


TÉCNICA ASR PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES *IN SITU* EM POÇOS DE PETRÓLEO

Rosane Chagas Bonelli

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.


Aprovada por:




Profª. Anja Laura Lopes da Silva Nunes, Ph.D.



Prof. Paulo César de Almeida Maia, D.Sc.



Prof. Sérgio Augusto Barreto da Fontoura, Ph.D.



Prof. Paulo Eduardo Lima de Santa Maria, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MARÇO DE 2006

BONELLI, ROSANE CHAGAS

Técnica ASR para Medição de
Tensões *In situ* em Poços de Petróleo
[Rio de Janeiro] 2006

XXVII, 190p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia Civil, 2006)

Dissertação – Universidade Federal
do Rio de Janeiro, COPPE

1. Tensões *in situ*
2. ASR
3. Modelos de interpretação
4. Petróleo
5. Viscoelasticidade
6. Análise de sensibilidade

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Testemunho

“Quando pensava estar no fundo do poço,
Realmente lá me encontrei.
Por lá permaneci entre colapsos e desmoronamentos,
Numa busca incessante de estabilidade.
Apenas hoje, arrancado de lá, numa viagem a superfície
Pude encontrar o relaxamento, e ainda assim eu era controlado.
Mas quando eu estava no fundo do poço, não estava só.
Os fluidos dentro de mim pulsavam com alta pressão como se fossem me romper,
Mas de certa forma preenchiam os vazios dos meus poros.
Ninguém pode imaginar o estado de tensões em que lá me encontrava,
Nem tampouco após meu relaxamento.
Hoje eu sou o testemunho do que é estar no fundo do poço, e me orgulho disso.
Pois somente através de um testemunho verdadeiramente profundo,
Buscando condições de realidade,
Pode-se tentar compreender e sentir o real alívio de uma recuperação.”

Rosane Chagas Bonelli – 08/07/2005

Aos meus pais, Glória e Ronald e a minha irmã Cláudia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, que foi minha fortaleza nos momentos mais difíceis de toda minha vida, mas em especial no decorrer desta dissertação.

À minha orientadora Anna Laura, pela extrema confiança e parceria em todos os momentos, sempre com uma palavra de apoio e estímulo pois, quando eu mesma não acreditei, ela acreditava com uma força sem a qual não estaria aqui.

À toda minha família. Ao meu Pai, este não tenho nem como agradecer, pois ele baseia seu amor em gestos concretos e palavras me faltariam para quantificar meu amor e gratidão pela plena doação para mim nestes anos. À minha mãe, que tanto rezou e por ter agüentado muitas ausências e por ela estar viva hoje ao meu lado, que tornou-se uma grande vitória em paralelo a este trabalho. À minha irmã Cláudia, e madrinha, grande motivadora diante das adversidades, não tenho como agradecer toda sua boa vontade e carinho comigo. À minha Vó Maria que faleceu durante esta dissertação, era uma pessoa exemplar com 94 anos que me apoiava nesta dissertação e continuou me apoiando lá de cima. Ao Zorro e Zulu e à Didi, minha mãezinha de criação, meus irmãos, Sérgio e Mauro, sobrinhos e primas, Valéria, Márcia e Denise.

Aos amigos da COPPE, alunos, professores, funcionários de todo o laboratório de Geotecnia, pela atenção, carinho e respeito. Não poderei citar todos mas, alguns amigos sempre presentes Marcelinho, Leonardo, Mariluce, Marcos, Rodrigo, Roberta, Alexander, Anderson, Tozzato, Carlinhos, Serginho, Bororó, Eduardo, Seu Bezerra, André Salviano, dentre vários outros não citados, porém não menos importantes para mim neste trabalho. Ao professor Paulo Santa Maria, pelos ensinamentos e apoio.

Aos meus amigos da Engenharia de Petróleo da PUC, que me acompanharam durante esta dissertação na pós-graduação, sempre me estimulando, Flávio Vianna, Fernanda Almeida, Aloísio, Sérgio Pimenta, em especial ao meu eterno amigo Rodrigo Chafic, que não só me apoiou na dissertação como foi presente durante todas as barreiras. Aos professores da PUC, Professor Jorge Pizarro, um grande exemplo de ser humano, simplicidade e humildade, tornando-se um grande amigo. Ao Professor Iberê Alves, pelas ajudas com as fantásticas planilhas de excel e por sempre acreditar em mim. Ao coordenador do curso Sérgio Fontoura, por me permitir cursar a Engenharia de Petróleo, confiar na minha entrada tardia e permitir que obtivesse conhecimentos sem os quais não poderia debater nesta dissertação.

Aos amigos da Engenharia Civil da UFRJ, especialmente George Neder, Patrícia Montezuma, André Oliveira, Fernanda Mussi, Eunice Horácio e Marcelo Sardinha.

À Petrobrás pelo apoio técnico, em especial ao Engenheiro Mauro Bloch, por muitas conversas esclarecedoras, ao Engenheiro Francisco e ao Professor e Engenheiro Luiz Rocha pela amizade e credibilidade apoio nesta dissertação. Também agradeço a Engenheira Cecília Azuega pelo apoio com o programa e boa vontade.

À empresa de petróleo Halliburton, pelo apoio técnico, em especial ao provedor dos dados e de tudo que foi disposto Mr. Tom Lantz (Montana), o qual não pude conhecer pessoalmente mas que foi o grande colaborador para esta dissertação e ao engenheiro e amigo, João Luiz Vieira.

Agradeço à Mary Blueme e JulieLeFever por me ceder informações para este trabalho. A minha amiga Nádia Lima, designer de programação visual pela ajuda técnica e pela amizade de 15 anos.

Aos amigos do curso de tubulações, em especial Diego Balbi, Vagner, Nelson Tobias e meu grande amigo Luiz Cláudio. Embarcados ou não, sempre presentes.

Aos amigos, Alex do Fundo, que teve especial atenção comigo durante o decorrer da dissertação e Guilherme Lucas, pela grande força. Agradeço ao Jorge Barrilo pela imensa atenção comigo, compreensão e apoio na finalização do trabalho.

Ao meu professor de Inglês e amigo Ivan Maia, à minha professora de canto Sônia Jopert e a psiquiatra da minha mãe Rosane Esquenazi.

Às crianças(Keyte), mães(Lucina) e voluntárias(Fernanda) da Casa Ronald Mc Donald, que entenderam minhas ausências e pelas lições, o que me fortaleceu muito.

Ao meu psiquiatra Marcos Gebara, que depois do meu seqüestro, me prometeu que este dia iria chegar e que apenas era necessário lutar, acreditar sem pensar muito. É isso, valeu a pena arriscar e superar. À todos que fizeram parte direta ou indireta da minha vida, que hoje eu voltei a amar pela força e sorriso de cada um não deixando jamais que eu ficasse no fundo do poço, embora tanto quisesse conhecer pelo objetivo da minha dissertação, tantas tensões, hoje sei que continua sendo difícil e só através de muita “determinação” e coragem é possível ter um parecer confiável.

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

TÉCNICA ASR PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES *IN SITU* EM POÇOS DE PETRÓLEO

Rosane Chagas Bonelli

Março/2006

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho visa estudar a aplicação da técnica ASR para a determinação das tensões *in situ* na indústria do petróleo. É apresentada uma revisão das técnicas de medição de tensão *in situ*, com ênfase na técnica ASR (*Anelastic Strain Recovery*) cujo estado da arte é descrito. São revisados e criticados os modelos de interpretação de tensão *in situ* da técnica ASR, objetivando calcular a magnitude das tensões *in situ* principais, através das deformações recuperadas obtidas do ensaio. Dois modelos foram selecionados para a análise das tensões *in situ* e correspondentes análises paramétrica e de sensibilidade: BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983), os quais foram utilizados em dois casos: calcário ROLLINS (dados da literatura) e arenito BAKKEN (dados fornecidos pela empresa de petróleo Halliburton). Uma análise de sensibilidade foi realizada através do coeficiente de Poisson, deformações recuperadas, deformações principais, tensão vertical (sobrecarga) e poropressão. Esta análise indicou a intensidade de propagação dos erros para as deformações principais, e para as tensões horizontais principais *in situ*, sugerindo o nível de robustez dos modelos estudados, além da relevância dos parâmetros envolvidos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ASR TECHNIQUE FOR MEASUREMENT OF *IN SITU* STRESSES IN PETROLEUM WELLS

Rosane Chagas Bonelli

March/2006

Advisors: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Department: Civil Engineering

The current work aims to study the application of ASR (anelastic strain recovery) technique for *in situ* stress determination in the petroleum industry. A brief review of the techniques of *in situ* stress measurement is presented, with emphasis on the ASR technique, whose state of art is described. Interpretation models of *in situ* stress of the referred technique are reviewed and commented, in order to calculate the magnitude of principal *in situ* stresses, by means of recovered deformations. Two models were chosen for the analysis of *in situ* stresses and correspondent sensitivity and parametric analysis : BLANTON (1983) and BLANTON e TEUFEL (1983), which were applied in two cases: ROLLINS sandstone (literature's data) and BAKKEN dolomite (data from the Halliburton Petroleum Industry). A sensitivity analysis was performed through Poisson ratio, recovered deformations, principal deformations, vertical stress (overburden) and porepressure. Such analysis indicated the intensity of error propagation for the principal deformations and the principal *in situ* horizontal stress, suggesting a level of robustness of the studied models, besides the relevance of the involved parameters.

ÍNDICE

1	CAPÍTULO 1.....	1
	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Importância da Pesquisa.....	1
1.2	Motivação para Pesquisa.....	2
1.3	Objetivos da Dissertação.....	2
1.4	Estrutura da Dissertação.....	3
2	CAPÍTULO 2.....	5
	TENSÕES <i>IN SITU</i> E TÉCNICAS PARA SUA DETERMINAÇÃO.....	5
2.1	Estado de Tensões <i>In Situ</i> dos Maciços Rochosos.....	5
2.2	Importância da Definição das Tensões <i>in situ</i> para a Indústria do Petróleo.....	7
2.2.1	Estabilidade de Poços Durante a Perfuração.....	7
2.2.2	Estimulação de Poços por Fraturamento Hidráulico.....	11
2.2.3	Estimativa de Reservas e Ganho na Produção de Óleo.....	11
2.2.4	Redução da Produção de Areia.....	12
2.2.5	Otimização de Malha de Drenagem com Injeção de Água.....	15
2.3	Técnicas de Determinação das Tensões <i>in situ</i>	19
2.4	Técnica ASR – <i>Anelastic Strain Recovery</i>	24
2.4.1	Histórico.....	24
2.4.2	Hipóteses e Fundamentos da Técnica.....	25
2.4.3	Ensaio ASR.....	30
2.4.4	Interpretação do Ensaio.....	31
2.4.5	Influência da Testemunhagem.....	34
2.4.6	Vantagens e Desvantagens da Técnica ASR.....	37
3	CAPÍTULO 3.....	40
	MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES <i>IN SITU</i> ATRAVÉS DA TÉCNICA ASR.....	40
3.1	Teoria da Viscoelasticidade Linear e da Poroelasticidade.....	41
3.2	Modelo de BLANTON (1983).....	44
3.2.1	Modelo de BLANTON Isotrópico (1983).....	47
3.2.2	Modelo de BLANTON Transversalmente Isotrópico (1983).....	52
3.2.3	Modelo de BLANTON (1983) Modificado por FJÆR (1992).....	55
3.3	Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).....	59
3.3.1	Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) Isotrópico.....	59
3.3.2	Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) Transversalmente Isotrópico.....	60
3.4	Outros Modelos.....	61
3.4.1	Modelo de BLANTON (1986).....	61
3.4.2	Modelos de WARPINSKI e TEUFEL (1989) e BLANTON (1989).....	69
3.4.2.1	Modelo de WARPINSKI e TEUFEL (1989).....	69
3.4.2.2	Modelo de BLANTON (1989).....	77
3.4.2.3	Análise Comparativa Entre os Modelos.....	80
3.4.3	Modelo de MATSUKI e TAKEUCHI (1990).....	82
3.4.4	Modelo de BRERETRON <i>et al.</i> (1995).....	88
3.4.5	Modelo de BLOCH (1999).....	91
3.5	Considerações Finais.....	97

4	CAPÍTULO 4.....	101
	MATERIAL E METODOLOGIA.....	101
4.1	Arenito ROLLINS.....	101
4.2	Calcário BAKKEN.....	105
4.2.1	Amostra BAKKEN 1.....	107
4.2.2	Amostra BAKKEN 2.....	110
4.2.3	Importância da Orientação das Deformações Principais das amostras do BAKKEN.....	111
4.3	Metodologia Adotada.....	119
5	CAPÍTULO 5.....	124
	RESULTADOS E ANÁLISES.....	124
5.1	Determinação das Deformações e Tensões Principais <i>in situ</i>	125
5.2	Análise de Sensibilidade para os Modelos.....	131
5.2.1	Influência do Coeficiente de Poisson.....	132
5.2.2	Influência das Componentes de Deformação Recuperada.....	134
5.2.3	Influência da Deformações Principais.....	143
5.2.4	Influência da Tensão de Sobrecarga.....	155
5.2.5	Influência da Poropressão.....	158
5.3	Comentários a respeito da Análise de Sensibilidade.....	159
6	CAPÍTULO 6.....	163
	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	163
6.1	Conclusões.....	163
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	165
	BIBLIOGRAFIA.....	166

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Tensões em maciços rochosos (adaptado de NUNES, 2000).....	7
Figura 2.2. Típicas ocorrências de instabilidade de poços durante a perfuração (adaptado de CSIRO, 2005).....	8
Figura 2.3. Análise típica de estabilidade de poço (adaptado de ADDIS, 2005).....	10
Figura 2.4. Canhoneio convencional (adaptado de THOMAS, 2001).	12
Figura 2.5. Base do critério de ruptura de Mohr-Coulomb (adaptado de ADDIS, 2005)... ..	14
Figura 2.6. Ruptura do poço por cisalhamento (adaptado de ADDIS, 2005).	14
Figura 2.7. Ruptura do poço por tração (adaptado de ADDIS, 2005).	14
Figura 2.8. Alocação de poço injetor e produtor em reservatório de óleo.	15
Figura 2.9. Poço horizontal e fraturas do maciço (LATIF, 2005).	17
Figura 2.10. Alocação de poços ignorando o padrão de fraturas do reservatório (LATIF, 2005).....	18
Figura 2.11. Alocação de poços considerando o padrão de fraturas do reservatório (LATIF, 2005).....	18
Figura 2.12. Variação da deformação durante a testemunhagem e o ensaio ASR (BLOCH, 1999).	28
Figura 2.13. Rocha com microfraturas submetida a tensões compressivas não uniformes (LATIF, 2005).	29
Figura 2.14. Testemunho removido da formação após descarregamento (LATIF, 2005). ..	30
Figura 2.15. Sistema completo de teste ASR (TERRATEK, 1995).	31
Figura 2.16. Direções das deformações do testemunho de um poço vertical (BLOCH, 1999).	31
Figura 2.17. Orientação típica para a medição das deformações do testemunho de um poço inclinado (BLOCH, 1999).	32
Figura 2.18. Sensores de deslocamento no ASR - 3D (TERRATEK, 1995).	32
Figura 2.19. Amostra de rocha selada e instrumentada com os Sensores de Deslocamento no Equipamento ASR (BLOCH, 2004).....	35
Figura 3.1. Fluxograma de cálculo do Modelo de BLANTON (1983) –Isotrópico.....	51
Figura 3.2. Fluxograma de cálculo do Modelo de BLANTON (1983) –Transversalmente Isotrópico.....	55
Figura 3.3. Direções das deformações medidas no ensaio ASR (FJÆR, 1992).....	56
Figura 3.4. Fluxograma de cálculo do Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) - Isotrópico.	60
Figura 3.5. Fluxograma de cálculo do Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) - Transversalmente Isotrópico.....	61
Figura 3.6. Histórico esquemático de descarregamento de um testemunho recuperado do poço (Terratek, 1995).....	64
Figura 3.7. Fluxograma de cálculo do modelo de BLANTON (1986).	68
Figura 3.8. Fluxograma de cálculo do modelo de WARPINSKI e TEUFEL (1989).	76
Figura 3.9. Fluxograma de cálculo do modelo de BLANTON (1989)..	80
Figura 3.10. Fluxograma de aplicação do modelo MATSUKI e TAKEUCHI (1990).	87
Figura 3.11. Fluxograma do cálculo do modelo de MATSUKI e TAKEUCHI (1990).	87
Figura 3.12. Fluxograma de cálculo do modelo de BRERETRON <i>et al.</i> (1995).	90
Figura 3.13. Variação da tensão total e da poropressão na superfície externa da amostra durante a testemunhagem.	91
Figura 3.14. Campo de tensões ao redor de um testemunho (BLOCH,1999).	95
Figura 3.15. Fluxograma de cálculo do Modelo de BLOCH (1999).	96

Figura 4.1. Deformações recuperadas no ensaio ASR da amostra ROLLINS - C-Temp (adaptado de WARPINSKI e TEUFEL, 1989).....	103
Figura 4.2. Deformações principais da amostra ROLLINS C-Temp (adaptado de WARPINSKI e TEUFEL, 1989).....	103
Figura 4.3. Deformações recuperadas da amostra ROLLINS com extrapolação para o tempo inicial - C-Temp	104
Figura 4.4. Deformações principais da amostra ROLLINS com extrapolação para o tempo inicial - C-Temp.....	105
Figura 4.5. Deformações recuperadas (C-Temp) - BAKKEN 1.....	108
Figura 4.6. Deformações principais (C-Temp) - BAKKEN 1.....	108
Figura 4.7. Direção da deformação principal ε_{11} - BAKKEN 1.....	109
Figura 4.8. Direção da deformação principal ε_{22} - BAKKEN 1.....	109
Figura 4.9. Direção da deformação principal ε_{33} - BAKKEN 1.....	110
Figura 4.10. Deformações recuperadas (C-Temp) - BAKKEN 2.....	111
Figura 4.11. Deformações principais (C-Temp) - BAKKEN 2.....	112
Figura 4.12. Direção da deformação principal ε_{11} - BAKKEN 2.....	112
Figura 4.13. Direção da deformação principal ε_{22} - BAKKEN 2.....	113
Figura 4.14. Direção da deformação principal ε_{33} - BAKKEN 2.....	113
Figura 4.15. Seção vertical do poço BTS 36-2H.....	115
Figura 4.16. Local do testemunho retirado do poço BTS 36-2H.....	115
Figura 4.17. Vista 3D do poço BTS-36-2H.....	116
Figura 4.18. Imagem do local testemunhado do poço BTS-36-2H (LANTZ, 2005c).....	118
Figura 4.19. Representação da imagem da superfície da parede do poço em uma superfície plana (de um poço vertical)	119
Figura 4.20. Fluxograma de cálculo de tensões horizontais principais <i>in situ</i>	120
Figura 5.1. Curvas de deformação volumétrica x tempo das amostras ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2 (C-Temp).....	126
Figura 5.2. Curvas tensão <i>versus</i> tempo das amostras ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2 (C-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).....	126
Figura 5.3. Curvas tensão <i>in situ</i> x tempo das amostras ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2 (C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).....	127
Figura 5.4. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação de coeficiente de Poisson, ν	132
Figura 5.5. Variação das tensões principais em relação à variação de ν (C-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).....	133
Figura 5.6. Variação das tensões principais em relação à variação de ν (C-Temp)– Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).....	134
Figura 5.7. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação da deformação recuperada ε_{xx}	135
Figura 5.8. Variação das tensões principais em relação à variação de ε_{xx} (C-Temp) – Modelo de BLANTON (1983)	137
Figura 5.9. Variação das tensões principais em relação à variação de ε_{xx} (C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).....	137
Figura 5.10. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação da deformação recuperada ε_{yy}	138

Figura 5.11. Variação das tensões principais em relação à variação de ε_{yy} (C-Temp) – Modelo de BLANTON(1983).....	140
Figura 5.12. Variação das tensões principais em relação à variação de ε_{yy} (C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).....	139
Figura 5.13. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação da deformação recuperada ε_{zz}	140
Figura 5.14. Variação das tensões principais em relação à variação de ε_{zz} (C-Temp)– Modelo de BLANTON (1983).....	141
Figura 5.15. Variação das tensões principais em relação à variação de ε_{zz} (C-Temp)– Modelo de BLANTON e TEUFEL(1983).	141
Figura 5.16. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação da deformação principal ε_{11}	143
Figura 5.17. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{11} (ensaio ASR-C-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).....	145
Figura 5.18. Variação das tensões horizontais em relação a variação de ε_{11} (equação característica-S-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).	146
Figura 5.19. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{11} (ensaio ASR-C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).....	146
Figura 5.20. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{11} (equação característica - S-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).....	147
Figura 5.21. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação da deformação principal ε_{22}	147
Figura 5.22. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{22} (ensaio ASR-C-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).....	148
Figura 5.23. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{22} (equação característica - S-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).	149
Figura 5.24. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{22} (ensaio ASR-C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).....	150
Figura 5.25. Variação das Tensões Horizontais em relação a variação de ε_{22} (equação característica-S-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).....	151
Figura 5.26. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação da deformação principal ε_{33}	152
Figura 5.27. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{33} (ensaio ASR-C-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).....	153
Figura 5.28. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{33} (equação característica - S-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).	154
Figura 5.29. Variação das tensões horizontais em relação a variação de ε_{33} (ensaio ASR-C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).....	154
Figura 5.30. Variação das tensões horizontais em relação a variação de ε_{33} (equação característica - S-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).....	155
Figura 5.31. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação de da tensão de sobrecarga, σ_v	156

Figura 5.32. Variação das tensões principais em relação à variação de σ_v (C-Temp)– Modelo de BLANTON (1983).	157
Figura 5.33. Variação das tensões principais em relação à variação σ_v (C-Temp)– Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).	157
Figura 5.34. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação da poropressão P_p	158
Figura 5.35. Variação das tensões principais em relação à variação de P_p (C-Temp)– Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).	159

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação de HILL <i>et al.</i> (1994).....	20
Tabela 2.2. Classificação de NUNES (1997).....	21
Tabela 2.3. Classificação de LJUNGGREN <i>et al.</i> (2003).	22
Tabela 2.4. Características das técnicas de determinação de tensões <i>in situ</i> (adaptado de LJUNGGREN <i>et al.</i> , 2003).	23
Tabela 3.1. Comparação dos inputs dos modelos de determinação de tensões <i>in situ</i>	100
Tabela 4.1. Características do arenito ROLLINS (BLANTON, 1986).	102
Tabela 4.2. Tensões <i>in situ</i> obtidas dos ensaios ASR e de fraturamento hidráulico (BLANTON, 1986).	102
Tabela 4.3. Características das curvas de deformação recuperadas e principais do ROLLINS-C-Temp.....	106
Tabela 4.4. Porosidade e permeabilidade do testemunho do poço BTS 36-2H (LANTZ, 2005a).	106
Tabela 4.5. Características da amostra BAKKEN 1.	107
Tabela 4.6. Características da amostra BAKKEN 2.	110
Tabela 4.7. Comportamento das curvas de deformação recuperadas e principais do BAKKEN.....	114
Tabela 4.8. Magnitudes e direções das deformações principais da amostra BAKKEN 1 (adaptado de LANTZ 2005a).	117
Tabela 4.9. Magnitudes e direções das deformações principais da amostra BAKKEN 2 (adaptado de LANTZ 2005a).	117
Tabela 4.10. Melhor estimativa das direções das deformações principais para amostras BAKKEN 1 e BAKKEN 2 (adaptado de LANTZ 2005a).	117
Tabela 4.11. Parâmetros escolhidos para a análise de sensibilidade dos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983).....	120
Tabela 4.12. Valores das componentes de deformações recuperadas no ensaio ASR (C-Temp).....	121
Tabela 4.13. Deformações principais obtidas do ensaio ASR (C-Temp) e equação característica (S-Temp).....	122
Tabela 4.14. Deformações principais e recuperadas obtidas do ensaio ASR (C-Temp).	123
Tabela 5.1. Magnitude das deformações e tensões principais da amostra ROLLINS. ...	128
Tabela 5.2. Magnitude das deformações e tensões principais da amostra BAKKEN 1.	128
Tabela 5.3. Magnitude das deformações e tensões principais da amostra BAKKEN 2.	129
Tabela 5.4. Magnitudes das tensões principais totais (C-Temp).....	130
Tabela 5.5. Magnitudes das tensões principais efetivas (C-Temp).....	130
Tabela 5.6. Magnitudes das tensões horizontais principais totais.....	131
Tabela 5.7. Resumo das análises de sensibilidade. *	160

LISTA DE SÍMBOLOS OU NOMENCLATURA:

A : Variável de correlação com a fluência (BLANTON, 1983);(BLANTON e TEUFEL, 1983);

A_1 : O mesmo que A , exceto pela presença de $D_1(t)$ (BLANTON,1983);

A_2 : O mesmo que A , exceto pela presença de $D_2(t)$ (BLANTON,1983);

a : Coeficiente de compliância com a fluência (BLANTON, 1983);(BLANTON e TEUFEL, 1983);

a : Constante (BLANTON, 1986);

b : Constante (BLANTON, 1986);

C_b : Compressibilidade volumétrica (BLANTON, 1986);

C_b : Inverso do Módulo de Cisalhamento G (WARPINSKI e TEUFEL, 1989);

$C_b(t)$: Compliâncias viscoelásticas independentes (função de $1/K$) (WARPINSKI e TEUFEL, 1989);

$C_E(t)$: Compliância dependente do tempo (BLANTON, 1983 modificado por FJÆR, 1992);

$C_G(t)$: Compliâncias viscoelásticas independentes (função de $1/G$) (WARPINSKI e TEUFEL, 1989);

C_K : Inverso do Módulo Volumétrico K (WARPINSKI e TEUFEL, 1989);

C_g : Compressibilidade do grão sólido (BLANTON, 1986);

$C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{33}$: Componentes da matriz tensão-deformação (BLANTON, 1983);

c : Constante arbitrada (BLANTON, 1983);

$c(t)$: Coeficiente de Poisson como medido num teste de fluência uniaxial (BLANTON, 1983);

D : Dimensões e unidades de compliância (compliance)(1/psi); da mesma ordem da concordância elástica, i.e., $1/E$, sendo o recíproco do módulo de Young determinado em uma taxa de carregamento baixa (Coeficiente de concordância com a fluência - BLANTON, 1986);

D_n : Constante de fluência adimensional e menor que 1, determinada através de dados experimentais (BLANTON, 1986);

D, D_n, n : Parâmetros de fluência para a rocha analisada (BLANTON, 1986);

$D(t)$: Coeficiente de compliância com a fluência (BLANTON, 1983);

$D_1(t), D_2(t)$: Compliância transversalmente isotrópica com a fluência (BLANTON, 1983);
 E : Módulo de Young;
 $E(t)$: Módulo de relaxação (BLANTON, 1983);
 E_1 : Módulo elástico na direção horizontal (BLANTON, 1983);
 E_1 : Módulo elástico na direção horizontal (BLANTON e TEUFEL, 1983);
 E_2 : Módulo elástico na direção vertical (BLANTON, 1983);
 E_2 : Módulo elástico na direção vertical (BLANTON e TEUFEL, 1983);
 $Erro$: Diferença absoluta entre a deformação medida pelo modelo e pelo ASR (BLOCH, 1999);
 e : Termo exponencial;
 $e(t)$: Dilatação (BLANTON, 1989);
 $e_i(t)$: Deformação desvio anelástica principal (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 $e_{ij}(t)$: Deformações anelástica desvio (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 e_m : Deformação normal anelástica média (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 $e_m(t)$: Deformação normal anelástica média após o alívio de tensões (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 $e_v(t)$: Deformação desvio recuperada vertical (BLANTON, 1989);
 $e_v(0)$: Deformação recuperada vertical, $t=0$ (BLANTON, 1989);
 $e_v(\infty)$: Deformação recuperada vertical, $t=\infty$ (BLANTON, 1989);
 $e_x, e_y, e_z, e_{xy}, e_{yz}, e_{zx}$: Deformações anelásticas desvio (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 $e_0(t)$: Deformação desvio recuperada radial, $r=0$ (BLANTON, 1989);
 $e_0(0)$: Deformação recuperada radial, $r=0, t=0$ (BLANTON, 1989);
 $e_0(\infty)$: Deformação recuperada radial, $r=0, t=\infty$ (BLANTON, 1989);
 $e_{45}(t)$: Deformação desvio recuperada radial, $r=45$ (BLANTON, 1989);
 $e_{45}(0)$: Deformação recuperada radial, $r=45, t=0$ (BLANTON, 1989);
 $e_{45}(\infty)$: Deformação recuperada radial, $r=45, t=\infty$ (BLANTON, 1989);
 $e_{90}(t)$: Deformação desvio recuperada radial, $r=90$ (BLANTON, 1989);
 $e_{90}(0)$: Deformação recuperada radial, $r=90, t=0$ (BLANTON, 1989);

$e_{90}(\infty)$: Deformação recuperada radial, $r=90$, $t=\infty$ (BLANTON, 1989);
 $f(t)$: Função arbitrária das medições recuperadas (BLANTON, 1983);
 G : Módulo de Cisalhamento (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a);
 $H(t)$: Função degrau unitário do histórico de tensões (BLANTON, 1983);
 $H(t)$: Função Unitária Heavisidade (BLANTON, 1986);
 H_1 : Dilatação Volumétrica (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a);
 H_2 : Distorção volumétrica (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a);
 J_{as} : Deformações anelásticas recuperadas no modo de cisalhamento (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 $J_{as}(t)$: Deformações anelásticas recuperadas no modo de cisalhamento em um dado instante de tempo t (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 J_{av} : Deformações anelásticas recuperadas no modo volumétrico (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 $J_{av}(t)$: Deformações anelásticas recuperadas no modo volumétrico em um dado instante de tempo t (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 J_s : Compliância com a fluência de cisalhamento de $(t_o - \tau_o)$ a $(t_f - \tau_o)$ (BLANTON, 1989);
 J_1 : Coeficiente de compliância com a fluência distorcional (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a);
 J_1 : Coeficiente de compliância com a fluência distorcional (BRERETRON et. al, 1995);
 J_1 : Invariante de tensão;
 J_2 : Coeficiente de compliância com a fluência dilatacional (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a);
 J_2 : Coeficiente de compliância com a fluência dilatacional (BRERETRON et al., 1995);
 J_2 : Segundo invariante de tensão;
 J_3 : Terceiro invariante de tensão;
 K : Módulo volumétrico (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a); (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990); (BLOCH, 1999);
 K_g : Módulo volumétrico (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a);
 K_s : Módulo volumétrico para o material da matriz (BLANTON, 1989); (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a); (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 K_s : Módulo volumétrico de grãos (BLOCH, 1999);

K_u : Módulo volumétrico não-drenado (BLOCH, 1999);
 l, m, n : Cossenos diretores (MATSUKI E TAKEUCHI, 1990);
 n : Dimensão e unidades de tempo (horas); geralmente varia entre 0 e 200, ou mais (BLANTON, 1986);
 P : Poropressão;
 P_0 : Carregamento hidrostático (BLOCH, 1999);
 p : Poropressão (BLANTON, 1986); (BLOCH, 1999);
 p_{df} : Pressão do fluido de perfuração no instante da perfuração para perfuração sobre-balanceada (o); balanceada (b); e sub-balanceada (u) (BLOCH, 1999);
 p_o : Poropressão (MATSUKI E TAKEUCHI, 1990);
 p_p : Poropressão (BLANTON, 1983); (BLANTON e TEUFEL, 1983); (BLANTON, 1986); (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a); (BLANTON, 1989);
 P_p : Poropressão (BRERETRON et al., 1995);
 p_{res} : Pressão estática no reservatório (BLOCH, 1999);
 $p(t)$: Histórico de poropressão (BLANTON, 1986);
 p' : Pressão do reservatório (BLANTON, 1986);
 $p'(t)$: Pressão do reservatório em um tempo t (BLANTON, 1986);
 Q : Parâmetro usado no cálculo de $\bar{\Delta}e_1$ e $\bar{\Delta}e_2$ (BLANTON, 1989);
 S_H : Tensão horizontal máxima;
 S_h : Tensão horizontal mínima;
 S_{ij} : Constantes de tensão desvio (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 S_{ijkl} : Matriz de compliância elástica (BLANTON, 1983); (BLANTON, 1986);
 $S_{ijkl}(t)$: Tensor de compliância com a fluência (BLANTON, 1983);
 S_0 : Carregamento desviador (BLOCH, 1999);
 S_V : Tensão vertical;
 s_x, s_y, s_z : Tensões desvio (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 t : Tempo;
 t : Tempo de aplicação das tensões (BLANTON, 1983);
 t_f : Tempo da última medição de deformação (BLANTON, 1989);
 t_o : Tempo em que a amostra é testemunhada (BLANTON, 1986);

t_o : Tempo inicial da medição das deformações recuperadas (BLANTON, 1989);
 t_1 : Início do teste ASR, em que a primeira medição de deformação é feita (BLANTON, 1983);
 t_1 : Preparação para o teste com o ASR;
 t_1 : Tempo de instrumentação da amostra (BLANTON e TEUFEL, 1983);
 t_1 : Tempo em que a primeira medição de deformação é feita (BLANTON, 1986);
 t_1 : Constante de tempo de fluência desviatória (BRERETRON et al., 1995);
 t_2 : Fim do teste ASR;
 t_2 : Tempo em que é feita a última medição de deformação (BLANTON, 1983);
 t_2 : Tempo em que é feita a última medição de deformação (BLANTON e TEUFEL, 1983);
 t_2 : Tempo em que é feita a última medição de deformação (BLANTON, 1986);
 t_2 : Constante de tempo de fluência dilatacional (BRERETRON et al., 1995);
 t^* : Tempo de recuperação (BLOCH, 1999);
 V_m : Parâmetro para o cálculo de $\Delta\varepsilon_{ij}$ (BLANTON, 1986);
 V_o : Parâmetro para o cálculo de $\Delta\varepsilon_{ij}$ (BLANTON, 1986);
 $V(t - \tau)$: Função viscoelástica dependente do tempo (BLANTON, 1983);
 $V(t - \tau)$: Função viscoelástica dependente do tempo (BLANTON, 1986);
 x_i : Parâmetros de solução de ajuste, $i = 1...11$ (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a);
 x_i : Parâmetros de solução de ajuste, $i = 1...11$ (BLANTON, 1989);
 z : Profundidade medida desde a superfície;
 α : Coeficiente de BIOT (BLANTON, 1983); (BLANTON e TEUFEL, 1983);
 α : Coeficiente de poropressão (BLANTON, 1986);
 α : Constante poroelástica (BLANTON, 1989); (WARPINSKI e TEUFEL, 1989b);
 α_T : Coeficiente de expansão linear termal (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a);
 α_T : Coeficiente de expansão linear termal (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 β : Parâmetro poroelástico de BIOT (BLANTON, 1986);
 β_{ij} : Termos de coeficientes de poropressão (BLANTON, 1986);
 β_∞ : Nível final de deformação (BRERETRON et al., 1995);
 $\beta(t)$: Deformação em um tempo t relacionada à poropressão (BRERETRON et al., 1995);

$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$: Deformações cisalhantes;

$\bar{\Delta}e_r$: Deformação recuperada radial desviatória de zero até infinito
 $= e_r(\infty) - e_r(0), r = 0,45,90$ (BLANTON, 1989);

$\bar{\Delta}e_v$: Deformação recuperada vertical desviatória de zero a infinito $= e_v(\infty) - e_v(0)$
(BLANTON, 1989);

$\bar{\Delta}e_1$: Máximo $\bar{\Delta}e_r, r = 0,45,90$, (BLANTON, 1989);

$\bar{\Delta}e_2$: Mínimo $\bar{\Delta}e_r, r = 0,45,90$, (BLANTON, 1989);

ΔT : Variação de temperatura (WARPINSKI e TEUFEL, 1989);

ΔT : Variação de temperatura (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);

$\Delta T(t)$: Variação de temperatura em um tempo t (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);

Δt : Intervalo de tempo desde que o testemunho é retirado de dentro do poço até a última medição de deformação (BLANTON, 1986);

$\Delta\varepsilon_{Hmáx}$: Variação da deformação horizontal máxima (BLANTON e TEUFEL, 1983);

$\Delta\varepsilon_{Hmín}$: Variação da deformação horizontal mínima (BLANTON e TEUFEL, 1983);

$\Delta\varepsilon_i$: Deformações diferenciais nas direções das deformações principais no intervalo de tempo $(t_1 - t_2)$;

$\Delta\varepsilon_{ij}$: Variações nas deformações principais;

$\Delta\varepsilon_{kk}$: Variações nas deformações volumétricas (BLANTON, 1986);

$\Delta\varepsilon(t)$: Deformações recuperadas em um tempo t (BLANTON, 1986);

$\Delta\varepsilon_x, \Delta\varepsilon_y, \Delta\varepsilon_z$: Recuperação das deformações principais diferenciais;

$\Delta\varepsilon_v$: Deformação recuperada vertical de t_1 a t_2 (BLANTON e TEUFEL, 1983);

$\Delta\varepsilon_v$: Deformação recuperada vertical de t_o a t_f (BLANTON, 1989);

$\Delta\varepsilon_{11}, \Delta\varepsilon_{22}, \Delta\varepsilon_{33}$: Recuperação das deformações principais diferenciais (BLANTON e TEUFEL, 1983);

$\Delta\varepsilon_{11}, \Delta\varepsilon_{22}, \Delta\varepsilon_{33}$: Principais deformações recuperadas (BLANTON, 1986);

$\Delta\varepsilon_1$: Deformação recuperada radial máxima de t_o a t_f (BLANTON, 1989);

$\Delta\varepsilon_2$: Deformação recuperada radial mínima de t_o a t_f (BLANTON, 1989);

$\bar{\Delta}\varepsilon_v$: Deformação recuperada vertical de zero a infinito (BLANTON, 1989);

$\bar{\Delta}\varepsilon_1$: Deformação recuperada radial máxima de zero a infinito (BLANTON, 1989);

$\overline{\Delta\varepsilon}_2$: Deformação recuperada radial mínima vertical de zero a infinito (BLANTON, 1989);

δ_{ij} : Delta de Kronecker (BLANTON, 1983);

δ_{ij} : Delta de Kronecker (BLANTON, 1986);

$\delta(\tau)$: Função de Delta Dirac (BLANTON, 1983);

ε : Deformação (BLANTON, 1983);

ε_{DD} : Deformação anelástica desviatória (BLOCH, 1999);

ε_H : Reação de deformação para função denominada degrau unitário do histórico de tensões $H(t)$ (BLANTON, 1983);

$\varepsilon_{Hmáx}$: Magnitude diferencial da deformação recuperada através da deformação horizontal principal maior (BLANTON e TEUFEL, 1983);

$\varepsilon_{Hmáx}$: Deformação horizontal;

$\varepsilon_{Hmín}$: Magnitude diferencial da deformação recuperada através da deformação horizontal principal menor (BLANTON e TEUFEL, 1983);

ε_{ij} : Tensor de deformações (BLANTON, 1983);

ε_{ij} : Tensor de deformações (BLANTON, 1986);

ε_{kk} : Deformação volumétrica (BLANTON, 1986);

ε_{PP} : Deformação anelástica hidrostática (BLOCH, 1999);

ε_V : Alívio de tensão elástica de um pedaço de rocha em profundidade (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a);

ε_x : Deformação medida na direção x (BLANTON, 1983);

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}$ e ε_{zx} : Deformações anelásticas recuperadas (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}$ e ε_{zx} : Deformações;

$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{aa}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{bb}, \varepsilon_{cc}$ e ε_{zz} : Deformações recuperadas diretamente no ensaio ASR;

ε_{xy} : Deformação usada no cálculo das deformações principais no plano horizontal (BLOCH, 1999);

ε_y : Deformação medida na direção y (BLANTON, 1983);

ε_{ww}^i : Deformação da rocha na direção ww e no instante de tempo i da medida;

ε_r : Deformação radial na direção que faz um ângulo θ com o relativo eixo x (BLANTON, 1983 Modificado por FJÆR, 1992);

$\varepsilon_r(t)$: Deformação anelástica na direção r em um tempo t (WARPINSKI e TEUFEL, 1989);

$\varepsilon_r(\theta)$: Deformação medida em direção paralela ao eixo x (0°) (BLANTON e TEUFEL, 1983);

$\varepsilon_r(\theta + 45)$: Deformação medida em direção que faz um ângulo de 45° com o eixo x (BLANTON e TEUFEL, 1983);

$\varepsilon_r(\theta + 90)$: Deformação medida em direção que faz um ângulo de 90° com o eixo x (BLANTON e TEUFEL, 1983);

ε_v : Deformação principal (Deformação vertical) (BLANTON e TEUFEL, 1983);

ε_v : Deformação volumétrica (BLANTON, 1986);

ε_v : Deformação vertical;

ε_∞ : Nível assintótico de deformação quando $t = \infty$ (BRERETRON et al., 1995);

ε_o : Deformação do testemunho recuperado do poço no instante da amostragem (BLANTON, 1986);

ε_1 : Deformação horizontal máxima (considerando ε_v a deformação principal máxima) (BLANTON, 1986);

ε_1 : Deformação principal maior (BLANTON e TEUFEL, 1983);

ε_2 : Deformação horizontal máxima (considerando ε_v a deformação principal máxima) (BLANTON, 1986);

ε_2 : Deformação principal (BLANTON e TEUFEL, 1983);

ε_2 : Deformação horizontal mínima;

$\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}$: Deformações principais no plano horizontal (BLOCH, 1999);

ε_{11} : Deformação principal maior;

ε_{22} : Deformação principal intermediária;

ε_{33} : Deformação principal menor;

$\varepsilon(t)$: Reação da deformação para uma contínua variação do histórico de tensões (BLANTON, 1983);

$\varepsilon(t)$: Deformação em um tempo t (BRERETRON et al., 1995);

$\varepsilon_a(t)$: Deformação anelástica recuperada trativa nas direções l , m e n (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);

$\varepsilon_{ij}(t)$: Componente de deformação no tempo t (BLANTON, 1983);

$\varepsilon_{ij}(t)$: Componente de deformação no tempo t (BLANTON e TEUFEL, 1983);

$\varepsilon_{ij}(t)$: Componente de deformação no tempo t (BLANTON, 1986);

$\varepsilon_r(t)$: Deformação em uma direção particular radial r no plano horizontal (BRERETRON et al., 1995);

ε_{r_modelo} : Deformação calculada através do modelo (BLOCH, 1999);

ε_{r_ASR} : Deformação medida através do ensaio ASR (BLOCH, 1999);

$\varepsilon_v(t)$: Deformação recuperada vertical (WARPINSKI e TEUFEL, 1989);

μ : Viscosidade (WARPINSKI e TEUFEL, 1989);

η : Constante de viscosidade / constante de amortecedor;

θ : Ângulo com o eixo x (BLANTON, 1983 Modificado por FJÆR, 1992);

θ : Direção em relação ao eixo x considerada para medição da deformação radial $\varepsilon_r(t)$ em um tempo t (WARPINSKI e TEUFEL, 1989);

θ : Ângulo do extensômetro com respeito a orientação da tensão máxima (BRERETRON et al., 1995);

θ : Direção do plano principal maior (BLOCH, 1999);

λ : Tempo de relaxação da poropressão (BRERETRON et al., 1995);

ν : Coeficiente isotrópico de Poisson da rocha; (BLANTON, 1983); (BLANTON e TEUFEL, 1983);

ν : Coeficiente de Poisson (BLANTON, 1986); (WARPINSKI e TEUFEL, 1989); (BLANTON, 1989);

ν : Coeficiente de Poisson da rocha (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);

ν_c : Coeficiente de Poisson no fluência (BLANTON, 1983);

$\nu_c(t)$: Coeficiente de Poisson no fluência em dado instante t (BLANTON, 1983);

ν_1, ν_2 : Coeficiente de Poisson da rocha com isotropia transversal (BLANTON, 1983); (BLANTON e TEUFEL, 1983);

ν_1 : Coeficiente de Poisson no plano horizontal (BLANTON e TEUFEL, 1983);

ν_2 : Coeficiente de Poisson no plano vertical (BLANTON e TEUFEL, 1983);

ρ : Densidade da rocha;

\sum'_{ij} : Componente de tensão total (BLANTON, 1986);

σ : Tensão total (BLANTON, 1983); (BLOCH, 1999);
 σ_a, σ_b : Diferentes histórias de tensões (BLANTON, 1983);
 σ_e : Tensão efetiva (WARPINSKI e TEUFEL, 1989);
 $\sigma_{HM\acute{a}x}$: Magnitude da tensão horizontal principal maior (BLANTON e TEUFEL, 1983);
 $\sigma_{HM\acute{i}n}$: Magnitude da tensão horizontal principal menor (BLANTON e TEUFEL, 1983);
 $\sigma_{hm\acute{i}n}$: Tensão horizontal mínima *in situ* (BLOCH, 1999);
 σ_i : Tensões totais (WARPINSKI e TEUFEL, 1989);
 σ'_i : Tensões efetivas (WARPINSKI e TEUFEL, 1989);
 σ'_{ij} : Histórico de tensão efetiva (BLANTON, 1983);
 σ'_{ij} : Componentes de tensão efetiva (BLANTON, 1986);
 $\sigma'_{ij}(t)$: Tensões nos testemunhos para qualquer tempo t (BLANTON, 1983);
(BLANTON, 1986);
 $\sigma_{kl}(\tau)$: Componente de tensão em qualquer tempo τ (BLANTON, 1986);
 σ'_{kl} : Histórico de tensão efetiva (BLANTON, 1983);
 σ_m : Tensão principal média (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 σ_{ov} : Tensão de sobrecarga;
 σ_x, σ_y e σ_z : Magnitudes de três tensões *in situ* principais (BLANTON, 1983);
 σ_x, σ_y e σ_z : Tensões compressivas tridimensionais genéricas (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 σ_x, σ_y e σ_z : Magnitudes de três tensões *in situ* principais (BRERETRON et al., 1995);
 σ_r : Tensão radial (BLOCH, 1999);
 σ_v : Tensão vertical total de sobrecarga (BLANTON, 1983);
 σ_v : Tensão total de sobrecarga através de carregamento gravitacional (BLANTON e TEUFEL, 1983);
 σ_v : Tensão vertical total de sobrecarga (BLANTON, 1989);
 σ_V : Tensão vertical total de sobrecarga (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a);
 σ_{ve} : Tensão de sobrecarga efetiva (BLANTON e TEUFEL, 1983);
 σ_z : Tensão vertical principal (BLANTON, 1983);

σ_1 : Tensão máxima horizontal (BLANTON, 1989); (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a);
 σ_1 : Tensão principal maior (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 σ_{11} : Tensão principal maior (BLANTON, 1983);
 $\sigma'_{11}, \sigma'_{22}, \sigma'_{33}$: Componentes principais de tensão efetiva (BLANTON, 1986);
 σ_2 : Tensão mínima horizontal (BLANTON, 1989);
 σ_2 : Tensão mínima horizontal (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a);
 σ_{22} : Tensão horizontal máxima (BLANTON, 1983);
 $\sigma_{22}(t)$: Tensão principal intermediária (BLANTON, 1983);
 σ_3 : Pressão de confinamento (BLANTON, 1986);
 σ_3 : Tensão vertical (BLANTON, 1989);
 σ_{33} : Tensão horizontal mínima (BLANTON, 1983);
 $\sigma_{33}(t)$: Tensão principal menor (BLANTON, 1983);
 τ : Tensão cisalhante;
 τ_{xy} : Tensão cisalhante atuante no plano xy (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 τ_{yz} : Tensão cisalhante atuante no plano yz (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 τ_{zx} : Tensão cisalhante atuante no plano zx (MATSUKI e TAKEUCHI, 1990);
 τ_o : Exato instante da testemunhagem;
 τ_o : Tempo de remoção das tensões (BLANTON, 1983);
 τ_o : Tempo zero em função do tempo de liberação do testemunho ou desligamento de seu meio circundante natural (BLANTON, 1986);
 τ_o : Instante em que a amostra é testemunhada (BLOCH, 1999);
 τ_0 : Tempo de relaxação para deformação anelástica (BRERETRON et al., 1995);
 τ_1 : Instante em que a amostra chega na superfície (técnica ASR);
 τ_1 : Instante de tempo em que o testemunho atinge a superfície (BLANTON, 1986);
 τ_1 : Instante em que a amostra chega na superfície (BLOCH, 1999);
 ϕ : Porosidade da rocha;
 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$: Parâmetros intermediários para cálculo das tensões principais (BLANTON, 1986).

SIGLAS

ASR - *Anelastic Strain Recovery* – Recuperação das deformações anelásticas

CSM - *Cerator Stress Meter*

C-Temp – Com correção de temperatura

CVA - *Circunferential Velocity Anisotropy*

Célula BDG - *Borehole Deformation Gage*

DM - *Direct Model* – Modelo Direto (Modelo de BLANTON, 1983)

DLS - *Dog Leg Section*

DSCA - *Differential Strain Curve Analysis*

DWVA - *Differential Wave Velocity Analysis*

EOR - *Enhanced Oil Recovery* – Recuperação de óleo

EUR - *Estimated Ultimate Recovery* (Melhor Recuperação Estimada)

HTPF - Teste Hidráulico em Fraturas Pré-existentes - *Hdraulic Tests on Preexisting Fractures*

LVDT's - *Linear Variable Displacement Transducer* – Transdutor de Deslocamento Linear Variável

MD - *Measured Depth* (Profundidade Medida)

MWD - *Measuring While Drilling*

PCV - Princípio da Correspondência Viscoelástica

PVC - Princípio Viscoelástico de Correspondência

PVE - *Poroelastic Model* (Modelo Poroviscoelástico)

SFJ - *Small Flat Jack*

SM - *Sandia Model* (Modelo de WARPINSKI e TEUFEL, 1989)

S-Temp – Sem correção de temperatura

TCP - *Tubing Conveying Perforator*

TVD - *True Vertical Depth* (Profundidade Vertical)

VCP - *Viscoelastic Correspondency Principle*

VS - *Vertical Section* - Seção vertical

1 CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Importância da Pesquisa

A determinação do campo de tensões *in situ* continua sendo um grande desafio para a engenharia de petróleo, em especial quando se refere a ambientes *offshore*. Neste caso, as técnicas são limitadas, tanto por motivos de inviabilidade técnica, quanto econômica.

Embora todas as técnicas sejam conhecidas como técnicas de medição de tensões *in situ*, sabe-se que o correto seria nomeá-las como técnicas de medição indireta de tensões *in situ*. Isto decorre do fato da tensão ser uma grandeza física não podendo ser medida diretamente, apenas obtida pela análise de seus efeitos, como a deformação ou a ruptura de um corpo sólido.

A determinação completa do campo de tensões *in situ* refere-se às orientações e magnitudes das tensões principais *in situ*. Nem todas as técnicas são capazes de prover o completo campo de tensões, caso da técnica ASR (com a hipótese de tensão vertical ser uma das tensões principais). Desta forma, esta dissertação é focada nas vantagens e limitações da técnica de medição de tensões *in situ* ASR (*Anelastic Strain Recovery*), principalmente quando empregada na indústria do petróleo.

Analisa-se os principais modelos da literatura de interpretação de tensões *in situ* da técnica ASR. Apresenta-se uma análise de sensibilidade e avaliação dos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983), considerando-se a variação dos principais parâmetros envolvidos nas suas formulações e utilizando-se os resultados de ensaios ASR das amostras ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2.

1.2 Motivação para Pesquisa

O estado de tensão *in situ* tem papel fundamental em todos os estágios de exploração de óleo, afetando significativamente a perfuração e estimulação de poços, bem como a produção do óleo. O conhecimento do estado de tensões *in situ* é importante na estimativa de reservas dos campos, no ganho da produção, no projeto de malha de drenagem através da injeção de água, na redução da produção de areia, no projeto de fraturamento hidráulico e especialmente no estudo da estabilidade de poços durante a perfuração.

A principal motivação para a pesquisa decorre do fato de que, até os dias de hoje, apesar do uso freqüente da técnica ASR, pouco se sabe sobre a sua confiabilidade em reproduzir o estado de tensões *in situ*. A orientação das tensões *in situ* calculadas através da orientação das deformações recuperadas nos ensaios ASR parece confiável quando comparada aos resultados de outras técnicas de medição de tensão *in situ*. Entretanto, no que se refere às magnitudes das tensões *in situ*, ainda há muitas incertezas, uma vez que dependem diretamente dos modelos de interpretação de medidas de tensões *in situ* adotados. Isto incentivou o estudo da técnica ASR, principalmente dos modelos de interpretação para cálculo das magnitudes das tensões principais *in situ*, visando investigar a confiabilidade e compreender a influência dos parâmetros envolvidos nos modelos.

1.3 Objetivos da Dissertação

A pesquisa tem como objetivo geral revisar os principais modelos de interpretação das tensões *in situ* em função dos resultados de ensaios ASR, comparar e analisar os modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983), escolhidos para análise de sensibilidade. Para tanto, é realizada uma pesquisa abrangente da literatura a fim de identificar os modelos de interpretação do ensaio ASR existentes. Vantagens e limitações são apresentadas e discutidas, auxiliando na adoção de dois modelos para fins da análise de sensibilidade e robustez. Desta forma, os modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983) são aplicados aos resultados de ensaios ASR de amostras de duas formações distintas: ROLLINS e BAKKEN.

1.4 Estrutura da Dissertação

Neste primeiro capítulo são apresentadas a importância e a motivação da pesquisa, onde são brevemente citados o emprego da técnica ASR para a sua determinação das tensões *in situ* e a relevância do conhecimento das referidas tensões para a indústria do petróleo. O capítulo também apresenta os objetivos, sendo um dos principais, o estudo de sensibilidade e robustez dos modelos de interpretação, além de apresentar a estrutura dessa dissertação.

No Capítulo 2 são apresentadas as classificações das técnicas mais comuns de medição de tensões *in situ*, além de uma revisão da literatura das técnicas mais utilizadas atualmente para esta medição. A técnica ASR é tratada em detalhes.

No Capítulo 3, encontra-se a revisão bibliográfica dos modelos de interpretação de tensões *in situ* para análise dos dados provenientes da técnica ASR, onde são discriminadas as vantagens, desvantagens, hipóteses, equações e o desenvolvimento analítico de cada modelo. Ênfase especial é dada aos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983), selecionados para a análise de sensibilidade.

O Capítulo 4 descreve os materiais adotados para análise e a metodologia de estudo desta dissertação. São utilizados dados de ensaios ASR executados em uma amostra de um poço vertical da formação ROLLINS, disponíveis na literatura, e dados de ensaios ASR fornecidos pela empresa de petróleo Halliburton para esta dissertação referentes a duas amostras, BAKKEN 1 e BAKKEN 2, retiradas de um mesmo testemunho do poço BTS-36 -2H da formação BAKKEN.

O Capítulo 5 apresenta inicialmente os tensores de tensão *in situ* das formações ROLLINS e BAKKEN determinados através dos resultados dos ensaios ASR interpretados pelos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983). Além disto, são apresentadas as análises de sensibilidade e resultados, referentes aos dois modelos, considerando-se a influência da variação dos principais parâmetros na determinação das tensões horizontais máxima e mínima. Discute-se ainda sobre a robustez dos modelos e a importância dos parâmetros envolvidos.

No Capítulo 6, são relatadas as conclusões gerais do estudo, no que diz respeito à técnica ASR, aos modelos escolhidos, ao material adotado e à utilização de

modelos para determinação das tensões *in situ*. Além disso, são apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras.

Finalmente, esta dissertação apresenta 3 anexos. O Anexo 1 refere-se às características da formação BAKKEN através de perfis do poço BTS-36-2H, fornecidos pela Halliburton. O Anexo 2 apresenta os relatórios de acompanhamento do poço obtidos através do programa Compass. O Anexo 3 apresenta as tabelas com as análises de sensibilidade dos modelos.

2 CAPÍTULO 2

TENSÕES *IN SITU* E TÉCNICAS PARA SUA DETERMINAÇÃO

Este capítulo apresenta a importância da determinação das tensões *in situ* para a indústria do petróleo, as classificações mais comuns das técnicas de medição de tensões *in situ*, além de uma revisão da literatura das técnicas de medição de tensão, com ênfase na técnica ASR.

2.1 Estado de Tensões *In situ* dos Maciços Rochosos

O estado de tensões dos maciços rochosos pode ser caracterizado pelas tensões *in situ* e pelas tensões induzidas. Define-se **tensão natural** ou **tensão *in situ*** como a tensão nas rochas, na ausência de qualquer perturbação causada pelo homem, resultante de complexa interação entre ações de esforços gravitacionais, esforços tectônicos, efeitos térmicos e processos físico-químicos. Sabe-se que processos químicos e físico-químicos, como precipitação mineral e recristalização, estão constantemente modificando a estrutura da rocha e, conseqüentemente, as tensões *in situ*. Movimentos tectônicos afetam o campo de tensões através da criação de falhas, fraturas e dobramentos, que afetados pela erosão, podem gerar um padrão complexo de direção das tensões tectônicas (HAYETT *et al.*, 1986, HERGET, 1988).

A **tensão induzida** é decorrente da redistribuição de tensões pré-existentes, devido à perturbação dos maciços com a implantação de obras de engenharia. O estado de tensão natural das rochas (tensões pré-existentes) é perturbado quando são executadas escavações, em especial de um poço de petróleo, que induzem a uma redistribuição de tensões, resultando no rompimento gradativo das rochas (embarrigamento da superfície escavada), desmoronamento de paredes de poços ou explosão da rocha em cavidades (MIOTO e COELHO, 1998).

O termo **tensão residual** destina-se a qualificar o estado de tensão remanescente no maciço rochoso ao término do mecanismo que lhe deu origem. As tensões residuais são tensões autoequilibradas.

Emprega-se a expressão **tensão tectônica** para qualificar o estado de tensão devido ao deslocamento relativo entre placas litosféricas ou outro processo geológico da dinâmica interna terrestre. Além disso, as tensões tectônicas são muito difíceis de serem previstas em relação à magnitude e à direção, a menos que tenham ocorrido recentes movimentos tectônicos e atividade sísmica. Tensões horizontais são freqüentemente maiores que as tensões verticais, devido à presença de tensões tectônicas. A tensão horizontal máxima pode ser obtida com bons conhecimentos das atividades tectônicas da área. Numa área tectonicamente relaxada é mais comum assumir que as tensões máximas e mínimas horizontais são equivalentes. Num ambiente tectônico, em que as tensões são desiguais, a razão entre as tensões pode ser estimada pelo *breakout* do poço (ruptura do poço por excesso de tensões) ou por estimulação do movimento do campo tectônico (HERGET, 1988).

Tensão térmica é um estado de tensões estabelecido pela variação de temperatura (HERGET, 1988, MIOTO e COELHO, 1998), ou seja, tensões térmicas ocorrem devido ao aquecimento e resfriamento da rocha. Elas ocorrem perto da superfície da terra devido à exposição ao sol ou como resultado do aquecimento do interior da terra pela radioatividade ou outros processos geológicos.

O estado de tensão, devido somente ao peso da rocha sobrejacente a um ponto ou ao plano do maciço rochoso, corresponde à **tensão gravitacional**. A tensão vertical pode ser determinada através dos registros de densidade (BRUCE, 1990).

Segundo GOODMAN (1980), o estado de tensões da massa rochosa é espacialmente variável em função da presença de feições estruturais (tais como falhas) ou da variação local nas propriedades da rocha. O estado atual de tensões que atua num determinado elemento da crosta terrestre deve ser função não apenas das condições atuais de carregamento, mas também do caminho de tensões definido pelo histórico geológico do maciço rochoso. As condições presentes de carregamento são a gravidade e os processos não tectônicos atuando na crosta. Por sua vez, o caminho de tensões definido pela história geológica do maciço é função das variações térmicas, processos físico-químicos, assim como movimentos tectônicos passados. Portanto, o estado natural de tensão resulta de sucessivos eventos da história geológica do maciço rochoso, correspondendo ao produto de vários estados de tensões anteriores.

Segundo NUNES (1998), são grandes as dificuldades de se medirem as tensões *in situ*, pois a distribuição das tensões varia consideravelmente nos maciços

rochosos, sendo muitas vezes impossível de serem obtidas na escala de um problema de engenharia.

A Figura 2.1 resume esquematicamente os tipos e as causas das tensões em maciços rochosos.

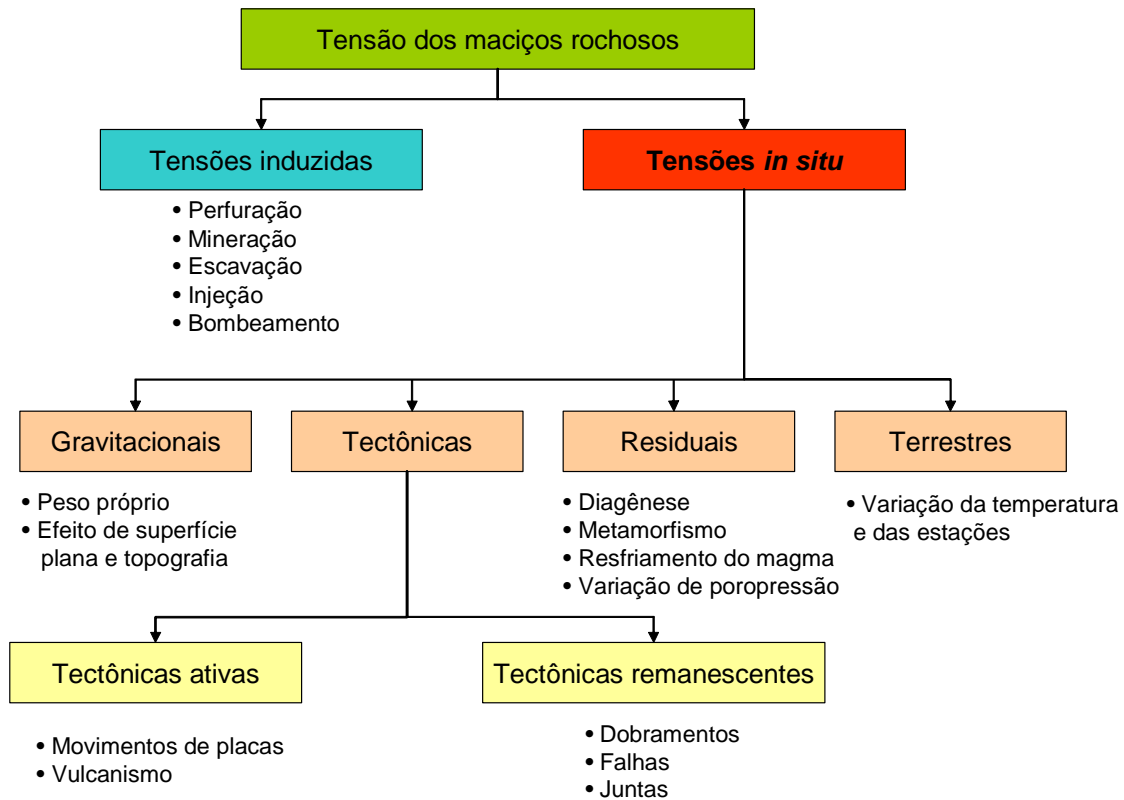


Figura 2.1. Tensões em maciços rochosos (adaptado de NUNES, 2000).

2.2 Importância da Definição das Tensões *in situ* para a Indústria do Petróleo

Atualmente, os poços de petróleo têm freqüentemente alcançado profundidades cada vez maiores, sejam eles *onshore* ou *offshore*. Além disto, poços *offshore* implicam em uma dificuldade ainda maior devido a elevadas profundidades de lâminas d'água, acima de 3000 m, tornando esta medição uma tarefa difícil e onerosa.

2.2.1 Estabilidade de Poços Durante a Perfuração

Em uma análise de estabilidade, o estado de tensões *in situ* e as características de resistência mecânica da rocha são os dois fatores mais relevantes para a estabilidade durante a perfuração de um poço. A importância é tão grande que,

em algumas ocasiões, é necessário redefinir a localização do poço, a fim de se encontrar uma direção que permita uma perfuração otimizada.

A Figura 2.2 apresenta típicas ocorrências de instabilidade de poços durante a perfuração (CSIRO, 2005). Em função do estado de tensões *in situ*, é possível estabelecer condições de estabilidade através da alteração da orientação do poço.

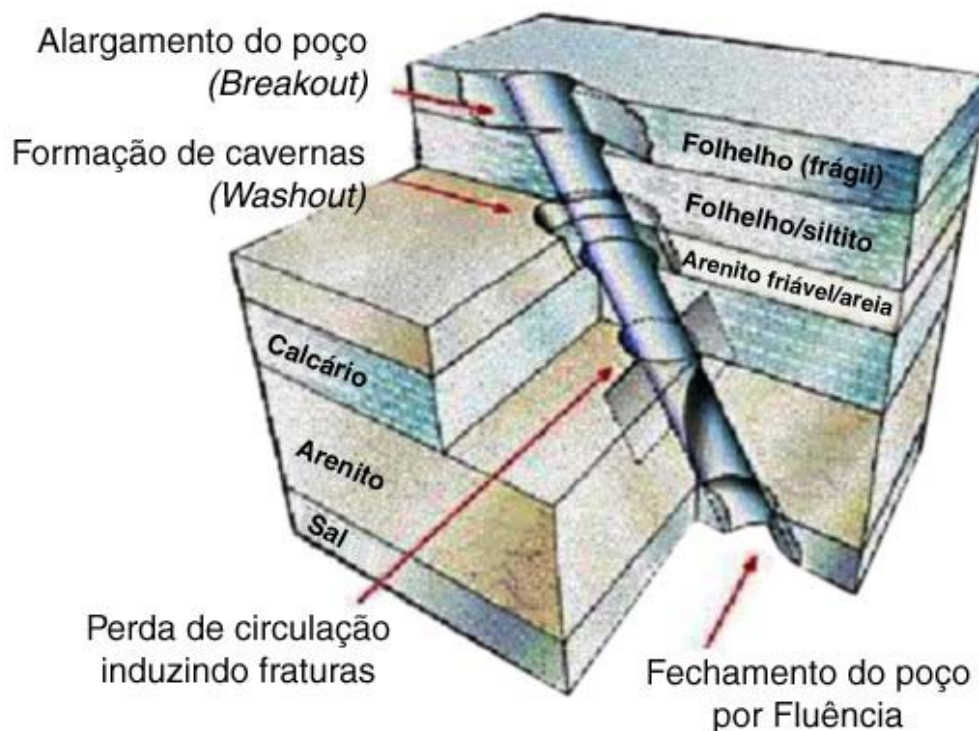


Figura 2.2. Típicas ocorrências de instabilidade de poços durante a perfuração (adaptado de CSIRO, 2005).

FJÆR *et al.* (1992) chamam atenção para o fato de que seria interessante do ponto de vista econômico que vários poços pudessem ser perfurados de uma plataforma *offshore*, atingindo diferentes alvos ou objetivos. Por alvo ou objetivo (*target*) entende-se o ponto final que o poço atinge no reservatório; é o ponto resultante da interseção da reta vertical que passa pela localização da sonda na superfície e o plano que contém a rocha reservatório. Um poço vertical convencional apresenta a cabeça do poço aproximadamente alinhada na mesma vertical com alvo contido no reservatório. Já um poço direcional é definido como aquele no qual a trajetória é deliberadamente desviada da vertical passando pela sonda; não apresenta a cabeça do poço alinhada na mesma vertical com o objetivo e assim, tanto a

inclinação quanto a direção da trajetória são alteradas e monitoradas (THOMAS, 2001, LIMA, 2002).

A inclinação do poço é muito freqüentemente limitada pela concentração de tensões devido ao campo de tensões *in situ* e pela resistência mecânica do maciço da formação (ROEGIERS e VANDAMME, 1999). No entanto, também existem situações onde o poço vertical convencional pode colapsar devido a um desviador de tensão horizontal *in situ* elevado. Assim sendo, neste caso o objetivo (*target*) no reservatório apenas pode ser alcançado através de um poço direcional, o que torna o projeto bastante complexo, exigindo atenção especial quanto às tensões *in situ* (VANDAMME e ROEGIERS, 1990). Uma possibilidade para superar este problema, e às vezes a única, é alinhar o poço com a tensão mais favorável ($\sigma_{Hmáx}$), por exemplo, minimizando o desviador de tensão na parede do poço.

A Figura 2.3 ilustra a importância das magnitudes das tensões horizontais máxima e mínima e da tensão vertical *in situ* para a estabilidade de um poço. Pode-se observar que o poço, no trecho vertical, tem as condições de estabilidade satisfeitas, tanto para o caso em que a tensão horizontal máxima é superior à tensão horizontal mínima, que é aproximadamente igual à tensão vertical ($S_H > S_h \approx S_V$), quanto para o caso em que a tensão horizontal máxima é superior a tensão horizontal mínima, onde ambas são extremamente superiores à tensão vertical ($S_H > S_h \gg S_V$).

No trecho horizontal do poço, para as duas situações propostas, a direção da perfuração irá influenciar a estabilidade. Quando o poço é orientado na direção SW - NE, que equivale à direção da tensão horizontal mínima, para a situação em que a tensão mínima é aproximadamente igual a tensão vertical ($S_H > S_h \approx S_V$), a condição é estável. Todavia, quando a tensão horizontal mínima é extremamente superior à tensão vertical ($S_H > S_h \gg S_V$) a condição é menos estável, ou melhor, instável.

A melhor opção neste caso de poço horizontal é orientá-lo na direção NW-SE, que equivale à direção da tensão horizontal máxima *in situ*. Isto ocorre tanto para a situação em que a tensão horizontal mínima se apresenta aproximadamente igual a tensão vertical ($S_H > S_h \approx S_V$) quanto para a situação em que tensão horizontal

mínima é extremamente superior à tensão vertical, ($S_H > S_h \gg S_V$), quando o poço é considerado estável.

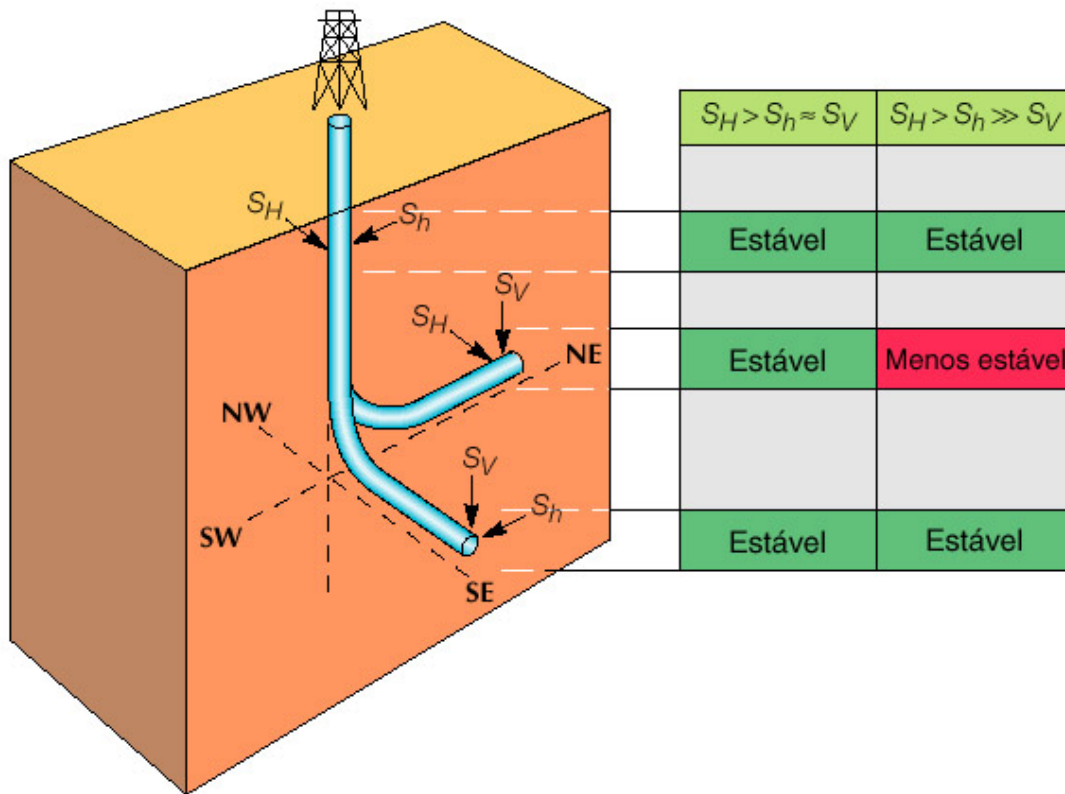


Figura 2.3. Análise típica de estabilidade de poço (adaptado de ADDIS, 2005).

Desta forma, seria mais seguro direcionar o poço na direção da tensão máxima NW-SE, a fim de assegurar estabilidade, pois ele se apresenta estável para as duas situações propostas. Enfim, quando o poço é direcionado na orientação da tensão mais favorável, o diferencial das tensões é menor, conduzindo a uma situação de estabilidade.

Conclui-se assim que o conhecimento da distribuição das tensões *in situ* na região onde pretende-se perfurar um poço de petróleo é de grande importância para a indústria petrolífera. Além disso, o estado de tensão *in situ* é também relevante na estimativa da estabilidade do poço durante a produção. Tal importância decorre principalmente da existência de reservatórios de arenitos não consolidados ou pouco consolidados que podem produzir grandes quantidades de partículas da formação, ocasionando produção elevada de areia. Essa alta produção leva a um desgaste prematuro da superfície dos equipamentos, a custos mais elevados no separador de

óleo e areia, e às vezes ao colapso total do poço, devido às cavidades geradas ao redor do revestimento (COOK *et al.*, 1994).

2.2.2 Estimulação de Poços por Fraturamento Hidráulico

Apesar da grande relevância na perfuração, a mais evidente importância das tensões *in situ* na exploração de óleo advém da estimulação de poços por fraturamento hidráulico, para aumentar a produtividade ou injetividade do poço. Tensões *in situ* desempenham papel importante na definição de dimensões, orientação e pressão de ruptura nas fraturas para iniciar a fratura hidráulica na parede do poço (HAIMSON, 1967).

O sucesso de um fraturamento hidráulico é muito dependente das tensões medidas em testes de microfraturamento hidráulico, executados previamente a grandes estimulações, com a finalidade de se obter dados de tensão para otimização do projeto (DANESHY *et al.*, 1986).

A fratura hidráulica se propaga na direção perpendicular à da tensão *in situ* mínima, ou seja, na direção da maior tensão *in situ* (HAIMSON, 1967). Baseando-se nisto, quando o fraturamento hidráulico é previsto nas operações de exploração para o aumento da produção dos poços, as localizações destes em relação ao objetivo devem ser definidas de acordo com a orientação da tensão *in situ*, com a finalidade de alcançar uma área de drenagem ótima, enquanto a estabilidade ainda for mantida e houver garantia de sucesso operacional (SMITH, 1989).

2.2.3 Estimativa de Reservas e Ganho na Produção de Óleo

A reserva de petróleo é definida como a quantidade de fluido que ainda pode ser obtida de um reservatório de petróleo em uma época qualquer de sua vida produtiva. Já o campo de petróleo consiste em uma área produtora de petróleo ou gás natural, a partir de reservatório contínuo ou de mais de um reservatório, a profundidades variáveis, abrangendo instalações e equipamentos destinados à produção (THOMAS, 2001). ROGIERS e VANDAMME (1999) ressaltam que, para a estimativa de reservas, deve-se levar em consideração o aumento da tensão efetiva

no campo de petróleo durante a produção do poço, afetando o montante total de hidrocarbonetos recuperáveis.

Em relação ao ganho na produção de óleo, ROEGIERS e VANDAMME (1999) avaliaram um ganho de produção equivalente à aproximadamente 30%, quando o padrão de perfuração foi definido em função da direção mais favorável para o fraturamento.

2.2.4 Redução da Produção de Areia

Segundo THOMAS (2001), a pressão de *drawdown* é definida como a pressão diferencial entre a pressão estática (pressão máxima do reservatório de petróleo em equilíbrio) e a pressão de fundo de poço (pressão de fluxo do fluido no fundo do poço), ou seja, quanto maior for a pressão de drawdown, maior será a vazão, o carreamento de partículas e a produção de areia.

Entende-se por canhoneado o local físico que comunica a formação produtora e o poço. Esta comunicação é obtida pela operação de canhoneio, ocorrida na etapa de produção, correspondente à perfuração do revestimento, através de cargas explosivas que podem penetrar até cerca de um metro na formação gerando canais de fluxo entre a formação produtora e o interior do poço.

Na Figura 2.4 pode-se observar um canhoneio convencional, onde são representados os canhoneados, os quais são canais para dentro da formação.

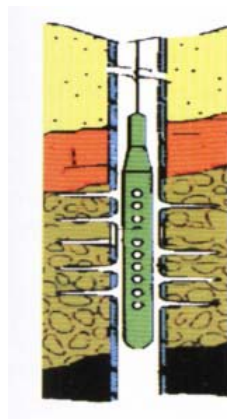


Figura 2.4. Canhoneio convencional (adaptado de THOMAS, 2001).

Desta forma, a produção de areia (lixamento) é um fenômeno complexo, sendo função da pressão de *drawdown* e da concentração de tensões ao redor dos canhoneados, que por sua vez é decorrente da existência do campo de tensões *in situ* original (MORITA *et al.*, 1987, PENNIGTON *et al.*, 1994).

O conhecimento da orientação da maior tensão horizontal define a direção de propagação da fratura a ser produzida, para a redução da produção de areia. A orientação dos canhoneados na direção da tensão horizontal maior também evita o embuchamento prematuro, a geração de fraturas secundárias e conseqüente dano à formação, com redução do intervalo fraturado.

O primeiro passo na decisão que envolve o processo de otimização da completação é avaliar se a formação sofrerá problemas de produção de areia durante a vida produtiva do poço. A produção de areia é um fenômeno que ocorre em duas fases. Na primeira, a areia é arrancada da parede do poço ou do túnel canhoneado através de rompimento e, na segunda, o fluxo de fluido deve transportar a areia rompida.

A pressão controlada pelo *drawdown* e depleção (queda de pressão no interior do reservatório) atuam na primeira fase. O fluxo, também controlado pelo *drawdown*, atua na segunda fase (MORITA, 1987). Utilizando esta teoria, a produção de areia é ditada pela estabilidade da formação. Para determinar se a formação é produtora potencial de areia, é necessário determinar se o furo ou o canhoneio serão estáveis durante a vida produtiva do poço. Existem três passos envolvidos nesse processo: determinação das tensões *in situ*; determinação das propriedades mecânicas da rocha e determinação da estabilidade da formação durante a vida produtiva do poço, usando o critério apropriado de falha, por exemplo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb (Figura 2.5).

MORITA *et al.* (1987) reportam que um aumento das tensões efetivas pode gerar um aumento do risco de ruptura por cisalhamento. Alguns exemplos deste tipo de ruptura podem ser observados na Figura 2.6. Por outro lado, esse aumento pode reduzir o risco de desenvolvimento da tensão de tração, evitando que ocorra uma ruptura por tração (Figura 2.7), sendo que um decréscimo em poropressão equivale a um aumento de tensão efetiva. Isto significa que o risco quanto à ruptura por

cisalhamento aumenta quando o reservatório é depletado. Também, a preservação da pressão do reservatório por injeção pode reduzir a produção de areia.

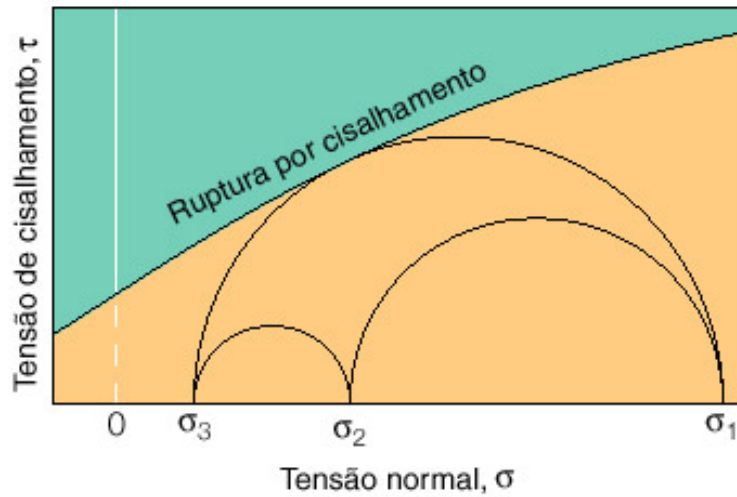


Figura 2.5. Base do critério de ruptura de Mohr-Coulomb (adaptado de ADDIS, 2005).

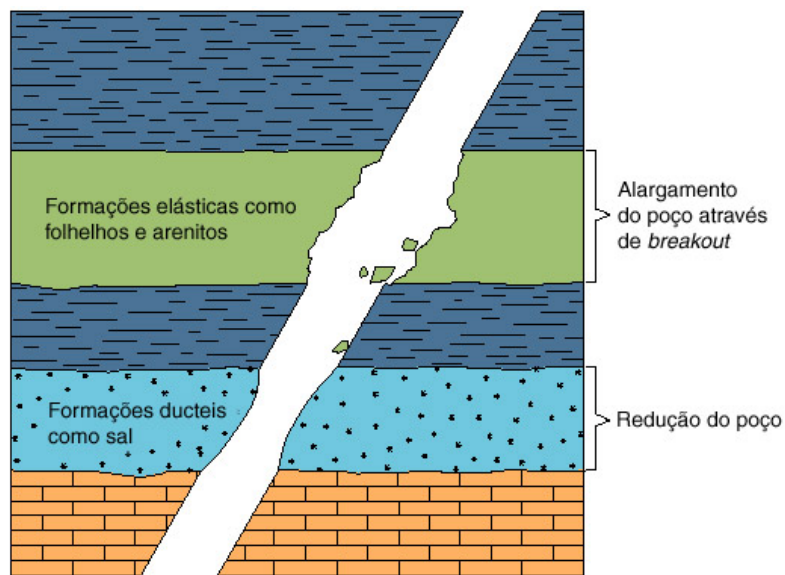


Figura 2.6. Ruptura do poço por cisalhamento (adaptado de ADDIS, 2005).

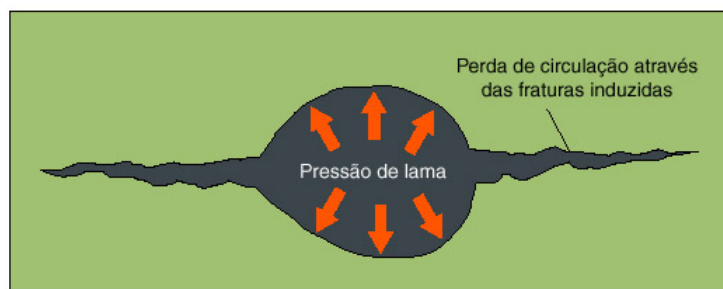


Figura 2.7. Ruptura do poço por tração (adaptado de ADDIS, 2005).

2.2.5 Otimização de Malha de Drenagem com Injeção de Água

O campo de tensões *in situ* também pode ser utilizado para otimizar uma malha de drenagem utilizando injeção de água. A injeção de um fluido em um reservatório tem como finalidade deslocar o petróleo para fora dos poros da rocha. O fluido injetado recebe o nome de fluido deslocante e, ao mesmo tempo em que empurra o óleo, ocupa os espaços dos vazios.

Os métodos que utilizam a injeção de água ou gás no reservatório são chamados de métodos convencionais de recuperação de óleo. Além destes, existem processos mais complexos para a recuperação do óleo, que são classificados como métodos especiais ou métodos avançados de recuperação de óleo, também conhecidos como EOR (*Enhanced Oil Recovery*), detalhado por THOMAS (2001).

A Figura 2.8 ilustra a alocação de um poço injetor, caracterizado como poço perfurado, com a intenção de injetar fluidos na rocha reservatório para aumentar a recuperação do petróleo, e a alocação de um poço produtor, definido como um poço perfurado com a intenção de produzir óleo ou gás natural. Vale ressaltar que um reservatório produz também água, além de óleo e gás natural (THOMAS, 2001).

Segundo TEUFEL (1985a), o conhecimento do estado de tensões *in situ* é de extrema importância para engenheiros de reservatórios, tanto no projeto de injeção de água contínua quanto nos métodos especiais de recuperação de óleo.

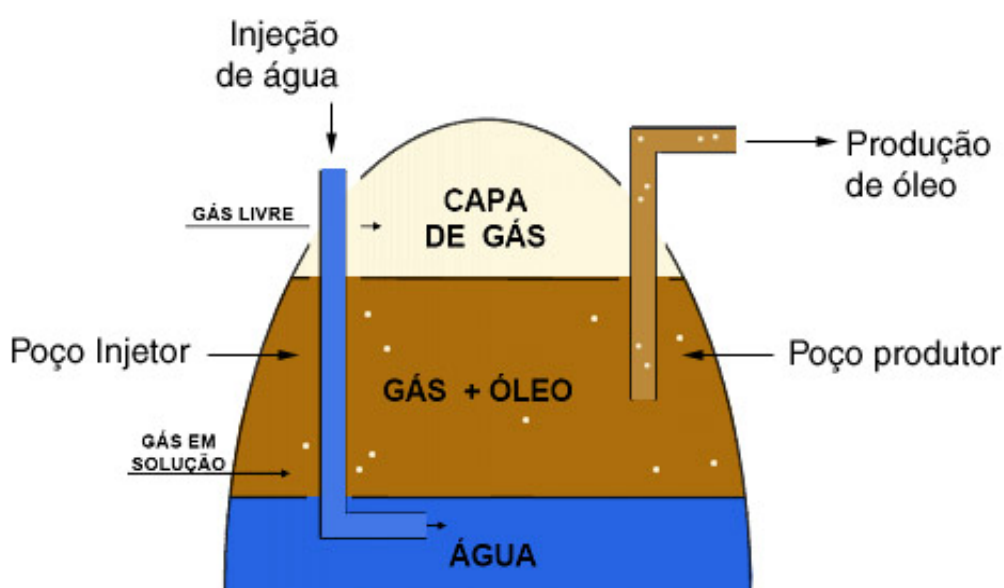


Figura 2.8. Alocação de poço injetor e produtor em reservatório de óleo.

Estimulação hidráulica e fraturas naturais podem melhorar muito a recuperação de óleo e gás em formações bem fechadas (com matriz de baixa permeabilidade). Todavia, podem afetar o fluxo e levar a um padrão de drenagem incomum dentro de um reservatório.

O gerenciamento efetivo do reservatório depende de uma clara compreensão da existência de fraturas conectadas, particularmente durante a perfuração quando o posicionamento do poço é crítico.

Estimulação por fraturamento hidráulico efetivo é fortemente influenciada pela direção da fratura. O tipo de tratamento selecionado pode ser modificado pelo azimute da fratura, especialmente se existirem estruturas geológicas a serem interceptadas ou evitadas pelas fraturas estimuladas.

A recuperação de óleo com injeção de água e outros projetos de recuperações avançadas de óleo requerem modelos da direção da fratura pois, caso contrário as fraturas do reservatório podem levar a um prematuro *breakthrough* (água “cortada” pelo óleo, ou melhor a água “ultrapassa” o óleo) e reduzir a taxa final recuperada de óleo. Projetos de injeção de água que incorporam dados de fratura podem maximizar a eficiência de fluxo.

A orientação da fratura hidráulica é aproximadamente perpendicular à orientação predominante das fraturas da região. Para alcançar a máxima eficiência de varredura areal durante uma injeção de água contínua ou EOR, os poços produtores devem ser localizados perpendicularmente ao azimute de propagação das fraturas.

Sabendo-se que poços horizontais interceptam muitas fraturas verticais e subverticais, a água pode se mover facilmente ao longo das fraturas verticais abertas, levando a uma produção de água antecipada e ao corte de água nos poços horizontais. Medições detalhadas de anisotropia ajudam a evitar este problema de caracterização destas fraturas com maior precisão. Tal comportamento pode ser observado na Figura 2.9. Em um padrão típico de injeção de óleo, o poço produtor é rodeado por poços injetores. Na direção da fratura o reservatório coincide com a rota do injetor para o produtor, então fluidos injetados irão viajar ao longo das fraturas, ultrapassando rochas não fraturadas, entrando no poço produtor muito cedo e varrendo apenas uma pequena porção do reservatório (LATIF, 2005).

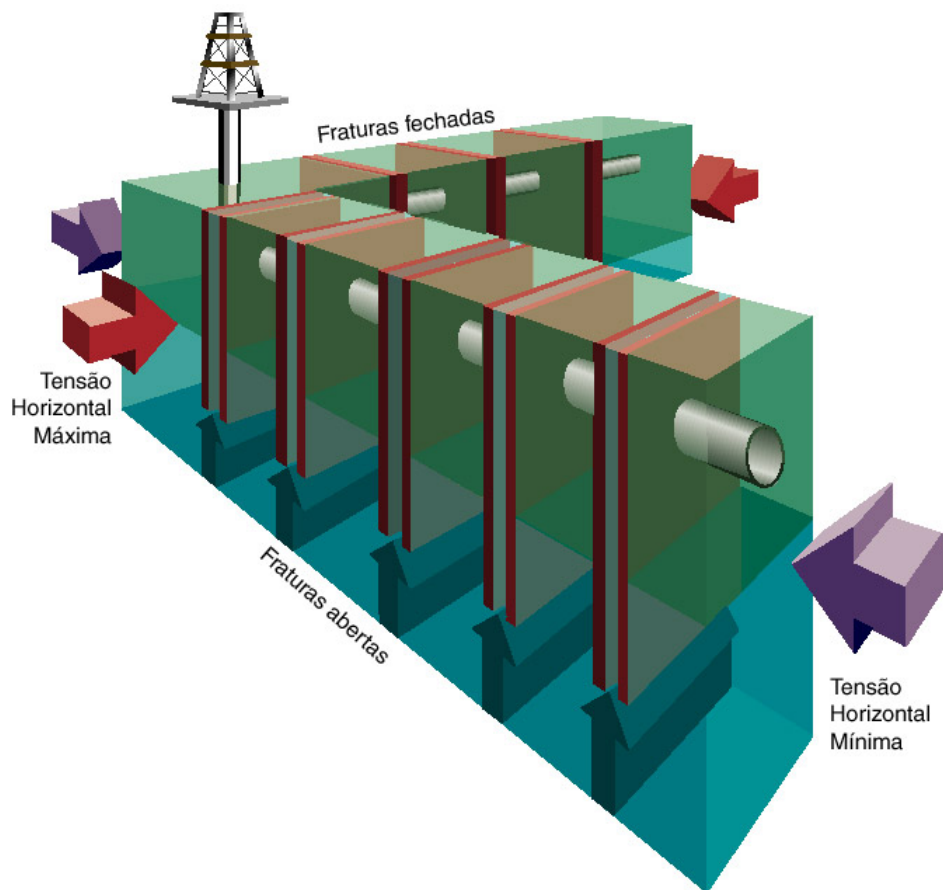


Figura 2.9. Poço horizontal e fraturas do maciço (LATIF, 2005).

A Figura 2.10 ilustra a alocação de poços injetores e poços produtores ignorando o padrão de fraturas do reservatório. Observa-se uma grande produção de água e um grande volume de óleo cortado (ultrapassado) pela água em reservatório (LATIF, 2005). Neste caso, a varredura torna-se deficiente e, além disso, ocorre grande produção de areia e água.

Já a Figura 2.11 ilustra a alocação de poços injetores e poços produtores levando em consideração o padrão de fraturas do reservatório. Nesse caso, ocorre uma varredura mais eficiente e uma produção de água mais atrasada, além de uma menor produção de areia (LATIF, 2005). Todavia, se os injetores forem posicionados ao longo de uma linha paralela à direção da fratura e os produtores ao longo de outra linha paralela, as fraturas podem ser usadas como uma linha de injeção, aumentando muito a eficiência de varredura no reservatório.

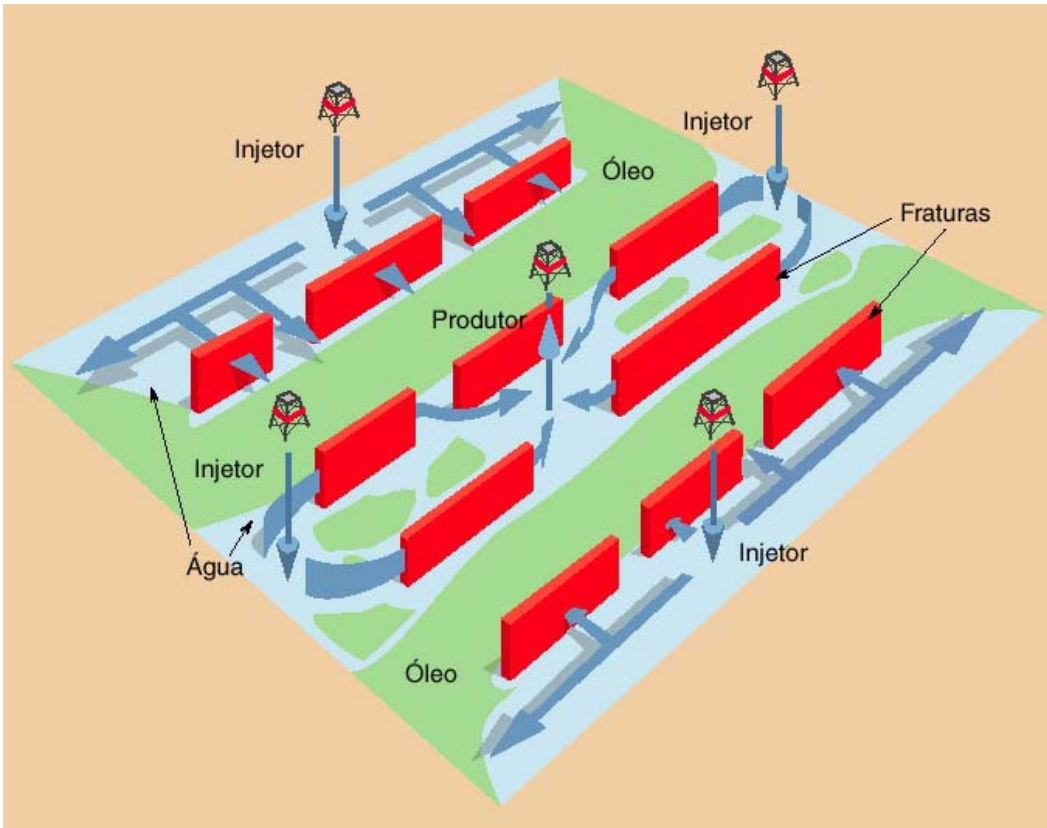


Figura 2.10. Alocação de poços ignorando o padrão de fraturas do reservatório (LATIF,2005).

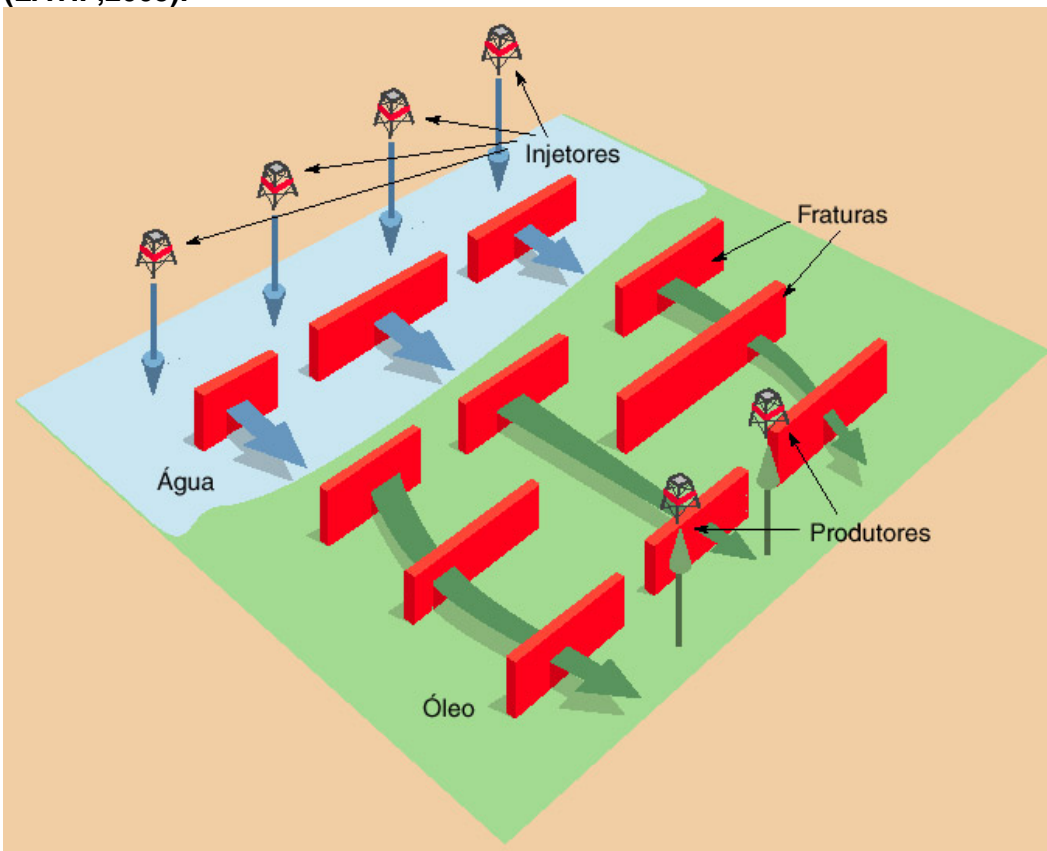


Figura 2.11. Alocação de poços considerando o padrão de fraturas do reservatório (LATIF, 2005).

2.3 Técnicas de Determinação das Tensões *in situ*

O estado de tensões *in situ* na rocha é um parâmetro requerido em diversos projetos de engenharia. As tensões *in situ* podem ser determinadas através da utilização de métodos, sejam eles diretos ou indiretos, baseados em diferentes hipóteses e modos de execução.

A literatura apresenta algumas classificações das técnicas de medição de tensões *in situ*: GOODMAN (1980), HILL *et al.* (1994), NUNES (1997, 1998) e LJUNGGREN *et al.* (2003). Essas classificações propõem categorias distintas de agrupamento das técnicas de medição de tensão em função do princípio de medições das tensões *in situ*, da localização do ensaio, da perturbação do estado de tensão natural e da variação do comportamento da rocha.

A classificação de GOODMAN (1980) divide as várias técnicas de medição de tensões em 4 categorias, de acordo com o método de obtenção, a saber, (i) alívio total das deformações; (ii) alívio parcial das deformações; (iii) fraturamento do maciço rochoso e (iv) propriedades da rocha.

Segundo HILL *et al.* (1994), existem 20 métodos para deduzir o campo de tensões originais *in situ*, os quais podem ser agrupados em 4 categorias: (i) técnicas baseadas no testemunho; (ii) técnicas baseadas no poço; (iii) técnicas baseadas nas proximidades do poço e (iv) técnicas baseadas em indicadores geológicos regionais (Tabela 2.1). A utilização de qualquer técnica, no entanto, é restrita pelas hipóteses teóricas, condições de teste, por limitações experimentais e modelagens matemáticas inerentes a cada método.

Os métodos baseados no testemunho são os mais econômicos, uma vez que eles não ocupam o poço exclusivamente para o teste. Esses métodos são, às vezes, preferidos quando a testemunhagem é parte da programação de perfuração, por exemplo, em casos de poços exploratórios. Por outro lado, os resultados podem ser influenciados pelo ambiente de teste, visto que o testemunho não está mais sob as reais condições *in situ*.

Os indicadores geológicos regionais levam em consideração o padrão de falhas ou podem ser baseados no Mapa do Mundo de Tensões (*World Stress Map*), o qual tem sido utilizado para a obtenção de valores de tensão para pré-projetos.

As técnicas baseadas no poço têm a vantagem inicial de coletar dados diretamente do subsolo, sem alteração do ambiente de teste, ou seja, o ambiente de teste é o próprio subsolo, diferentemente do que ocorre nas técnicas baseadas no testemunho. No entanto, as técnicas baseadas no poço são mais dispendiosas, porque são necessários equipamentos de superfície e subsuperfície, além de serem técnicas muito freqüentemente difíceis de serem interpretadas. Já as técnicas baseadas nas proximidades do poço incluem a medida da orientação do início do fraturamento hidráulico e da sua propagação.

A maioria dos métodos é capaz de fornecer apenas a orientação da tensão *in situ*, não determinando as respectivas magnitudes das tensões *in situ*. Três métodos, no entanto, são mais gerais, pois determinam o campo completo de tensões *in situ*: recuperação das deformações anelásticas (*Anelastic Strain Recovery* - ASR), análise da curva de deformações diferenciais (*Differential Strain Curve Analysis* - DSCA) e microfraturamento hidráulico.

Tabela 2.1. Classificação de HILL et al. (1994).

Categoria	Técnica
Técnicas baseadas no testemunho	<i>Anelastic Strain Recovery – ASR</i>
	<i>Differential Strain Curve Analysis – DSCA</i>
	<i>Circunferential Velocity Anisotropy – CVA</i>
	<i>Differential Wave Velocity Analysis – DWVA</i>
	Teste pontual de carregamento axial
	Exames petrográficos de microfraturas
	Sobrefuração de testemunhos
	Fraturas induzidas em um testemunho
	Observação direta de testemunhos resultantes de ensaios de fraturamento
Técnicas baseadas no poço	Microfraturamento hidráulico
	Técnica de <i>Borehole Breakouts</i>
	Técnica de deformação do poço
	Imagem do poço das fraturas induzidas pela perfuração
	Registro de <i>Gamma Ray Directional</i>
Técnicas baseadas nas proximidades do poço	Registros Microssísmicos
	<i>Earth Tilt Survey</i>
Indicadores geológicos regionais	<i>Earthquake Focal Mechanisms</i>
	Dados de escorregamento de falha
	Mapeamento das juntas neotectônicas
	<i>Volcanic Vent Alignment</i>

Na Tabela 2.2 pode-se observar a classificação de NUNES (1997, 1998), que engloba mais de 30 técnicas de medições de tensões *in situ*, agrupadas em 4 categorias baseadas nos seguintes princípios de ensaio:

- Restabelecimento, no qual a tensão a ser determinada é restabelecida;
- Fraturamento, que consiste em provocar a fratura na rocha e definir a tensão de ruptura;
- Recuperação, no qual as deformações do maciço são recuperadas e registradas após o alívio das tensões *in situ*;
- Particulares, os quais consideram princípios mistos ou exóticos.

Tabela 2.2. Classificação de NUNES (1997).

Categoria		Técnicas	
Técnicas baseadas no princípio do restabelecimento		Método do Macaco Plano	
		<i>Small Flat Jack</i> - SFJ	
Técnicas baseadas no princípio do fraturamento		Fraturamento Hidráulico	
		<i>Hdraulic Tests on Preexisting Fractures</i> - HTPF	
		<i>Cerator Stress Meter</i> - Pressiômetro CSM	
		<i>Rockmeter</i>	
		<i>Serata Stress Meter</i>	
Técnicas baseadas no princípio das recuperações		<i>Borehole Breakouts</i>	
		Medidas na parede da escavação	Pinos de deslocamento
			Macaco Cilíndrico
			<i>Undercoring</i>
		Medidas da variação do diâmetro de furos	<i>Borehole Deformation Gage</i> - Célula BDG
			Célula de Liège
			Célula Japonesa
			Célula CERCHAR
			Célula <i>Doorstopper</i>
		Medidas das deformações no fundo dos furos	<i>Célula CEJM</i>
			Célula Hemisférica
			Célula CSIR
		Medidas das deformações nas paredes dos furos	Célula CSIRO
			Célula LNEC
			Célula SSPB
Célula LUH			
<i>Borehole Slotter</i>			
Holográfica			
Técnicas particulares		<i>Core Discing</i>	
		<i>Differential Strain Curve Analysis</i> - DSCA	
		<i>Anelastic Strain Recovery</i> - ASR	
		Efeito Kaiser	
		Velocidade Sônica	

LJUNGGREN *et al.* (2003) classificam os métodos de determinação de tensões *in situ* em duas categorias principais. A primeira consiste em métodos que perturbam as condições das tensões *in situ* das rochas, como por exemplo, induzindo deformações específicas e/ou promovendo a abertura de fraturas. A segunda consiste em métodos baseados na observação do comportamento da rocha, sem nenhuma influência do método de medição, não perturbando as condições das tensões *in situ* das rochas.

A Tabela 2.3 resume as técnicas de medição das tensões *in situ* segundo a classificação de LJUNGGREN *et al.* (2003). A Tabela 2.4 resume as vantagens, limitações e aplicações mais usuais das técnicas, além de informar o tipo de determinação do estado de tensões: bidimensional, 2D ou tridimensional, 3D.

Tabela 2.3. Classificação de LJUNGGREN *et al.* (2003).

Categoria	Técnica
Métodos com perturbação das tensões <i>in situ</i>	Fraturamento hidráulico <i>Hdraulic Tests on Preexisting Practices - HTPF</i>
	Alívio de tensão em poço
	Alívio de tensão de superfície
	Estatística de banco de dados
Métodos sem perturbação das tensões <i>in situ</i> (observação do comportamento da rocha)	<i>Core Discing</i>
	<i>Borehole Breakout</i>
	Retroanálise
	Efeito <i>Kaiser</i>
	<u>Anelastic Strain Recovery – ASR</u>
	Observação geológica
	Mecanismos de focos de terremotos

Três técnicas são correntemente usadas para determinar alguns aspectos do campo de tensão *in situ* em profundidade: fraturamento hidráulico, cálculo das propriedades do material e métodos de relaxação de deformações.

As tensões principais horizontais *in situ* são freqüentemente determinadas através de registros ou do cálculo de propriedades de material de laboratório. Os cálculos são baseados no comportamento elástico de deformação uniaxial, e incluem apenas os efeitos da sobrecarga e da poropressão nas tensões horizontais. Tensões termais e tectônicas são ignoradas, assim como as de fluência e de outros efeitos importantes no histórico do tempo. Não se pode esperar que esses cálculos sejam confiáveis.

Os métodos de relaxação de tensões, usados primariamente para determinar a orientação das deformações, dependem do desenvolvimento de tensões preferencialmente orientadas em uma amostra retirada de um testemunho que sofra alívio de tensões.

Tabela 2.4. Características das técnicas de determinação de tensões *in situ* (adaptado de LJUNGGREN *et al.*, 2003).

Método	2D /3D	Vantagens	Limitações
Sobrefuração (Overcoring)	2D 3D	<ul style="list-style-type: none"> Técnica mais desenvolvida tanto na teoria quanto na prática Profundidade até 1000m 	<ul style="list-style-type: none"> Pequeno volume da rocha Necessita de sonda de sobrefuração
Doorstopper	2D	<ul style="list-style-type: none"> Uso em rochas brandas ou duras, fraturadas 	<ul style="list-style-type: none"> Necessita sonda de sobrefuração.
Fraturamento Hidráulico	2D	<ul style="list-style-type: none"> Medições no furo existente Baixa dispersão dos resultados Volume de rocha razoavelmente grande Profundidades rasas a profundas 	<ul style="list-style-type: none"> Avaliação de σ_{HMin} Alteração na química da água
HTPF	2D 3D	<ul style="list-style-type: none"> Medições no furo existente Aplicável a maciços com altas tensões 	<ul style="list-style-type: none"> Requer fraturas existentes no poço com variação de <i>strikes</i> e <i>dips</i> (mergulhos)
Core discing	2D	<ul style="list-style-type: none"> Informação obtida no estágio de perfuração 	<ul style="list-style-type: none"> Apenas estimativa qualitativa
Borehole breakouts	2D	<ul style="list-style-type: none"> Relativamente rápido, principalmente em furos profundos 	<ul style="list-style-type: none"> Restrito à orientação de tensão Informação existente em estágio preliminar
Mecanismos focais	2D	<ul style="list-style-type: none"> Para grandes profundidades 	<ul style="list-style-type: none"> Informação apenas em grandes profundidades
Efeito Kaiser	2D 3D	<ul style="list-style-type: none"> Medidas simples 	<ul style="list-style-type: none"> Confiabilidade relativamente baixa Estimativas grosseiras
ASR / DSCA / RACOS	2D 3D	<ul style="list-style-type: none"> Usado para grandes profundidades 	<ul style="list-style-type: none"> Medidas complicadas em micro-escala, sensível a diversos fatores
Retro Análise	2D	<ul style="list-style-type: none"> Rápido e simples Alta confiabilidade devido ao grande volume de rocha 	<ul style="list-style-type: none"> Projeto preliminar e construção
Análise de dados geológicos	2D 3D	<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> Estimativa muito rude, confiabilidade baixa Projeto preliminar

Após esta breve revisão das classificações relativas a técnicas de medições de tensões *in situ*, a técnica ASR foi selecionada como objetivo de estudo desta dissertação, em função da simplicidade do ensaio e do uso cada vez mais freqüente por parte da indústria do petróleo. A técnica ASR pode ser caracterizada pela medição da relaxação após retirada do testemunho do barrilete de testemunhagem. As

deformações decorrentes da relaxação são medidas por transdutores acoplados na amostra, imediatamente após a recuperação do barrilete de testemunhagem.

Dependendo da classificação, a técnica ASR é denominada de forma diferenciada. Segundo GOODMAN (1980), a técnica ASR é caracterizada pelo alívio parcial das tensões. Por outro lado, corresponde a um método baseado no testemunho (HILL *et al.*, 1994). De acordo com NUNES (1997), a técnica ASR pode ser classificada como particular e exótica, baseada no princípio de recuperação e reestabelecimento. Enquanto que, pela classificação de LJUNGGREN *et al.* (2003), a técnica ASR é um método de medição de tensão *in situ* baseado na observação do comportamento da rocha sem qualquer perturbação das tensões *in situ*, e pode ser usada tanto para medições 2D e 3D, em grandes profundidades.

2.4 Técnica ASR – Anelastic Strain Recovery

Esta seção apresenta a técnica ASR em detalhes. Reporta-se histórico, hipóteses, fundamentos, tempo de testemunhagem, descrição do ensaio, influência da testemunhagem, direção das deformações, comportamento tensão-deformação da rocha, vantagens e desvantagens.

2.4.1 Histórico

A técnica ASR (*Anelastic Strain Recovery*) pretende determinar o campo de tensões *in situ* baseando-se nas deformações da rocha devido ao alívio de tensões que naturalmente ocorre depois da testemunhagem. O alívio de tensões provoca variação da dimensão do testemunho, provavelmente devido à formação e abertura de microfraturas na amostra.

VOIGHT (1968) sugeriu que as tensões principais *in situ* poderiam ser determinadas pelas variações nas dimensões do material testemunhado de um poço ao longo do tempo. Ele argumentou que existe uma justificativa empírica para a consideração de que toda componente variável das deformações anelásticas recuperáveis sejam proporcionais às deformações recuperáveis totais e, portanto, sejam relacionadas ao estado pré-existente de tensões *in situ*.

No princípio, as orientações das tensões foram determinadas a partir das medições com extensômetros ou medidores de deformações (*strain gages*) colados ao

redor do testemunho (VOIGHT, 1968, JÆGER e COOK, 1979). Estudos teóricos mostraram que as magnitudes das tensões também podem ser determinadas (BLANTON, 1983, BLANTON e TEUFEL, 1983, WARPINSKI e TEUFEL, 1989a).

As deformações recuperadas durante a testemunhagem envolvem instantaneamente tanto uma componente elástica quanto anelástica. Os transdutores são geralmente instalados logo após a testemunhagem e alívio de tensões, e as deformações recuperadas medidas podem ser relacionadas à componente de tensão total que atuava antes do alívio. Se os transdutores forem instalados após o alívio inicial de tensões, parte da componente das deformações anelásticas ainda poderá ser determinada.

Os primeiros testes ASR, no entanto, foram inconsistentes devido aos procedimentos de medições das deformações, que utilizavam *strain gages* colados na superfície de amostras saturadas não seladas (TEUFEL, 1982, TEUFEL, 1983). Providências como encapsulamento com silicone ou poliuretano (TEUFEL, 1985b) foram introduzidas com o objetivo de selar o testemunho e evitar a evaporação da umidade. Ao mesmo tempo, *strain gages* foram substituídos por *clip-on gages*, aumentando a confiabilidade da medida. Banhos de óleo (PERREAU *et al.*, 1989) ou em fluidos baseados em silicone inerte (BUTTERWORTH *et al.*, 1991) foram, mais tarde, utilizados com a finalidade de controlar a temperatura, umidade e vibrações externas durante os ensaios.

A recuperação do campo de tensões *in situ* derivado dos testes do ASR pode ser confirmada em muitas situações, através de comparações com outros métodos de medições de tensões, como fraturamento hidráulico (BLANTON e TEUFEL, 1983, TEUFEL, 1985b), bem como através de testes de laboratório em arenitos sintéticos (YASSIR *et al.*, 1998). Existem também situações nas quais os testes ASR não obtiveram sucesso, como o caso de arenitos inconsolidados (RAMOS *et al.*, 1994), devido ao período demasiadamente longo entre a retirada do testemunho e o ensaio (BRUMLEY *et al.*, 1994) e à impossibilidade de computar a magnitude das tensões devido à contração do testemunho.

2.4.2 Hipóteses e Fundamentos da Técnica

O método baseia-se na hipótese de que, quando um testemunho é perfurado, instantaneamente ocorre uma relaxação elástica, e a seguir ocorre uma relaxação

anelástica, na proporção do campo de tensões *in situ* a que o testemunho estava submetido antes da testemunhagem, e que é função do tempo.

De acordo com VOIGHT (1968), se a rocha for isotrópica e homogênea e tiver um comportamento linearmente viscoelástico, o alívio de deformações ao longo das direções das deformações principais será uniforme no tempo. Além disso, as direções das deformações principais aliviadas, determinadas em um dado intervalo de tempo, correspondem à condição do estado inicial de deformações *in situ*. Da mesma forma, as direções das deformações principais determinadas através das medições das deformações anelásticas recuperadas correspondem às direções das tensões *in situ* principais. Como supõe-se que a direção da deformação horizontal máxima seja paralela à direção da tensão máxima, esta também será a direção das fraturas induzidas.

Desta maneira, as orientações das deformações principais determinadas pelo ensaio ASR serão alinhadas com as tensões *in situ* principais (EL RABBA, 1986, WARPINSKI e TEUFEL, 1989a). Conclui-se então que serão registradas maiores deformações na direção da tensão maior.

A determinação do campo de tensões *in situ* pela técnica ASR requer as seguintes condições:

- (i) testemunho orientado e isento de fraturas naturais;
- (ii) furo paralelo a uma das tensões principais;
- (iii) deformações anelásticas proporcionais às tensões *in situ* existentes antes da recuperação do testemunho;
- (iv) amostras bem consolidadas.

As condições acima descartariam, por exemplo, folhelhos, conglomerados e amostras com intercalações e laminações de diferentes tipos de rocha. Amostras inconsolidadas podem se deformar pela simples pressão do sensor de deslocamento, durante o ensaio de ASR, além de não produzirem microfraturas bem definidas.

Quando um testemunho for removido de um maciço rochoso, ele tenderá a relaxar e expandir, devido ao alívio da tensão *in situ*. Medições de campo mostram que a abertura e propagação das microfraturas geralmente são compatíveis com as deformações anelásticas recuperadas (ASR). Pelas medições das deformações

recuperadas, a orientação das deformações principais pode ser determinada. Desta forma, a orientação das tensões principais também pode ser obtida. Todavia, a determinação da magnitude das tensões *in situ* é mais difícil e um modelo constitutivo para a rocha deve ser usado.

Conforme já comentado, a determinação das tensões *in situ* através do ensaio ASR se baseia na relaxação de uma amostra de rocha logo após a testemunhagem. Além da deformação anelástica instantânea que ocorre quando a tensão é aliviada, uma deformação anelástica adicional também se desenvolve após certo tempo. Para um testemunho retirado de uma formação rochosa, o período de tempo no qual a maioria das deformações anelásticas se desenvolve é tipicamente de 10 a 50 horas.

A modelagem do processo de testemunhagem leva em consideração dois tipos distintos de deformações exibidas pelo testemunho quando cortado fora do maciço rochoso: elástica, em um primeiro estágio, e anelástica no segundo estágio. A Figura 2.12 mostra o comportamento da deformação imediatamente após a testemunhagem e durante o ensaio ASR (BLOCH, 1999). O processo elástico é representado pela reta que vai de A a B, no exato instante da testemunhagem ($t = \tau_o$). Já o processo anelástico é representado pela curva de B a E. Em C, a amostra atinge a superfície ($t = \tau_1$), e a preparação para o teste com o ASR vai de C a D ($t = t_1$). Os sensores de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Displacement Transducers*) são instalados, e as deformações na amostra são monitoradas de D ($t = t_1$) a E ($t = t_2$).

A redução assintótica do gradiente de deformação com o tempo explica a necessidade de se realizar o ensaio o mais rápido possível, enquanto as variações ainda são mensuráveis (até t_2), para aumentar a precisão das medidas. Assume-se que as tensões e poropressão do testemunho se reduzem instantaneamente, igualando-se à pressão do fluido de perfuração assim que a testemunhagem se inicia, quaisquer que sejam as condições de perfuração: *overbalanced* (superbalanceada, pressão do fluido maior do que a pressão da formação), *balanced* (balanceada, pressão do fluido igual à pressão da formação), e *underbalanced* (sub-balanceada, pressão do fluido menor do que pressão da formação). Assume-se também um declínio linear durante a viagem do testemunho para fora do poço, por isso um comportamento elástico.

Com o alívio das tensões que a rocha estava submetida no subsolo, são formadas microfaturas, que se orientam de acordo com o campo de tensões *in situ* prévio. A medição da orientação das deformações numa amostra permite, então, uma estimativa da orientação das tensões *in situ*.

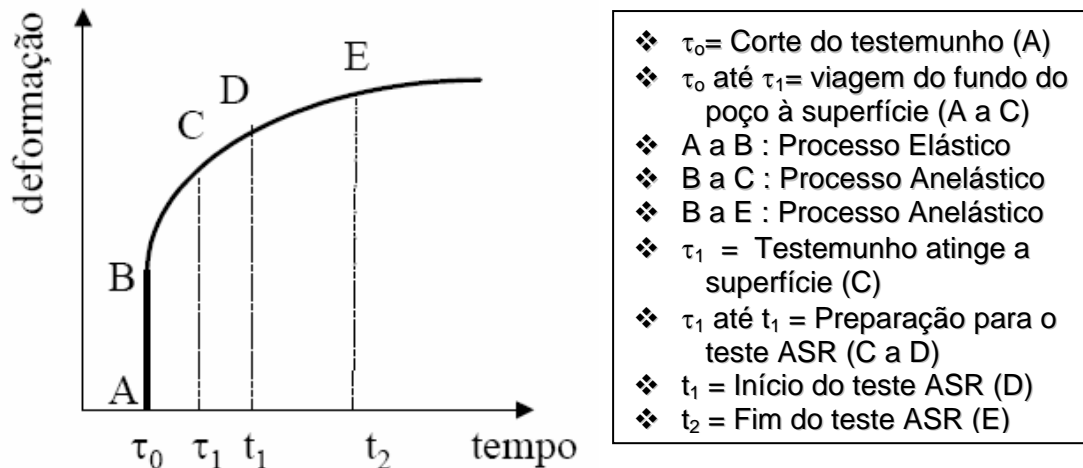


Figura 2.12. Variação da deformação durante a testemunhagem e o ensaio ASR (BLOCH, 1999).

Os mecanismos físicos de relaxação da rocha associados ao ensaio ASR podem ser descritos da seguinte forma. Um material rochoso confinado sob uma elevada temperatura está em seu estado de tensão *in situ*. O confinamento é removido e o material é então exposto à pressão atmosférica normal e à temperatura ambiente. Os minerais individuais e cristais exibem uma certa densidade e arranjo estrutural sob várias tensões e condições de temperatura. Quando uma amostra do material é aliviada de suas tensões confinantes, os minerais individuais e os materiais tentam manter o estado físico original resultando em expansão dos cristais individuais e dos componentes minerais. A variação entre os coeficientes de expansão de cristais individuais, componentes minerais e os componentes de cimentação resulta em um crescimento do conjunto. As forças externas coesivas e resistência mecânica dos materiais de cimentação devem ser excedidas antes que ocorra ruptura na matriz da rocha, acarretando numa nova microfatura. O número de microfaturas é ditado pela expansão dos minerais, que é função da magnitude e orientação das tensões de confinamento e da integridade dos materiais de cimentação.

A presença de tensão de confinamento não uniforme resulta em uma expansão não uniforme dos minerais, e, portanto, em uma orientação das microfaturas, a qual deve ser função da orientação das tensões. A maioria das microfaturas deve abrir

perpendicularmente à tensão máxima, enquanto as outras microfaturas devem abrir-se opostamente à tensão mínima. Tal comportamento pode ser observado na Figura 2.13. Uma rocha descarregada com microfissuras orientadas aleatoriamente mostra a tendência de abertura das fissuras em qualquer orientação (Figura 2.13.a). Todavia, quando a tensão é aplicada (Figura 2.13.b), as fissuras perpendiculares à direção da tensão máxima compressional irão fechar, enquanto as fissuras paralelas a ela irão permanecer abertas.

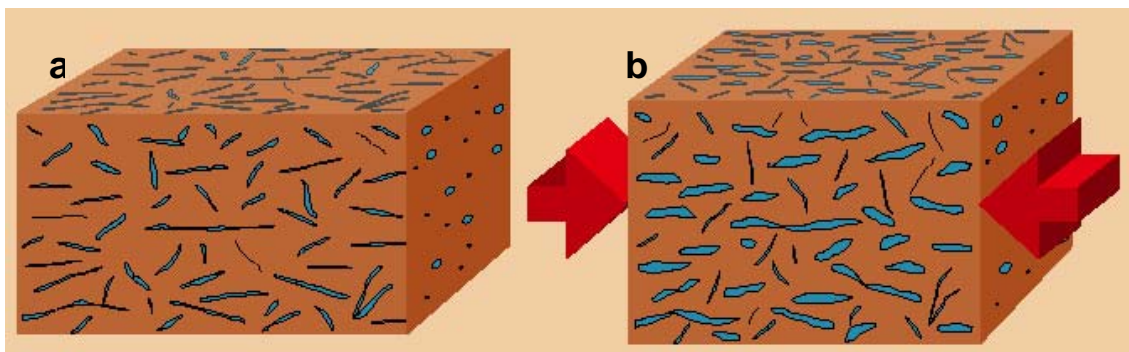


Figura 2.13. Rocha com microfaturas submetida a tensões compressivas não uniformes (LATIF, 2005).

A idéia de uma população de microfaturas alinhadas, difundidas através de todo testemunho, foi confirmada através de testes de emissão acústica e ondas P (medições de velocidade da onda no laboratório), que têm apresentado uma forte correspondência com o padrão de deformações recuperadas (TEUFEL, 1983, BUTTERWORTH *et al.*, 1991). Sabe-se que, em muitas rochas este alívio de tensões causa deformações anelásticas dependentes do tempo e produz microfaturas perpendicularmente à direção de tensão máxima da formação, como pode ser observado na Figura 2.14. Nesta Figura observa-se que o testemunho sofreu descarregamento após sua retirada da formação.

Os resultados de ensaio ASR de amostras retiradas de um testemunho, após diversos anos de sua recuperação, têm também mostrado curvas ASR típicas (BUTTERWORTH *et al.*, 1991). Isto leva a diferentes interpretações quanto aos mecanismos físicos: apenas a parte externa do testemunho pode ser envolvida no processo de relaxação, e/ou o processo pode ser significativamente influenciado por tensões paleológicas existentes no testemunho. No entanto, nenhuma destas observações é definitiva, e princípios físicos intrínsecos ao processo do ensaio ASR estão ainda em aberto para investigações (BLOCH, 1999).

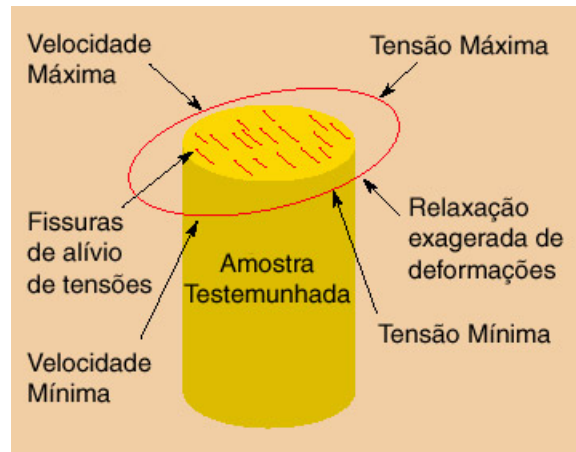


Figura 2.14. Testemunho removido da formação após descarregamento (LATIF, 2005).

A base teórica mais aceita para o processo de relaxação assume que os grãos de areia se tornam compactados e litificados. A energia armazenada no grão pode variar em diferentes direções, dependendo da magnitude de tensão existente em cada orientação. Quando um extrato rochoso é testemunhado, os grãos de areia esforçam-se para expandir elasticamente assim que as tensões estejam aliviadas, mas elas são retidas pela ligadura da cimentação.

Muitas dessas ligaduras serão eventualmente quebradas, formando uma população de microfaturas que são tipicamente representadas pelo processo de deformação anelástica, onde a maioria das microfaturas são preferencialmente alinhadas com o anterior campo de tensões (HILL *et al.*, 1994). As medidas das principais deformações da rocha causadas por cada abertura de microfatura podem determinar a direção da tensão principal (FERREIRA, 2002).

2.4.3 Ensaio ASR

Os equipamentos do ensaio ASR são portáteis, podendo ser utilizados em laboratório ou em campo. O equipamento de teste contém um controlador de temperatura e condicionadores de sinais para transdutores de deslocamento. Microcomputadores são associados para aquisição de dados. Até duas amostras podem ser colocadas em uma câmara, que tem o propósito de manter temperatura e umidade constantes durante o ensaio ASR. Cada amostra é instrumentada com 12 transdutores de deslocamento variáveis, em seis direções.

A Figura 2.15 mostra um sistema completo para o teste ASR (TERRATEK, 1995).



Figura 2.15. Sistema completo de teste ASR (TERRATEK, 1995).

2.4.4 Interpretação do Ensaio

O ensaio ASR mede as deformações em seis direções básicas, conforme mostrado na Figura 2.16 (BLOCH, 1999), que representa mais adequadamente as direções dos sensores de deslocamento de um poço vertical. Já a Figura 2.17 (BLOCH, 1999) mostra a orientação típica para a medição das deformações recuperadas em um ensaio ASR realizado em um testemunho retirado de um poço inclinado. E a Figura 2.18 apresenta os 12 sensores de deslocamento no equipamento tridimensional ASR fabricado pela TERRATEK (1995).

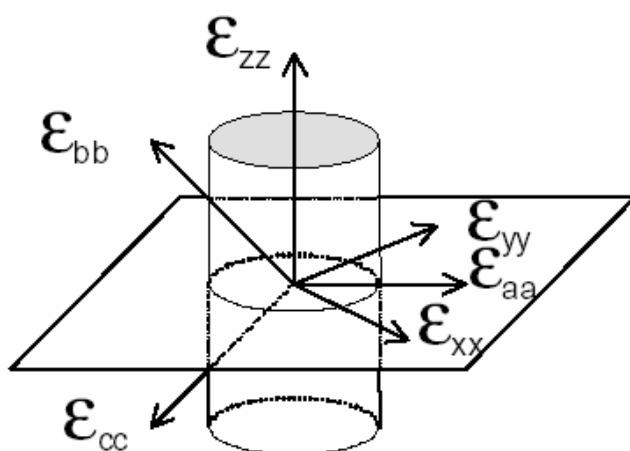


Figura 2.16. Direções das deformações do testemunho de um poço vertical (BLOCH, 1999).

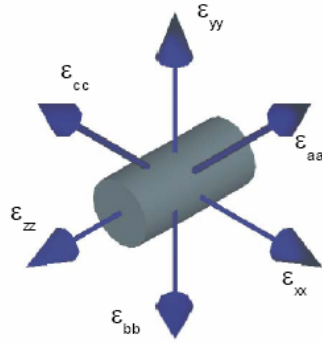


Figura 2.17. Orientação típica para a medição das deformações do testemunho de um poço inclinado (BLOCH, 1999).

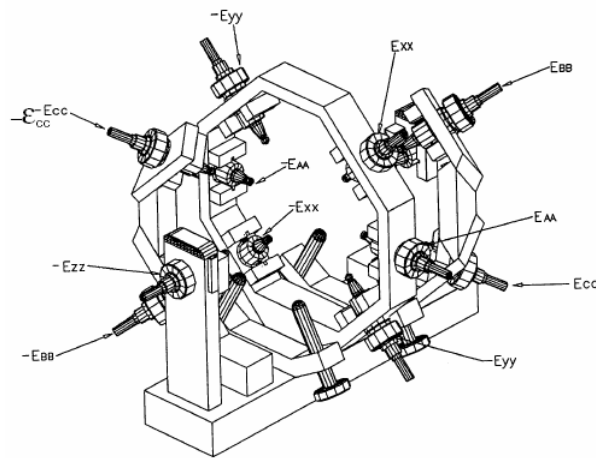


Figura 2.18. Sensores de deslocamento no ASR - 3D (TERRATEK, 1995).

A orientação das deformações principais é determinada pelo cálculo dos autovetores da matriz de deformações, dada por:

$$\bar{\delta} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_z \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^i & \frac{\varepsilon_{xx}^i - 2\varepsilon_{aa}^i + \varepsilon_{yy}^i}{2} & \frac{\varepsilon_{zz}^i - 2\varepsilon_{bb}^i + \varepsilon_{xx}^i}{2} \\ \frac{\varepsilon_{xx}^i - 2\varepsilon_{aa}^i + \varepsilon_{yy}^i}{2} & \varepsilon_{yy}^i & \frac{\varepsilon_{yy}^i - 2\varepsilon_{cc}^i + \varepsilon_{zz}^i}{2} \\ \frac{\varepsilon_{zz}^i - 2\varepsilon_{bb}^i + \varepsilon_{xx}^i}{2} & \frac{\varepsilon_{yy}^i - 2\varepsilon_{cc}^i + \varepsilon_{zz}^i}{2} & \varepsilon_{zz}^i \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

onde:

ε_{ww}^i = deformação da rocha na direção ww e no instante de tempo i da medida.

Embora o equipamento TERRATEK permita a medição das deformações em 6 direções, somente as deformações no plano perpendicular ao eixo da amostra ($\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{aa}$) são necessárias para o cálculo das deformações principais no plano horizontal referente à poços verticais. As demais direções são indispensáveis para poços inclinados.

As deformações horizontais principais (ε_{11} e ε_{22}) são obtidas em cada instante a partir de:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} + \sqrt{\varepsilon_{xy}^2 + \left[\frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2} \right]^2} \quad (2-2)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} - \sqrt{\varepsilon_{xy}^2 + \left[\frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2} \right]^2}$$

onde:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\varepsilon_{xx} - 2\varepsilon_{aa} - \varepsilon_{yy}}{2}$$

A determinação do tensor completo de deformações exige medidas distintas das deformações dos ensaios ASR, considerando as seguintes condições:

(i) A tensão vertical é tensão principal

Se uma das direções de deformação principal for conhecida, quatro medidas de deformações independentes são necessárias para determinar o tensor completo de deformações, provendo as direções medidas escolhidas adequadamente com relação a um único eixo. No caso em que a tensão vertical é uma tensão principal e o testemunho é vertical, são necessárias uma medição na direção vertical e três no plano transversal (BLOCH, 1999).

(ii) A tensão vertical não é tensão principal

No caso genérico em que a direção da tensão principal não é conhecida, são necessárias seis medições independentes de deformação para se determinar os seis componentes do tensor de deformação tridimensional (BLOCH, 1999).

(iii) A orientação das tensões principais *in situ* é conhecida

A testemunhagem para testes de ASR é geralmente orientada com a finalidade de associar as direções das deformações medidas no ensaio com o azimute do poço. Quando uma ferramenta de orientação de testemunhagem não estiver disponível, utiliza-se registros geológicos, como microscaneamento da formação e técnicas paleomagnéticas para orientar as amostras, apesar destes oferecerem acurácia reduzida (BUTTERWORTH *et al.*, 1991).

A análise da orientação das tensões principais dos testes de ASR pode ser realizada com razoável acurácia para rochas homogêneas e isotrópicas (TEUFEL, 1982, TEUFEL, 1983, EL RABBA e MEADOWS, 1986, OWEN *et al.*, 1988). Amostras de rocha, todavia, podem esconder heterogeneidades, não visíveis na face externa do testemunho, que podem afetar a deformação da rocha anisotropicamente, induzindo a erro na orientação das deformações principais.

2.4.5 Influência da Testemunhagem

(i) Tempo de testemunhagem

O testemunho a ser ensaiado deve ser instrumentado o quanto antes após a sua recuperação, visto que a maioria das deformaçõesanelásticas irão se desenvolver nas primeiras horas. Uma vez que a amostra esteja instrumentada, é vital que ela se mantenha a uma temperatura constante para minimizar os efeitos térmicos. A selagem da amostra também é importante para evitar a perda de umidade. A Figura 2.19 apresenta uma amostra de rocha envolta em filme plástico e instrumentada com os sensores de deslocamento (BLOCH, 2004).

A evaporação da umidade pode acarretar deformações dos poros devido à difusão e a conseqüente redistribuição da poropressão. Entretanto, qualquer que seja o processo para minimizar a perda da umidade da superfície do testemunho, a redistribuição dos fluidos dos poros no teste ASR não pode ser evitada, talvez

minimizada. Esta redistribuição de fluido se inicia no momento de perfuração e continua durante a extração da amostra do furo e transporte à superfície, devido à variação da poropressão na superfície externa do testemunho (BLOCH, 2004).

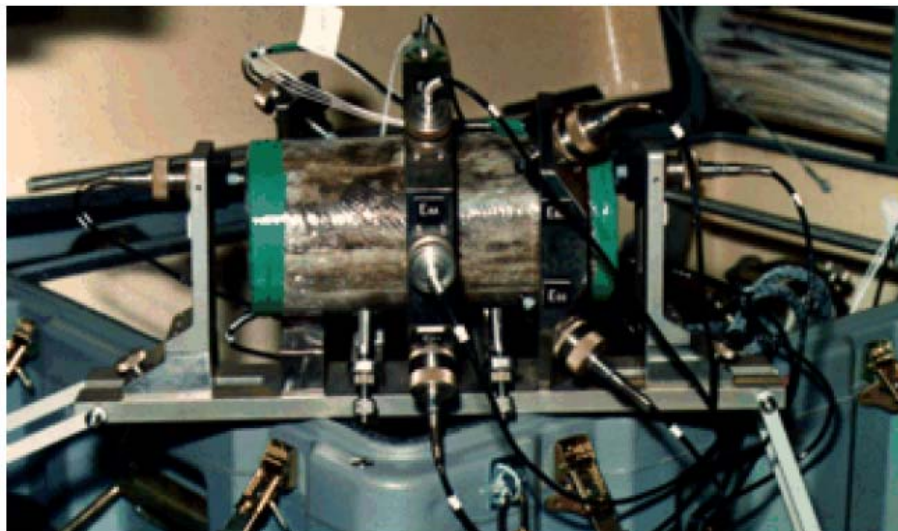


Figura 2.19. Amostra de rocha selada e instrumentada com os Sensores de Deslocamento no Equipamento ASR (BLOCH, 2004).

Em um teste ASR típico, as deformações dos testemunhos amostrados são monitoradas por 48 horas após a remoção do barrilete de testemunhagem. Deve-se observar que o processo de retirada do testemunho para fora do poço leva várias horas. Portanto, o início das medições deve ser o mais cedo possível, tipicamente 3 a 5 horas após o alívio de tensão. Como após a retirada do testemunho, a deformação decai exponencialmente com o tempo, os testes ASR são executados assim que a amostra se torna disponível na sonda de perfuração. Para reduzir ainda mais o tempo entre a retirada do testemunho e o ensaio, a amostra é retirada da parte inferior de todo testemunho, que é a última a ser testemunhada antes que o barrilete de testemunhagem seja puxado para a superfície. É importante lembrar que períodos típicos para obtenção de boas leituras de deformação anelásticas situam-se entre 20 e 30 horas após a remoção do barrilete de testemunhagem (FJÆR, 1992).

(ii) Representatividade do testemunho e efeitos da escala

Os testemunhos possibilitam a medição direta de parâmetros de resistência e propriedades elásticas estáticas, além da deformabilidade da rocha. Portanto, os testemunhos de ensaio devem ser representativos da formação que se pretende estudar, bem como devem se apresentar em estado preservado, não alterado durante

a testemunhagem e subsequente manuseio. Ressalta-se que alguns desses danos podem ser minorados pelo próprio método de preparação da amostra (FJÆR *et al.*, 1992).

Outro aspecto importante refere-se aos tamanhos freqüentemente reduzidos dos testemunhos e que podem não ser representativas do intervalo sob investigação, como por exemplo, para uma zona fraturada, em que as amostras de ensaio são retiradas da parte intacta. A limitada disponibilidade de material testemunhável acarreta uma grande incerteza nos resultados. Normalmente, testemunhos são retirados apenas do reservatório, enquanto o comportamento mecânico do extrato subjacente pode ter uma grande importância para problemas de perfuração ou afundamentos durante a depleção do reservatório.

Deve-se lembrar que o comportamento elástico do maciço fraturado é bem diferente do comportamento da rocha intacta. Isto significa que as propriedades importantes para análise de tensões são aquelas do maciço rochoso. Assim, a análise será tendenciosa. As amostras devem sempre que possível apresentar as fraturas naturais, todavia, para um ensaio ASR a amostra não pode ser fraturada, devendo o testemunho ser intacto. Por outro lado, em uma análise de produção de areia, as fraturas podem não ser relevantes, e as amostras devem ser retiradas da parte intacta da rocha (FJÆR *et al.*, 1992).

Portanto, o tamanho da amostra pode ser importante. Se as fraturas ocorrerem na escala de vários metros, então será bastante improvável que os testes em uma amostra pequena possam prover dados confiáveis. Fraturas e fissuras podem, todavia, ocorrer em várias escalas de comprimento, maiores ou menores que as escalas da amostras. Qualitativamente, isto produz um aumento de resistência com o decréscimo do tamanho da amostra.

Uma amostra é provavelmente alterada quando retirada das condições *in situ* para as condições de laboratório. *In situ*, ela pode se encontrar a 1 ou mais quilômetros de profundidade, em ambientes de temperatura de 50 a 150°C, e em equilíbrio químico com a sua pressão de fluido. Quando testemunhada ela é levada à superfície com modificações na sua pressão e temperatura. Além disto, ela entra em contato com a lama de perfuração e o filtrado de lama pode penetrar no testemunho. Define-se lama ou fluido de perfuração como uma mistura complexa de sólidos, líquidos e produtos químicos que possui basicamente as funções de limpar o fundo do

poço dos cascalhos gerados durante a perfuração e transportá-los para a superfície, exercer pressão hidrostática sobre as formações, além de resfriar e lubrificar a coluna de perfuração e a broca. Já o filtrado da lama de perfuração consiste na sua fase líquida, que invade a rocha durante a perfuração, formando uma camada sobre as rochas permeáveis (FJÆR *et al.*, 1992, THOMAS, 2001).

2.4.6 Vantagens e Desvantagens da Técnica ASR

Como qualquer método de medida de tensões *in situ*, a técnica ASR também apresenta vantagens e limitações.

As principais vantagens são as seguintes (BLOCH, 1999):

- a) Possibilidade de determinação do estado de tensões *in situ* tridimensional (orientação e magnitude) em uma amostra, contrariamente à grande variedade de técnicas baseadas no testemunho, capazes de fornecer o estado de tensões *in situ*, no máximo bidimensional;
- b) Ensaio de fácil execução e pouco dispendioso;
- c) Ensaio não destrutivo, isto é, as amostras permanecem disponíveis para qualquer outro propósito após o teste ASR;
- d) Operação de poço permanece inalterada na testemunhagem de amostras, exceto pela utilização de ferramentas de orientação dos testemunhos;
- e) Possibilidade de aplicação em situações nas quais o microfraturamento não é recomendado para a medição de tensões, devido ao risco de severos problemas de estabilidade de poço, onde as ferramentas tendem a ficar emperradas e de controle de poço (poços abertos não revestidos), além das dificuldades de isolamento de uma zona específica;
- f) Possibilidade de aplicação em poços tanto verticais quanto inclinados; pode ser usado em poços desviados desde que a relaxação de deformações seja medida em, no mínimo, seis direções, com a finalidade de permitir a determinação do completo tensor de deformações;

- g) A acurácia adequada para a determinação das orientações das tensões principais *in situ*.

A técnica ASR apresenta as seguintes limitações e/ou desvantagens:

- (i) Os princípios físicos não são completamente compreendidos: vários fatores permanecem indefinidos, assim como o efeito da anisotropia nos processos térmicos e a difusão da poropressão;
- (ii) Complexidade dos modelos para o cálculo de magnitudes de tensões, necessitando-se de vários parâmetros da rocha;
- (iii) Aplicação exclusiva em rochas bem consolidadas; a utilização do teste em arenitos inconsolidados e pouco consolidados provocou embutimento do transdutor na matriz não rígida e ausência de deformações mensuráveis (RAMOS *et al.*, 1994);
- (iv) Necessidade de orientação do testemunho, o que pode ser complexo e oneroso. A rotação do testemunho ou falta de ferramentas de orientação inutilizam a amostra para o ensaio ASR (OWEN *et al.*, 1988, RAMOS *et al.*, 1994);
- (v) Impossibilidade de aplicação em testemunhos com estrutura de microfraturas devido a tectonismos ou outras causas, visto que a tensão poderá ser aliviada pela existência de fraturas, com nenhuma relação com a orientação das tensões originais (WARPINSKI e TEUFEL, 1986, KUZLMAN *et al.*, 1992). Apenas porções não fraturadas dos testemunhos orientados podem ser usadas no ASR;
- (vi) A hipótese de comportamento linear viscoelástico para rochas pode ser questionável: se a direção da deformação principal mudar durante o teste, ele deverá ser descartado devido ao seu comportamento viscoso anisotrópico (BLOCH, 1999);
- (vii) O método ASR tem sido principalmente utilizado em poços a grandes profundidades, onde métodos como o fraturamento hidráulico são inviáveis.

Entretanto, a experiência tem indicado erros maiores na magnitude da tensão *in situ* menor quando são comparados os resultados da técnica ASR com a técnica de microfraturamento;

- (viii) Além dessas limitações, a utilização do método ASR pode ser consideravelmente prejudicada ou mesmo limitada por: (1) variações de temperatura produzindo deformações térmicas; (2) desidratação de amostras testemunhadas; (3) difusão da pressão do fluido do poro; (4) recuperação de deformações não homogêneas; (5) anisotropia da rocha; (6) interação do fluido de perfuração com a rocha; (7) deformações residuais; (8) tempo de recuperação do testemunho e (9) acurácia na orientação do testemunho (TEUFEL, 1998, NUNES, 1997).

3 CAPÍTULO 3

MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES *IN SITU* ATRAVÉS DA TÉCNICA ASR

Os modelos de interpretação das tensões obtidas através da técnica ASR têm como objetivo determinar a magnitude das tensões principais *in situ* utilizando as medidas das deformações recuperadas da amostra de rocha logo após a sua retirada do poço. Os primeiros modelos referentes à técnica ASR são baseados na teoria da viscoelasticidade linear, representados por BLANTON (1983), BLANTON e TEUFEL (1983), BLANTON (1986), WARPINSKI e TEUFEL (1989a), BLANTON (1989), MATSUKI e TAKEUCHI (1990), enquanto os modelos mais atuais são baseados na teoria da poroviscoelasticidade linear, tais como o de BRERETRON *et al.* (1995) e BLOCH (1999).

Este capítulo apresenta as hipóteses, características e formulações dos diferentes modelos de interpretação dos resultados da técnica ASR, os quais são listados a seguir:

- (i) BLANTON (1983);
- (ii) BLANTON e TEUFEL (1983);
- (iii) BLANTON (1986);
- (iv) WARPINSKI e TEUFEL (1989a);
- (v) BLANTON (1989);
- (vi) MATSUKI e TAKEUCHI (1990);
- (vii) BRERETRON *et al.* (1995);
- (viii) BLOCH (1999);

Antes de iniciar a apresentação dos modelos, é importante ressaltar alguns conceitos da viscoelasticidade e da poroelasticidade, que são a base para a formulação dos mesmos.

Cabe aqui ressaltar que as análises de sensibilidade que serão realizadas no Capítulo 5 são referentes apenas aos modelos de BLANTON (1983) e de BLANTON e

TEUFEL (1983), devido à carência de dados suficientes dos ensaios ASR e de laboratório das amostras ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2, apresentados no Capítulo 4, requeridos nos outros modelos.

3.1 Teoria da Viscoelasticidade Linear e da Poroelasticidade

Define-se reologia como a ciência que estuda a deformação imediata e o escoamento da matéria. Por deformação, entende-se a mudança de forma e dimensões de um certo corpo, sob a ação de um sistema de forças externas. O termo escoamento está associado à parcela de deformação dependente do tempo (SANTA MARIA, 1996).

Segundo FUNG (1965), denomina-se viscoelástico todo material que obedece a uma lei hereditária linear. Em outras palavras, refere-se a uma classe de materiais que mantêm linearidade entre tensão e deformação, mas esta relação linear depende de um terceiro parâmetro, o tempo. Tais materiais exibem características que não permitem sua classificação como puramente elásticos ou viscosos. Pode-se classificar os materiais segundo seu comportamento:

- (i) Perfeitamente elástico: quando as relações tensão *versus* deformação são lineares, independentes da velocidade da deformação, e inexistente qualquer outro efeito dependente do tempo;
- (ii) Inelástico: quando apresenta qualquer desvio da elasticidade perfeita, independente de sua natureza.

Os materiais com comportamento recuperável são aqueles em que, cessada a ação do carregamento, todas as deformações por ele induzidas se anulam, não havendo, portanto, deformações permanentes. Os materiais com comportamento dependente do tempo e recuperável são designados anelásticos. Anelasticidade, entretanto, pode ser definida de forma mais precisa em termos de duas restrições impostas às relações tensão *versus* deformação:

- (i) Linearidade;
- (ii) Relação final unívoca – para cada valor de tensão existe um único valor de deformação, após passado suficiente tempo.

Estas restrições conduzem à condição de total recuperação das deformações. Observa-se assim, que a anelasticidade é um caso particular da viscoelasticidade.

Um material é considerado viscoelástico linear quando, para um determinado tempo, a tensão é proporcional à deformação e é válido o princípio da superposição. Neste caso, a condição de relação unívoca é atendida.

As relações diversas entre tensão *versus* deformação e tensão *versus* tempo existentes na literatura técnica são basicamente empíricas. A maioria delas foi estabelecida de forma a se ajustar a resultados experimentais obtidos sob tensão e temperatura constantes. Ocorre, entretanto, que o comportamento real dos materiais tem mostrado que a deformação correspondente a um determinado tempo depende de todos os valores de tensão aos quais o material foi submetido no passado, e não de seu valor final. Assim, o fenômeno da fluência é afetado por toda a história de tensões do material. Baseado neste fato, diversos métodos matemáticos foram sugeridos para representar o comportamento viscoelástico dos materiais.

Uma outra forma bastante útil de representar o comportamento viscoelástico dos materiais é através do operador integral. Qualquer curva tensão *versus* tempo pode ser aproximada pela soma de uma série de funções degrau, que correspondem a uma série de incrementos de carga. A função de fluência $J(t)$ pode ser definida como a deformação por fluência resultante da ação de uma tensão unitária.

Para melhor compreender os mecanismos macroscópicos que regem o comportamento de um sistema real (físico), costuma-se substituir este sistema por um modelo mecânico ideal, denominado modelo reológico, que é composto por unidades básicas de molas, amortecedores e blocos de atrito dispostos em série ou em paralelo.

Os modelos viscoelásticos básicos, de interesse prático, são:

(i) Modelo Hookeano: É constituído por uma única mola, com comportamento linear, e tem resposta independente do tempo (fenômeno perfeitamente elástico). Para este modelo, a tensão σ é uma função linear da deformação ε e a relação tensão *versus* deformação é representada por uma constante de proporcionalidade E , módulo de elasticidade.

(ii) Modelo Newtoniano: É constituído por um único amortecedor, com comportamento linear, e tem resposta dependente do tempo (modelo perfeitamente viscoso). Se a tensão σ é uma função linear da velocidade de deformação, a relação tensão *versus* deformação é igual a η , constante de viscosidade ou constante do amortecedor.

(iii) Modelo tensão de escoamento: É constituído por um único bloco de atrito, com comportamento tensão *versus* deformação proporcional à função degrau, e tem resposta independente do tempo (fenômeno perfeitamente plástico).

Além disso, nos modelos viscoelásticos em questão, ocorrerá a representação integral das equações constitutivas. A vantagem do emprego da representação integral em relação à representação diferencial consiste na flexibilidade da representação das propriedades viscoelásticas do material que são obtidas diretamente dos ensaios. Além disso, a representação integral pode também ser estendida para descrever o comportamento de materiais que envelhecem e os efeitos de temperatura também podem ser facilmente incorporados (SANTA MARIA, 1996).

O comportamento viscoelástico da rocha é representado pelo modelo modificado de Kelvin (FLÜGGE, 1975), permitindo cada parâmetro da rocha variar de forma independente durante o processo de deformação, contrariando as formulações viscoelásticas existentes, as quais assumem uma função viscoelástica simples, função da deformação volumétrica da rocha (BLANTON, 1983, BLANTON, 1986).

Por outro lado, para compreender a teoria da Poroelasticidade, é importante não tratar as rochas como se fossem materiais sólidos homogêneos, pois, as rochas são geralmente materiais compostos, e, desta forma, não homogêneos numa escala microscópica. O comportamento mecânico das rochas depende, em grande parte, da parcela não sólida do material. Ressalta-se aqui a importância de levar em conta o espaço de vazios, que não é apenas essencial para o óleo ser produzido do reservatório, mas também tem grande importância no comportamento mecânico da rocha. Considera-se primeiramente uma descrição macroscópica da comunicação de porosidade e permeabilidade, que permite estudar tanto propriedades mecânicas estáticas quanto dinâmicas. Esta aproximação é baseada na teoria de BIOT.

O maior avanço com a aproximação poroviscoelástica foi dar uma explicação para a contração do testemunho, freqüentemente observado no ensaio ASR. Nenhum

dos modelos viscoelásticos (BLANTON, 1983, WARPINSKI e TEUFEL, 1989) pode ser aplicado adequadamente, pois na formulação viscoelástica não podem ser incluídos os efeitos da contração. O objetivo final da aproximação poroviscoelástica é permitir a computação das magnitudes das tensões quaisquer que sejam as deformações anelásticas: expansão, contração ou expansão e contração misturados, preenchendo uma brecha na literatura existente do ASR (BLOCH, 1999).

A partir de agora, serão detalhados os modelos para determinação das tensões *in situ* no ensaio ASR com sua configuração e formalismo matemático.

3.2 Modelo de BLANTON (1983)

O primeiro modelo de interpretação dos resultados dos ensaios ASR foi desenvolvido por BLANTON (1983). Através da teoria da viscoelasticidade, BLANTON (1983) mostrou que as magnitudes das tensões principais *in situ* podem ser calculadas através da recuperação de deformações anelásticas de um testemunho.

O modelo de BLANTON (1983) é um modelo direto, de fácil aplicação e estabelecido com as seguintes hipóteses:

- (i) Comportamento linear viscoelástico, homogêneo, não sujeito ao envelhecimento e isotrópico da rocha; esta hipótese explicita equações integrais, nas quais as deformações são função do tempo, devido ao histórico de tensões;
- (ii) Coeficientes de Poisson e de Biot são constantes durante o processo de recuperação das deformações;
- (iii) Descarregamento das tensões *in situ* no momento da testemunhagem, isto é, o estado original de tensão *in situ* é assumido igual à pressão atmosférica após o corte e a retirada do testemunho, ou seja, ocorre um descarregamento instantâneo da rocha;
- (iv) Tensão vertical (σ_v) assumida como tensão principal e igual à sobrecarga;
- (v) Poço vertical.

Segundo BLANTON (1983), a deformação anelástica $\varepsilon_{ij}(t)$ é determinada através da Equação 3-1:

$$\varepsilon_{ij}(t) = S_{ijkl} \int_0^t V(t-\tau) \frac{\partial \sigma'_{kl}(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (3-1)$$

onde:

S_{ijkl} : Matriz de compliância;

$V(t-\tau)$: Função de compliância global;

$(t - \tau)$: Intervalo de tempo;

$\sigma'_{kl}(t)$: Histórico de tensão efetiva;

σ'_{kl} : Tensão efetiva;

t : Tempo qualquer;

τ : Tempo de testemunhagem.

Quanto à hipótese de comportamento linear viscoelástico, vale comentar que as deformações recuperadas na rocha dependentes do tempo, ou seja, anelásticas, são resultado de uma reação viscoelástica resultante da remoção das tensões *in situ*.

Sistemas viscoelásticos geralmente envolvem um comportamento dependente do histórico de tensões e, desta forma, são descritos matematicamente por funções. Ao desenvolver relações entre as deformações medidas e as tensões *in situ*, utiliza-se uma teoria constitutiva viscoelástica baseada em integrais hereditárias. Esta aproximação é particularmente conveniente, pois ela não requer nenhum conhecimento dos mecanismos físicos envolvidos no processo anelástico, e isto pode ser observado através do emprego de uma função de compliância global. Além disso, essa teoria permite o tratamento de uma extensa faixa de materiais com modelos mecânicos baseados em mola e amortecedor. O ganho em generalidade não causa perda em utilidade e, de fato, este método é freqüentemente fácil de usar em aplicações.

As condições de homogeneidade e de superposição de Boltzman devem ser satisfeitas para que uma função seja linear, ou seja:

$$\begin{aligned} \varepsilon\{c\sigma\} &= c\varepsilon\{\sigma\} \\ \varepsilon\{\sigma_a + \sigma_b\} &= \varepsilon\{\sigma_a\} + \varepsilon\{\sigma_b\} \end{aligned} \quad (3-2)$$

onde:

ε : Deformações;

σ , σ_a , σ_b : Diferentes históricos de tensões;

c : Constante;

{ } : Usado para denotar uma função.

Conforme já comentado, a reação da deformação para uma contínua variação do histórico de tensões pode ser calculada através da integral hereditária, conhecendo apenas a reação padrão para um histórico de tensão pré-selecionado, através da Equação 3-3:

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t \varepsilon_H(t, \tau) \frac{d\sigma}{d\tau} d\tau \quad (3-3)$$

O padrão de reação da função de fluência utilizado na Equação 3-3, ε_H , é a reação de deformação para uma função denominada degrau unitário do histórico de tensões, $H(t)$, e serve como uma propriedade do material viscoelástico.

A Equação 3-3 pode ser então simplificada ao assumir que o material não apresenta envelhecimento, isto é, a deformação depende do tempo passado desde a aplicação da tensão e não do tempo relativo à idade do material. Com esta restrição, essa Equação toma a forma de uma integral de convolução:

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t \varepsilon_H(t - \tau) \frac{d\sigma}{d\tau} d\tau \quad (3-4)$$

A condição de linearidade também permite a extensão da Equação 3-4 de forma a expressar uma relação viscoelástica constitutiva tridimensional tal como:

$$\varepsilon_{ij}(t) = \int_0^t S_{ijkl}(t - \tau) \frac{\partial \sigma_{kl}}{\partial \tau} d\tau \quad (3-5)$$

onde:

$S_{ijkl}(t)$: Tensor de compliância de fluência.

As limitações do modelo de BLANTON (1983) são, na sua maioria, decorrentes das hipóteses assumidas. São elas:

- (i) Aplicável apenas na ausência de difusão de poropressão;
- (ii) Aplicável apenas na ausência de contração do testemunho, pois o modelo só foi testado em testemunhos nesta condição (BLOCH, 1999);
- (iii) Recomendado apenas para testemunhos de rocha isotrópicos e transversalmente isotrópicos;
- (iv) O sistema deve ser linear.

Observa-se ainda que as variações de temperatura freqüentemente têm grande influência na deformação viscoelástica e este modelo só foi testado em testemunhos que apresentam expansão (BLOCH, 1999).

BLANTON (1983) considerou dois casos de interesse prático: recuperação de testemunhos isotrópicos e transversalmente isotrópicos. No caso isotrópico, a única propriedade requerida do material é o coeficiente de Poisson, enquanto que no caso transversalmente isotrópico, são requeridos dois coeficientes de Poisson, assim como o coeficiente de compliância de fluência. O caso transversalmente isotrópico assume que a tensão vertical é paralela ao eixo de simetria das propriedades do material.

Os principais resultados para os dois casos são equações que permitem o cálculo de tensões horizontais *in situ* através de tensões verticais, deformações recuperadas principais e propriedades do material que independem do tempo.

3.2.1 Modelo de BLANTON Isotrópico (1983)

O modelo para material isotrópico postula as seguintes hipóteses:

- (i) rocha homogênea e linearmente viscoelástica;
- (ii) viscoelasticidade da rocha é obtida de um parâmetro viscoelástico (coeficiente de compliância com a fluência, $D(t)$, ou o módulo de relaxação, $E(t)$);
- (iii) coeficiente de Poisson independente do tempo
- (iv) remoção instantânea das tensões *in situ*.

Quando estas hipóteses são válidas, a magnitude da tensão principal *in situ* pode ser calculada, caso as três deformações principais e o coeficiente de Poisson sejam conhecidos, além de uma das tensões principais ser igual à tensão de sobrecarga, definida como tensão vertical atuante.

Para rocha isotrópica, a relação constitutiva pode ser expressa por:

$$\varepsilon_{ij}(t) = \int_0^t [1 + \nu_c(t - \tau)] D(t - \tau) \frac{\partial \sigma_{ij}(t)}{\partial \tau} d\tau - \delta_{ij} \int_0^t \nu_c(t - \tau) D(t - \tau) \frac{\partial \sigma_{kk}(t)}{\partial \tau} d\tau \quad (3-6)$$

onde:

δ_{ij} : Delta de Kronecker;

$D(t)$: Coeficiente de compliância com a fluência, $D(t) = \varepsilon\{H\}$.

A reação de deformação para uma função degrau unitária de tensão corresponde ao coeficiente de Poisson na fluência, ν_c , e é definida por:

$$\nu_c = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \text{ (independe do tempo)} \quad (3-7)$$

onde:

$\varepsilon_{11}(t)$ e $\varepsilon_{22}(t)$: Deformações principais medidas em um ensaio uniaxial de fluência.

O coeficiente de Poisson na fluência não é necessariamente igual ao coeficiente de Poisson medido em um ensaio de relaxação ou em um ensaio de taxa de deformação constante. Entretanto, se o coeficiente de Poisson em um destes ensaios for constante, ele será constante e igual em todos os ensaios.

Isto pode ser verificado assumindo-se $\nu_c(t)$ como constante, e calculando o coeficiente de Poisson através da Equação 3-7 em condições de carregamento correspondentes ao ensaio de relaxação e ao de taxa de deformação constante. Vale ressaltar que, em muitas aplicações de engenharia, o coeficiente de Poisson é assumido como constante, independentemente da solitação.

Se as medições das deformações recuperadas são feitas de tal forma que permitam o cálculo das deformações principais, então, as equações pertinentes são:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11}(t) &= \int_0^t D(t - \tau) \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \tau} d\tau - \nu \int_0^t D(t - \tau) \frac{\partial (\sigma_{22} + \sigma_{33})}{\partial \tau} d\tau \\ \varepsilon_{22}(t) &= \int_0^t D(t - \tau) \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial \tau} d\tau - \nu \int_0^t D(t - \tau) \frac{\partial (\sigma_{11} + \sigma_{33})}{\partial \tau} d\tau \end{aligned} \quad (3-8)$$

$$\varepsilon_{33}(t) = \int_0^t D(t-\tau) \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial \tau} d\tau - \nu \int_0^t D(t-\tau) \frac{\partial (\sigma_{11} + \sigma_{22})}{\partial \tau} d\tau$$

O histórico de tensões que mais se aproxima do descarregamento do testemunho é:

$$\begin{aligned} \sigma_{11}(t) &= \sigma_x [H(t) - H(t - \tau_o)] \\ \sigma_{22}(t) &= \sigma_y [H(t) - H(t - \tau_o)] \\ \sigma_{33}(t) &= \sigma_z [H(t) - H(t - \tau_o)] \end{aligned} \quad (3-9)$$

onde:

σ_x, σ_y e σ_z : Magnitudes das três tensões principais *in situ*;

$t - \tau_o$: Tempo de aplicação das tensões;

τ_o : Tempo correspondente ao momento de remoção das tensões.

O histórico de deformações correspondentes pode ser derivado usando o conjunto de Equações 3-9, derivadas no tempo nas Equações 3-8, que levam a uma nova forma:

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \tau} = \sigma_x [\delta(\tau) - \delta(\tau - \tau_o)] \quad (3-10)$$

onde:

$\delta(\tau)$: Função de Delta Dirac.

A deformação principal $\varepsilon_{11}(t)$ é, portanto, expressa por:

$$\varepsilon_{11}(t) = [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \int_0^t D(t-\tau) [\delta(\tau) - \delta(\tau - \tau_o)] d\tau \quad (3-11)$$

As deformações principais $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{33}(t)$ também podem ser expressas por equações similares à Equação 3-11. A integral da Equação 3.11 pode ser avaliada tomando vantagem da propriedade de peneiramento da função de Delta Dirac ($\delta(\tau)$), tal como se segue:

$$\int_{\tau_o-L}^{\tau_o+L} f(t)\delta(\tau - \tau_o)d\tau = f(\tau_o); \quad \text{para } L>0 \quad (3-12)$$

Assim, a Equação 3-11 pode ser simplificada e expressa por:

$$\varepsilon_{11}(t) = [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)][D(t) - D(t - \tau_o)] \quad (3-13)$$

De maneira análoga, ocorre para $\varepsilon_{22}(t)$ e $\varepsilon_{33}(t)$. Entre o tempo em que a rocha é descarregada (τ_o) e o tempo em que é realizada a primeira medição de deformação (t_1), a deformação elástica e uma porção da deformação dependente do tempo são perdidas. Finalmente uma última leitura é feita (t_2), estabilizado ou não o testemunho, e a magnitude de deformação diferencial para cada direção principal pode ser obtida por:

$$\Delta\varepsilon_x = \varepsilon_{11}(t_1) - \varepsilon_{11}(t_2)$$

$$\Delta\varepsilon_y = \varepsilon_{22}(t_1) - \varepsilon_{22}(t_2) \quad (3-14)$$

$$\Delta\varepsilon_z = \varepsilon_{33}(t_1) - \varepsilon_{33}(t_2)$$

Substituindo a Equação 3-13 nas Equações 3-14, são obtidas relações entre as medições das deformações diferenciais principais e as magnitudes originais das tensões principais:

$$\Delta\varepsilon_x = A[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\Delta\varepsilon_y = A[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (3-15)$$

$$\Delta\varepsilon_z = A[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

onde:

$$A = D(t_1) - D(t_1 - \tau_o) - D(t_2) + D(t_2 - \tau_o).$$

Existem cinco parâmetros desconhecidos no sistema das Equações 3-15: A , ν , σ_x , σ_y e σ_z . Ao eliminar dois destes parâmetros é possível determinar as magnitudes das tensões principais. A medida do coeficiente de Poisson (ν) é uma tarefa relativamente fácil ou ele pode ser estimado de ensaios anteriores desde que

não haja muita variação. Em muitos reservatórios, a tensão vertical (σ_z) pode ser assumida como principal e sua magnitude calculada através do peso de material sobrejacente (sobrecarga). Portanto, apenas três parâmetros restam desconhecidos: A , σ_x e σ_y .

Quanto ao termo A , que depende de $D(t)$, pode ser eliminado, e, desta forma obtém-se as equações desejadas para calcular a magnitude das tensões principais restantes, como a seguir:

$$\sigma_x = \sigma_z \frac{(1-\nu)\Delta\varepsilon_x + \nu(\Delta\varepsilon_y + \Delta\varepsilon_z)}{(1-\nu)\Delta\varepsilon_z + \nu(\Delta\varepsilon_x + \Delta\varepsilon_y)} \quad (3-16)$$

$$\sigma_y = \sigma_z \frac{(1-\nu)\Delta\varepsilon_y + \nu(\Delta\varepsilon_x + \Delta\varepsilon_z)}{(1-\nu)\Delta\varepsilon_z + \nu(\Delta\varepsilon_x + \Delta\varepsilon_y)}$$

As Equações 3-16 foram utilizadas por TEUFEL (1982) para calcular as tensões *in situ* no *DOE Multi Well Test Site*, com bons resultados.

A Figura 3.1 resume, sob a forma de um fluxograma, a seqüência de aplicação do modelo de BLANTON (1983) para rochas isotrópicas.

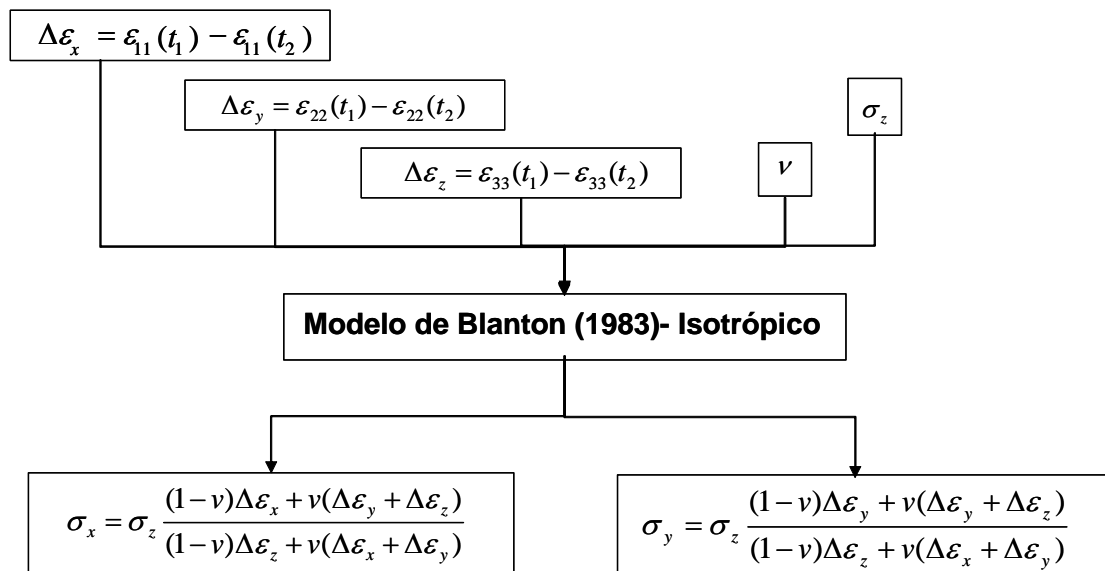


Figura 3.1. Fluxograma de cálculo do Modelo de BLANTON (1983) – Material Isotrópico.

3.2.1 Modelo de BLANTON Transversalmente Isotrópico (1983)

A presença de planos de acamamento em muitos reservatórios rochosos pode acarretar o desenvolvimento de um comportamento mecânico anisotrópico com propriedades distintas nesse plano e no plano perpendicular. Neste caso, a rocha deve ser considerada transversalmente isotrópica ou com anisotropia cruzada, onde o plano de acamamento corresponde ao plano de isotropia. A deformabilidade da rocha é composta por cinco parâmetros elásticos, os módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson perpendiculares e paralelos ao plano de isotropia, além do módulo cisalhante.

O tensor de compliância com a fluência, $S_{ijkl}(t)$, tem cinco componentes diferentes de zero. Todavia, um destes componentes pode ser eliminado, considerando uma tensão principal perpendicular ao eixo de acamamento e paralela ao eixo de simetria de propriedades do material. Escolhendo-se um eixo coordenado que coincida com a direção das tensões principais e assumindo constante o coeficiente de Poisson, as equações constitutivas pertinentes se tornam:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \int_0^t D_1(t-\tau) \frac{\partial(\sigma_{11} - \nu_1 \sigma_{22})}{\partial \tau} d\tau - \nu_2 \int_0^t D_2(t-\tau) \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial \tau} d\tau \\ \varepsilon_{22} &= \int_0^t D_1(t-\tau) \frac{\partial(\sigma_{22} - \nu_1 \sigma_{11})}{\partial \tau} d\tau - \nu_2 \int_0^t D_2(t-\tau) \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial \tau} d\tau \\ \varepsilon_{33} &= \int_0^t D_2(t-\tau) \frac{\partial[\sigma_{33} - \nu_2(\sigma_{11} + \sigma_{22})]}{\partial \tau} d\tau\end{aligned}\tag{3-17}$$

Usando os mesmos históricos de tensão apresentados para o caso isotrópico, as equações que relacionam as deformações principais diferenciais às propriedades dos materiais e às magnitudes das tensões principais podem ser oriundas das Equações 3-17 como se segue:

$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon_x &= A_1[(\sigma_x - \nu_1 \sigma_y) - \nu_2 A_2 \sigma_z] \\ \Delta \varepsilon_y &= A_1[(\sigma_y - \nu_1 \sigma_x) - \nu_2 A_2 \sigma_z] \\ \Delta \varepsilon_z &= A_2[\sigma_z - \nu_2(\sigma_x + \sigma_y)]\end{aligned}\tag{3-18}$$

onde:

$$A_1 = D_1(t_1) - D_1(t_1 - \tau_o) - D_1(t_2) + D_1(t_2 - \tau_o)$$

$$A_2 = D_2(t_1) - D_2(t_1 - \tau_o) - D_2(t_2) + D_2(t_2 - \tau_o)$$

As expressões para a magnitude das tensões principais podem ser obtidas resolvendo o sistema de Equações 3-18, obtendo-se o resultado sob a forma da matriz seguinte:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix} = \frac{1}{B} \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \varepsilon_x \\ \Delta \varepsilon_y \\ \Delta \varepsilon_z \end{pmatrix}$$

onde:

$$B = (1 + \nu_1)A_1[(1 - \nu_1)A_1 - 2\nu_2^2 A_2] \quad (3-19)$$

$$C_{11} = A_1 - \nu_2^2 A_2$$

$$C_{12} = \nu_1 A_1 - \nu_2^2 A_2$$

$$C_{13} = (1 + \nu_1)\nu_2 A_1$$

$$C_{33} = (1 - \nu_1^2)A_1^2 / A_2$$

Os coeficientes A_1 e A_2 , correspondentes às Equações 3-18 e presentes nas Equações 3-19, são funções dependentes do tempo, de $D_1(t)$ e $D_2(t)$.

Na situação onde a rocha estava em equilíbrio estático antes da remoção das tensões, tem-se que $D_1(t) = D_2(t)$. Logo, A poderia ser avaliado em função do tempo transcorrido, como descrito a seguir:

$$A = D(t_2 - \tau_o) - D(t_1 - \tau_o) \quad (3-20)$$

Por sua vez, uma simplificação mais significativa pode ser alcançada se o comportamento da rocha dependente do tempo for controlado por um constituinte isotrópico e se a anisotropia for decorrente de elementos essencialmente elásticos. Para materiais de engenharia assim compostos, a compliância com a fluência é proporcional, e a dependência no tempo é contida num termo isolado.

Assumindo que $aD_1(t) = D_2(t)$, pode-se eliminar A_2 da equação 3-19. Desta forma, o cálculo é análogo ao do material isotrópico para obtenção das equações para as tensões principais horizontais que não contêm nenhuma propriedade do material dependente do tempo. Tratando-se σ_z como um termo conhecido da Equação 3-19, obtém-se:

$$\sigma_x = a\sigma_z \frac{(1 - \nu_2^2 a)\Delta\varepsilon_x + (\nu_1 + \nu_2^2 a)\Delta\varepsilon_y + (1 + \nu_1)\nu_2\Delta\varepsilon_z}{(1 + \nu_1)[(1 - \nu_1)\Delta\varepsilon_z + \nu_2 a(\Delta\varepsilon_x \Delta\varepsilon_y)]} \quad (3-21)$$

$$\sigma_y = a\sigma_z \frac{(1 - \nu_2^2 a)\Delta\varepsilon_y + (\nu_1 + \nu_2^2 a)\Delta\varepsilon_x + (1 + \nu_1)\nu_2\Delta\varepsilon_z}{(1 + \nu_1)[(1 - \nu_1)\Delta\varepsilon_z + \nu_2 a(\Delta\varepsilon_x \Delta\varepsilon_y)]}$$

Concluindo, as deformações recuperadas de um material isotrópico e transversalmente isotrópico podem ser obtidas através das Equações 3-16 e 3-21, respectivamente. Os dados de entrada em comum são a tensão vertical, as deformações principais e as propriedades do material que independem do tempo.

Várias hipóteses do modelo de BLANTON (1983) podem requerer verificações experimentais, tais como a linearidade, coeficiente de Poisson constante, isotropia e coeficientes de compliância na fluência. Um tipo de experimento que é particularmente realizado é o ensaio de recuperação de fluência. A principal razão para se recomendar este ensaio é que o histórico de carregamento é similar ao usado nas equações. Uma outra vantagem é que os dados são gerados por dois tipos de carregamento, desta forma provendo uma verificação na linearidade. Deve-se tomar cuidado, todavia, para correção dos efeitos de carregamentos e descarregamentos transientes.

As hipóteses de não envelhecimento e isoterminia são restrições nas técnicas usadas para medição de deformações recuperadas. A secagem do testemunho é uma forma de envelhecimento. Assim, cuidados especiais devem ser tomados para preservar o testemunho enquanto as medições são feitas. Mudanças de temperatura freqüentemente têm grande influência na deformação viscoelástica. Logo, condições isotérmicas devem ser mantidas.

A Figura 3.2 resume a seqüência de passos exigida para a determinação das tensões *in situ* através das medidas de deformações recuperadas, utilizando-se o modelo de BLANTON (1983) para materiais transversalmente isotrópicos.

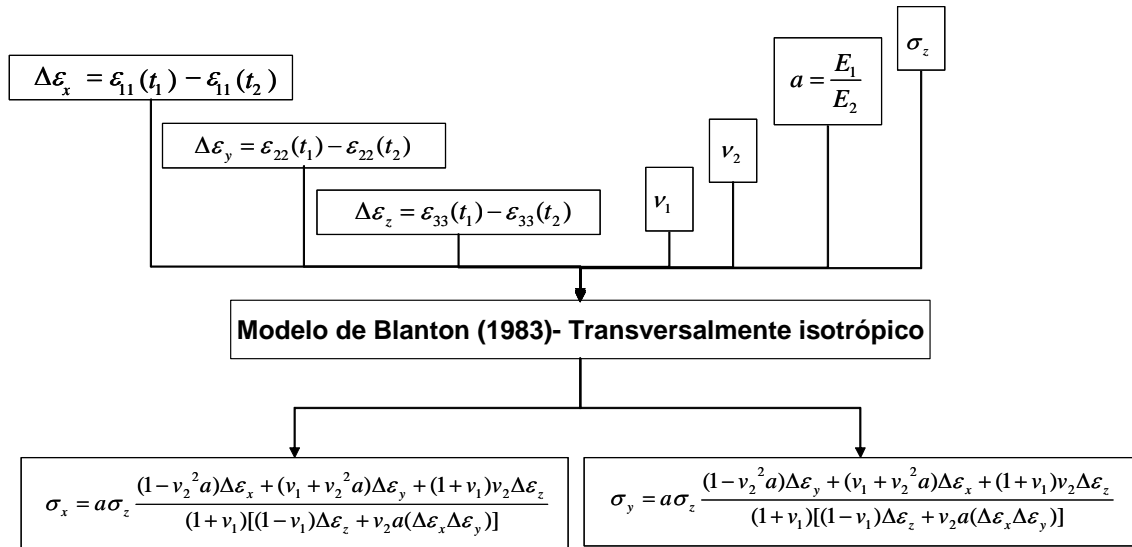


Figura 3.2. Fluxograma de cálculo do Modelo de BLANTON (1983) – Material Transversalmente Isotrópico.

3.2.2 Modelo de BLANTON (1983) Modificado por FJÆR (1992)

Outra forma de computação das magnitudes das tensões principais do modelo de BLANTON (1983) é proposta por FJÆR (1992), incluindo-se um parâmetro anelástico do material e um coeficiente de Poisson (ν) constante. Assume-se que esse coeficiente é conhecido através de outras fontes, devendo ser determinado através de um ensaio mecânico do testemunho de rocha. O parâmetro anelástico é determinado pela estimativa da tensão vertical através da integração de registros de densidade. As duas tensões horizontais, então, podem ser computadas (FJÆR, 1992).

A direção das tensões principais é determinada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (3-22)$$

Sabe-se que ε_x e ε_y são as deformações medidas nas direções x e y, respectivamente, e ε_r é a deformação radial na direção que faz um ângulo θ com o

eixo x. Assumindo que as direções x e y são as direções das deformações principais, tem-se que:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta \quad (3-23)$$

Durante o ensaio ASR são feitas medidas de deformação nas três direções horizontais: $\varepsilon_r(\theta)$ medida a 0° , $\varepsilon_r(\theta + 45)$ medida a 45° e $\varepsilon_r(\theta + 90)$ medida a 90° (Figura 3.3), as quais são corrigidas em função dos efeitos da variação de temperatura ocorrida durante o ensaio.

As deformações ε_1 , ε_2 e o ângulo θ são determinados através das seguintes expressões:

$$\varepsilon_r(\theta) = \varepsilon_1 \cos^2 \theta + \varepsilon_2 \sin^2 \theta \quad (3-24)$$

$$\varepsilon_r(\theta + 45) = \varepsilon_1 \cos^2(\theta + 45) + \varepsilon_2 \sin^2(\theta + 45) = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \sin 2\theta \quad (3-25)$$

$$\varepsilon_r(\theta + 90) = \varepsilon_1 \sin^2 \theta + \varepsilon_2 \cos^2 \theta \quad (3-26)$$

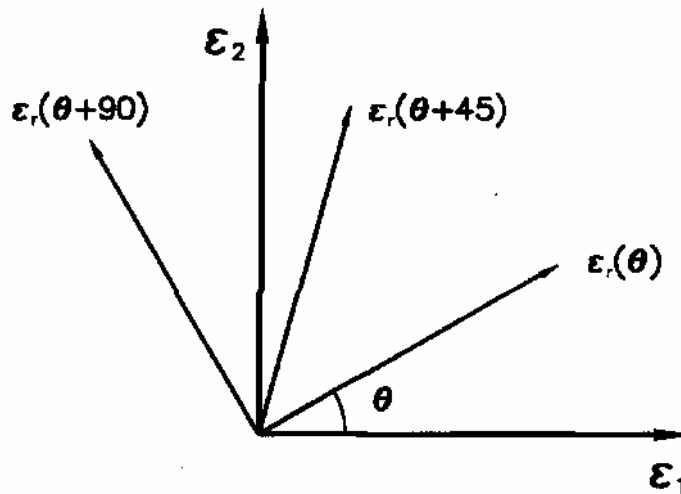


Figura 3.3. Direções das deformações medidas no ensaio ASR (FJÆR, 1992).

Somando-se as Equações 3-24 e 3-26, obtém-se a seguinte equação:

$$\varepsilon_r(\theta) + \varepsilon_r(\theta + 90) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (3-27)$$

Subtraindo-se a Equação 3-24 da Equação 3-26, obtém-se:

$$\varepsilon_r(\theta) - \varepsilon_r(\theta + 90) = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cos 2\theta \quad (3-28)$$

Inserindo-se as Equações 3-27 e 3-28 na Equação 3-25, chega-se à Equação 3-29:

$$\frac{\varepsilon_r(\theta) - \varepsilon_r(\theta + 90)}{2} \tan 2\theta = \frac{\varepsilon_r(\theta) + \varepsilon_r(\theta + 90)}{2} - \varepsilon_r(\theta + 45) \quad (3-29)$$

Desta forma, determina-se θ através da Equação 3-30:

$$\tan 2\theta = \frac{\varepsilon_r(\theta) + \varepsilon_r(\theta + 90) - 2\varepsilon_r(\theta + 45)}{\varepsilon_r(\theta) - \varepsilon_r(\theta + 90)} \quad (3-30)$$

Determina-se então ε_1 , ε_2 através das expressões seguintes:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_r(\theta) + \varepsilon_r(\theta + 90) + \frac{\varepsilon_r(\theta) - \varepsilon_r(\theta + 90)}{\cos 2\theta} \right) \quad (3-31)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_r(\theta) + \varepsilon_r(\theta + 90) - \frac{\varepsilon_r(\theta) - \varepsilon_r(\theta + 90)}{\cos 2\theta} \right) \quad (3-32)$$

No método de BLANTON (1983), as tensões principais são determinadas de forma simples através das deformações principais. Além disso, assume-se que a tensão é aliviada progressivamente quando o testemunho é retirado e descreve o desenvolvimento das deformações anisotrópicas através da substituição de $1/E$ por um termo de compliância dependente do tempo ($C_E(t)$). Desta forma, a deformação principal ε_1 pode ser expressa por:

$$\varepsilon_1(t) = C_E(t)(\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)) \quad (3-33)$$

E similarmente para $\varepsilon_2(t)$ e $\varepsilon_3(t)$.

Em um ensaio, monitora-se a amostra a partir de um instante de tempo t_1 após a liberação das tensões, até certo tempo t_2 . Portanto, as deformações diferenciais ao longo deste período são:

$$\Delta\varepsilon_1 = \varepsilon_1(t_2) - \varepsilon_1(t_1) = [C_E(t_2) - C_E(t_1)][(\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3))] \quad (3-34)$$

$$\Delta\varepsilon_2 = \varepsilon_2(t_2) - \varepsilon_2(t_1) = [C_E(t_2) - C_E(t_1)][(\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3))] \quad (3-35)$$

$$\Delta\varepsilon_3 = \varepsilon_3(t_2) - \varepsilon_3(t_1) = [C_E(t_2) - C_E(t_1)][(\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2))] \quad (3-36)$$

Considerando-se que $A = C_E(t_2) - C_E(t_1)$, têm-se três equações (Equações 3-34, 3-35 e 3-36) para determinar cinco parâmetros: A , ν , σ_1 , σ_2 e σ_3 . Assumindo-se que σ_3 é igual a σ_v , e que ν é conhecido, soluciona-se o sistema para os parâmetros A , σ_1 e σ_2 . Logo, as equações para obtenção dos valores de σ_1 e σ_2 são:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{(1-\nu)\Delta\varepsilon_1 + \nu(\Delta\varepsilon_2 + \Delta\varepsilon_3)}{(1-\nu)\Delta\varepsilon_3 + \nu(\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2)} \quad (3-37)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 \frac{(1-\nu)\Delta\varepsilon_2 + \nu(\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_3)}{(1-\nu)\Delta\varepsilon_3 + \nu(\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2)} \quad (3-38)$$

Em uma situação real, as tensões σ_1 , σ_2 e σ_3 são efetivas, e portanto, a poropressão (P_p) e a constante de Biot (α) devem ser conhecidas com razoável acurácia. Adicionalmente, utiliza-se, como estimativa do ν viscoelástico, um ν constante e elástico determinado através de ensaios de laboratório convencionais. Outro problema é que o método usa apenas os dados no intervalo de tempo entre os instantes de medição das deformações t_1 e t_2 .

3.3 Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)

O modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) se diferencia do modelo de BLANTON (1983) por incluir o efeito da poropressão, tanto no caso de recuperação de um testemunho isotrópico quanto de um testemunho transversalmente isotrópico.

3.3.1 Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) Isotrópico

Considerando materiais isotrópicos, o modelo viscoelástico de BLANTON e TEUFEL (1983) permite a determinação das magnitudes das tensões principais horizontais, através das relações entre deformações principais ($\varepsilon_{Hmáx}$, $\varepsilon_{Hmín}$ e ε_v), coeficiente de Poisson (ν), tensão vertical (sobrecarga) efetiva (σ_{ve}), poropressão (P_p) e coeficiente de Biot (α);

$$\sigma_{Hmáx} = \sigma_{ve} \frac{(1-\nu)\Delta\varepsilon_{Hmáx} + \nu(\Delta\varepsilon_{Hmín} + \Delta\varepsilon_v)}{(1-\nu)\Delta\varepsilon_v + \nu(\Delta\varepsilon_{Hmáx} + \Delta\varepsilon_{mín})} + \alpha P_p \quad (3-39)$$

$$\sigma_{Hmín} = \sigma_{ve} \frac{(1-\nu)\Delta\varepsilon_{Hmín} + \nu(\Delta\varepsilon_{Hmáx} + \Delta\varepsilon_v)}{(1-\nu)\Delta\varepsilon_v + \nu(\Delta\varepsilon_{Hmín} + \Delta\varepsilon_{máx})} + \alpha P_p \quad (3-40)$$

A tensão vertical (sobrecarga) efetiva (σ_{ve}) é calculada através de:

$$\sigma_{ve} = \sigma_v - \alpha P_p \quad (3-41)$$

Onde σ_v é a tensão total vertical (sobrecarga devida ao carregamento gravitacional), usando uma densidade média γ , e a poropressão P_p é usualmente determinada através de ensaios *in situ* no poço, com α assumido igual a um.

A Figura 3.4 resume a seqüência de cálculos para a determinação das tensões *in situ* através do modelo de BLANTON e TEUFEL (1983), aplicado a rochas isotrópicas.

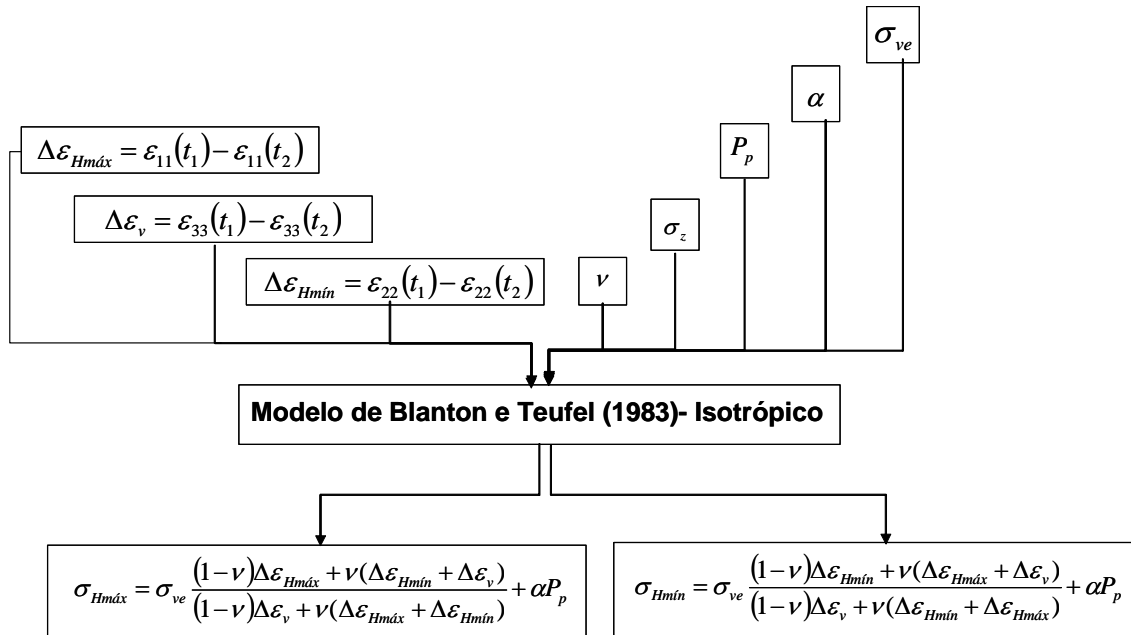


Figura 3.4. Fluxograma de cálculo do Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) - Isotrópico.

3.3.2 Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) Transversalmente Isotrópico

As relações do material transversalmente isotrópico são consideravelmente mais complexas. Porém, alguns resultados podem ser simplificados quando o eixo de simetria das propriedades do material é paralelo a uma das tensões principais e uma tensão é conhecida. Isto corresponde a uma rocha com planos horizontais de acamamento e a tensão principal vertical se iguala à tensão vertical (sobrecarga). Para estas condições, e conhecendo-se os coeficientes de Poisson ν_1 e ν_2 , as magnitudes das outras duas tensões podem ser calculadas pelas equações:

$$\sigma_{Hmáx} = a \sigma_{ve} \frac{(1-\nu_2^2 a) \Delta \varepsilon_{Hmáx} + (\nu_1 + \nu_2^2 a) \Delta \varepsilon_{Hmín} + (1+\nu_1) \nu_2 \Delta \varepsilon_v}{(1+\nu_1)[(1-\nu_1) \Delta \varepsilon_v + \nu_2 a (\Delta \varepsilon_{Hmáx} \Delta \varepsilon_{Hmín})]} + \alpha P_p \quad (3-42)$$

$$\sigma_{Hmín} = a \sigma_{ve} \frac{(1-\nu_2^2 a) \Delta \varepsilon_{Hmín} + (\nu_1 + \nu_2^2 a) \Delta \varepsilon_{Hmáx} + (1+\nu_1) \nu_2 \Delta \varepsilon_v}{(1+\nu_1)[(1-\nu_1) \Delta \varepsilon_v + \nu_2 a (\Delta \varepsilon_{Hmáx} \Delta \varepsilon_{Hmín})]} + \alpha P_p$$

O coeficiente de compliância de *fluência* (a) de BLANTON e TEUFEL (1983) é determinado pela razão entre os módulos de elasticidade nas direções horizontal (E_1) e vertical (E_2), medidos em um ensaio convencional de taxa de deformação constante, por exemplo, $a = E_1/E_2$.

A Figura 3.5 resume a seqüência de cálculos para a determinação das tensões *in situ* através do modelo de BLANTON e TEUFEL (1983), aplicado a rochas transversalmente isotrópicas.

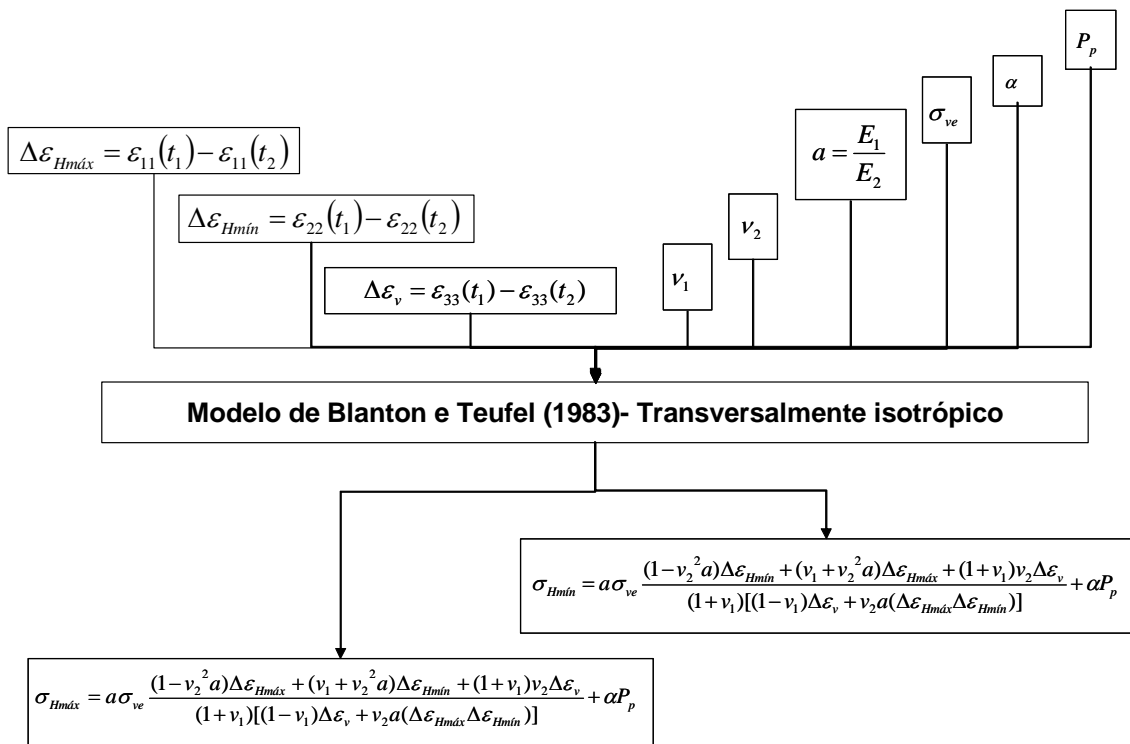


Figura 3.5. Fluxograma de cálculo do Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) - Transversalmente Isotrópico.

3.4 Outros Modelos

A literatura apresenta diversos modelos posteriores aos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983), os quais são formulados considerando aspectos diversos em relação aos modelos pioneiros. Nesta seção, resume-se as características principais destes modelos.

3.4.1 Modelo de BLANTON (1986)

O modelo de BLANTON (1986) é o modelo adotado pela empresa Terratek para a determinação das tensões principais *in situ*. Além da fabricação do equipamento de ensaio, a Terratek também oferece um programa de interpretação dos resultados do ensaio ASR baseado no modelo de BLANTON (1986).

Conforme já comentado, a direção vertical é uma das direções de tensão principal e sua magnitude é igual à tensão de sobrecarga, que pode ser estimada pela

integração contínua dos registros de densidade do maciço rochoso. Alternativamente, a magnitude das tensões pode ser computada para qualquer distribuição de tensão principal, caso os ensaios de propriedades mecânicas em laboratório sejam feitos para determinar valores de fatores de compliância de *fluência*.

O modelo de BLANTON (1986) leva em consideração os efeitos da poropressão, temperatura e anisotropias do testemunho, o qual deve ser orientado, intacto, relativamente homogêneo e selado, para prevenir a evaporação da umidade. Esse modelo pode ser aplicado ao testemunho de um poço desviado através da medição dos eixos apropriados. Neste caso, o testemunho não irá sempre expandir em todas as direções e de fato elevados coeficientes de Poisson e elevadas tensões desviatórias podem realmente induzir a contração do testemunho.

O cálculo de tensões pelo modelo de BLANTON (1986) através das deformações inclui o efeito do descarregamento gradual experimentado pelo testemunho após sua recuperação. Isto representa uma melhora em relação aos modelos anteriores, que são derivados da hipótese de que há um descarregamento instantâneo do testemunho. Se não for razoável assumir que uma das tensões principais seja vertical, então as três tensões principais devem ser calculadas independentemente e o erro associado à hipótese de descarregamento instantâneo pode ser grande. Nestas situações, as equações que incluem o efeito do descarregamento gradual devem ser usadas.

Os parâmetros necessários para a determinação das tensões *in situ* são o coeficiente de Poisson (ν), o módulo de Young (E), a constante poroelástica de BIOT (α), a pressão do reservatório (p') e a estimativa da tensão vertical (σ'_{11}).

No modelo, considera-se que a caracterização do campo de tensões *in situ* é dada por:

$$\sigma'_{ij} = \sum'_{ij} - \beta_{ij} p'(t) \quad (3-43)$$

onde:

σ'_{ij} : Componente de tensão efetiva;

\sum'_{ij} : Componente de tensão total;

β_{ij} : Termo de Coeficiente de poropressão;

$p'(t)$: Poropressão do reservatório.

Para um material isotrópico, a Equação 3-43 pode ser reescrita em termos de um coeficiente de poropressão único (β), que equivale ao α utilizado em outros modelos, tal como:

$$\sigma'_{ij} = \sum_{ij} \delta_{ij} \cdot \beta \cdot p'(t) \quad (3-44)$$

onde:

δ_{ij} : Delta de Kronecker ($\delta_{ij} \rightarrow 1$; para $i = j$ e $\delta_{ij} \rightarrow 0$; para $i \neq j$).

Durante a testemunhagem e recuperação da amostra, as tensões são removidas, pois o testemunho é descarregado. O histórico desse descarregamento, apresentado na Figura 3.6, fornece importantes informações para o entendimento do comportamento desse testemunho. Durante a sua recuperação, o testemunho é submetido à tensão *in situ* de algum tempo no passado geológico, referenciado como tempo zero (t_o), em função do tempo de liberação do testemunho ou separação do meio circundante natural. A seguir, em qualquer tempo t , as tensões nos testemunhos são representadas como $\sigma'_{ij}(t)$ e a poropressão como $p(t)$.

A relação constitutiva para o comportamento elástico de um maciço isotrópico é dada por:

$$\sigma'_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{ij} + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \quad (3-45)$$

No tempo t_o , as tensões limites do testemunho caem instantaneamente de seus valores originais *in situ* para a pressão do fluido de perfuração. Se a pressão do fluido de perfuração for aproximadamente igual à pressão do reservatório p' , a queda instantânea da tensão do testemunho pode ser representada como $\sigma'_{ij} \rightarrow \delta_{ij} p$. O testemunho atinge a superfície no tempo t_1 . Durante o intervalo de tempo $t_1 - t_o$, isto

é, durante a viagem de saída do testemunho do furo de perfuração, as tensões e poropressões no testemunho podem se reduzir a zero simultaneamente. Para simplificação matemática, assume-se que estas tensões variam com taxa constante. A recuperação das deformações ocorre durante este intervalo de tempo a uma taxa reduzida. Acima do tempo t_1 , as tensões mantêm-se iguais a zero e as deformações são recuperadas continuamente de maneira assintótica.

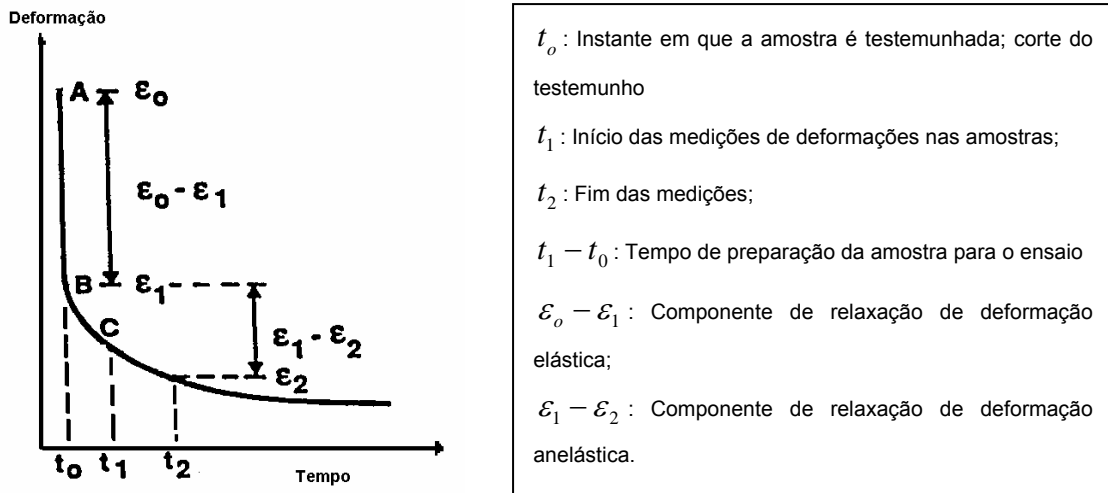


Figura 3.6. Histórico esquemático de descarregamento de um testemunho recuperado do poço (TERRATEK, 1995).

A relação constitutiva para o material padrão poroso viscoelástico (com poropressão) é dada por:

$$\epsilon_{ij}(t) = S_{ijkl} \int_0^t V(t-\tau) \frac{\partial \sigma_{kl}(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (3-46)$$

onde:

$\epsilon_{ij}(t)$: Componente de deformação no tempo t ;

$\sigma_{kl}(\tau)$: Componente de tensão em qualquer tempo τ ;

S_{ijkl} : Matriz de compliância elástica, em que o módulo E é substituído pela constante $1/D$.

Ressalta-se que, se a maior tensão principal *in situ* (σ'_{11}) for a tensão vertical (sobrecarga) atuando na direção vertical, as outras duas tensões principais podem ser

determinadas indiretamente, sem um conhecimento explícito da função viscoelástica e seus coeficientes.

A determinação das tensões principais σ'_{22} e σ'_{33} , quando σ'_{11} for conhecido, pode ser realizada de acordo com as seguintes etapas:

(i) Determinação das deformações diferenciais principais recuperadas $\Delta\varepsilon_{11}$, $\Delta\varepsilon_{22}$ e $\Delta\varepsilon_{33}$ através de dados de deformações recuperadas, medidas por todo o período de amostragem;

Portanto, as deformações diferenciais recuperadas para qualquer tempo, t_1 até t_2 , podem ser calculadas através de:

$$\varepsilon_{ij}(t) = -[\varepsilon_{ij}(t_2) - \varepsilon_{ij}(t_1)] \quad (3-47)$$

(ii) Determinação de ω_1 em todos os pontos de dados e os valores correspondentes à $\Delta t = t_2 - \tau_o$ com valor medido do coeficiente de Poisson ν . O valor de t_2 é o tempo correspondente a cada ponto dado;

(iii) Determinação de $\partial\omega_1/\partial\Delta t$ em cada ponto dado e encaixe de curva exponencial. Esta determinação permite calcular as constantes a e b , e, por conseguinte, n e (CD_n) ;

Derivando-se ω_1 com respeito a Δt , tem-se que:

$$\frac{\partial\omega_1}{\partial\Delta t} = \frac{CD_n}{n} e^{-\frac{\Delta t}{n}} \quad \text{ou} \quad \frac{\partial\omega_1}{\partial\Delta t} = ae^{b\Delta t} \quad (3-48)$$

e

$$a = \frac{CD}{n}$$

$$b = \frac{1}{n} \quad (3-49)$$

(iv) Determinação de V_m/V_o utilizando os valores de n , τ_o e τ_1 na Equação 3-50;
 Considera-se que, se o tempo for calculado pelo início do histórico geológico, isto é, t_1 e t_2 infinitamente grandes, os termos $e^{-t_1/n}$ e $e^{-t_2/n}$ tendem a zero e podem ser desprezados.

$$\frac{V_m}{V_o} = \frac{n}{\Delta\tau} \left(e^{\frac{\Delta\tau}{n}} - 1 \right) - 1 \quad (3-50)$$

(v) Determinação de (DD_n) multiplicando-se a pela constante D_n , obtendo assim os valores conhecidos de CD_n , σ'_1 , β , p' , e V_m/V_o ;

$$\omega_1 = D \left[\sigma'_{11} + \frac{V_m}{V_o} (1 - \beta) p' \right] V_o = CV_o = -CD_n \left[e^{-\frac{t_2 - \tau_o}{n}} - e^{-\frac{t_1 - \tau_o}{n}} \right] \quad (3-51)$$

$$\text{ou } C = D \left[\sigma'_{11} + \frac{V_m}{V_o} (1 - \beta) p' \right] \quad (3-52)$$

(vi) Obtenção do termo $V_m D$ multiplicando-se a equação pela constante D , determinando assim os valores conhecidos de (DD_n) , CD_n , τ_o , $\Delta\tau$, n e valores apropriados selecionados para t_1 e t_2 (instantes de tempo correspondentes à primeira e à última leitura);

(vii) Obtenção de ω_1 , ω_2 e ω_3 , utilizando-se os parâmetros $\Delta\varepsilon_{11}$, $\Delta\varepsilon_{22}$, $\Delta\varepsilon_{33}$, valores para o intervalo entre os tempos selecionados t_1 e t_2 ;

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{(1 - 2\nu)\Delta\varepsilon_{11} + \Delta\varepsilon_{kk}\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \\ \omega_2 &= \frac{(1 - 2\nu)\Delta\varepsilon_{22} + \Delta\varepsilon_{kk}\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \\ \omega_3 &= \frac{(1 - 2\nu)\Delta\varepsilon_{33} + \Delta\varepsilon_{kk}\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \end{aligned} \quad (3-53)$$

(viii) Determinação de σ'_{22} e σ'_{33} utilizando as seguintes equações:

$$\sigma'_{22} = \sigma'_{11} \left[\frac{\omega_2 - V_m D(1 - \beta) p'}{\omega_1 - V_m D(1 - \beta) p'} \right] \quad (3-54)$$

$$\sigma'_{33} = \sigma'_{11} \left[\frac{\omega_3 - V_m D(1 - \beta) p'}{\omega_1 - V_m D(1 - \beta) p'} \right]$$

As deformações obtidas durante a relaxação, após o descarregamento, são ajustadas pela equação exponencial seguinte:

$$\Delta \varepsilon(t) = \sigma D_1 [1 + D_n \{1 - \exp(-t/n)\}] \quad (3-55)$$

onde:

t : Período de tempo desde o momento que a amostra foi descarregada (em horas);

$\Delta \varepsilon(t)$: Deformações recuperadas no tempo t (deformação no tempo de descarregamento menos deformação no tempo t);

σ : Máxima tensão aplicada (psi);

D, D_n, n : Constantes de *fluência* determinadas através dos dados experimentais. D é compliância (1/psi); da mesma ordem da compliância elástica, isto é, o recíproco do módulo de Young, $1/E$ determinado em uma taxa de carregamento baixa; D_n é adimensional, menor que 1 e n é período de tempo em horas; geralmente varia entre 0 e 200, ou mais.

O Módulo de Young e o coeficiente de Poisson são determinados através do ensaio de compressão uniaxial, assumindo-se a amostra como homogênea e com propriedades mecânicas isotrópicas. O Módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν) são definidos como:

$$E = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \quad (3-56)$$

$$\nu = - \frac{\partial \varepsilon_3}{\partial \varepsilon_1}$$

O parâmetro poroelástico de BIOT (β) é obtido através do carregamento hidrostático da amostra. Esse parâmetro é definido como:

$$\beta = 1 - \frac{C_g}{C_b} \quad (3-57)$$

onde:

C_g : Compressibilidade do grão;

C_b : Compressibilidade de volume.

Os parâmetros de compressibilidade de volume C_b e compressibilidade do grão C_g são definidos como:

$$C_b = \left. \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial \sigma_3} \right|_{\partial p(t)=0} \quad (3-58)$$

$$C_g = \left. \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial \sigma_3} \right|_{\partial p(t)=\partial \sigma_3} \quad (3-59)$$

onde:

ε_v : Deformação volumétrica;

σ_3 : Pressão de confinamento (em um teste hidrostático, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$).

A Figura 3.7 resume a seqüência de cálculo das tensões principais *in situ* através do modelo de BLANTON (1986) sob a forma de fluxograma.

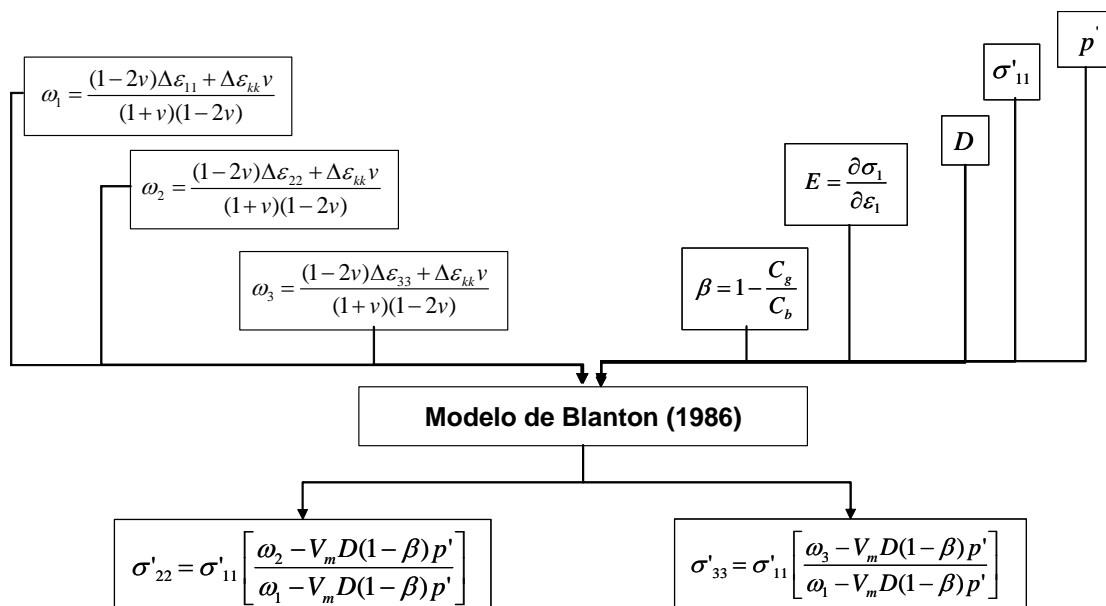


Figura 3.7. Fluxograma de cálculo do Modelo de BLANTON (1986).

3.4.2 Modelos de WARPINSKI e TEUFEL (1989) e BLANTON (1989)

BLANTON (1989) foi o primeiro a produzir modelo com equações padrão da elasticidade linear e a teoria da viscoelasticidade linear. Ele derivou seu modelo usando uma aproximação da integral hereditária, enquanto WARPINSKI e TEUFEL (1989) usam o princípio da viscoelasticidade correspondente (VCP). As duas técnicas podem gerar resultados similares, dependendo de sua implementação. As diferenças entre os dois modelos estão principalmente em seus detalhes, muitos dos quais podem ser relevantes.

O modelo de WARPINSKI e TEUFEL (1989) é designado de *Sandia Model* (SM), enquanto o modelo de BLANTON (1989) é chamado de *Direct Model* (DM). Uma das primeiras afirmações de WARPINSKI e TEUFEL (1989) é que o modelo SM requer menos parâmetros que o modelo DM. WARPINSKI e TEUFEL (1989) afirmaram que apenas dois dados de *input* são requeridos: a tensão de sobrecarga e a tensão mínima ou a compliância distorcional (J_1). Por outro lado, são requeridos quatro dados de *input* para o modelo de BLANTON (1989): tensão de sobrecarga (σ_v), poropressão (P_p), coeficiente de BIOT (α) e coeficiente de Poisson (ν). De fato, o modelo de BLANTON (1989) exige os mesmos dados de *input* que o modelo de WARPINSKI e TEUFEL (1989), e pode calcular os mesmos *outputs*, segundo BLANTON (1989).

Em relação às deformações recuperadas, os modelos DM e SM se diferenciam apenas pela caracterização da trajetória das deformações. No DM, a deformação diferencial é simplesmente a variação das deformações a partir do intervalo de tempo no qual as medições foram feitas. No SM, a deformação diferencial é computada do tempo zero (quando o testemunho é cortado e a extrapolação da medida de volta para zero) até o infinito (usando o decaimento exponencial em um sólido linear padrão).

3.4.2.1 Modelo de WARPINSKI e TEUFEL (1989)

O modelo de WARPINSKI e TEUFEL (1989) é referido como modelo do histórico de deformações por exigir o ajuste do histórico de deformações ao modelo teórico, e também o ajuste de uma curva quadrática de todas as deformações recuperadas através do ensaio ASR. Este modelo pode explicar e adequar os registros

mais incomuns, aqueles que contêm contração em várias ou em todas as direções. Tais contrações são provavelmente causadas pela poropressão.

WARPINSKI e TEUFEL (1989) incorporam três parâmetros distintos no SM, dois referentes ao modelo representado por K_s não viscoelástico e a atribuição de diferentes tempos de retardamento para a distorção e dilatação, e um referente ao uso do modelo, uma vez que caracteriza as deformações através de uma curva de ajuste.

As hipóteses do modelo de WARPINSKI e TEUFEL (1989) são:

- (i) Comportamento linear viscoelástico da rocha;
- (ii) Comportamento das deformações pode ser descrito por modelo padrão exponencial;
- (iii) Tensão de sobrecarga e poço verticais;
- (iv) Rocha isotrópica;
- (v) Módulo volumétrico (K_g) não é parâmetro viscoelástico, desde que o processo seja de fraturamento;
- (vi) Descarregamento das tensões *in situ* gradual no momento da testemunhagem;
- (vii) O modelo assume dois parâmetros linearmente viscoelásticos, e utiliza todos os dados para o ajuste do modelo viscoelástico. O modelo utiliza então o chamado sólido com três parâmetros, que é obtido ao ignorar-se o elemento viscoso do modelo de Burger, e confere um decaimento exponencial das deformações anelásticas com o tempo.

Ao invés de trabalhar com $1/E$ e ν , WARPINSKI e TEUFEL (1989) utilizam o módulo volumétrico (K) e o cisalhante (G).

onde:

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{3G} + \frac{1}{9K} \quad (3-60)$$

e

$$\frac{\nu}{E} = \frac{1}{6G} - \frac{1}{9K} \quad (3-61)$$

As deformações principais podem ser calculadas através de:

$$\varepsilon_1 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{9K} + \frac{\left(\sigma_1 + \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3)\right)}{3G}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{9K} + \frac{\left(\sigma_2 + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\right)}{3G} \quad (3-62)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{9K} + \frac{\left(\sigma_3 + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)\right)}{3G}$$

Observa-se que $1/K \rightarrow C_b(t)$ e $1/G \rightarrow C_G(t)$ são compliâncias viscoelásticas independentes, pois separam a deformação puramente volumétrica da deformação puramente cisalhante.

Ignorando a parte elástica, o sólido com três parâmetros implica em um comportamento descrito nas equações seguintes:

Definindo-se os parâmetros H_1 e H_2 seguintes:

$$H_1 = \frac{C_b}{6} = \frac{1}{6G} \quad (3-63)$$

$$H_2 = \frac{C_K}{9} = \frac{1}{9K} \quad (3-64)$$

Obtêm-se as equações de WARPINSKI e TEUFEL (1989) usadas para ajuste dos dados (ε_r é usada para θ , $\theta + 45$ e $\theta + 90$):

$$\varepsilon_r(t) = (2\sigma_1 \cos^2 \theta + 2\sigma_2 \sin^2 \theta - \sigma_1 \sin^2 \theta - \sigma_2 \cos^2 \theta - \sigma_3)H_1(1 - e^{-t/t_G}) + (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)H_2(1 - e^{-t/t_b}) \quad (3-65)$$

$$\varepsilon_3(t) = (2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2)H_1(1 - e^{-t/t_G}) + (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)H_2(1 - e^{-t/t_b}) \quad (3-66)$$

Atentando para o fato que ao considerar tensões efetivas, $\sigma'_i \rightarrow \sigma_i - \alpha p_f$, apenas o termo H_2 (distorção volumétrica) varia. Por esta razão, WARPINSKI e TEUFEL (1989) utilizam a distorção cisalhante para obter seus resultados, dificultando a obtenção de um coeficiente preciso da poropressão e de um coeficiente de BIOT constante.

Uma consideração importante do processo viscoelástico é que ele representa um tipo de compliância com a fluência. Todavia, compliâncias independentes na distorção comparadas com a dilatação podem ser consideradas segundo WARPINSKI e TEUFEL (1989). Isto é verdadeiro para o comportamento elástico onde o módulo volumétrico K é requerido para o carregamento hidrostático, e outro módulo independente (módulo de cisalhamento G) é requerido para análise de cisalhamento puro. Não existe nenhuma razão para que a mesma independência não seja verdadeira para o comportamento viscoelástico.

Baseado nisto, pode-se desenvolver uma solução viscoelástica. O método mais fácil, consistente com o modelo viscoelástico padrão e linear, é determinar a solução elástica e, então, usar o princípio da correspondência viscoelástica para obter a solução viscoelástica. O alívio de tensão elástica da rocha isotrópica em um poço vertical com tensão de sobrecarga alinhada com o eixo do poço é dado por:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r = (1/E)(\sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta) - (\mu/E)(\sigma_1 \sin^2 \theta + \sigma_2 \cos^2 \theta) \\ - (\mu/E)\sigma_v - \frac{1}{3}[(1/K) - (1/K_s)]p_p - \alpha_T \Delta T \end{aligned} \quad (3-67)$$

$$\varepsilon_v = (1/E)(\mu/E)(\sigma_1 + \sigma_2) - \frac{1}{3}[(1/K) - (1/K_s)]p_p - \alpha_T \Delta T \quad (3-68)$$

Pressupõe-se que apenas as tensões efetivas são recuperadas e a porção do testemunho permanece em um fluido não penetrante com pressão equivalente à poropressão. É importante reconhecer nas equações que σ_1 , σ_2 e σ_v são as tensões totais e que as tensões efetivas são incorporadas através do termo de poropressão.

Desta forma, a tensão efetiva pode ser expressa por:

$$\sigma_e = \sigma - [1 - K/K_s]p_p \quad (3-69)$$

Assumindo-se o processo de relaxação como um processo intergranular (microfraturas e/ou contato entre grãos), o parâmetro K_s não será viscoelástico e, então, o valor exato de $\alpha = (1 - K / K_s)$ não precisa ser especificado. Finalmente, devido ao fato de não existirem constantes elásticas envolvidas no termo de deformações térmicas, a temperatura nunca afeta o comportamento viscoelástico. Rejeita-se qualquer comportamento viscoelástico de α_T .

O efeito final a considerar é a recuperação do testemunho e a resultante de mudança de pressão. Após a perfuração, a poropressão no exterior da amostra é p_p , enquanto a poropressão também é p_p (se a perfuração for balanceada). Substituindo p_p para todos os σ'_s e substituindo $K = E/3(1 - 2\mu)$, demonstra-se que o único efeito da tensão hidrostática resultante ocorre através da constante K_s , visto que nenhuma perturbação anelástica ocorre como um resultado de pressão. Todavia, isto não ocorrerá se o testemunho for impermeável o suficiente, de modo que a pressão não possa se equilibrar durante o tempo de viagem.

Devido a uma relaxação exponencial e à diferença postulada no comportamento na distorção e na dilatação, um modelo sólido viscoelástico linear, de três parâmetros foi adotado, tanto para distorção quanto para a dilatação. O princípio da correspondência de viscoelasticidade aplicado a este modelo afirma que a transformada de Laplace da solução viscoelástica para o problema elástico correspondente pode ser obtida pela recolocação das constantes elásticas.

O parâmetro J_1 é o argumento de compliância com a fluência distorcional e J_2 é um argumento de compliância com a fluência dilatacional. A parte distorcional é a parte útil dos dados de relaxação para cálculo das tensões, pois os efeitos de poropressão não entram nos componentes distorcionais. Desta forma, estes termos são independentes do comportamento da poropressão e da lei de tensão efetiva usada.

A curva de ajuste e estimativa dos parâmetros é ponto fundamental no modelo de WARPINSKI e TEUFEL (1989). Assim, caso as medições de ASR do testemunho tenham sido feitas em um poço vertical usando três transdutores horizontais a 0° , 45°

e 90°, e um vertical, os componentes x_i , que foram determinados através dos dados de campo, serão utilizados na curva ajuste onde $x_9 = t_1$ e $x_{11} = t_2$. Além disso, a geometria considerada requer que $x_2 + x_6 + x_8 = 0$, em que apenas 10 parâmetros são independentes:

$$\varepsilon_0(t) = x_1 - x_2 e^{-t/x_9} - x_{10} e^{-t/x_{11}} \quad (3-70)$$

$$\varepsilon_{45}(t) = x_3 - x_4 e^{-t/x_9} - x_{10} e^{-t/x_{11}} \quad (3-71)$$

$$\varepsilon_{90}(t) = x_5 - x_6 e^{-t/x_9} - x_{10} e^{-t/x_{11}} \quad (3-72)$$

$$\varepsilon_V(t) = x_7 - x_8 e^{-t/x_9} - x_{10} e^{-t/x_{11}} \quad (3-73)$$

Pode-se então escrever relações para x_i , ressaltando que apenas x_2, x_4, x_6, x_8 são úteis para determinação das tensões:

$$x_2 = [\sigma_1(3 \cos^2 \theta - 1) + \sigma_2(3 \sin^2 \theta - 1) - \sigma_V] J_1 \quad (3-74)$$

$$x_4 = [\sigma_1(\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \sin 2\theta) + \sigma_2(\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \sin 2\theta) - \sigma_V] J_1 \quad (3-75)$$

$$x_6 = [\sigma_1(3 \sin^2 \theta - 1) + \sigma_2(3 \cos^2 \theta - 1) - \sigma_V] J_1 \quad (3-76)$$

$$x_8 = (\sigma_1 - \sigma_2 + 2\sigma_V) J_1 \quad (3-77)$$

onde θ foi substituído por $\theta + \frac{\pi}{4}$ para o termo x_4 e por $\theta + \frac{\pi}{2}$ para o termo x_6 . As informações que podem ser extraídas das equações das deformações horizontais independem do ângulo θ . Isto pode ser avaliado por:

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1}[(x_2 + x_6 - 2x_4)/(x_2 - x_6)] \quad (3-78)$$

Todavia, θ deve-se verificar o valor do ângulo com a tensão máxima ou mínima em função do *gage* de 0°. A checagem pode ser executada facilmente através das comparações das magnitudes de x_2 e x_6 . Se $x_2 > x_6$, então a maior deformação (da mesma forma a maior tensão) é próxima ao sensor de 0°.

Adicionalmente, um valor negativo de θ indica que a orientação é entre os sensores de 0° e 45° .

Observa-se que restam apenas duas equações independentes para calcular quatro parâmetros desconhecidos: σ_1 , σ_2 , σ_v e J_1 . O parâmetro σ_v é obtido com a integração do peso de sobrecarga das rochas. O valor de σ_2 pode ser determinado em um microfraturamento, e J_1 pode ser obtido de dados anteriores em um mesmo material ou similar, possivelmente em laboratório. Caso não haja nenhuma informação anterior sobre J_1 , recomenda-se a realização de um microfraturamento adicional às medições de ASR.

Como a compliância distorcional deve ser usada como um *input* no modelo de WARPINSKI e TEUFEL (1989), ela deve ser determinada independentemente dos dados de deformações recuperadas (os valores de J_1 são calculados com tensão horizontal mínima como *input*). Um teste de laboratório para determinar a compliância distorcional gera dados que podem ser usados para calcular não somente o coeficiente de Poisson, mas também a compliância de *fluência*.

Se um microfraturamento for conduzido, então os outros dois parâmetros, σ_1 e J_1 , podem ser obtidos através de:

$$\sigma_1 = \{x_2(-\sigma_2 + 2\sigma_v) - x_8[(3 \sin^2 \theta - 1)\sigma_2 - \sigma_v]\} / \det \quad (3-79)$$

$$J_1 = \frac{\det}{(3 \sin^2 \theta - 1)\sigma_2 - \sigma_v + (3 \cos^2 \theta - 1)(-\sigma_2 + 2\sigma_v)} \quad (3-80)$$

com $\det = x_2 + (3 \cos^2 \theta - 1)x_8$

Se J_1 for conhecido através de resultados de laboratório ou dados de campo anteriores, então, σ_1 e σ_2 equivalem a:

$$\sigma_1 = \frac{[\sigma_v + (x_2 / J_1)] - (3 \sin^2 \theta - 1)[2\sigma_v - (x_8 / J_1)]}{\det} \quad (3-81)$$

$$\text{e } \sigma_2 = \frac{(3 \cos^2 \theta - 1)[2\sigma_v - (x_8 / J_1)][\sigma_v + (x_2 / J_1)]}{\det} \quad (3-82)$$

com $\det = 3(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$

Finalmente, o argumento de compliância com a fluência dilatacional (J_2) pode ser computado através de:

$$x_{10} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_v - 3p_p)J_2 \quad (3-83)$$

Em geral, a Equação 3-83 não fornece uma boa estimativa de J_2 , porque outros efeitos dilatacionais como aqueles resultantes de perfuração sub-balanceada, efeitos viscoelásticos termais e a lenta difusão do fluido dos poros através do testemunho devem ser incluídos no termo x_{10} . Devido ao fato de não existirem melhores opções para calcular estes efeitos, J_2 sempre será um valor aproximado.

A Figura 3.8 ilustra a seqüência de operações necessárias para a determinação das tensões *in situ* segundo o modelo de WARPINSKI e TEUFEL (1989). Esse modelo tenta encaixar os registros mais incomuns, incluindo aqueles que contém contração em várias ou em todas as direções.

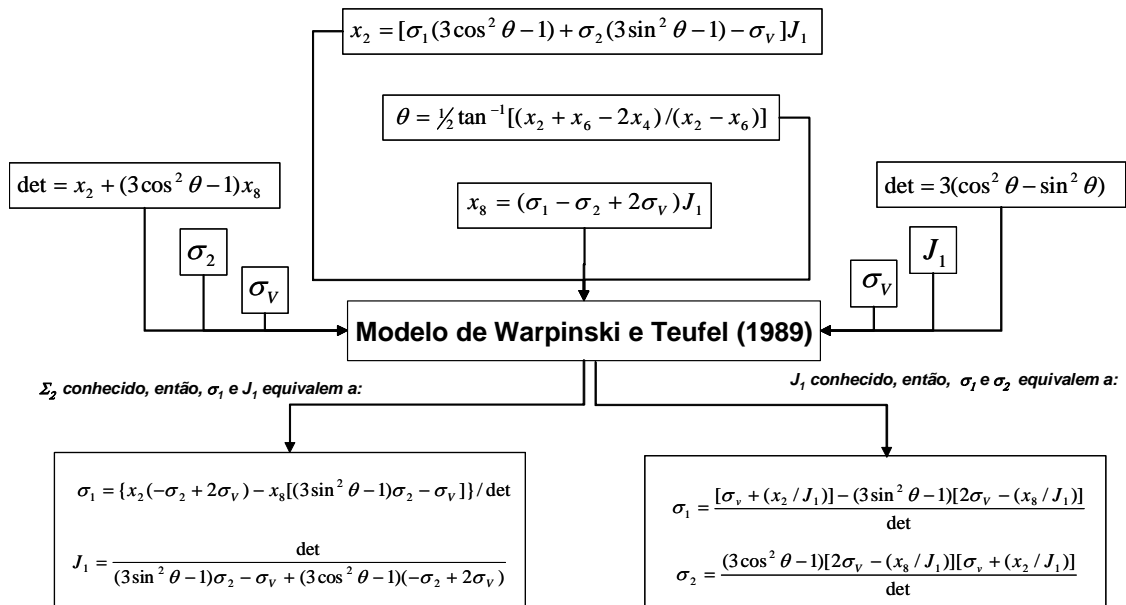


Figura 3.8. Fluxograma de cálculo do modelo de WARPINSKI e TEUFEL (1989).

3.4.2.2 Modelo de BLANTON (1989)

O modelo de BLANTON (1989) permite a determinação da tensão horizontal máxima sem exigir o conhecimento da poropressão, da constante poroelástica (α) ou coeficiente de Poisson (ν) caso a tensão de sobrecarga e a tensão principal menor sejam conhecidas. A equação básica do modelo que relaciona as deformações recuperadas medidas e as tensões *in situ* é:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_1 \\ \Delta\varepsilon_2 \\ \Delta\varepsilon_3 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 - \alpha p_p \\ \sigma_2 - \alpha p_p \\ \sigma_3 - \alpha p_p \end{bmatrix} \quad (3-84)$$

onde $D = D(t_o) - D(t_0 - \tau_o) - D(t_f) + D(t_f - \tau_o)$;

τ_o : Instante de tempo em que o testemunho foi cortado;

t_o : Instante de tempo da primeira medição;

t_f : Instante de tempo da última medição de deformação.

Uma das formas mais úteis é obtida pela eliminação de D e resolução das duas tensões horizontais, as quais resultam em:

$$\sigma_1 = (\sigma_v - \alpha p_p) \frac{(1-\nu)\Delta\varepsilon_1 + \nu(\Delta\varepsilon_2 + \Delta\varepsilon_v)}{(1-\nu)\Delta\varepsilon_v + \nu(\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2)} + \alpha p_p \quad (3-85)$$

$$\sigma_2 = (\sigma_v - \alpha p_p) \frac{(1-\nu)\Delta\varepsilon_2 + \nu(\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_v)}{(1-\nu)\Delta\varepsilon_v + \nu(\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2)} + \alpha p_p \quad (3-86)$$

Se a tensão mínima horizontal for conhecida, a Equação 3-86 pode ser resolvida para o termo da poropressão e o resultado pode ser substituído na Equação 3-85. Esta substituição elimina tanto o termo de poropressão como o termo do coeficiente de Poisson e resulta em uma relação para a tensão máxima horizontal como função das deformações, sobrecarga e tensão mínima horizontal, como a seguir:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_v(\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_2) + \sigma_2(\Delta\varepsilon_v - \Delta\varepsilon_1)}{(\Delta\varepsilon_v - \Delta\varepsilon_2)} \quad (3-87)$$

O modelo de BLANTON (1989) também pode ser usado para calcular a tensão horizontal máxima (σ_1) e mínima (σ_2), além da compliância distorcional (J_s):

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_v + 2(\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_v)}{J_s} \quad (3-88)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_v + 2(\Delta\varepsilon_2 - \Delta\varepsilon_v)}{J_s} \quad (3-89)$$

onde $J_s = 2D(1 + \nu)$.

O parâmetro J_s pode ser determinado pela avaliação do componente distorcional no tempo apropriado.

Na prática é raro ter-se o valor de uma das tensões horizontais *in situ* disponíveis; uma medida da poropressão é mais comum. Apesar do conceito do modelo de BLANTON (1989) ser baseado em um *input* prático e certamente desejável, não garante resultados acurados. Desta forma, WARPISNKI e TEUFEL (1989) recomendam o uso do modelo de BLANTON (1989) em conjunção com uma medição de tensão por fraturamento hidráulico (microfraturamento) ou alguma outra medição de tensão independente. Entretanto, a determinação das tensões horizontais através de microfraturamento envolve vários riscos e custos.

O cálculo das tensões no modelo de BLANTON (1989) é feito a partir dos seguintes coeficientes: x_2 (Equação 3-74), x_4 (Equação 3-75), x_6 (Equação 3-76) e x_8 (Equação 3-77).

$$e_0(t) = \varepsilon_0(t) - e(t) \quad (3-90)$$

$$e_{45}(t) = \varepsilon_{45}(t) - e(t) \quad (3-91)$$

$$e_{90}(t) = \varepsilon_{90}(t) - e(t) \quad (3-92)$$

$$e_v(t) = \varepsilon_v(t) - e(t) \quad (3-93)$$

$$\text{onde } e(t) = \frac{[\varepsilon_0(t) + \varepsilon_{90}(t) + \varepsilon_v(t)]}{3} \quad (3-94)$$

$$\bar{\Delta}e_0 = e_0(\infty) - e_0(0) = x_2 \quad (3-95)$$

$$\bar{\Delta}e_{45} = e_{45}(\infty) - e_{45}(0) = x_4 \quad (3-96)$$

$$\bar{\Delta}e_{90} = e_{90}(\infty) - e_{90}(0) = x_6 \quad (3-97)$$

$$\bar{\Delta}e_v = e_v(\infty) - e_v(0) = x_8 \quad (3-98)$$

Pode-se utilizar as Equações 3-95 a 3-97 para calcular as deformações máxima e mínima:

$$\bar{\Delta}e_1 = \frac{(x_2 + x_6 + Q)}{2} \quad (3-99)$$

$$\bar{\Delta}e_2 = \frac{(x_2 + x_6 - Q)}{2} \quad (3-100)$$

$$\text{onde: } Q = [(x_2 - x_6)^2 + (x_2 + x_6 - 2x_4)^2]^{1/2} \quad (3-101)$$

e, enfim, a tensão horizontal máxima pode ser definida por:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_v(\bar{\Delta}e_1 - \bar{\Delta}e_2) + \sigma_2(\bar{\Delta}e_v - \bar{\Delta}e_1)}{(\bar{\Delta}e_v - \bar{\Delta}e_2)} \quad (3-102)$$

$$\text{ou } \sigma_1 = \frac{\sigma_v(\bar{\Delta}\varepsilon_1 - \bar{\Delta}\varepsilon_2) + \sigma_2(\bar{\Delta}\varepsilon_v - \bar{\Delta}\varepsilon_1)}{(\bar{\Delta}\varepsilon_v - \bar{\Delta}\varepsilon_2)} \quad (3-103)$$

Na Figura 3.9 pode-se observar a seqüência de operações para a determinação das tensões principais *in situ* segundo o modelo de BLANTON (1989).

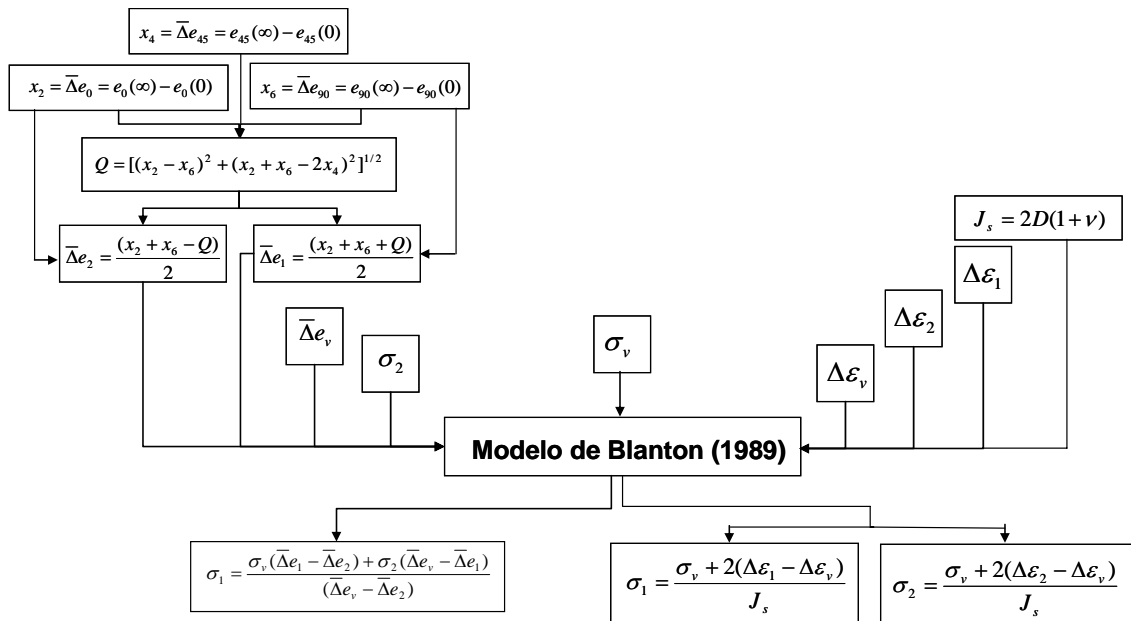


Figura 3.9. Fluxograma de cálculo do modelo de BLANTON (1989).

3.4.2.3 Análise Comparativa Entre os Modelos

Segundo WARPINSKI e TEUFEL (1989), a hipótese severa de um coeficiente de Poisson constante do modelo de BLANTON (1983) é questionável. Além do coeficiente de Poisson de materiais viscoelásticos variar, seu valor depende do tipo de teste executado. O coeficiente de Poisson obtido de um teste de *fluência* não é, em geral, o mesmo determinado em ensaios de relaxação, ensaios com taxa de carregamento constante ou com taxa de deformação constante.

Os dois modelos são similares em vários modos. Ambos derivam equações viscoelásticas através de equações elásticas com o princípio de correspondência e os assumem um descarregamento progressivo. Além disto, quando as equações para o cálculo das tensões são escritas nos mesmos termos (por exemplo, como símbolos para deformações e parâmetros constitutivos em coordenadas retangulares ao invés de coordenadas cilíndricas), eles têm formas similares.

Equações gerais têm sido derivadas para materiais totalmente anisotrópicos, e equações específicas têm sido desenvolvidas para o modelo de rochas acamadas. Também têm sido desenvolvidas equações gerais para redução gradual da tensão de confinamento e poropressão, em vez de descarregamento progressivo, para modelar os longos tempos de viagem na recuperação do testemunho.

Em relação às deformações recuperadas, os modelos DM e SM se diferenciam apenas pela forma de caracterização da trajetória das deformações. No DM, a deformação diferencial é simplesmente a variação das deformações a partir do intervalo de tempo no qual as medições foram feitas. No SM, a deformação diferencial é computada do tempo zero (quando o testemunho é cortado e a extrapolação da medida de volta para zero) até o infinito (usando o decaimento exponencial em um sólido linear padrão).

O modelo de BLANTON (1989) emprega a tensão mínima como parâmetro de entrada. Essas novas características são tal como o modelo de WARPINSKI e TEUFEL (1989), o que permite a boa comparação entre estes modelos.

Ao contrário do modelo de BLANTON (1989), que não utiliza a tensão mínima como dado de *input*, WARPINSKI e TEUFEL (1989b) sugerem que o ASR é insuficientemente desenvolvido no tempo presente para se esperar bons resultados sem nenhum dado independente diretamente medido de uma das tensões principais horizontais.

Além disto, o uso da compliância distorcional como parâmetro de entrada no modelo de BLANTON (1989) acarreta, geralmente, resultados pouco acurados, já que esta não pode ser medida e tampouco os efeitos de difusão de poropressão. WARPINSKI e TEUFEL (1989) determinam este parâmetro através do testemunho, também um procedimento para calcular as tensões horizontais com dados de campo, ou seja, utilizam apenas a tensão de sobrecarga, contornando as severas limitações do modelo de BLANTON (1989).

WARPINSKI e TEUFEL (1989) afirmam que a hipótese de comportamento exponencial do processo de relaxamento também é uma limitação, porém empírica, baseada na forma das curvas de deformação recuperadas. Coeficientes de Poisson, ν , e Biot, α , constantes não tem nenhuma justificativa teórica ou empírica.

BLANTON (1989) através de suas novas equações, separa a parte desviatória das deformações e ajusta os dados para obter uma comparação com os valores de WARPINSKI e TEUFEL (1989). BLANTON (1989) mostra que a poropressão pode ser eliminada em qualquer modelo pela separação das deformações desviatórias e dilatacionais. Todavia, WARPINSKI e TEUFEL (1989) reconhecem a importância de eliminar as contribuições da poropressão.

De acordo com WARPINSKI e TEUFEL (1989), o modelo de BLANTON (1989) introduz erros ao calcular α através de $\alpha = 1 - K / K_s$. Para rochas reais, K_s deve ser determinado através de ensaios de laboratório.

3.4.3 Modelo de MATSUKI e TAKEUCHI (1990)

Métodos que usam testemunhos orientados de poços foram investigados por pesquisadores em uma tentativa de desenvolver um método simples e barato para medição de tensões *in situ* em grande profundidade. Ao contrário dos outros métodos, o teste ASR não foi estabelecido como um método para medição de tensões tridimensionais. Nos estudos de TEUFEL (1983), BLANTON (1983), WARPINSKI e TEUFEL (1989) e WOLTER *et al.* (1989), a tensão vertical foi assumida como sendo uma das tensões principais determinada pela tensão de sobrecarga. Todavia, muitas medições *in situ* mostram que esta hipótese não é sempre correta (BROWN *et al.*, 1978). Além disto, vários modelos de interpretação assumem que as deformações recuperadas anelásticas, aquelas causadas pelo descarregamento unitário da tensão da rocha são independentes da tensão aplicada.

O modelo de MATSUKI e TAKEUCHI (1990) mostra que a concordância das deformações recuperadas anelásticas da rocha depende da tensão média (σ_m). Por sua vez, a tensão média principal aumenta em função da deformação anelástica recuperada de compliância com o modo de cisalhamento e decresce no modo volumétrico. Esta afirmação é contrária ao que é assumido em outros modelos, onde a concordância com as deformações recuperadas anelásticas, que são as deformações recuperadas causadas pelo descarregamento unitário da tensão da rocha, é independente da tensão aplicada.

Maiores desenvolvimentos nos modelos de WARPINSKI e TEUFEL (1989) foram apresentadas por MATSUKI e TAKEUCHI (1990 e 1991), para computar o campo de tensões *in situ* através de testes ASR em poços desviados em campos geotérmicos do Japão. Ao invés de uma organização de teste completamente diferente, com amostras cúbicas e *strain gages*, a formulação foi a mesma do modelo WARPINSKI e TEUFEL (1989), e não existiu relação com os efeitos poroelásticos (BLOCH, 1999). Enfim, este modelo baseia-se na recuperação da deformação

anelástica normal de um material viscoelástico em uma direção arbitrária em um estado de tensão genérico.

As hipóteses do método de MATSUKI e TAKEUCHI (1990) são:

- (i) Estado de tensões *in situ* tridimensionais;
- (ii) A rocha é assumida como um material isotrópico viscoelástico. O comportamento viscoelástico deve consistir de dois modos de deformação independentes: cisalhamento e volumétrico;
- (iii) As deformações recuperadas são dependentes da tensão aplicada;
- (iv) O tempo logo após o alívio de tensões é considerado. Todavia, é comum levar tempo para começar as medições após o início do alívio das tensões que ocorre no momento do corte do testemunho. Para levar este efeito em consideração, o tempo deve ser obtido como aquele após as medições do ensaio ASR e uma parte remanescente das deformações recuperadas anelásticas concordantes deve ser usada para determinação dos valores de tensão.

A concordância com as deformações anelásticas recuperadas nos modos de cisalhamento e volumétrico, J_{as} e J_{av} , respectivamente, são definidos por:

$$e_{ij}(t) = J_{as}(t)S_{ij}$$

(3-104)

$$e_m(t) = J_{av}(t)\sigma_m$$

Onde S_{ij} e σ_m são as constantes de tensão desviadora e tensão principal média respectivamente, as quais são aliviadas progressivamente no tempo $t=0$; e $e_{ij}(t)$ e $e_m(t)$ são as deformações desviadora e anelástica principal após o alívio de tensão, respectivamente.

Para derivar uma equação de deformação anelástica normal em um material viscoelástico, considera-se primeiro o comportamento elástico. Se um material for submetido a tensões compressivas tridimensionais genéricas e à poropressão p_o , a deformação normal compressiva na direção arbitrária pode ser expressa por:

$$\begin{aligned}
\varepsilon = & (1/E)(1^2\sigma_x + m^2\sigma_y + n^2\sigma_z + 2lm\tau_{xy} + 2mn\tau_{yz} + 2nl\tau_{zx}) \\
& - (\nu/E)\{(m^2 + n^2)\sigma_x + (n^2 + 1^2)\sigma_y + (1^2 + m^2)\sigma_z - 2lm\tau_{xy} \\
& - 2mn\tau_{yz} - 2nl\tau_{zx}\} - (1/3)(1/K - 1/K_s)p_o - \alpha_T\Delta T
\end{aligned} \tag{3-105}$$

Onde l , m e n são os cossenos diretores em relação aos eixos arbitrários x , y e z , E é o módulo de Young, ν é o coeficiente de Poisson, K é o módulo volumétrico, K_s é o módulo da matriz, α_T é o coeficiente de expansão linear termal e ΔT é a variação de temperatura.

No caso de um material viscoelástico, pelo uso do princípio de correspondência (FLÜGGE, 1967) assume-se que K_s não é um parâmetro viscoelástico (WARPINSKI e TEUFEL, 1989). Então, pelo uso das concordâncias das deformações anelásticas recuperadas definidas em 3-104 na transformada de Laplace inversa, a deformação anelástica recuperada trativa $\varepsilon_a(t)$ nas direções l , m e n é dada pelas seguintes equações onde as tensões e poropressões são aliviadas gradualmente:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_a(t) = & (1/3)(3l^2 - 1)\sigma_x + (3m^2 - 1)\sigma_y + (3n^2 - 1)\sigma_z \\
& + 6lm\tau_{xy} + 6mn\tau_{yz} + 6nl\tau_{zx}]Jas(t) \\
& + (\sigma_m - p_o)Jav(t) + \alpha_T\Delta T(t)
\end{aligned} \tag{3-106}$$

Esta equação que fornece a base para o método ASR, sugere que as deformações anelásticas recuperadas dependem de seis componentes das tensões *in situ*, poropressão, mudança de temperatura e concordância com as deformações anelásticas recuperadas dos dois modos de deformação. Por este motivo, para determinar as tensões *in situ* tridimensionais gerais através das deformações anelásticas normais, todos os componentes do tensor de deformação anelástica devem ser determinados. O tensor de deformação anelástica completo pode ser determinado se as deformações normais anelásticas nas seis direções independentes forem medidas com transdutores de deslocamento ou *strain gages*.

As deformações anelásticas normais podem ser expressas por:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= (\sigma_x - \sigma_m)Jas(t) + (\sigma_m - p_o)Jav(t) + \alpha_T \Delta T(t) \\
\varepsilon_y &= (\sigma_y - \sigma_m)Jas(t) + (\sigma_m - p_o)Jav(t) + \alpha_T \Delta T(t) \\
\varepsilon_z &= (\sigma_z - \sigma_m)Jas(t) + (\sigma_m - p_o)Jav(t) + \alpha_T \Delta T(t)
\end{aligned}
\tag{3-107}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xy} &= \{\tau_{xy} - 0.5(\sigma_z - \sigma_m)Jas(t) + (\sigma_m - p_o)Jav(t) + \alpha_T \Delta T(t)\} \\
\varepsilon_{yz} &= \{\tau_{yz} - 0.5(\sigma_x - \sigma_m)Jas(t) + (\sigma_m - p_o)Jav(t) + \alpha_T \Delta T(t)\} \\
\varepsilon_{zx} &= \{\tau_{zx} - 0.5(\sigma_y - \sigma_m)Jas(t) + (\sigma_m - p_o)Jav(t) + \alpha_T \Delta T(t)\}
\end{aligned}
\tag{3-108}$$

Através das deformações anelásticas normais medidas, o tensor de deformações anelásticas pode ser determinado e dividido em deformação anelástica normal média e_m :

$$e_m = (\sigma_m - p_o)Jav(t) + \alpha_T \Delta T(t) \tag{3-109}$$

As deformações desviadoras anelásticas são determinadas pelas expressões seguintes:

$$\begin{aligned}
e_x &= s_x Jas(t) \\
e_y &= s_y Jas(t) \\
e_z &= s_z Jas(t) \\
e_{xy} &= \tau_{xy} Jas(t) \\
e_{yz} &= \tau_{yz} Jas(t) \\
e_{zx} &= \tau_{zx} Jas(t)
\end{aligned}
\tag{3-110}$$

onde s_x , s_y , s_z são as tensões desviadoras.

As equações 3-110 sugerem que:

- (i) as orientações das tensões principais são determinadas pelas orientações das deformações principais desviadoras, desde que os componentes desviatórios das orientações principais coincidam com seus componentes ordinários;
- (ii) as razões entre as tensões desviadoras principais são dadas pelas razões das deformações anelásticas principais desviadoras. Observa-se que estes valores são constantes através das medições e podem ser determinados sem conhecimento das deformações anelásticas recuperadas em concordância com a rocha, admitida isotrópica termalmente e mecanicamente. Desta forma, pela análise da variação destes valores no tempo, o grau de anisotropia da rocha pode ser determinado.

Através das equações 3-109 e 3-110, os valores absolutos das tensões principais são dados por:

$$\sigma_i = e_i(t) / J_{as}(t) + \{e_m(t) - \alpha_T \Delta T(t)\} / J_{av}(t) + p_o \quad (3-111)$$

onde $e_i(t)$ é uma das deformações principais anelásticas desviadoras. Para determinar os valores absolutos das tensões *in situ*, as concordâncias das deformações anelásticas recuperadas dos dois modos devem ser determinadas para a rocha em adição aos efeitos de poropressão e temperatura das deformações anelásticas normais médias. Além disto, a dependência de $J_{as}(t)$ e $J_{av}(t)$ das tensões normais médias deve ser levada em consideração.

O procedimento proposto para determinar as tensões *in situ* tridimensionais pode ser resumido na Figura 3.10. O processo utilizado para determinar valores absolutos pode requerer várias iterações para assegurar que as condições de tensão usadas na calibração das concordâncias com as deformações anelásticas recuperadas não diferem significativamente dos valores determinados. Para determinar as condições de tensão para a calibração, pode ser útil primeiramente assumir que a tensão vertical é a sobrecarga.

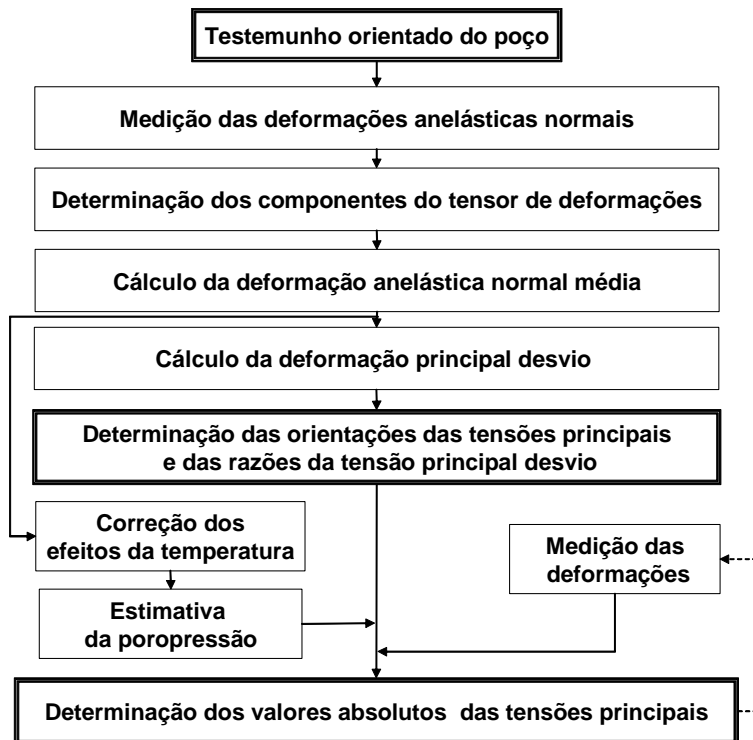


Figura 3.10. Fluxograma de aplicação do modelo MATSUKI e TAKEUCHI (1990).

A Figura 3.11 ilustra o procedimento de cálculo das tensões *in situ* através do modelo de MATSUKI e TAKEUCHI (1990).

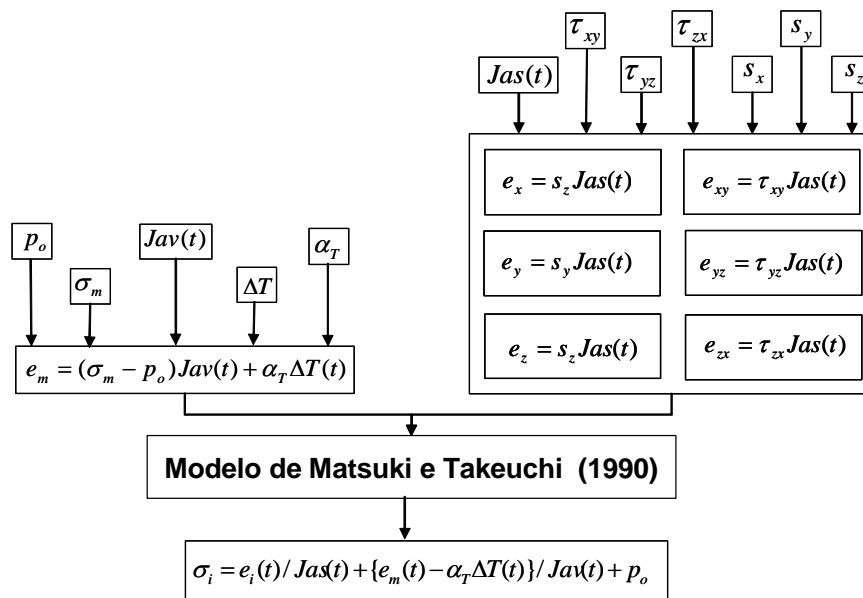


Figura 3.11. Fluxograma do cálculo do modelo de MATSUKI e TAKEUCHI (1990).

3.4.4 Modelo de BRERETRON *et al.* (1995)

BRERETRON *et al.* (1995) demonstraram complexo padrão de deformação em ensaios ASR que poderia ser explicado pela combinação de deformações geradas pelo alívio de tensões e variações de poropressão, assumindo que ambos os processos competem entre si dependendo das magnitudes das tensões, da permeabilidade e da poropressão da rocha. Avaliaram os efeitos da poropressão como uma explicação possível dos resultados complexos da técnica ASR, bem como o método ASR para grandes perfurações nas crostas oceânicas e ocidentais.

As hipóteses de BRERETRON *et al.* (1995) são:

- (i) Em uma rocha com estrutura fraturada, é possível ocorrer uma contração em taxa maior que a expansão no ensaio ASR devido à difusão dos fluidos dos poros;
- (ii) Assume-se que a perfuração ocorre sob condições aproximadamente balanceadas, tal que a pressão do fluido dos poros mantenha o equilíbrio com o fluido da perfuração, e que a permeabilidade do material do testemunho seja suficientemente alta para permitir a manutenção deste equilíbrio durante a recuperação do testemunho. Isto só não acontecerá se a permeabilidade do material testemunhado for baixa durante e posteriormente a recuperação do testemunho;
- (iii) Para materiais de baixa permeabilidade, é possível que haja competição entre os processos de recuperação anelástica e recuperação da poropressão;
- (iv) As características da curva de recuperação das deformações resultantes irão depender das magnitudes das tensões das rochas, da permeabilidade e da poropressão;

No modelo viscoelástico apresentado por WARPINSKI e TEUFEL (1989b), a deformação ε em uma direção particular radial r no plano horizontal é:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r(t) = & (2\sigma_x \cos^2 \theta + 2\sigma_y \sin^2 \theta - \sigma_x \sin^2 \theta - \sigma_y \cos^2 \theta - \sigma_z) [1 - e^{-t/t_1}] J_1 + \\ & + (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z - 3P_p) [1 - e^{-t/t_2}] J_2 \end{aligned} \quad (3-112)$$

Onde t é o tempo, θ é o ângulo do extensômetro com respeito à orientação da tensão máxima; (σ_1) , $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, são as magnitudes das tensões principais; J_1 e J_2 são os argumentos e concordância distorcional e dilatacional com a fluência; t_1 e t_2 são as constantes de tempo de fluência desviatórias e dilatacionais; P_p é a poropressão e r corresponde à direção radial no plano horizontal.

As deformações puramente anelásticas do modelo viscoelástico apresentado por WARPINSKI e TEUFEL (1989) podem ser observadas a seguir:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3-113)$$

Onde ε_{∞} é o nível assintótico de deformação quando $t = \infty$ e τ_0 é o tempo de relaxação para deformação anelástica, sendo os dois parâmetros exclusivamente relacionados ao alívio de tensões.

Em termos de poropressão, tem-se:

$$\beta(t) = \beta_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda}} \right) \quad (3-114)$$

Onde β_{∞} é o nível final de deformação e λ é o tempo de relaxação da poropressão. Ambos são constantes no tempo e unicamente relacionados à dissipação de poropressão.

A deformação total em um teste hipotético ASR pode ser representada pela soma de $\varepsilon(t)$ e $\beta(t)$. O sinal negativo da Equação 3-113 significa que a contração causada pela redução de poropressão é arbitrada como negativa, enquanto a expansão causada pelo alívio de tensão na Equação 3-114 é arbitrada como positiva.

Este modelo sugere que o aparente comportamento complexo da reação das curvas de algumas rochas pode ser explicado pela variação da poropressão além das deformações anelásticas da rocha. Os resultados de ensaio ASR são dependentes da

magnitude e das constantes do tempo das duas componentes, e também do tempo no qual a rocha é instrumentada após o corte e a recuperação.

O efeito de poropressão não pode ser isolado. Isto indica que rochas com baixa permeabilidade, tais como siltitos, arenitos e rochas metamórficas, são mais suscetíveis à relaxação de poros. As curvas de recuperação das deformações são muito complexas no caso de testemunhos com porosidade e densidade de fratura extremamente baixas (BRERETRON, 1995). O efeito ao se ignorar a poropressão na determinação da direção das tensões principais pode ser significativo, principalmente se as propriedades da matriz e a difusão da poropressão forem anisotrópicas.

BRERETRON *et al.* (1995) também reconhece que nem todas as reações podem ser explicadas pelo modelo da poropressão. Existe um enorme número potencial de outras razões que poderiam explicar a variação das curvas, incluindo o método de medição, os efeitos térmicos e a anisotropia.

A Figura 3.12 ilustra o procedimento de cálculo das tensões *in situ* através do modelo de BRERETON (1995) sob a forma de fluxograma.

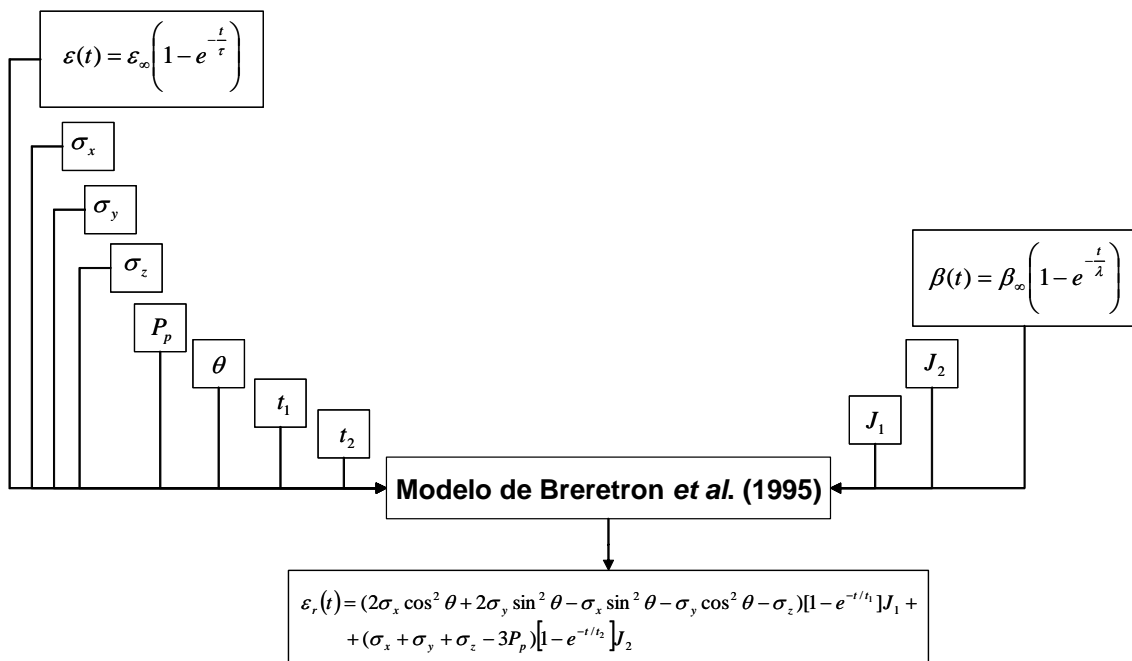


Figura 3.12. Fluxograma de cálculo do modelo de BRERETRON *et al.* (1995).

3.4.5 Modelo de BLOCH (1999)

Segundo BLOCH (2005), o modelo PVE (Poroviscoelástico) apresenta o cálculo da magnitude das tensões utilizando uma nova formulação poroviscoelástica, linear para testemunhos de rocha cilíndricos, desenvolvido por DETOURNAY & CHENG (1993). A contração das amostras nesta formulação é atribuída exclusivamente a efeitos de difusão da poropressão. O modelo desenvolvido simula as deformaçõesanelásticas logo após o corte, na testemunhagem, até a completa estabilização das deformações na superfície. As equações básicas de poroelasticidade são empregadas de forma acoplada, associando a variação do volume dos poros da rocha, devido à variação da poropressão e à deformação do constituinte sólido.

As propriedades mecânicas necessárias para a simulação podem ser obtidas de ensaios de compressão em laboratório, enquanto os efeitos viscosos são incluídos na formulação através do modelo modificado de Kelvin e do Princípio da Correspondência Elasticidade-Viscoelasticidade (VCP – *Viscoelastic Correspondency Principle*) (FLÜGGE, 1975). As tensões horizontais *in situ* são calculadas por inversão numérica (retroanálise), ajustando a curva de deformação gerada pelo modelo às deformações medidas no campo, através de um código numérico.

O modelo PVE assume que a tensão e a poropressão na superfície da rocha se igualam automaticamente à pressão do fluido de perfuração, para maciços sob estado hidrostático de tensões, decrescendo linearmente na medida em que a amostra é trazida para a superfície, como mostrado na Figura 3.13.

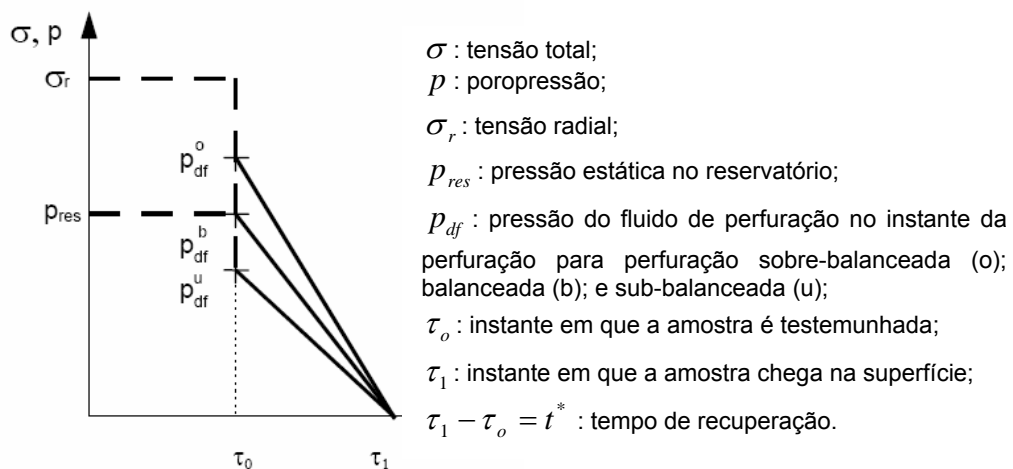


Figura 3.13. Variação da tensão total e da poropressão na superfície externa da amostra durante a testemunhagem.

O equacionamento do caminho mostrado na Figura 3.13 é a condição de contorno adotada no modelo PVE. A variação da tensão hidrostática e da poropressão no espaço de Laplace é dada, respectivamente, pelas Equações 3-115 e 3-116, nas quais o símbolo “ \sim ” indica que a variável é calculada no espaço de Laplace:

$$\tilde{P} = \frac{P_{df}}{s} \left[\frac{(1 - e^{-t^* s})}{t^* s} - 1 \right] + \frac{\sigma_r}{s} \quad (3-115)$$

$$\tilde{p} = \frac{P_{df}}{s} \left[\frac{(1 - e^{-t^* s})}{t^* s} - 1 \right] + \frac{P_{res}}{s} \quad (3-116)$$

A geometria analisada é cilíndrica, e assume-se que as tensões principais são longitudinais e radiais ao eixo do cilindro. No caso de um poço vertical, por exemplo, as principais tensões devem ser exatamente na vertical e horizontal.

Algumas hipóteses para aplicação da poroelasticidade linear para o problema cilíndrico são necessárias:

- (i) Ocorrem pequenas deformações e deslocamentos, para que possam ser assumidos como sendo lineares;
- (ii) As tensões e deformações são proporcionais;
- (iii) As forças de corpo podem ser desprezadas;
- (iv) Os poros são interconectados de certa forma que existe fluido livre;
- (v) A porosidade média é totalmente saturada;
- (vi) O fluido dos poros é newtoniano e incompressível;
- (vii) As variações de temperatura não são levadas em consideração;

As hipóteses associadas ao processo de testemunhagem e conseqüentemente à recuperação das deformações anelásticas são as seguintes:

- (i) A geometria é axisimétrica;
- (ii) A porosidade média é considerada isotrópica e homogênea;
- (iii) Condição de deformação plana;

Quanto à geometria axisimétrica, vale ressaltar que a formulação poroelástica adotada é válida apenas para carregamentos simétricos ao eixo (DETOURNAY e CHENG, 1993). Por exemplo, as tensões são definidas na posição radial. Com a finalidade de adaptar estas condições para o atual campo de tensões do maciço, as tensões são decompostas em componentes hidrostáticos e desviatórios, representados respectivamente por P_0 e S_0 . Enquanto o carregamento hidrostático leva a mudanças volumétricas, e é muito mais afetado pelo fluido nos poros, a resposta da rocha para carregamento desviatório é completamente elástica (ABOULEISMAN *et al.*, 1996), portanto, não influenciado pelo fluido no poros. Desta maneira, baseado em um problema de linearidade, o caso hidrostático foi resolvido por aproximação poroviscoelástica e mais tarde adicionado à solução viscoelástica para carregamentos desviatórios, simulando o atual campo de tensões.

Quanto à isotropia e homogeneidade da porosidade média, embora seja possível considerar os efeitos da poroelasticidade em rochas com isotropia transversal (CUI *et al.*, 1996, CHENG, 1997), assume-se que a rocha seja isotrópica, simplificando as equações, reduzindo o *input* necessário de parâmetros da rocha e os testes experimentais. Quanto à homogeneidade, sempre quando forem detectadas macrovariações nos constituintes da rocha, antes ou após o ensaio ASR (algumas vezes as heterogeneidades não são visíveis antes do ensaio ASR e antes que as amostras sejam serradas), os resultados devem ser menosprezados, pois as deformações medidas, e conseqüentemente a computação das tensões, serão afetadas pelas heterogeneidades locais;

Já em relação à condição de deformação, o testemunho é considerado infinitamente longo. Sendo assim, a deformação vertical é insignificante e não afeta as deformações radiais.

Quatro constantes independentes da rocha, além da permeabilidade, são necessárias para a derivação completa de todos os parâmetros envolvidos nos problemas de poroelasticidade em meios isotrópicos poroelásticos. Estes parâmetros não podem ser escolhidos aleatoriamente. Dois devem representar o comportamento drenado da rocha, enquanto outros dois devem ser associados ao fluxo de fluidos. Estas constantes foram definidas como: módulo de Young (E), módulo volumétrico (K), módulo volumétrico não-drenado (K_u) e módulo volumétrico de grãos (K_s).

A aplicação do modelo de BLOCH (1999) pode seguir o seguinte roteiro:

- (i) Testemunhagem de amostra de rochas. A orientação obtida no ensaio é geralmente associada ao poço através da testemunhagem orientada. São ensaiadas simultaneamente duas amostras de 20 cm, cortadas do testemunho e envolvidas em plástico selante ou pintados com verniz para prevenir a evaporação de fluidos durante o teste. Este processo, no entanto, não impede a redistribuição de poropressão interna, que é a base para o modelo PVE (BLOCH, 1999).
- (ii) Medições das deformações anelásticas assim que a amostra de rocha é retirada do fundo do poço. Embora o teste ASR seja capaz de prover as deformações da rocha em seis direções (ε_{xx} , ε_{aa} , ε_{yy} , ε_{bb} , ε_{cc} e ε_{zz}), apenas (ε_{xx} , ε_{aa} e ε_{yy}) são necessários para a solução 2D;
- (iii) Computação das deformações principais no plano horizontal, (ε_{11} e ε_{22}), para cada intervalo de tempo, de acordo com GOODMAN (1980):

$$\begin{cases} \varepsilon_{11} = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} + \sqrt{\varepsilon_{xy}^2 + \left[\frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2}\right]^2} \\ \varepsilon_{22} = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} - \sqrt{\varepsilon_{xy}^2 + \left[\frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2}\right]^2} \end{cases} \quad (3-117)$$

$$\text{onde: } \varepsilon_{xy} = \frac{\varepsilon_{xx} - 2\varepsilon_{aa} - \varepsilon_{yy}}{2} \quad (3-118)$$

- (iv) Determinação das deformações anelásticas hidrostáticas e desviatórias, ε_{pp} e ε_{DD} .

Embora a formulação poroelástica só trabalhe com tensões hidrostáticas, a componente desviadora é livre de efeitos poroelásticos, podendo ser obtida através da formulação elástica convencional. Assim sendo, as deformações principais horizontais medidas no ensaio com o ASR foram inicialmente transformadas em deformações hidrostáticas (ε_{pp}) e desviadora (ε_{DD}), através de:

$$\begin{cases} \varepsilon_{PP} = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}{2} \\ \varepsilon_{DD} = \frac{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}}{2} \end{cases} \quad (3-119)$$

(v) Determinação das tensões hidrostáticas e desviatórias, P_0 e S_0 , através de ε_{PP} e ε_{DD} , através do método de inversão.

O campo de tensões ao redor de um testemunho pode ser conhecido como é visto na Figura 3.14:

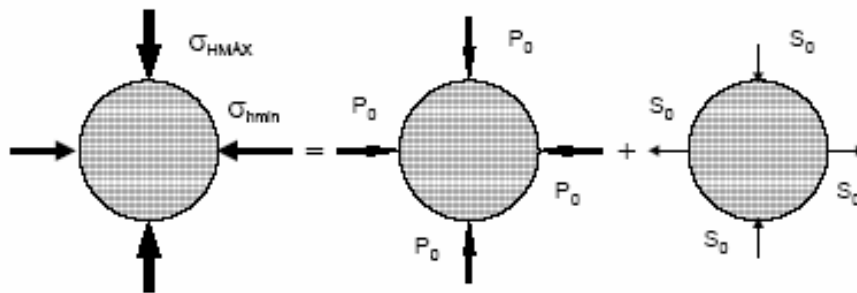


Figura 3.14. Campo de tensões ao redor de um testemunho (BLOCH,1999).

(vi) Computação das tensões horizontais principais *in situ* $\sigma_{HMÁX}$ e σ_{hmin} :

$$\sigma_{HMÁX} = P_0 + S_0 \quad (3-120)$$

$$\sigma_{hmin} = P_0 - S_0 \quad (3-121)$$

Onde P_0 é um componente de tensão hidrostática e S_0 é o componente de tensão desviatória, assumindo que θ corresponde a $\sigma_{HMÁX}$ e conseqüentemente $\theta + 90$ graus que é associada a σ_{hmin} .

(vii) Comparação das tensões obtidas com outros dados de campos assim como tendências geológicas regionais.

As tensões definidas pelo código durante a otimização do ajuste são o resultado final desejado. O método consiste no ajuste dos parâmetros de entrada através da minimização da diferença entre as deformações calculadas e as medidas no ensaio de campo a cada instante, conforme a função erro definida por:

$$Erro = \left| \varepsilon_{r_modelo} - \varepsilon_{r_ASR} \right|_i \quad (3-122)$$

A função erro foi então minimizada através do algoritmo numérico, tendo como dados de entrada as propriedades mecânicas da rocha, uma estimativa qualquer das componentes hidrostáticas e desviadora da tensão *in situ* e as condições de campo (profundidade da testemunhagem, pressão do reservatório, pressão do fluido de perfuração, tempo de recuperação da amostra, tempo de preparação do ensaio com o ASR, e tempo de duração do ensaio).

As principais saídas do modelo são:

- (i) Os deslocamentos radiais para o completo processo anelástico. Este comportamento será comparado à aproximação viscoelástica disponível; quantificando a influência da poroelasticidade no processo do ASR;
- (ii) O histórico de distribuição de poropressão, em uma tentativa de explicar o padrão de deformação do testemunho;
- (iii) A tensão *in situ* radial ou a pressão inicial do reservatório dos deslocamentos radiais medidos no campo com o dispositivo do ASR comparando com as tensões deduzidas pelos modelos de viscoelasticidade convencionais.

A Figura 3.15 resume a seqüência de cálculo das tensões *in situ* através do modelo de BLOCH (1999) sob a forma de fluxograma.

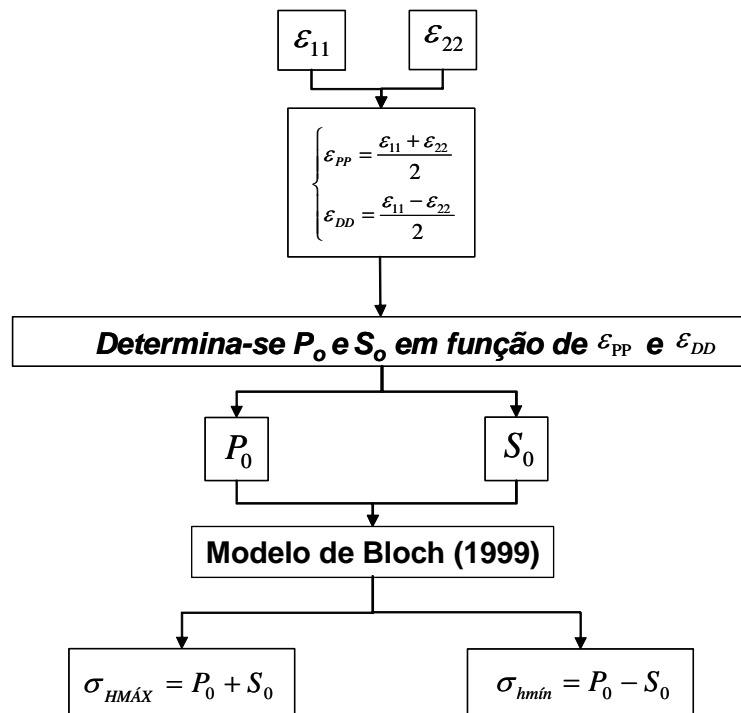


Figura 3.15. Fluxograma de cálculo do Modelo de BLOCH (1999).

3.5 Considerações Finais

Poucos modelos para prever as magnitudes das tensões *in situ* através de magnitudes relativas das deformações principais medidas no teste ASR foram desenvolvidos: BLANTON (1983), WARPINSKI e TEUFEL (1989) e MATSUKI e TAKEUCHI (1990), baseados na teoria da viscoelasticidade. A tensão vertical foi assumida como sendo uma das tensões principais determinada pela tensão de sobrecarga (TEUFEL, 1983, BLANTON, 1983, WARPINSKI e TEUFEL, 1989, WOLTER *et al.*, 1989). Todavia, muitas medições *in situ* mostraram que esta hipótese não é sempre correta (BROWN *et al.*, 1978).

Segundo BLOCH (1999), a maior limitação dos modelos do ASR baseados na viscoelasticidade é a hipótese de que as amostras de rocha sempre irão expandir-se após a testemunhagem devido ao alívio de tensão. Esta hipótese está implícita no modelo de viscoelasticidade para computar as magnitudes das tensões (BLANTON e TEUFEL, 1983), levando a valores errados sempre quando a rocha mostrar alguma contração. A contração do testemunho foi reportada em muitos casos de campo (BLANTON e TEUFEL, 1983, PERREAU *et al.*, 1989, BUTTERWORTH *et al.*, 1991, RAMOS *et al.*, 1994, BRERETRON *et al.*, 1995), e poucas tentativas foram feitas para explicar tal fato. BUTTERWORTH *et al.* (1991) mencionaram que, em alguns casos, esta contração do testemunho pode ser apenas aparente, sendo causada pelo salto da ponteira do sensor carregado, que pode ser empurrada para dentro do testemunho pela deteriorização da rocha no ponto de contato.

Assumindo que as ponteiros do sensor não são influenciadas pelas medições, três fatores adicionais potenciais devem ser considerados na explicação da contração da rocha: elevado coeficiente de Poisson, mudança de temperatura e efeitos poroelásticos (BLANTON, 1983, BLANTON, 1986, WARPINSKI e TEUFEL, 1989, BRERETRON *et al.*, 1995).

Em relação ao coeficiente de Poisson, é fácil perceber que as contrações da rocha podem ocorrer na direção da tensão *in situ* mínima para rochas com coeficientes de Poisson elevados submetidos a elevadas tensões desviadoras ($\sigma_1 - \sigma_3$), baseando-se somente na teoria da elasticidade. Neste caso, a expansão da rocha devido ao alívio de tensão mínima deve ser menor que a contração da rocha devido a expansão na direção da máxima tensão *in situ*.

Quanto à mudança de temperatura, é importante ressaltar que a correção das deformações medidas em relação à variação deste parâmetro é um passo inicial sempre quando analisar os dados ASR. Isto é usualmente feito medindo-se o coeficiente de expansão térmica, e adicionando ou subtraindo as deformações térmicas devido a mudanças de temperatura das medições de deformações totais quando os testes ASR forem executados. Um caminho mais apropriado, todavia, seria considerar os efeitos térmicos associados à deformação da rocha devido ao alívio de tensões e redução da poropressão.

Em relação aos efeitos associados à difusão de poropressão e deformações no maciço, esses parâmetros têm sido totalmente abandonados pelos modelos viscoelásticos para computar as magnitudes das tensões pelo ASR. Uma das razões consiste no fato de assumir que a deformação do volume dos poros é tão pequena e homogênea que afeta igualmente a deformação da rocha em todas as direções. Desta maneira, seria irrelevante para modelos o uso das magnitudes relativas das principais deformações como *input* para computar as tensões. Também pode ser observado que a importância da teoria da poroelasticidade não foi tão difundida na indústria do petróleo nos anos 80. De fato, apenas poucas publicações mencionaram os efeitos de poroelasticidade, principalmente em fraturamento hidráulico (ROEGIERS e ISHIJIMA, 1983, SCHIMIDT e ZOBACK, 1989, HAISON e HUANG, 1989).

Segundo BLANTON (1986), o período de recuperação das deformações para a determinação do campo de tensões envolve um número de hipóteses e idealizações que alimentam questões sobre sua aplicabilidade genérica. Algumas questões de particular preocupação são:

- (i) A remoção gradual das tensões durante o alívio do testemunho;
- (ii) O efeito da poropressão e da temperatura;
- (iii) O trabalho com poços desviados;
- (iv) Observação de expansões e contrações no mesmo testemunho.

BLANTON (1989) foi o primeiro a produzir um modelo com equações padrão da elasticidade linear e a teoria da viscoelasticidade linear. Ele derivou seu modelo usando uma aproximação da integral hereditária, enquanto WARPINSKI e TEUFEL (1989) usaram o Princípio de Correspondência Elasticidade-Viscoelasticidade correspondente (VCP). As duas técnicas podem gerar resultados similares, dependendo de sua implementação. As diferenças entre os dois modelos estão

principalmente nos detalhes dos modelos, todavia muitos destes detalhes podem ser relevantes.

Segundo (WARPINSKI e TEUFEL, 1989, BLANTON, 1989), a permeabilidade anisotrópica irá causar deformabilidade anisotrópica, mas WARPINSKI e TEUFEL (1989) acreditam que é impossível se obter dados de magnitudes das tensões através de rochas anisotrópicas e bastante difícil para rochas isotrópicas.

O modelo de BLANTON (1989) é aplicado apenas na ausência de redução da poropressão e contração do testemunho. Esta é a razão pela qual WARPINSKI e TEUFEL (1989) tentaram encaixar toda família de dados. Os parâmetros de encaixe propõem informação adicional para diagnosticar este tipo de comportamento.

Segundo BLOCH (1999), não existem dúvidas de que a orientação das tensões principais *in situ* seja coincidente com a direção das deformações principais detectadas na amostra durante o teste de ASR. Já a magnitude das tensões era calculada na década de 80 com modelos puramente viscoelásticos (BLANTON 1986, WARPINSKI e TEUFEL, 1989), onde a deformação da rocha era desacoplada da variação de pressão no fluido intersticial intraporos. Estes modelos são adequados somente para o caso de expansão monotônica da rocha após o alívio das tensões, quando os efeitos de poropressão são desprezíveis. Diversos casos mostraram, no entanto, a ocorrência de contração após a testemunhagem (PERREAU *et al.*, 1989, BLANTON *et al.*, 1986), os quais impulsionaram a pesquisa de outros modelos que melhor representassem a deformação observada durante o ensaio ASR. Os efeitos de contração podem ser atribuídos à redução de temperatura e poropressão após o corte, (WARPINSKI e TEUFEL, 1989, BRERETRON *et al.*, 1995), sendo mais evidentes conforme as condições de campo (pressão estática inicial e tensões horizontais), propriedades físicas da rocha (permeabilidade) e o tipo de fluido intersticial intraporos (viscosidade).

Enfim, do estudo de todos os modelos foi possível concluir que muito ainda deve ser padronizado para a validação da aplicação destes modelos como um meio de confiável de determinação das tensões *in situ*. Para tal inicialmente, deve-se estar ciente que apenas o conhecimento pleno dos modelos, hipóteses, limitações e inclusive conhecimento de todas as condições de campo, mesmo que não representem parâmetros que possam ser inseridos diretamente nos modelos. Tal domínio pode trazer o que pode ser ainda mais difícil de mensurar, uma interpretação

das respostas dos ensaios ASR de forma crítica para que os modelos possam ser bem aplicados, e conseqüentemente, bem aproveitados.

A Tabela 3.1 apresenta a comparação dos inputs de todos os modelos de determinação de tensões in situ todos os modelos citados nesse Capítulo.

Tabela 3.1. Comparação dos Inputs dos Modelos de Determinação de Tensões *in situ*.

Modelo	Input
BLANTON (1983) isotrópico	$\Delta\varepsilon_{11}, \Delta\varepsilon_{22}, \Delta\varepsilon_{33}, \nu, \sigma_1$
BLANTON (1983) transversalmente isotrópico	$\Delta\varepsilon_{11}, \Delta\varepsilon_{22}, \Delta\varepsilon_{33}, \nu_1, \nu_2, a = E_1/E_2, \sigma_1$
BLANTON e TEUFEL (1983) isotrópico	$\Delta\varepsilon_{Hmáx}, \Delta\varepsilon_v, \Delta\varepsilon_{Hmín}, \nu, \sigma_1, P_p, \alpha, \sigma_{ve}$
BLANTON e TEUFEL (1983) transversalmente isotrópico	$\Delta\varepsilon_{Hmáx}, \Delta\varepsilon_v, \Delta\varepsilon_{Hmín}, \nu_1, \nu_2, a = E_1/E_2, P_p, \alpha, \sigma_{ve}$
BLANTON (1986)	$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \beta, E, D = 1/E, \sigma'_{11}, p'$
WARPINSKI e TEUFEL (1989)	$\sigma_2, \sigma_v, x_2, \theta, x_8$
	$J_1, \sigma_v, x_2, \theta, x_8$
BLANTON (1989)	$\bar{\Delta}\varepsilon_v, \bar{\Delta}\varepsilon_1, \bar{\Delta}\varepsilon_2, \sigma_2, \sigma_v$
	$\Delta\varepsilon_v, \Delta\varepsilon_1, \Delta\varepsilon_2, J_s, \sigma_v$
MATSUKI e TAKEUCHI (1990)	$e_m, e_x, e_y, e_z, e_{xy}, e_{yz}, e_{zx}$
BRERETRON <i>et al.</i> (1995)	$\varepsilon_t, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, P_p, \theta, t_1, t_2, J_1, J_2, \beta(t)$
BLOCH (1999)	$P_0, S_0, \varepsilon_{PP}, \varepsilon_{DD}$

4 CAPÍTULO 4

MATERIAL E METODOLOGIA

São descritos neste capítulo os dois materiais utilizados nesta pesquisa para análise de sensibilidade dos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983). São eles:

- (i) Arenito da Formação ROLLINS (Colorado, EUA), relativo à amostra ROLLINS, cujos dados foram obtidos da literatura (BLANTON, 1983, BLANTON e TEUFEL, 1983, BLANTON, 1986, WARPINSKI e TEUFEL, 1989);
- (ii) Calcário da Formação BAKKEN (Montana, EUA), relativo às amostras BAKKEN 1 e BAKKEN 2 do poço (BTS - *Burning Tree State*, 36-2H), com dados provenientes de relatórios técnicos cedidos pela empresa de petróleo Halliburton (LANTZ, 2000, LANTZ, 2005a).

Além disto, é apresentada a metodologia de estudo empregada para avaliar a sensibilidade dos modelos, na determinação das tensões *in situ* máxima e mínima.

4.1 Arenito ROLLINS

O material da formação do ROLLINS representa um caso clássico da literatura sobre a técnica ASR. A amostra ROLLINS tem granulometria fina e homogênea, e assume-se que apresenta coeficiente de Poisson constante durante o processo de recuperação das deformações. Nenhum efeito de redução de poropressão foi aparente. O coeficiente de poropressão foi determinado assumindo-se que o constituinte primário da matriz rochosa do arenito de ROLLINS era o quartzo (BLANTON, 1986).

As propriedades do arenito do ROLLINS e condições *in situ* são apresentadas na Tabela 4.1. Os resultados do ensaio ASR na amostra ROLLINS, considerada como isotrópica e homogênea (BLANTON, 1983, BLANTON e TEUFEL, 1983, BLANTON, 1986, WARPINSKI e TEUFEL, 1989a), permitiram a análise dos modelos de interpretação de magnitudes de tensões *in situ* e a comparação com as tensões

obtidas através do ensaio de fraturamento hidráulico. A Tabela 4.2 apresenta estes valores de magnitudes e orientações de tensões *in situ* para duas técnicas, ASR (Modelo de BLANTON, 1986) e fraturamento hidráulico, mostrando resultados semelhantes.

Tabela 4.1. Características do arenito ROLLINS (BLANTON, 1986).

Parâmetros	Valores
Módulo de Young, E	32,6 MPa
Coefficiente de Poisson, ν	0,21
Coefficiente de poropressão, α	0,59
Tensão de sobrecarga, σ_v	56,4 MPa
Tempo de recuperação, t	7 horas
Profundidade, $Prof$	2.305,5 m
Poropressão, P_p	41,0 MPa

Tabela 4.2. Tensões *in situ* obtidas dos ensaios ASR e de fraturamento hidráulico (BLANTON, 1986).

Ensaio	Tensão Horizontal Mínima σ_{33}	Tensão Horizontal Máxima σ_{22}	Azimute de Tensão Horizontal Máxima σ_{22}
ASR (Modelo de BLANTON, 1986)	51,02±1,03 MPa	53,98±1,03 MPa	N117E + 8
Fraturamento Hidráulico	47,02 MPa	49,98 MPa	N110E – 120E

A Figura 4.1 apresenta os dados da literatura (WARPINSKI e TEUFEL, 1989a) relativos às deformações recuperadas no ensaio ASR da amostra da formação do ROLLINS. Como a amostra foi retirada de um poço vertical, só há necessidade de se registrar as seguintes deformações recuperadas no ensaio ASR: ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{aa} e ε_{zz} , sendo as deformações ε_{bb} e ε_{cc} desnecessárias para este cálculo.

A Figura 4.2 apresenta os valores das deformações principais ε_{11} , ε_{22} , ε_{33} , calculadas a partir das deformações recuperadas como pode ser observado na Figura 4.1. É interessante observar nas Figuras 4.1 e 4.2 que o ensaio ASR só teve início após 7 horas do corte do testemunho no fundo do poço.

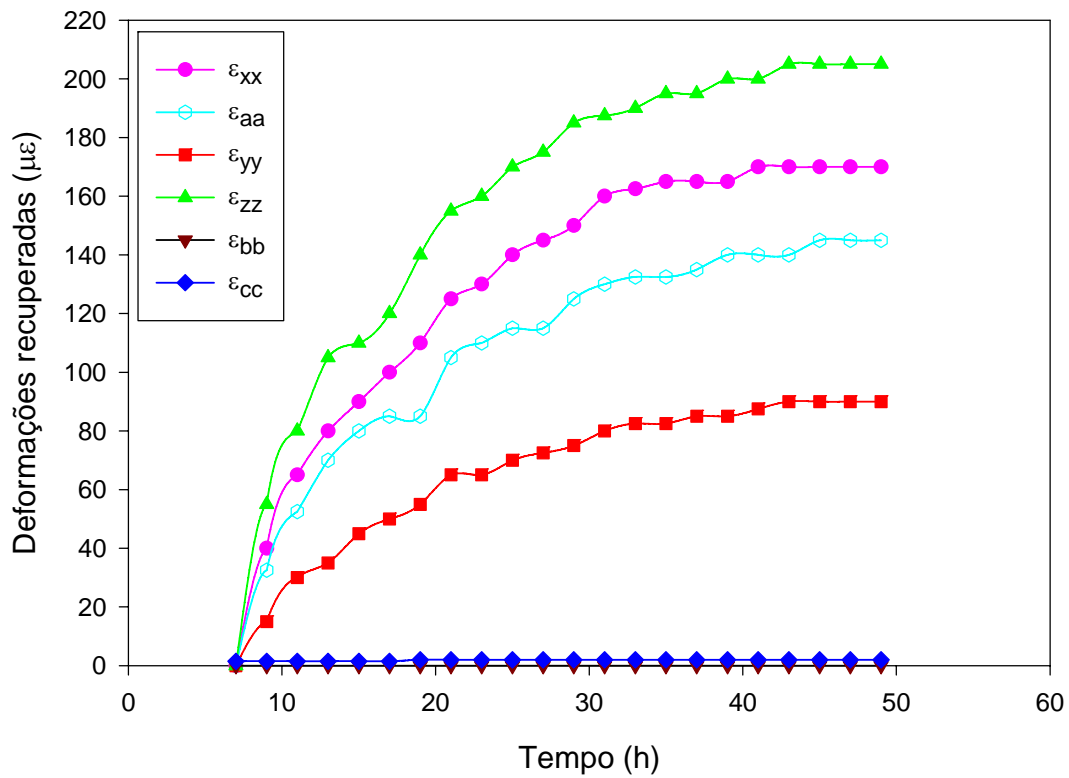


Figura 4.1. Deformações recuperadas no ensaio ASR da amostra ROLLINS – C-Temp (adaptado de WARPINSKI e TEUFEL, 1989).

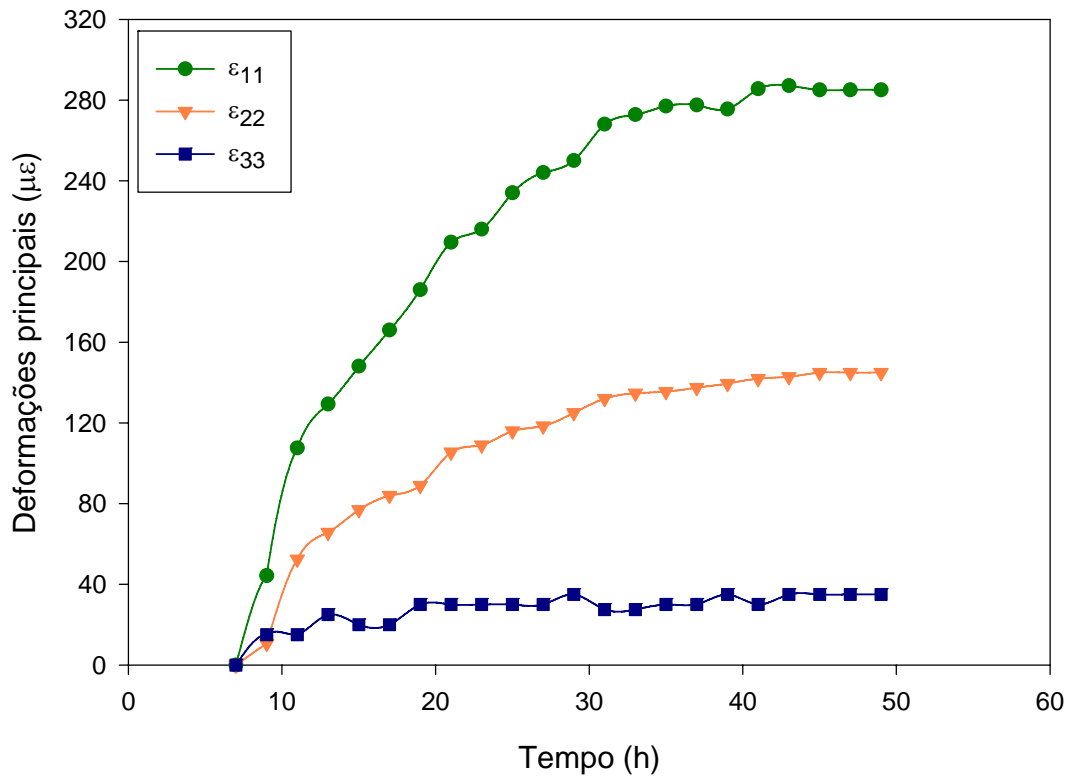


Figura 4.2. Deformações principais da amostra ROLLINS - C-Temp (adaptado de WARPINSKI e TEUFEL, 1989)

Por sua vez, a Figura 4.3 apresenta dados referentes às mesmas deformações recuperadas do ROLLINS (WARPINSKI e TEUFEL, 1989), mostrando como seria a sua extrapolação para o tempo zero, correspondente ao corte do testemunho no fundo do poço. O período de tempo entre 0 e 7 horas corresponde ao tempo no qual o testemunho está sendo transportado do fundo do poço para a superfície. Todavia, desta extrapolação para o tempo zero, não é possível chegar a uma aproximação das deformações recuperadas no período de viagem do testemunho até a superfície (como se o testemunho fosse instrumentado no momento do corte), pois as deformações não são anelásticas neste momento inicial.

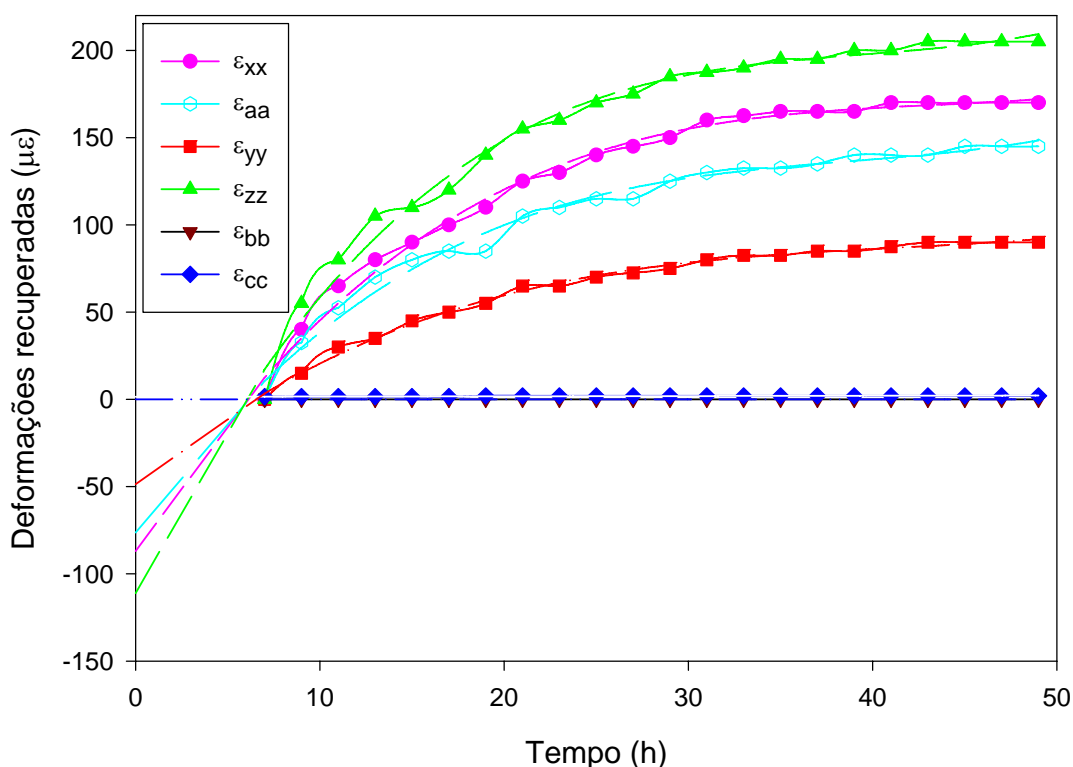


Figura 4.3. Deformações recuperadas na amostra ROLLINS com extrapolação para o tempo inicial – C-Temp.

De forma similar, a Figura 4.4 apresenta as deformações principais do ROLLINS com extrapolação para o tempo zero, anterior ao do início do ensaio ASR.

No cálculo dos autovalores para determinação das tensões principais (Figuras 4.2. e 4.4) não foram utilizados os valores referentes a tempos menores que 7 h, anteriores ao início do ensaio, nos modelos de interpretação das tensões *in situ*. Sabe-se que, as deformações iniciais sofridas pelo testemunho são elásticas, o que não influenciaria no resultado das medições das deformações anelásticas recuperadas, que é a proposta da técnica ASR.

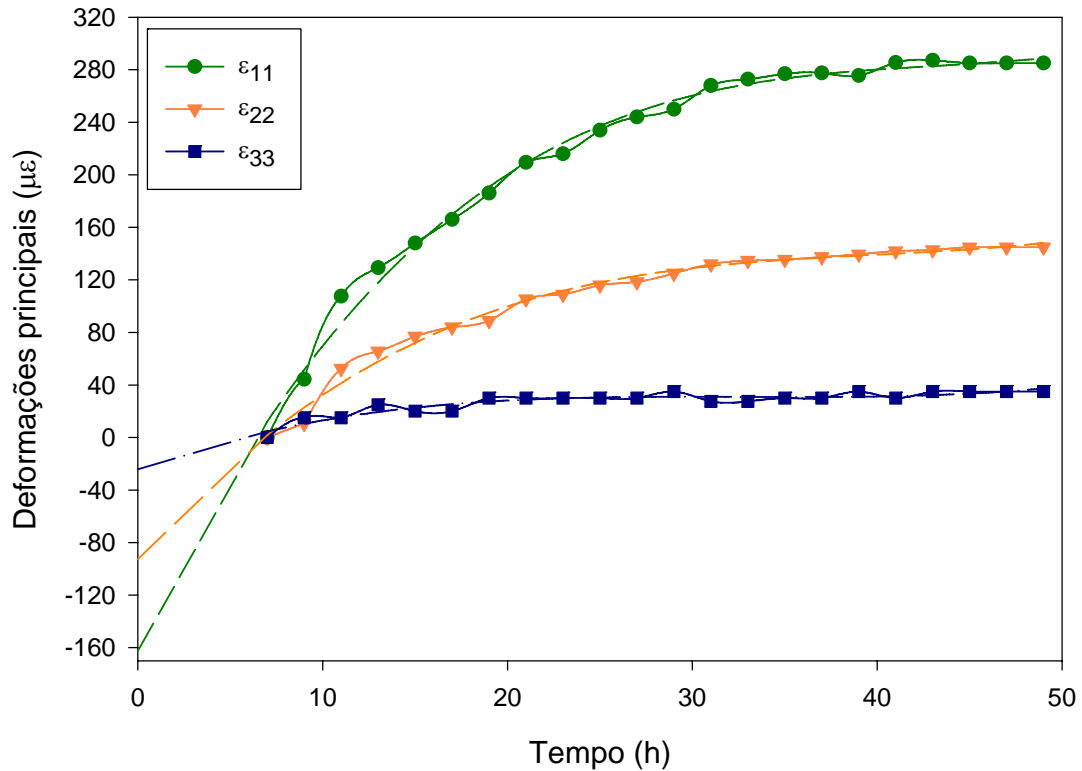


Figura 4.4. Deformações principais da amostra ROLLINS com extrapolação para o tempo inicial - C-Temp.

Apesar da análise de extrapolação da curva para o tempo zero (Figuras 4.2 e 4.4), ressalta-se que, para o cálculo das magnitudes das tensões *in situ* através dos modelos, o valor realmente relevante é o da deformação volumétrica máxima, que não ocorre no início do ensaio ASR. Isto reduz a importância de se controlar as deformações nas primeiras horas de ensaio. Mas, é fundamental lembrar que o testemunho deve ser instrumentado o quanto antes, após a saída do poço.

As características das deformações recuperadas e principais do ROLLINS, sem extrapolação e com extrapolação, podem ser caracterizadas por polinômio do 4º grau, com coeficientes de correlação entre 0,9 e 1 para todos os casos.

4.2 Calcário BAKKEN

O material da formação petrolífera do BAKKEN é caracterizado pelas amostras BAKKEN 1 e BAKKEN 2, obtidas do testemunho do poço BTS 36-2H, Montana (EUA).

O relatório de análise inicial do testemunho indicou que a formação calcária do BAKKEN continha um intervalo de 3,048 a 3,658 m de zona produtora, com

porosidades efetivas variando de 6,2% a 8,6% (5,0% a 6,9% de porosidade de hidrocarbonetos), o que é consistente com os resultados esperados para o poço piloto vertical (Tabela 4.3). Inicialmente, o poço foi perfurado até a profundidade de retirada do testemunho, que corresponde ao intervalo de 2970,1 a 2978,0 m.

Tabela 4.3. Características das curvas de deformação recuperadas e principais do ROLLINS - C-Temp.

Tipo	Linha de tendência	Coeficiente de correlação (R^2)		Equação
		Mínimo	Máximo	
Deformações recuperadas	Sem extrapolação	0,991 (ε_{aa})	0,997 (ε_{yy})	Polinomial do 4º grau
Deformações principais		0,991 (ε_{22})	0,997 (ε_{33})	
Deformações recuperadas	Com extrapolação	0,991 (ε_{aa})	0,997 (ε_{yy})	
Deformações principais		0,707 (ε_{33})	0,996 (ε_{22})	

As permeabilidades horizontais na porção vertical do poço variaram de 0,12 md a menos do que 0,001 md. As permeabilidades verticais acima dos intervalos de elevada porosidade variaram de 0,020 md a menos do que 0,001 md. Sendo assim, a média da razão de anisotropia vertical (k_v/k_h) foi aproximadamente 0,48. Estudos de simulação inicial de reservatório foram executados usando razão de 0,2, com permeabilidade horizontal de 0,33 md. Os detalhes da análise do testemunho estão incluídos na Tabela 4.4 (LANTZ, 2005a). As duas amostras analisadas nesta pesquisa: amostra BAKKEN 1 (2973,32 m - 2973,54 m), e a amostra BAKKEN 2 (2974,85 - 2975,06 m), são apresentadas em negrito. O Anexo 1 apresenta maiores detalhes das características da formação e dos perfis do poço BTS 36-2H.

Tabela 4.4. Porosidade e permeabilidade do testemunho do poço BTS 36-2H (LANTZ, 2005a).

Profundidade		Porosidade ϕ (%)	Permeabilidade k (md)
Topo	Fundo		
2970,12 m	2971,68 m	3,60	0,0017
2971,68 m	2971,74 m	1,52	0,0012
2971,74 m	2972,41 m	4,00	0,0200
2972,41 m *	2974,54 m	6,88	0,1206
2974,54 m **	2976,37 m	5,12	0,0060
2976,37 m	2978,51 m	1,28	0,0010

*2973,32 m a 2973,54 m – Amostra BAKKEN 1

**2974,85 a 2975,06 m – Amostra BAKKEN 2

Cada amostra apresenta 0,213 m de comprimento. Adicionalmente, muitas laminações finas de folhelho foram observadas em toda sequência do testemunho, as

quais reduziam a permeabilidade vertical efetiva, o que aumentava as chances de que um fraturamento hidráulico fosse necessário, especialmente porque era possível observar permeabilidades horizontais reduzidas (LANTZ, 2005a). Ambas amostras apresentam características diferenciadas apesar de estarem afastadas de apenas 1,524 m.

4.2.1 Amostra BAKKEN 1

A amostra BAKKEN 1 está localizada entre 2972,4 m e 2974,5 m, onde a estrutura rochosa foi caracterizada por uma estrutura muito fina a fina cristalina, sendo a rocha um calcário arenítico e siltoso, com uma porosidade de 6,88% e permeabilidade de 0,1206 md. A Tabela 4.5 apresenta as características da amostra BAKKEN 1, adaptados do relatório técnico de LANTZ (2000).

Tabela 4.5. Características da amostra BAKKEN 1.

Parâmetros	Valores
Coefficiente de Poisson, ν	0,18
Coefficiente de poropressão, α	1
Tensão de sobrecarga, σ_v	70,62 MPa
Tempo de recuperação, t	Não disponível
Profundidade, $Prof$	2973,3 m
Poropressão, P_p	28,96 MPa

A Figura 4.5 apresenta os resultados do ensaio ASR, referente às deformações recuperadas da amostra BAKKEN 1, com correção de temperatura. Na Figura 4.6 podem-se observar as deformações principais ε_{11} , ε_{22} , ε_{33} , obtidas a partir da matriz de deformações, com correção de temperatura.

É possível observar que o azimute e a inclinação para as três direções nas primeiras horas de ensaio sofrem variações antes de alcançar a estabilidade. As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam os valores das deformações principais da amostra BAKKEN 1 nas direções 1, 2 e 3, respectivamente.

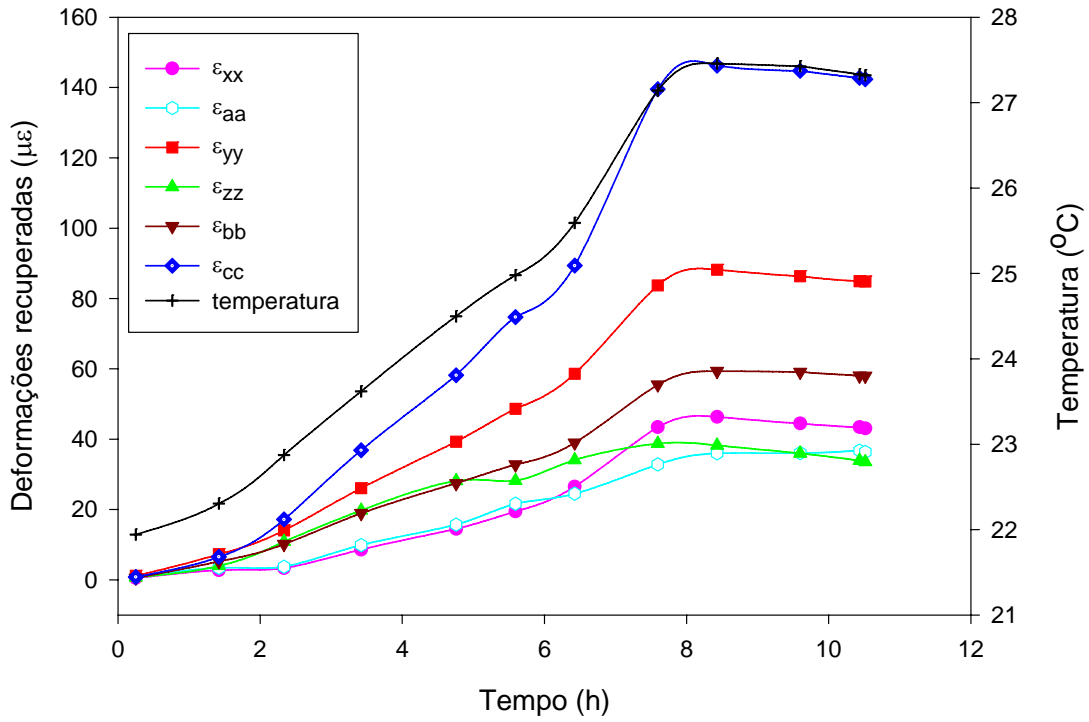


Figura 4.5. Deformações recuperadas (C-Temp) - BAKKEN 1.

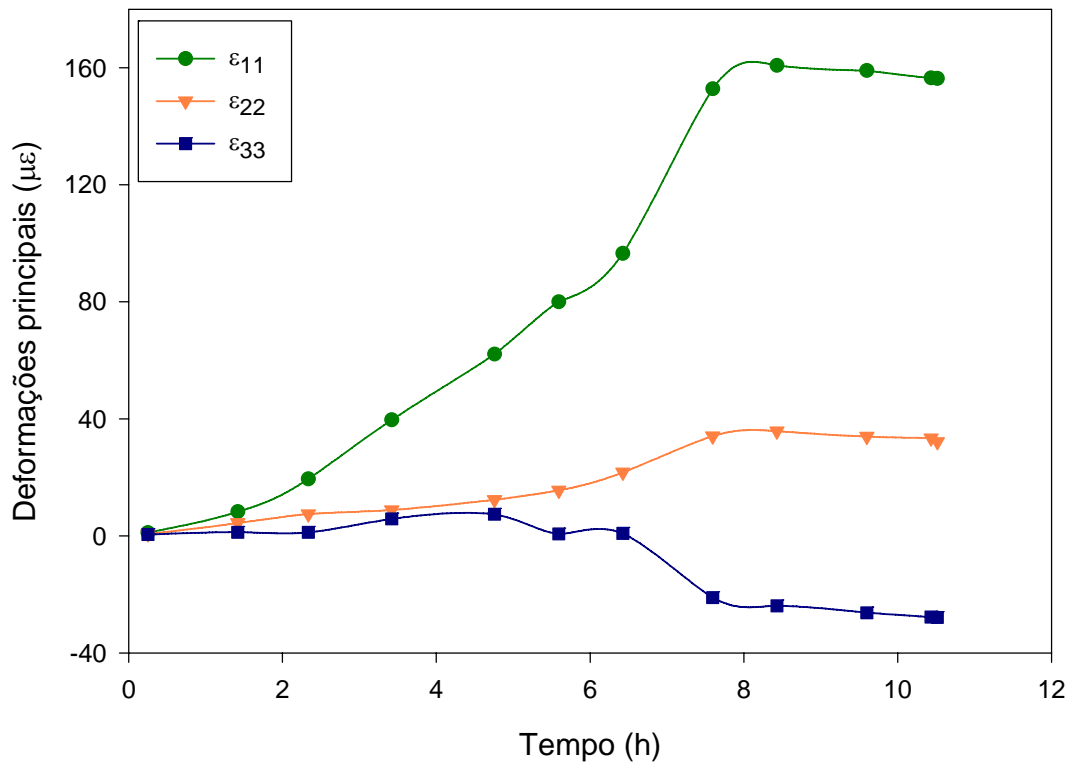


Figura 4.6. Deformações principais (C-Temp) - BAKKEN 1.

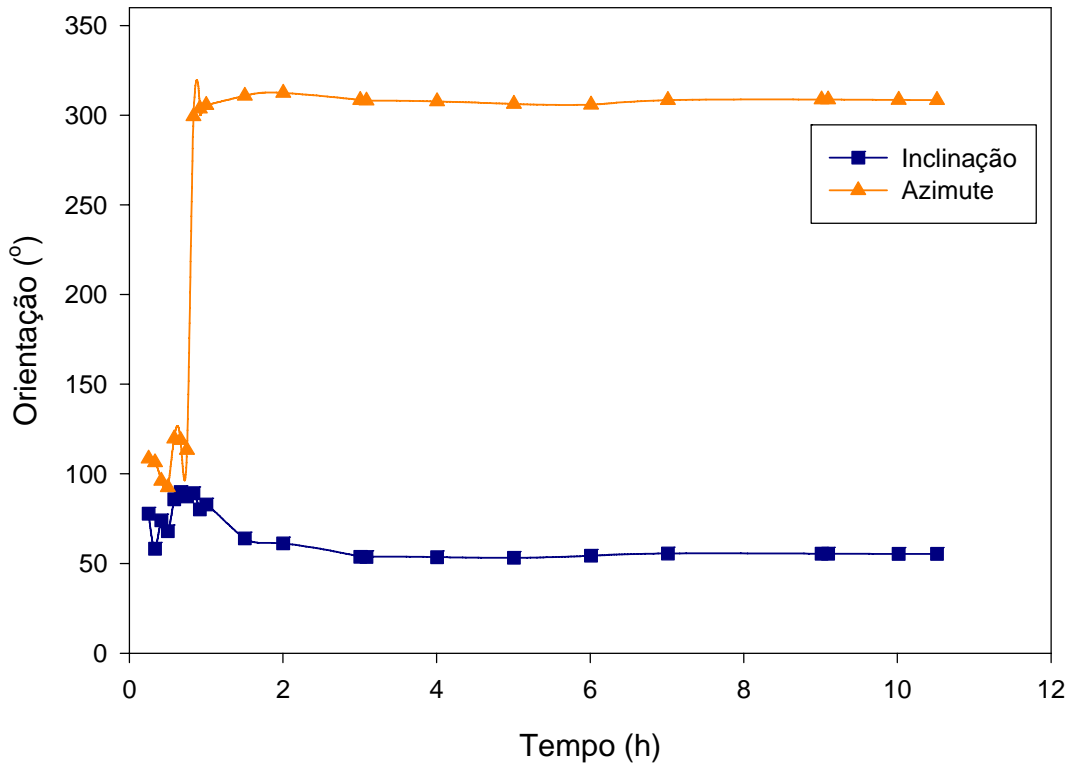


Figura 4.7. Direção da deformação principal ε_{11} - BAKKEN 1.

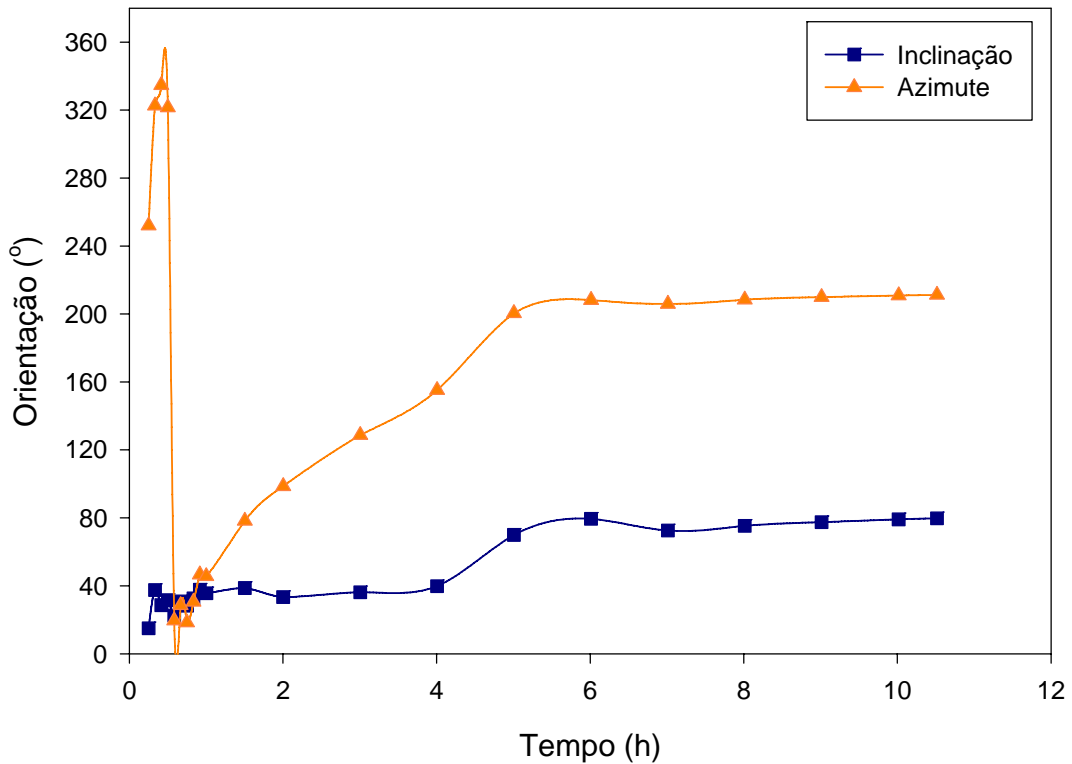


Figura 4.8. Direção da deformação principal ε_{22} - BAKKEN 1.

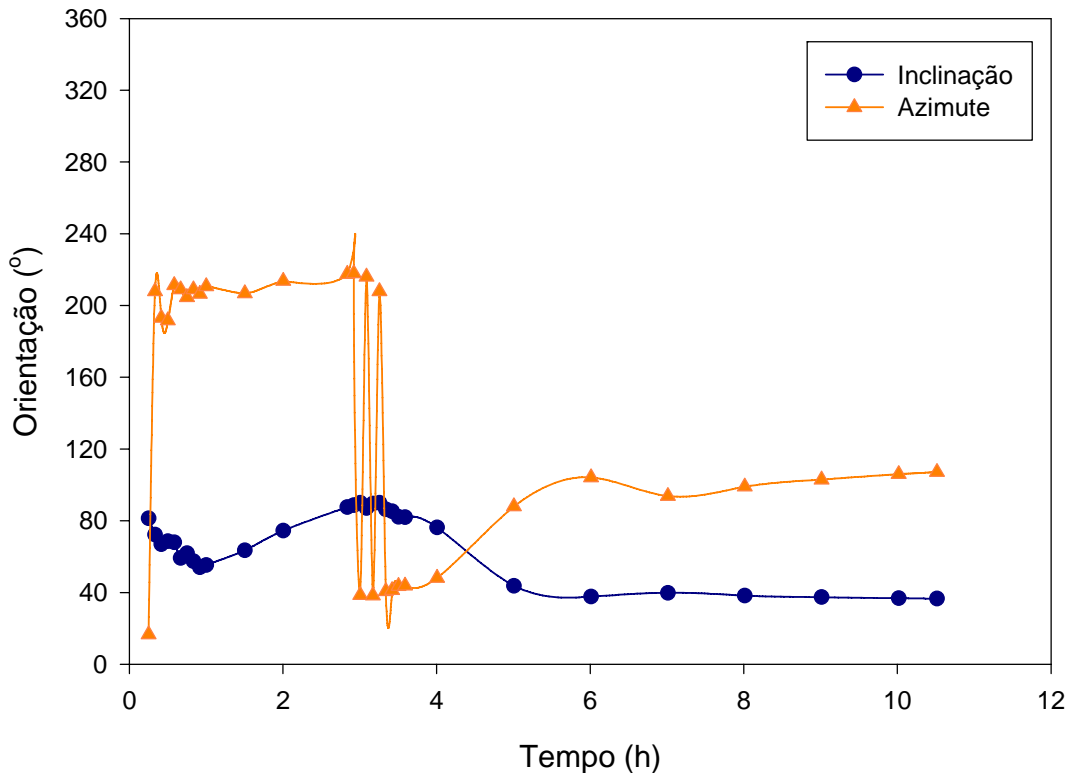


Figura 4.9. Direção da deformação principal ε_{33} - BAKKEN 1.

4.2.2 Amostra BAKKEN 2

A amostra BAKKEN 2 está localizada entre 2974,5 m e 2976,4 m e tem uma estrutura muito fina cristalina, sendo a rocha um calcário arenítico e siltoso, com uma porosidade de 5,12% e permeabilidade de 0,006 md. A Tabela 4.6 apresenta características da amostra BAKKEN 2, adaptadas do relatório técnico de LANTZ (2000).

Tabela 4.6. Características da amostra BAKKEN 2.

Parâmetros	Valores
Coeficiente de Poisson, ν	0,18
Coeficiente de poropressão, α	1
Tensão de sobrecarga, σ_v	70,7 MPa
Tempo de recuperação, t	Não disponível
Profundidade, $Prof$	2974,9 m
Poropressão, P_p	29,0 MPa

A Figura 4.10 apresenta os dados das deformações recuperadas no ensaio ASR da amostra BAKKEN 2 com correção de temperatura. Tais deformações recuperadas foram medidas em seis diferentes direções da amostra BAKKEN 2. Na

Figura 4.11, pode-se observar as deformações principais relativas ao ensaio da amostra BAKKEN 2 com correção de temperatura.

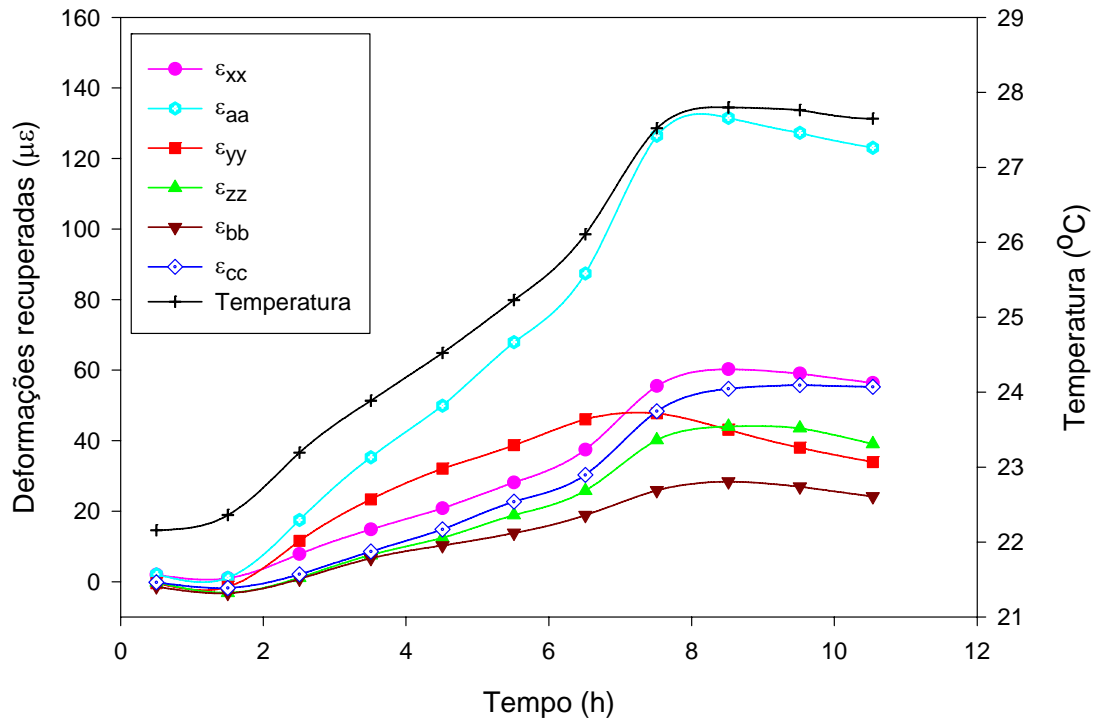


Figura 4.10. Deformações recuperadas (C-Temp)-BAKKEN 2.

As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam as deformações principais referentes ao ensaio ASR realizado na amostra BAKKEN 2 nas direções 1, 2 e 3, respectivamente.

Na Tabela 4.7 pode-se observar que as curvas de deformação recuperadas e principais das amostras BAKKEN 1 (Figuras 4.5 e 4.6) e BAKKEN 2 (Figura 4.10 e 4.11) equivalem a equações polinomiais de 4^o grau.

4.2.3 Importância da Orientação das Deformações Principais das amostras do BAKKEN

Sabe-se que o objetivo da empresa Halliburton referente à realização de ensaios ASR nas amostras BAKKEN foi determinar a orientação das tensões *in situ* para a escolha do melhor direcionamento do trecho horizontal do poço. Desta forma, o poço BTS36-2H foi perfurado em duas fases. A primeira fase correspondeu à parte vertical do poço, até 2976,68 m de profundidade vertical, e foi nesta fase que o testemunho foi retirado para realização do ensaio ASR.

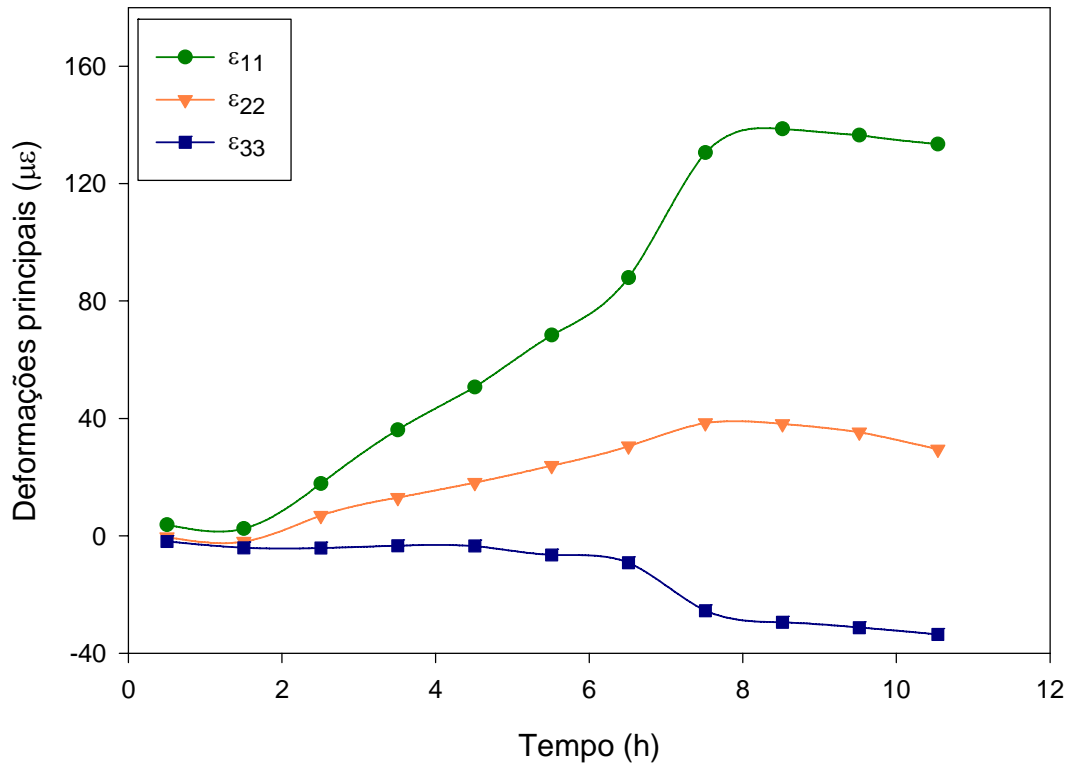


Figura 4.11. Deformações principais (C-Temp) - BAKKEN 2.

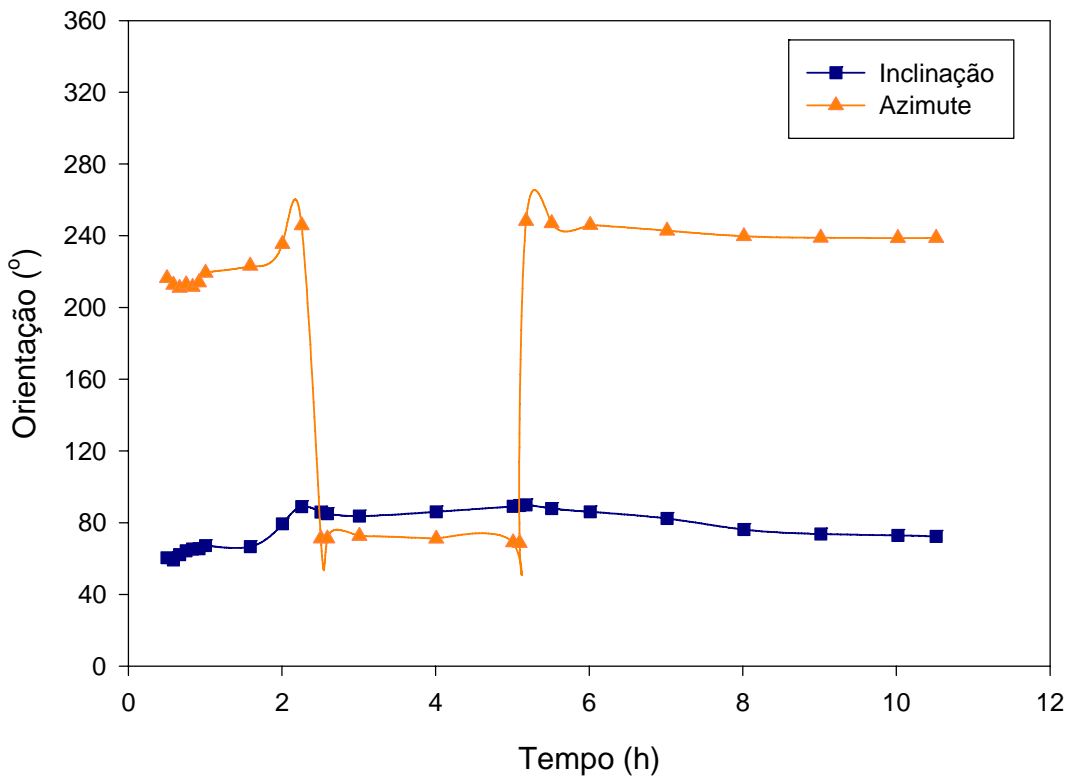


Figura 4.12. Direção da deformação principal ϵ_{11} - BAKKEN 2.

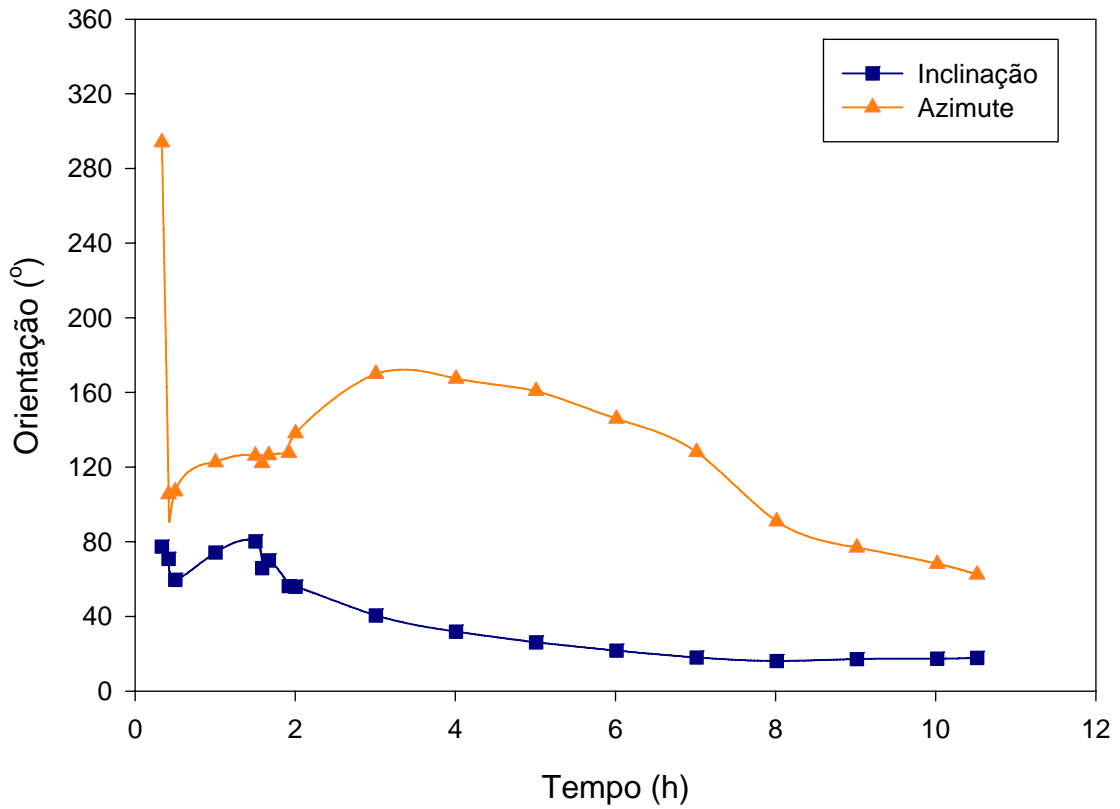


Figura 4.13. Direção da deformação principal ε_{22} – BAKKEN 2.

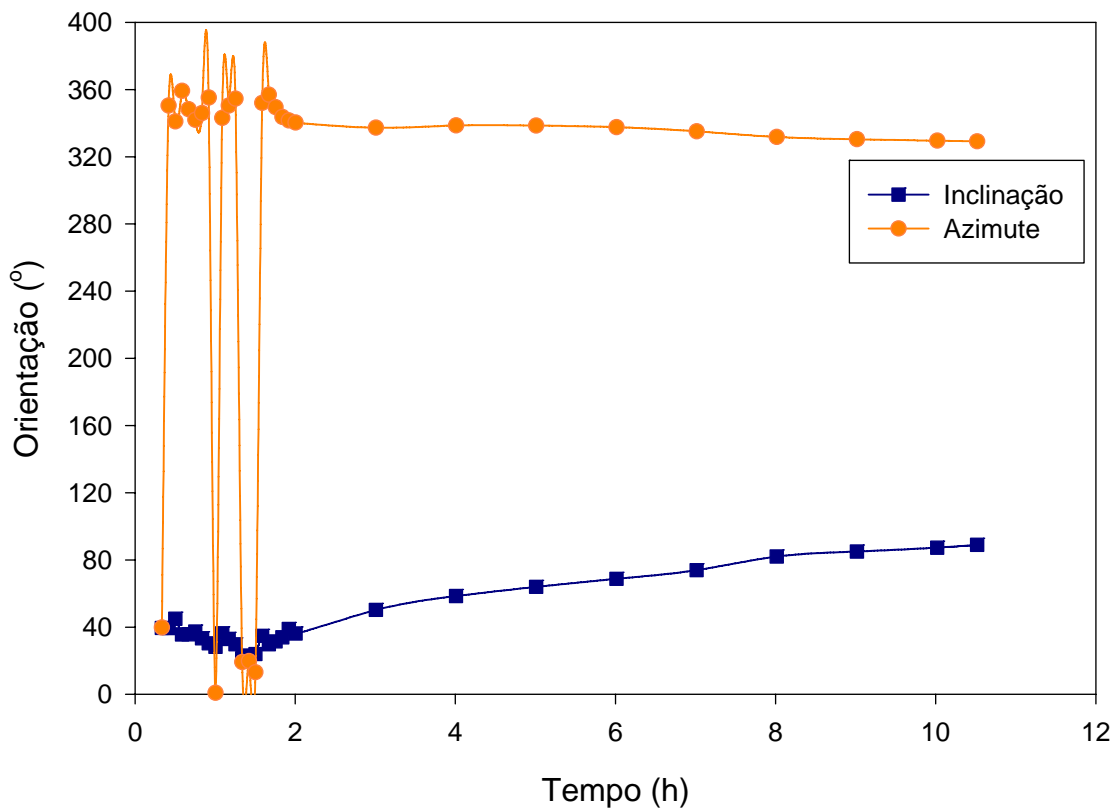


Figura 4.14. Direção da deformação principal ε_{33} - BAKKEN 2.

Tabela 4.7. Comportamento das curvas de deformação recuperadas e principais do BAKKEN.

Tipo	Amostra	Coeficiente de correlação (R^2)		Equação
		Mínimo	Máximo	
Deformações recuperadas	BAKKEN 1	0,987 (ε_{xx})	0,995 (ε_{aa})	Polinomial do 4º grau
Deformações principais		0,966 (ε_{33})	0,991 (ε_{11})	
Deformações recuperadas	BAKKEN 2	0,988 (ε_{33})	0,993 (ε_{33})	
Deformações principais		0,9877 (ε_{33})	0,993 (ε_{33})	

Todavia, os dados de levantamento de direção vão até 2956,56 m de profundidade vertical (TVD), os quais podem ser observados na Tabela A2.1 (Anexo 2). Como o testemunho para a retirada das amostras de estudo está localizado entre 2970,12 m e 2978,00 m (TVD), foi feita uma análise adicional de direção e inclinação (*Directional Survey*) para confirmação do ângulo do poço, além do esquema da seção vertical. A partir destes dados, o poço foi considerado vertical para análise e será esquematizado a seguir.

Cabe aqui salientar que a segunda fase de perfuração do poço BTS 36-2H tem início na profundidade vertical total (TVD) de 2819,4 m, em que está o conhecido KOP (*Kick Off Point*), ponto no qual ocorre ganho de ângulo do poço, até que ele atinja seu trecho horizontal, a uma profundidade vertical total (TVD) de 2976,68 m e a uma profundidade medida (MD) de 3523,5 m, como pode ser observado na Tabela A2.2 (Anexo 2).

É possível observar o real objetivo (alvo) do poço, que equivale a profundidade total vertical (TVD) de 2979,7 m, sendo que através do programa, esta profundidade medida (MD) foi 3218,4 m. Tal erro decorre da restrição imposta pelo programa COMPASS em relação ao *build up* (taxa máxima de ganho de ângulo). A Figura 4.15 mostra a seção vertical do BTS-36-2H.

A Figura 4.16 apresenta o local realçado (da Figura 4.15), no qual foi retirado o testemunho. A Figura 4.17 apresenta uma vista 3D do poço. Os resultados do levantamento de direção e inclinação do poço BTS 36-2H são detalhados nas Tabelas A2.1 e A2.2, apresentadas no Anexo 2.

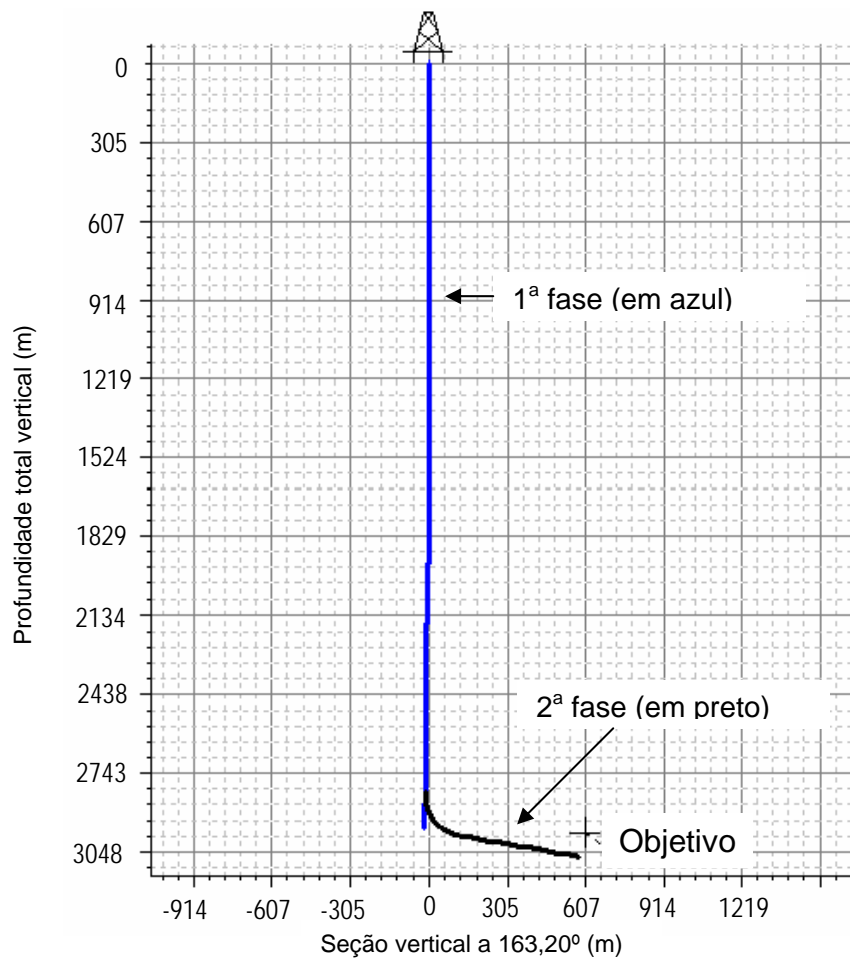


Figura 4.15. Seção vertical do poço BTS 36-2H.

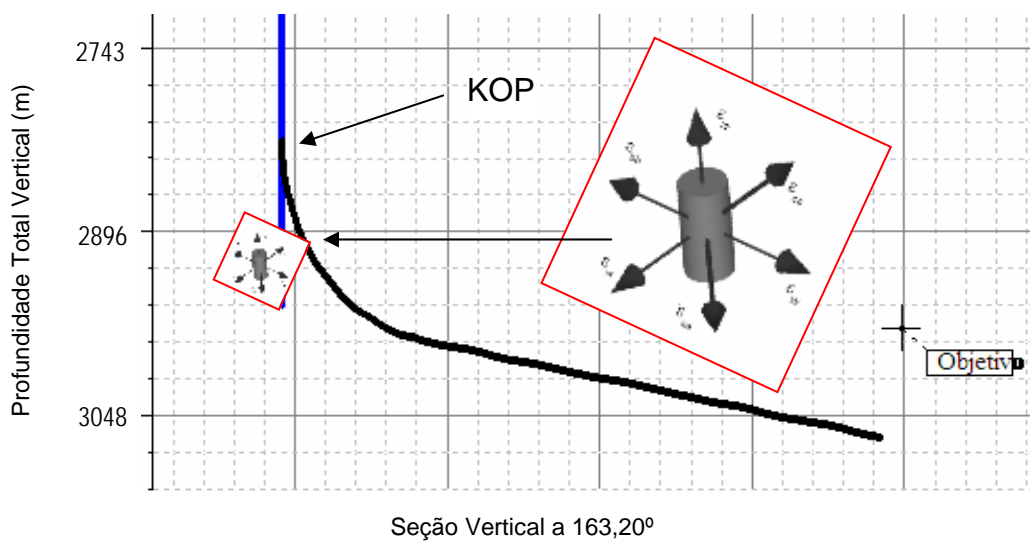


Figura 4.16. Local do testemunho retirado do poço BTS 36-2H.

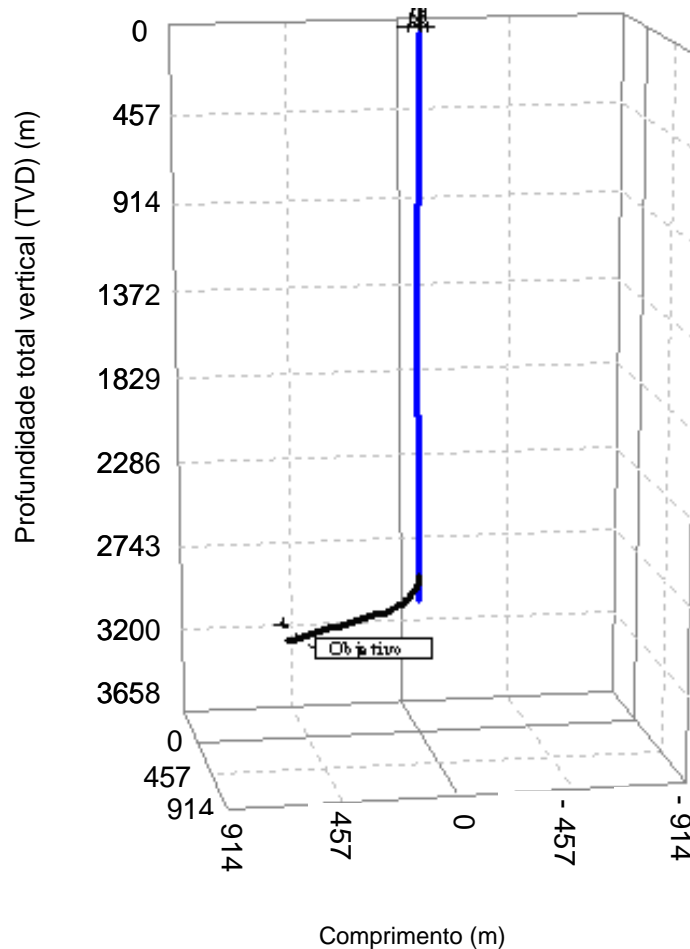


Figura 4.17. Vista 3D do poço BTS-36-2H.

É importante salientar que o testemunho de ensaio ASR é oriundo da parte vertical do poço, e a análise desse testemunho permitiu a determinação das direções das tensões principais *in situ*. No relatório do ensaio fornecido pela Halliburton, apenas as orientações das deformações *in situ* foram utilizadas no projeto do poço. A empresa não utilizou modelos de interpretação das tensões relativos a técnica ASR para a determinação das magnitudes das tensões *in situ*.

As Tabelas 4.8 e 4.9 apresentam as magnitudes e orientações, azimute e inclinação, das deformações principais das amostras BAKKEN 1 e BAKKEN 2, respectivamente. No período de tempo escolhido, tanto o azimute quanto a inclinação se encontravam estáveis.

É relevante citar que, para a escolha da melhor orientação do poço, foi feita análise das duas amostras, BAKKEN 1 (Tabela 4.8) e BAKKEN 2 (Tabela 4.9), tomando-se a média, para orientação deste poço, conforme visto na Tabela 4.10.

Essa média é considerada como a melhor estimativa das direções principais para as amostras.

Tabela 4.8. Magnitudes e direções das deformações principais da amostra BAKKEN 1 – C-Temp - (adaptado de LANTZ 2005a).

Tempo passado (h)	Magnitudes das deformações			Deformação principal máxima (ϵ_{11})		Deformação principal intermediária (ϵ_{22})		Deformação principal mínima (ϵ_{33})	
	ϵ_{11} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{22} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{33} ($\mu\epsilon$)	Azimute (°)	Inclinação (°)	Azimute (°)	Inclinação (°)	Azimute (°)	Inclinação (°)
1,00	7,5	4,7	1,5	305,6	82,9	45,6	35,6	210,7	55,3
1,08	7,8	4,7	2,1	306,9	78,1	52,2	38,7	208,1	53,8
1,17	8,1	5,0	1,6	305,4	75,7	51,4	42,6	203,5	50,9
1,25	8,5	5,3	2,2	307,5	76,3	53,1	42,2	206,2	51,1
1,34	9,0	5,4	2,4	308,6	71,6	58,5	44,5	203,2	51,3
Média	-	-	-	306,8	76,9	52,2	40,7	206,3	52,5

Tabela 4.9. Magnitudes e direções das deformações principais da amostra BAKKEN 2 – C-Temp - (adaptado de LANTZ 2005a).

Tempo passado (h)	Magnitudes das deformações			Deformação principal máxima (ϵ_{11})		Deformação principal Intermediária (ϵ_{22})		Deformação principal mínima (ϵ_{33})	
	ϵ_{11} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{22} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{33} ($\mu\epsilon$)	Azimute (°)	Inclinação (°)	Azimute (°)	Inclinação (°)	Azimute (°)	Inclinação (°)
1,00	5,9	-0,01	-2	219,3	67,2	122,5	74,2	0,9	28,2
1,08	6,0	0,1	-2,2	220,7	68,6	118,8	62,2	343,1	36,3
1,17	6,0	0,01	-2,1	220,5	67,5	120,6	67,3	350,3	32,9
1,25	6,3	0,2	-2,1	219,4	67,9	121,4	71,1	354,5	29,8
1,34	6,0	-0,7	-1,9	220,8	70,0	128,1	82,7	19,1	21,4
Média	-	-	-	220,2	68,2	122,3	71,5	357,6	29,7

Tabela 4.10. Melhor estimativa das direções das deformações principais para amostras BAKKEN 1 e BAKKEN 2 – C-Temp - (adaptado de LANTZ 2005a).

Deformação principal máxima (ϵ_{11})		Deformação principal intermediária (ϵ_{22})		Deformação principal mínima (ϵ_{33})	
Azimute(°)	Inclinação(°)	Azimute (°)	Inclinação(°)	Azimute (°)	Inclinação(°)
N340°E	80°	260°	~40°	N80°E	36°

Uma primeira utilização da informação das direções das deformações principais foi a escolha do direcionamento da lateral do poço através de dados de perfuração e azimute. A empresa TerraTek realizou um teste ASR no testemunho imediatamente após a sua remoção do barrilete de testemunhagem. Estes azimutes de tensão praticamente coincidem com a fratura natural, que pode ser observada no

testemunho com um azimute de N153°E. Desta forma, a empresa tomou a decisão de perfurar a lateral no azimute de N160°E.

Tal comportamento pode ser confirmado através de outra técnica de medição de tensão *in situ*, conhecida por Imageamento do poço (*Borehole Image*), a qual foi executada na região de testemunhagem do poço (Figura 4.18), a fim de visualizar as fraturas induzidas pela perfuração. As linhas vermelhas (verticais) indicam as fraturas induzidas pela perfuração na profundidade testemunhada. O azimute do testemunho é N152°E. Já a linha preta (senoidal) indica a fratura natural com a mesma orientação, mergulhando 67° para o leste (LANTZ, 2005b, LANTZ, 2005c).

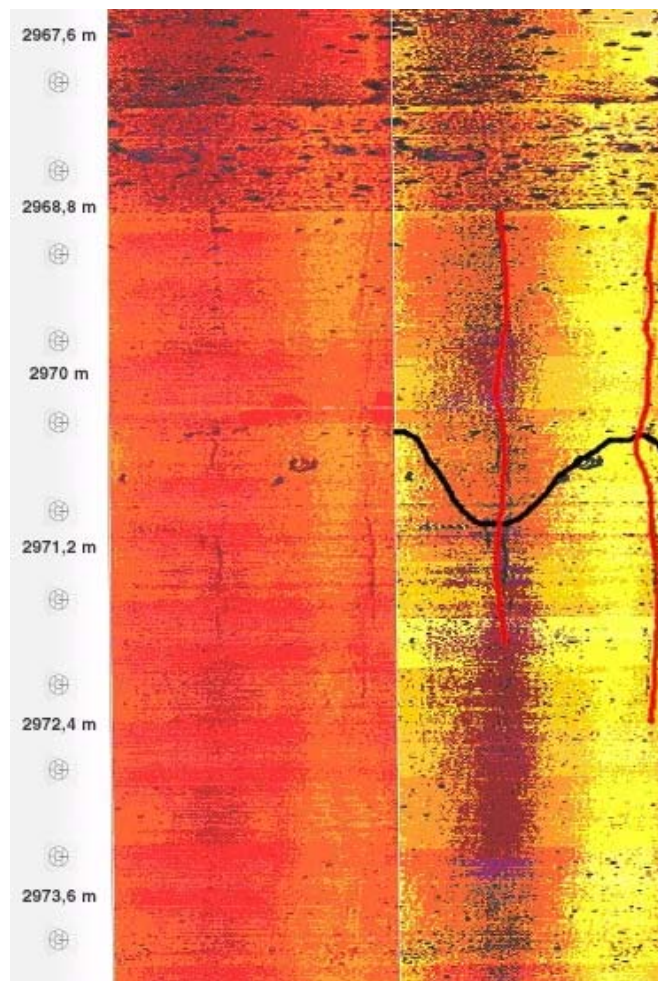


Figura 4.18. Imagem do local testemunhado do poço BTS-36-2H (LANTZ, 2005c).

A Figura 4.19 mostra um esquema que auxilia a interpretação da Figura 4.18 obtida através da técnica de Imageamento do poço (*Borehole Image*).

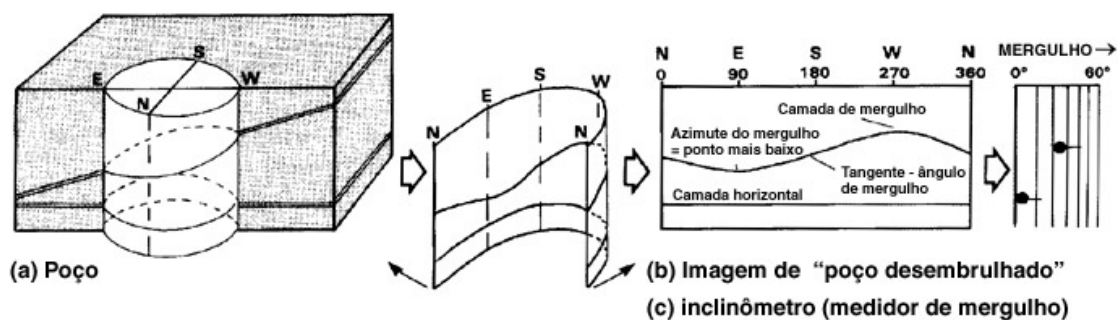


Figura 4.19. Representação da imagem da superfície da parede do poço em uma superfície plana (de um poço vertical).

Além disso, o conhecimento da direção das deformações das tensões *in situ* foi fundamental para planejar as direções do fraturamento hidráulico previsto para o poço BTS 36-2H do reservatório BAKKEN, tendo em vista baixas permeabilidades e porosidades da região em questão.

4.3 Metodologia Adotada

A metodologia adotada consistiu inicialmente na análise dos modelos quanto às suas hipóteses, limitações, dados de *input* e *output* que permitiram a escolha dos modelos a serem utilizados para o estudo de sensibilidade. Desta forma, baseando-se nas informações do Capítulo 3, foram escolhidos o modelo de BLANTON (1983) e o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983). Apesar dos modelos serem muito semelhantes, o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) inclui o efeito da poropressão. Assim, foi possível verificar o efeito da poropressão na determinação das tensões *in situ* através dos dois modelos.

Cabe ressaltar aqui que os outros modelos não foram selecionados para esta análise devido à ausência de parâmetros de entrada dos casos adotados. Nem todos os dados disponíveis tanto do arenito ROLLINS quanto do calcário BAKKEN eram suficientes para suprir os dados de entrada dos outros modelos. Sendo assim, após a escolha dos dois modelos, foi realizada a análise de sensibilidade das tensões *in situ* calculadas em função da variação dos parâmetros envolvidos nos modelos de interpretação dos ensaios ASR. Foram analisados os seguintes parâmetros comuns aos modelos BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983): ν , σ_v , ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz} , ε_{11} , ε_{22} , ε_{33} . O efeito da variação da poropressão P_p na determinação das tensões *in situ* foi estudado especificamente no modelo de BLANTON e TEUFEL (1983). A Tabela 4.11 resume os parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade nos dois

modelos propostos. Maiores detalhes sobre motivação e escolha desses parâmetros são apresentados antes de cada análise no Capítulo 5 para facilitar a compreensão.

Tabela 4.11. Parâmetros escolhidos para a análise de sensibilidade dos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983).

Parâmetros	Unidades	Variação
Coefficiente de Poisson ν	-	0,15 a 0,35
Tensão de sobrecarga σ_v	MPa	-50% a 50%
Deformação recuperada ε_{xx}	$\mu\varepsilon$	-50% a 50%
Deformação recuperada ε_{yy}	$\mu\varepsilon$	-50% a 50%
Deformação recuperada ε_{zz}	$\mu\varepsilon$	-50% a 50%
Deformação principal ε_{11}	$\mu\varepsilon$	-50% a 50%
Deformação principal ε_{22}	$\mu\varepsilon$	-50% a 50%
Deformação principal ε_{33}	$\mu\varepsilon$	-50% a 50%
Poropressão P_p *	MPa	-50% a 50%

* Referente apenas ao modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)

Um resumo da metodologia para o cálculo das tensões principais horizontais é apresentado na Figura 4.20.

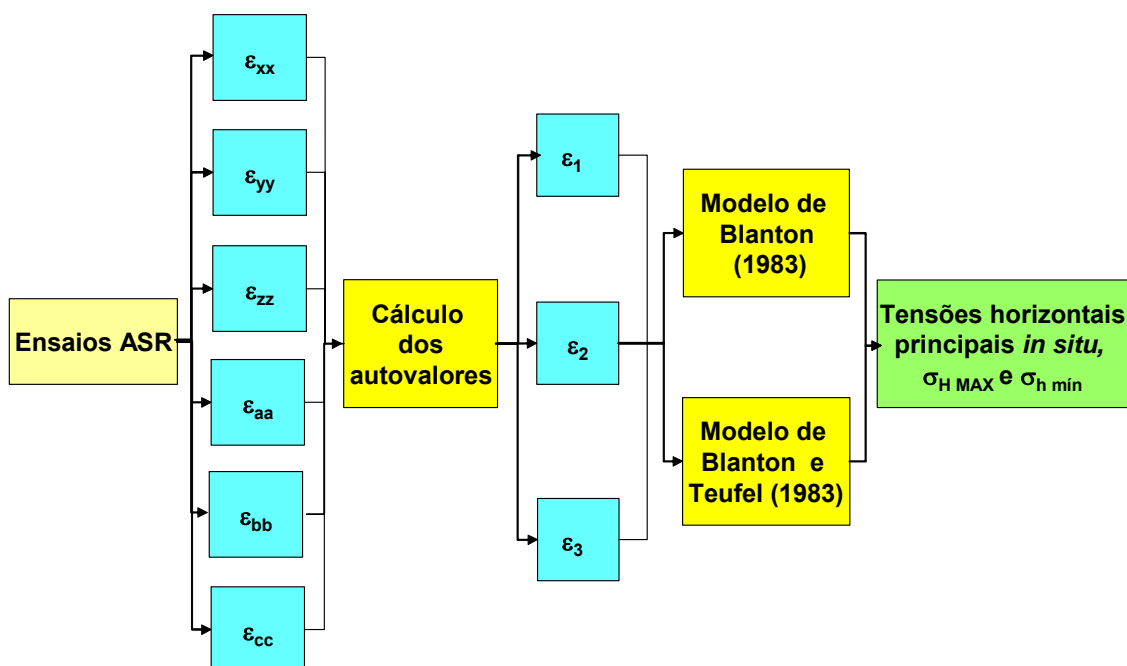


Figura 4.20: Fluxograma de cálculo de tensões horizontais principais *in situ*.

A partir do ensaio ASR realizado nas amostras de ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2, obtém-se os valores das componentes de deformações recuperadas do testemunho em seis direções padronizadas, representadas por: $\varepsilon^{i_{xx}}$, $\varepsilon^{i_{aa}}$, $\varepsilon^{i_{yy}}$, $\varepsilon^{i_{zz}}$,

ε_{bb}^i e ε_{cc}^i . Com estes valores, calcula-se as componentes das deformações no sistema de coordenadas x, y e z através da seguinte matriz dos autovalores:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^i & \frac{\varepsilon_{xx}^i - 2\varepsilon_{aa}^i + \varepsilon_{yy}^i}{2} & \frac{\varepsilon_{zz}^i - 2\varepsilon_{bb}^i + \varepsilon_{xx}^i}{2} \\ \frac{\varepsilon_{xx}^i - 2\varepsilon_{aa}^i + \varepsilon_{yy}^i}{2} & \varepsilon_{yy}^i & \frac{\varepsilon_{yy}^i - 2\varepsilon_{cc}^i + \varepsilon_{zz}^i}{2} \\ \frac{\varepsilon_{zz}^i - 2\varepsilon_{bb}^i + \varepsilon_{xx}^i}{2} & \frac{\varepsilon_{yy}^i - 2\varepsilon_{cc}^i + \varepsilon_{zz}^i}{2} & \varepsilon_{zz}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

sendo que $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx}$, $\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx}$ e $\varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy}$.

A Tabela 4.12 apresenta os valores das deformações recuperadas ε_{xx} , ε_{aa} , ε_{yy} , ε_{zz} , ε_{bb} , e ε_{cc} após a estabilização no ensaio ASR das amostras do ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2, com correção de temperatura (C-Temp).

Tabela 4.12. Valores das componentes de deformações recuperadas no ensaio ASR (C-Temp).

Caso de estudo	Magnitudes das deformações recuperadas					
	$\Delta\varepsilon_{xx}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{aa}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{yy}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{zz}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{bb}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{cc}$ ($\mu\varepsilon$)
ROLLINS	170	145	90	205	-	-
BAKKEN 1	46	36	88	38	59	146
BAKKEN 2	59	131	46	43	28	53

Os invariantes de deformações J_1 , J_2 e J_3 são calculados em função das deformações recuperadas no ensaio ASR, através das seguintes equações:

$$J_1 = \varepsilon_{xx}^i + \varepsilon_{yy}^i + \varepsilon_{zz}^i \quad (4-2)$$

$$J_2 = \varepsilon_{xx}^i \varepsilon_{yy}^i + \varepsilon_{xx}^i \varepsilon_{zz}^i + \varepsilon_{yy}^i \varepsilon_{zz}^i - \varepsilon_{xy}^2 - \varepsilon_{xz}^2 - \varepsilon_{yz}^2 \quad (4-3)$$

$$J_3 = \varepsilon_{xx}^i \times \varepsilon_{yy}^i \times \varepsilon_{zz}^i - \varepsilon_{xx}^i \times (\varepsilon_{yz}^i)^2 - \varepsilon_{yy}^i \times (\varepsilon_{xz}^i)^2 - \varepsilon_{zz}^i \times (\varepsilon_{xy}^i)^2 + 2 \times \varepsilon_{yz}^i \times \varepsilon_{xz}^i \times \varepsilon_{xy}^i \quad (4-4)$$

Os invariantes escalares do tensor de deformações J_1 , J_2 e J_3 são os mesmos para as deformações principais calculadas, onde $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0$:

$$J_1 = \varepsilon_{11}^i + \varepsilon_{22}^i + \varepsilon_{33}^i \quad (4-5)$$

$$J_2 = \varepsilon_{11}^i \varepsilon_{22}^i + \varepsilon_{11}^i \varepsilon_{33}^i + \varepsilon_{22}^i \varepsilon_{33}^i \quad (4-6)$$

$$J_3 = \varepsilon_{11}^i \times \varepsilon_{22}^i \times \varepsilon_{33}^i \quad (4-7)$$

Por fim, determina-se a equação característica :

$$\varepsilon^3 - J_1\varepsilon^2 + J_2\varepsilon - J_3 = 0 \quad (4-8)$$

sendo que as três raízes da equação, que são os autovalores, são equivalentes às três deformações principais, ε_{11} , ε_{22} e ε_{33} .

As deformações principais são os *inputs* dos modelos, para a determinação dos valores das tensões horizontais principais. É importante ressaltar que foi utilizada a mesma metodologia tanto para a amostra da formação ROLLINS quanto para as amostras BAKKEN 1 e BAKKEN 2, a fim de permitir a comparação dos resultados.

A Tabela 4.13 apresenta as deformações principais ε_{11} , ε_{22} e ε_{33} obtidas da literatura, com correção de temperatura e as calculadas nessa dissertação, através da equação característica, sem correção de temperatura, conforme metodologia de cálculo citada anteriormente.

Tabela 4.13. Deformações principais obtidas do ensaio ASR (C-Temp) e da equação característica (S-Temp).

Caso de estudo	Deformações Principais						Deformações Volumétrica $\Delta\varepsilon_{kk}$ **
	Ensaio ASR (C-Temp)			Equação Característica* (S-Temp)			
	$\Delta\varepsilon_{11}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{22}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{33}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{11}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{22}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{33}$ ($\mu\varepsilon$)	
ROLLINS	285	145	35	296	138	31	465
BAKKEN 1	161	36	-24	116	42	15	173
BAKKEN 2	137	39	-28	95	41	12	148

Equação característica: $\varepsilon^3 - J_1\varepsilon^2 + J_2\varepsilon - J_3 = 0$

* $\Delta\varepsilon_{kk} = \Delta\varepsilon_{11} + \Delta\varepsilon_{22} + \Delta\varepsilon_{33}$

As deformações volumétricas finais $\Delta\varepsilon_{kk}$ são provenientes do somatório das três deformações principais provenientes das raízes da equação característica (S-Temp) e do ensaio ASR (C-temp). Observa-se que os valores da deformação volumétrica $\Delta\varepsilon_{kk}$ com e sem correção de temperatura são iguais. Entretanto, as raízes são diferentes, sendo este um dos pontos que serão observados nas simulações do Capítulo 5.

A Tabela 4.14 apresenta as deformações recuperadas e as deformações principais do ensaio ASR, com correção de temperatura. Pode-se observar a relação entre as deformações recuperadas nas direções xx, yy e zz com as deformações calculadas principais nas direções 11, 22 e 33.

Tabela 4.14. Deformações principais e recuperadas obtidas de ensaio ASR (C-Temp).

Caso de estudo	Deformações						
	Recuperadas			Principais*			Volumétrica**
	$\Delta\varepsilon_{xx}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{yy}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{zz}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{11}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{22}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{33}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{kk}$ *** ($\mu\varepsilon$)
ROLLINS	170	90	205	285	145	35	465
BAKKEN 1	47	88	38	161	36	-24	173
BAKKEN 2	59	46	43	137	39	-28	148

* C-Temp

** Para deformações C-Temp e S-Temp

$$*** \Delta\varepsilon_{kk} = \Delta\varepsilon_{xx} + \Delta\varepsilon_{yy} + \Delta\varepsilon_{zz} = \Delta\varepsilon_{11} + \Delta\varepsilon_{22} + \Delta\varepsilon_{33} = J_1$$

No capítulo seguinte são feitas as análises dos dois modelos de interpretação das tensões *in situ*, tanto para a determinação da magnitude quanto para a determinação da robustez, além da influência de cada parâmetro.

5 CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta as análises de sensibilidade e a comparação dos resultados dos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983). Para tal, foi empregada a metodologia descrita no capítulo anterior, na qual é feita a variação de um único parâmetro para determinação de sua influência nas tensões principais horizontais, máxima e mínima. A finalidade prática deste tipo de estudo é verificar a robustez dos modelos em relação a erros experimentais e teóricos freqüentemente presentes nas determinações das tensões *in situ*.

As análises de sensibilidade no modelo de BLANTON (1983) foram realizadas para os seguintes parâmetros: coeficiente de Poisson (ν), tensão vertical total (σ_v), deformações recuperadas referentes ao eixo do testemunho nas direções x, y e z (ε_{xx} , ε_{yy} e ε_{zz}) e as deformações principais nas direções 1, 2 e 3 (ε_{11} , ε_{22} e ε_{33}). Cabe salientar que nem todos os parâmetros são inseridos diretamente no modelo de BLANTON (1983), apenas ν , σ_v , ε_{11} , ε_{22} e ε_{33} . Já as deformações recuperadas que foram escolhidas para a simulação (ε_{xx} , ε_{yy} e ε_{zz}) são *input* da matriz dos autovalores, dando origem às deformações principais (ε_{11}' , ε_{22}' e ε_{33}'), que serão função do parâmetro escolhido para variação.

Apenas estas deformações principais serão *inputs* dos modelos sendo que elas são influenciadas pela variação prévia da deformação recuperada e com este erro propagado são inseridas nos modelos. Já para o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) foram utilizados os mesmos parâmetros do modelo de BLANTON (1983), acrescidos da poropressão, P_p . O coeficiente de BIOT, α , foi o único parâmetro considerado constante na análise de sensibilidade, sendo assumido para a amostra ROLLINS igual a 0,59 e para as amostras BAKKEN 1 e BAKKEN 2, igual a 1.

5.1 Determinação das Deformações e Tensões Principais *in situ*

Primeiramente, as hipóteses e condições de uso básicas de cada modelo devem ser respeitadas, garantindo a adequação dos resultados. Por exemplo, nos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983), uma das tensões principais deve ser considerada igual à tensão de sobrecarga. Além disso, foram aplicados os modelos isotrópicos às formações do ROLLINS e BAKKEN. Todavia, apenas pode-se confirmar que a amostra ROLLINS é isotrópica.

Em termos de condições de utilização, os modelos em questão só podem ser aplicados caso não ocorra a contração da amostra, ou seja, o somatório das deformações principais (calculadas através da matriz dos autovalores), que equivale à deformação volumétrica, seja positivo, representando um comportamento expansivo das amostras.

A Figura 5.1 mostra a variação da deformação volumétrica com o tempo para as amostras ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2. Pode-se observar que a amostra do ROLLINS não apresentou contração (deformação volumétrica negativa), o que possibilitou que os modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983) pudessem ser aplicados com os dados de qualquer tempo de ensaio. Já as amostras BAKKEN 1 e BAKKEN 2 apresentaram contração no início dos ensaios, inviabilizando o uso dos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983), somente no período de tempo referente à contração. As curvas de deformação volumétrica *versus* tempo são caracterizadas por curvas polinomiais do 2º grau, com um coeficiente de correlação de aproximadamente 0,99 para todos os casos.

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam as curvas (com correção de temperatura) de tensão *versus* tempo das amostras calculadas através dos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983), respectivamente. Pode-se observar nas Figuras 5.2 e 5.3 que os modelos não chegam a valores realísticos de tensões *in situ* para o caso de contração da amostra, nas primeiras horas. Todavia, cabe aqui salientar que uma ou até duas das três deformações principais podem ser negativas, contanto que a deformação volumétrica respectiva seja sempre positiva (expansão da amostra).

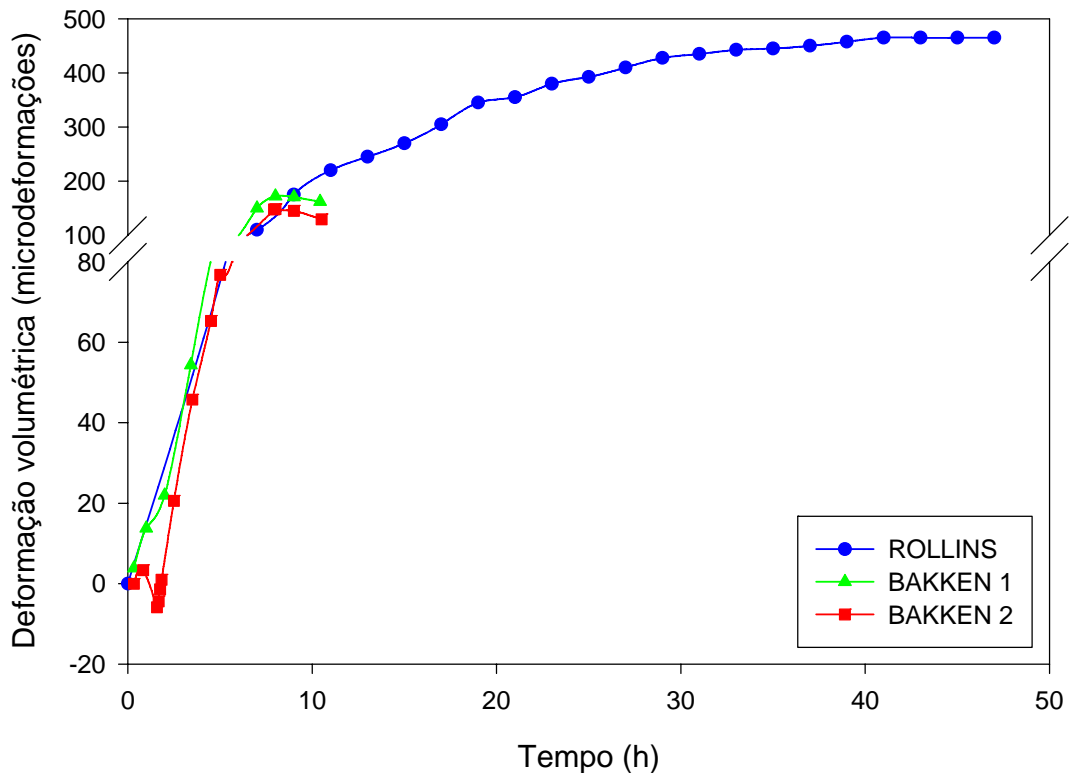


Figura 5.1. Curvas de deformação volumétrica x tempo das amostras ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2 (C-Temp).

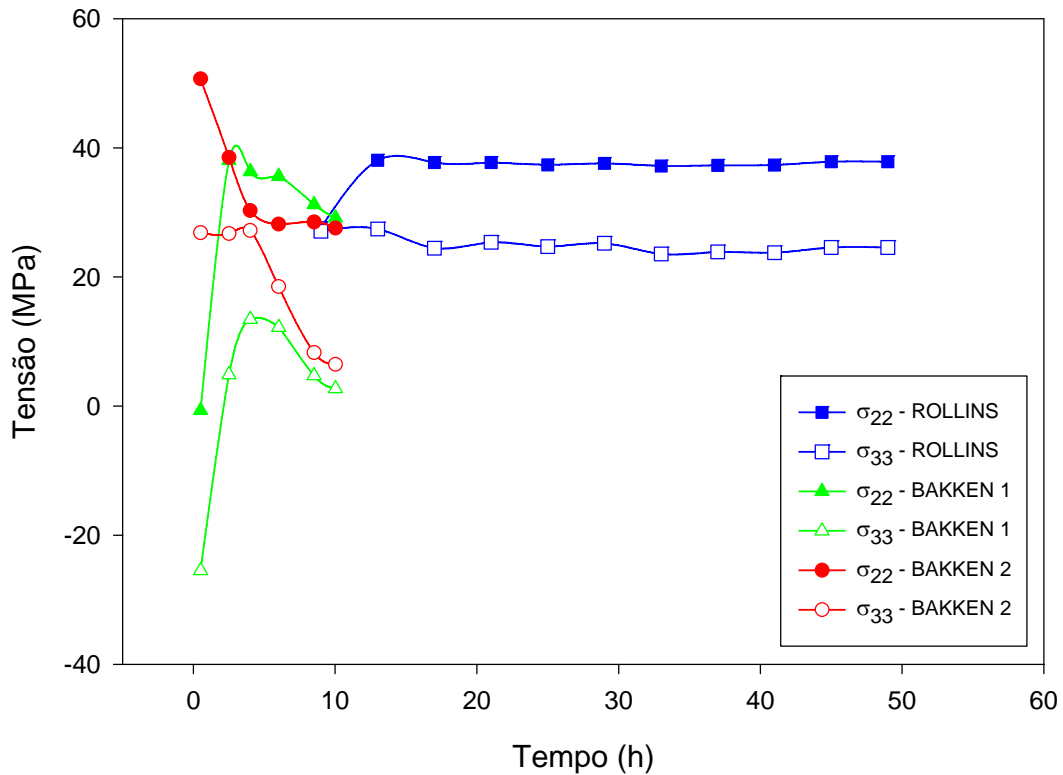


Figura 5.2. Curvas tensão versus tempo das amostras ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2 (C-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).

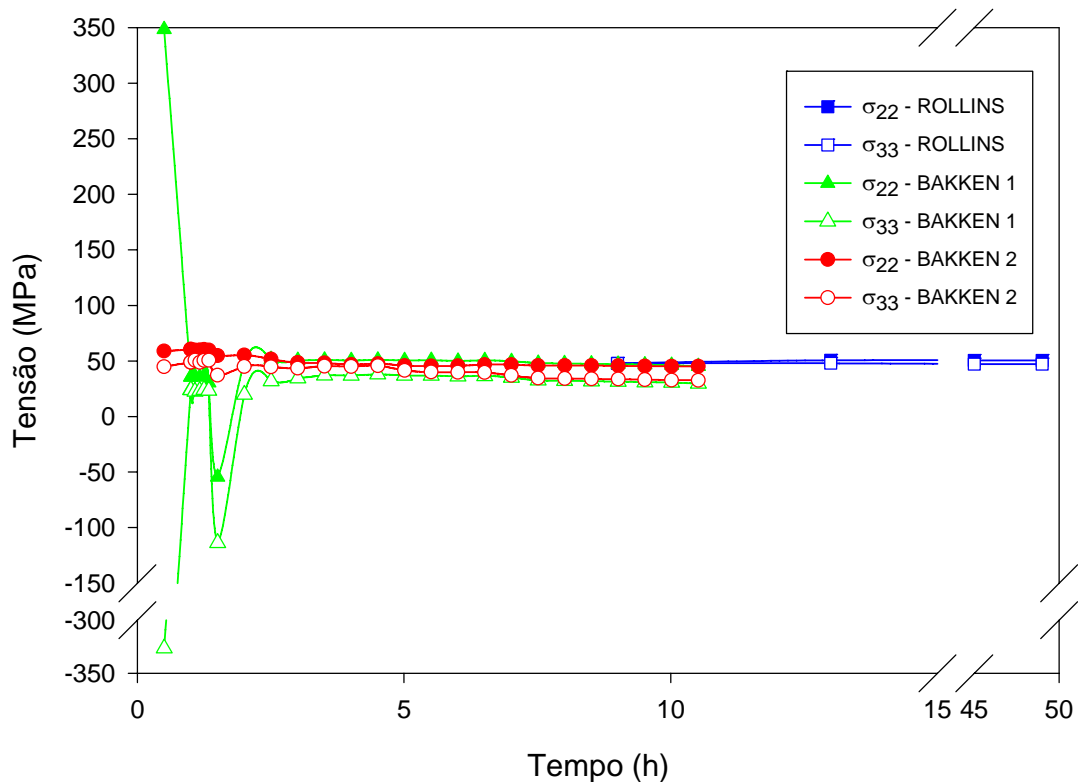


Figura 5.3. Curvas tensão *in situ* x tempo das amostras ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2 (C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

Pode-se observar também que, para a amostra ROLLINS, tanto no modelo de BLANTON (1983) quanto no modelo de BLANTON e TEUFEL (1983), as tensões principais *in situ* máximas e mínimas permanecem constantes para todos os tempos. Assim, a escolha das deformações principais referentes a qualquer tempo, e não mais apenas relativa à deformação volumétrica máxima, de pico, fornece aproximadamente as mesmas tensões horizontais máxima (σ_{22}) e mínima (σ_{33}).

As Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam as variações das tensões *in situ* e das deformações principais ε_{11} , ε_{22} e ε_{33} , em função do tempo para as amostras ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2, respectivamente.

Pode-se observar na Tabela 5.1, para a amostra ROLLINS, que os valores das tensões principais *in situ* são aproximadamente constantes para qualquer tempo e conseqüentemente, para qualquer deformação volumétrica, possivelmente devido ao comportamento elástico, isotrópico e homogêneo do arenito.

Tabela 5.1. Magnitude das deformações e tensões principais da amostra ROLLINS – (C-Temp).

Tempo passado (h)	Deformações				Tensões Principais Totais - σ_{11} = 54,8 MPa			
	Principais - C-Temp			Volumétrica	Através do Modelo de BLANTON (1983)		Através do Modelo de BLANTON e TEUFEL(1983)	
	ε_{11} ($\mu\varepsilon$)	ε_{22} ($\mu\varepsilon$)	ε_{33} ($\mu\varepsilon$)	ε_v ($\mu\varepsilon$)	σ_{22} (MPa)	σ_{33} (MPa)	σ_{22} (MPa)	σ_{33} (MPa)
9,0	44	11	10	55	27,6	27,1	47,9	47,8
13,0	129	66	25	220	38,1	27,4	50,6	47,9
49,0	285	145	35	465	37,8	24,6	50,5	47,2

Já na Tabela 5.2, referente a amostra BAKKEN 1, observa-se que as tensões *in situ* σ_{22} e σ_{33} não são mais constantes. Elas variam em função do tempo e das diferentes deformações volumétricas, o que pode estar associado à falta de proporcionalidade entre as deformações principais da amostra BAKKEN 1, possivelmente decorrente da heterogeneidade ou da anisotropia da amostra, diferentemente do que ocorre com a amostra ROLLINS. Deve-se ficar claro que os valores das deformações principais não têm que apresentar valores máximos isoladamente, mas em função da deformação volumétrica máxima que, para o caso do BAKKEN 1, ocorreu 8,5 horas após o início do ensaio. O fim do ensaio BAKKEN 1, todavia, ocorreu às 10,5 horas, momento onde a deformação volumétrica é menor que a de pico.

Tabela 5.2. Magnitude das deformações e tensões principais da amostra BAKKEN 1 (C-Temp).

Tempo passado (h)	Deformações				Tensões Principais Totais σ_{11} = 70,6MPa			
	Principais - C-Temp			Volumétrica	Modelo de BLANTON (1983)		Modelo de BLANTON e TEUFEL(1983)	
	$\Delta\varepsilon_{11}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{22}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{33}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_v$ ($\mu\varepsilon$)	σ_{22} (MPa)	σ_{33} (MPa)	σ_{22} (MPa)	σ_{33} (MPa)
0,5	4	2	-0,3	7	50,7	26,9	58,9	45,0
1,3	9	5	2	16	53,0	36,4	60,2	50,5
8,5	161	36	- 24	173	28,5	8,3	45,8	33,8
10,5	156	33	- 28	161	27,4	6,2	45,2	32,6

Na Tabela 5.3, referente a amostra BAKKEN 2, observa-se que as tensões *in situ* também variam em função do tempo como na amostra BAKKEN 1, provavelmente pelas mesmas razões. Pode-se observar, também, que os valores de deformação referentes à 1,5 horas equivalem à deformação volumétrica negativa, e foram apresentados para ressaltar que nem o modelo de BLANTON (1983), nem o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) podem ser utilizados neste caso onde ocorre

contração da amostra. Todavia, para todos os intervalos de tempo, quando apenas uma ou duas deformações principais são negativas (de contração), e a deformação volumétrica ainda é positiva, os modelos podem ser aplicados com êxito. A escolha das deformações principais a serem inseridas nos modelos foram referentes ao tempo de 8,0 horas (deformação volumétrica máxima). Apesar disto, as deformações principais referentes ao tempo de 4,5 horas originaram os maiores valores de tensão *in situ*. Todavia, esta pode ser uma característica particular dos modelos, e não uma função da deformação volumétrica máxima, pois na prática espera-se que esta corresponda às maiores tensões *in situ*.

Tabela 5.3. Magnitude das deformações e tensões principais da amostra BAKKEN 2 (C-Temp).

Tempo passado (h)	Deformações				Tensões Principais Totais - $\sigma_{11} = 70,7 \text{ Mpa}$			
	Principais – C-Temp			Volumétrica	Através do Modelo de BLANTON (1983)		Através do Modelo de BLANTON e TEUFEL(1983)	
	$\Delta \varepsilon_{11}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta \varepsilon_{22}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta \varepsilon_{33}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta \varepsilon_v$ ($\mu\varepsilon$)	σ_{22} (MPa)	σ_{33} (MPa)	σ_{22} (MPa)	σ_{33} (MPa)
1,5	2,5	-2,0	-4,1	-3,6	141,2	-241,6	-54,4	-113,7
4,5	50,6	18,1	-3,5	65,2	37,3	15,2	51	38
8,0	137	39,0	-27,9	148,4	31,8	5,4	47,7	32,2
10,5	133	29,5	-33,6	129,4	27,4	1,2	45,1	29,6

Na Tabela 5.4 são apresentadas as magnitudes das tensões principais totais referentes às deformações volumétricas máximas para as amostras ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2, obtidas da literatura e do teste ASR, as quais representam o padrão para análise de sensibilidade dos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983).

A Tabela 5.5 resume os valores das magnitudes das tensões principais efetivas, obtidas através da seguinte equação:

$$\sigma' = \sigma - \alpha \cdot P_p \quad (5.1)$$

onde, α = Coeficiente de Biot;

P_p = Poropressão

Para o caso ROLLINS, os valores máximo e mínimo das tensões horizontais principais totais no modelo de BLANTON (1983) equivalem a 37,9 MPa e 24,6 MPa, respectivamente. Estes valores são inferiores aos valores das tensões horizontais principais totais calculados através do modelo de BLANTON e TEUFEL (1983), que

equivalem a 50,5 MPa e 47,2 MPa. Por outro lado, como o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) considera a influência da poropressão, a mesma tendência não acontece para as tensões efetivas. As tensões principais totais para o modelo de BLANTON (1983), que equivalem a 37,9 MPa e 24,6 MPa (iguais às tensões totais), são iguais às tensões efetivas calculadas através do modelo de BLANTON e TEUFEL (1983), equivalentes a 37,9 MPa e 24,6 MPa, como era previsto. Isto ocorre porque no modelo de BLANTON (1983), as tensões totais principais são equivalentes às tensões principais efetivas. As mesmas tendências foram observadas para os casos BAKKEN 1 e BAKKEN 2. Tal análise foi realizada para ressaltar importância de se considerar a poropressão visto que os modelos tem como *output* as tensões totais e o mais importante para campo de tensões é o conhecimento das tensões efetivas, que só é possível através da utilização do modelo de BLANTON e TEUFEL(1983).

Tabela 5.4. Magnitudes das tensões principais totais (C-Temp).

Amostra	Tensões Principais Totais					
	Modelo de BLANTON(1983)			Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)		
	σ_{11} (MPa)	σ_{22} (MPa)	σ_{33} (MPa)	σ_{11} (MPa)	σ_{22} (MPa)	σ_{33} (MPa)
ROLLINS- Valor Padrão*	-	-	-	54,8	54,5	51,9
ROLLINS – Modelo	54,8	37,8	24,6	54,8	50,5	47,2
BAKKEN 1 – Modelo	70,6	28,5	8,3	70,6	45,8	33,8
BAKKEN 2 – Modelo	70,7	31,9	5,5	70,7	47,8	32,2

* - obtidos da literatura

Tabela 5.5. Magnitudes das tensões principais efetivas (C-Temp).

Amostra	Tensões Principais Efetivas						
	Modelo de BLANTON(1983)			Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
	σ'_{11} (MPa)	σ'_{22} (MPa)	σ'_{33} (MPa)	P_p (MPa)	σ'_{11} (MPa)	σ'_{22} (MPa)	σ'_{33} (MPa)
ROLLINS –Valor padrão*	-	-	-	41,0	13,7	9,5	10,9
ROLLINS – Modelo**	54,8	37,8	24,6	41,0	30,6	37,8	24,6
BAKKEN 1 – Modelo**	70,6	28,5	8,3	28,9	41,7	28,5	8,3
BAKKEN 2 – Modelo**	70,7	31,9	5,5	28,9	41,7	31,9	5,5

* - obtidos da literatura

Desta forma, a Tabela 5.6 apresenta as tensões horizontais principais totais provenientes das deformações principais totais obtidas diretamente da literatura dos ensaios ASR, para o caso ROLLINS, e através dos dados da Halliburton, para os casos BAKKEN 1 e BAKKEN 2, ambos com correção de temperatura. Cabe aqui

salientar que as análises de sensibilidade dos modelos terão como valores de referência as tensões principais totais *in situ* para efeito de comparação.

Tabela 5.6. Magnitudes das tensões horizontais principais totais.

Amostra	Tensões	Modelo de BLANTON (1983)		Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)	
		C-Temp	S-Temp	C-Temp	S-Temp
ROLLINS	σ_{22}	37,8	36,1	50,5	50,1
	σ_{33}	24,6	23,5	47,2	46,9
BAKKEN 1	σ_{22}	28,5	38,8	45,8	51,9
	σ_{33}	8,3	27,2	33,8	45,0
BAKKEN 2	σ_{22}	31,9	42,9	47,8	54,3
	σ_{33}	5,5	27,7	32,2	45,3

C-Temp - Com correção de Temperatura
S-Temp - Sem correção de Temperatura

Comparando-se os valores na Tabela 5.6, observa-se que, para a amostra ROLLINS, a correção de temperatura (C-Temp) pouco influenciou nos resultados das tensões *in situ*, mostrando uma diferença de até 1%, tanto para a tensão máxima quanto para a tensão mínima.

Já para as amostras BAKKEN 1 e BAKKEN 2, as tensões máximas e mínimas sem correção de temperatura (S-Temp) são superiores às respectivas tensões com correção de temperatura (C-Temp). Para a amostra BAKKEN 1, o aumento das tensões máxima e mínima é de 37% e 408%, respectivamente, para o BAKKEN 2, tem-se um aumento de 13% na mínima e até 40% na máxima.

Desta forma, é possível observar um padrão para o comportamento das tensões em função da temperatura. A Tabela 5.6 apresenta os valores das tensões referentes às deformações principais totais, calculadas pela matriz dos autovalores em função das deformações recuperadas sem correção de temperatura, através da equação característica dependente dos invariantes de deformação apresentada no Capítulo 4.

5.2 Análise de Sensibilidade para os Modelos

Na análise de sensibilidade dos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983) são avaliados os parâmetros: coeficiente de Poisson, componentes de

deformações recuperadas, componentes de deformações principais, tensão de sobrecarga e poropressão.

5.2.1 Influência do Coeficiente de Poisson

A Figura 5.4 apresenta a metodologia empregada na análise de sensibilidade em função da variação do coeficiente de Poisson (ν). Sabe-se que os limites teóricos, máximo e mínimo, do coeficiente de Poisson são de 0 a 0,5. Todavia, por se tratar de um material rochoso, não teria sentido utilizar estes valores para a análise. Desta forma, o coeficiente de Poisson variou de 0,15 a 0,35, caracterizando o intervalo de variação mais comum para as rochas.

Salienta-se que nesta análise todos os outros parâmetros se mantiveram constantes, enquanto apenas o coeficiente de Poisson variou. Para o caso do ROLLINS, o real coeficiente de Poisson ν é igual a 0,21. Já para a amostra BAKKEN 1 e BAKKEN 2, o real ν é igual a 0,18.

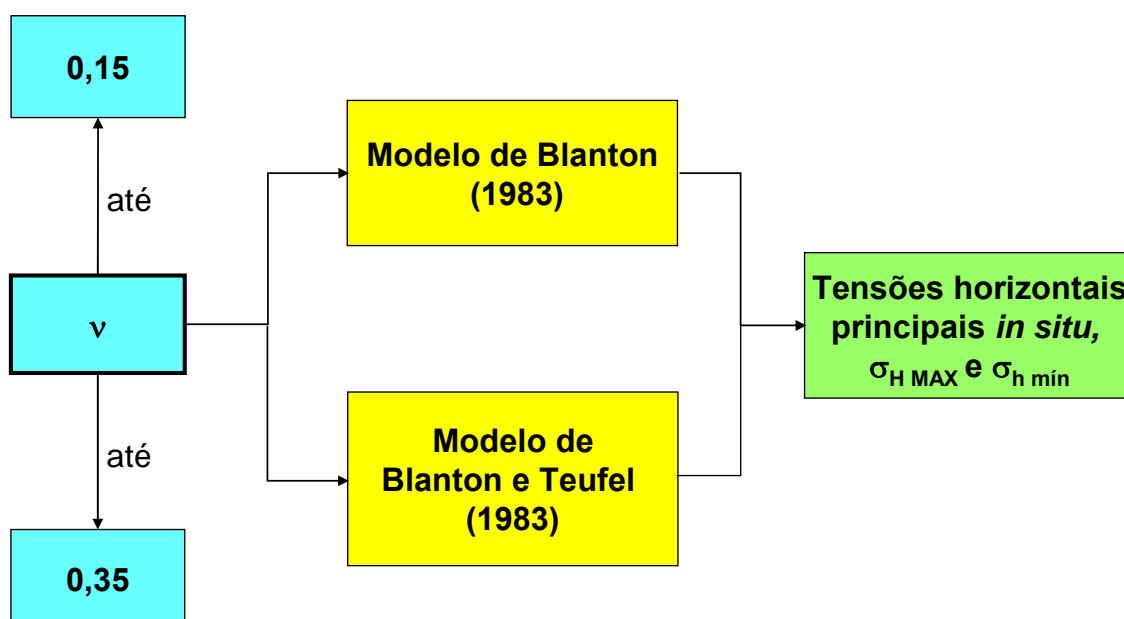


Figura 5.4. Metodologia de análise de sensibilidade em função do coeficiente de Poisson, ν .

Na Figura 5.5 observa-se a variação das tensões horizontais, máxima e mínima, em função do coeficiente de Poisson, para o caso ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2, utilizando-se o modelo de BLANTON (1983). Para o caso do ROLLINS, percebe-se uma relação linear. Tal comportamento também pode ser observado nos

casos BAKKEN 1 e BAKKEN 2. Todavia, para estes casos, a equação que mais se adequa à tendência das curvas é a polinomial de 2º grau. Desta forma, foi possível concluir, que para todos os casos aplicados no modelo de BLANTON (1983), as tensões horizontais máximas e mínimas aumentam com o aumento do coeficiente de Poisson. A taxa de aumento da tensão mínima é maior que a taxa de aumento da tensão horizontal máxima.

Nas Tabelas A3.1 e A3.2 (Anexo 3), é possível observar e quantificar a influência da variação do coeficiente de Poisson nos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983).

A Figura 5.6 apresenta a variação nas tensões horizontais máxima e mínima em função do coeficiente de Poisson para o caso ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2, utilizando-se o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

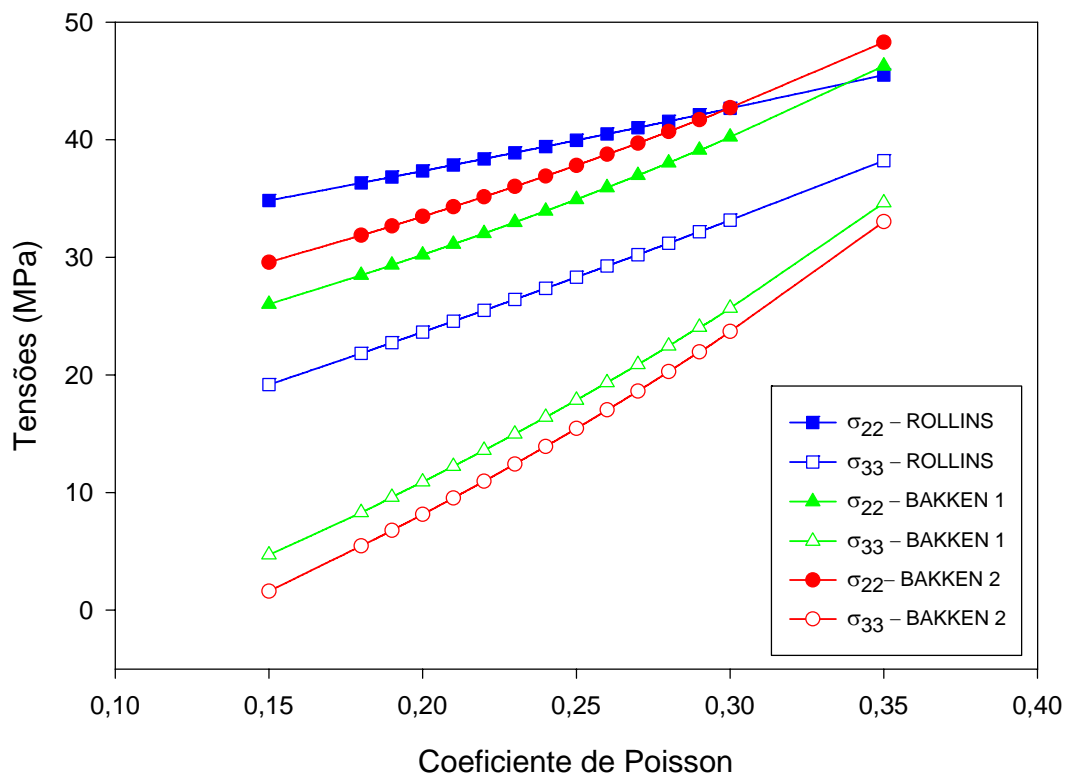


Figura 5.5. Variação das tensões principais em função do ν (C-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).

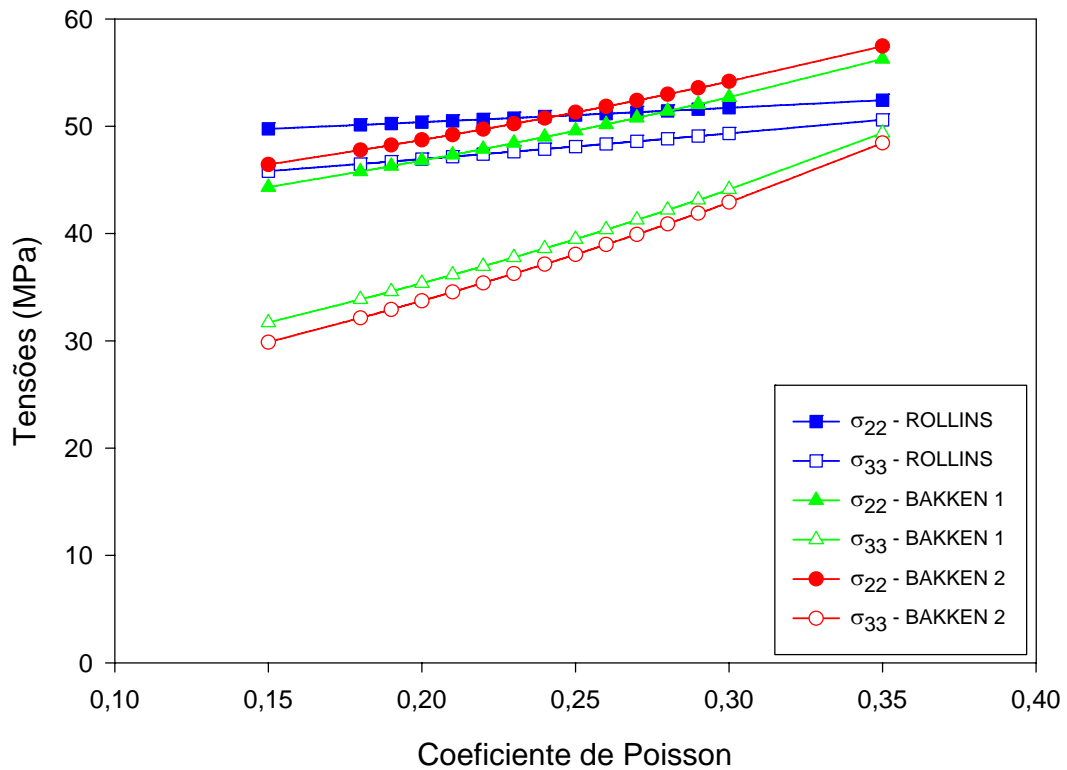


Figura 5.6. Variação das tensões principais em relação à variação do ν (C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

Observa-se também para o caso ROLLINS, um comportamento linear das relações entre tensões máximas e mínimas e o coeficiente de Poisson. Para o BAKKEN 1 e BAKKEN 2, a equação que mais se adequa à tendência das curvas é polinomial do segundo grau.

5.2.2 Influência das Componentes de Deformação Recuperada

A escolha das deformações recuperadas para a análise de sensibilidade indireta no modelo seria mais adequada, tendo em vista que os erros provenientes do ensaio ASR são diretamente observados nas deformações recuperadas. Todavia, seu erro como foi imposto através da escolha de parâmetro isolado, por exemplo ε_{xx} , quando entrava na matriz dos autovalores gerando 3 valores de deformações principais dependentes deste erro em ε_{xx} , que no caso foi a deformação escolhida.

A Figura 5.7 apresenta a metodologia empregada na análise de sensibilidade em função da variação ε_{xx} , deformação recuperada na direção xx , para os casos do

ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2. O objetivo desta análise é observar a influência do parâmetro ε_{xx} , que não é avaliado diretamente nos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983), mas primeiro é inserido na matriz dos autovalores, a fim de encontrar as deformações calculadas principais ε_{11} , ε_{22} e ε_{33} , que será o *input* dos modelos. Desta forma, o erro em ε_{xx} será propagado para ε_{11} , ε_{22} e ε_{33} , e a seguir para as tensões horizontais principais máxima, $\sigma_{HMÁX}$ e mínima, σ_{hmin} .

Enfim, esta análise é também justificada, pois um transdutor de deslocamento defeituoso do equipamento de ensaio ASR pode fazer leituras expúrias ou ainda puncionar a região de contato com a amostra, gerando erro nas deformações recuperadas, que podem influenciar as tensões horizontais principais. Para tal, todos os parâmetros se mantiveram constantes, enquanto apenas a deformação recuperada ε_{xx} variou de -50% a +50% ε_{xx} .

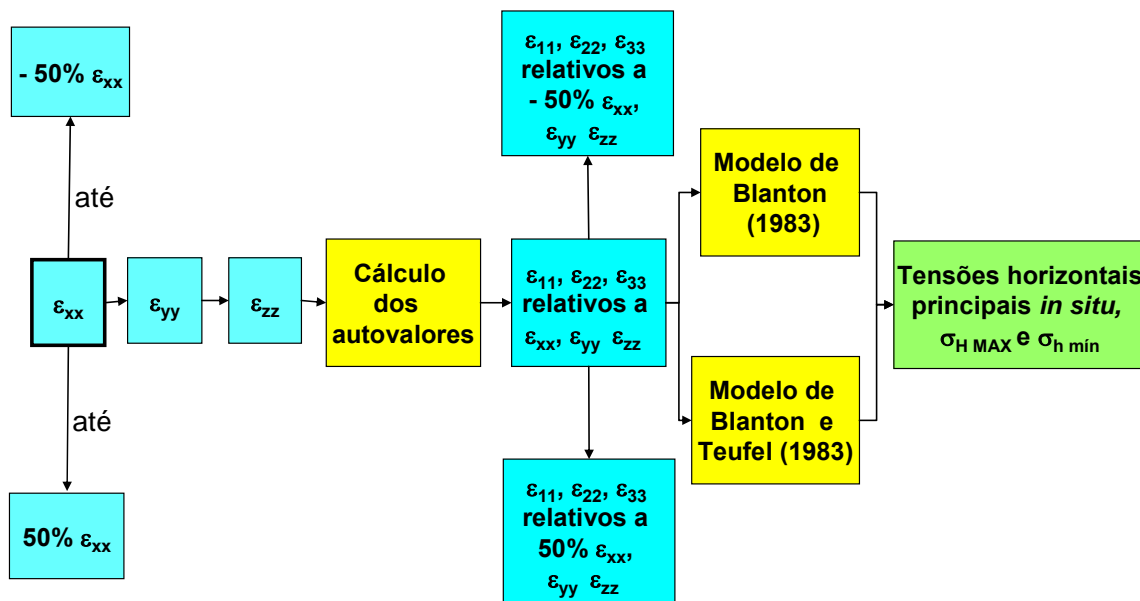


Figura 5.7. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação da deformação recuperada ε_{xx} .

A Figura 5.8 apresenta a variação das tensões principais em função da variação de ε_{xx} , utilizando o modelo de BLANTON (1983). Constata-se que, quando a deformação ε_{xx} varia, não é observada nenhum padrão definido de variação para as tensões máximas horizontais do ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2.

Para o caso ROLLINS, as tensões mantêm-se aproximadamente constantes nos extremos $-50\% \varepsilon_{xx}$ e $+50\% \varepsilon_{xx}$, e sofrem pequenas variações para pequenas porcentagens de ε_{xx} .

Para o caso BAKKEN 1, a tensão horizontal máxima aumenta a uma taxa maior do que a tensão horizontal mínima, que permanece aproximadamente constante. Já para o caso BAKKEN 2, a tensão máxima horizontal decresce e a tensão horizontal mínima cresce com o aumento de ε_{xx} . Tal diferença é decorrência do fato da deformação recuperada ε_{xx} influenciar o cálculo dos autovalores, os valores de deformações principais, ε_{11} , ε_{22} e ε_{33} , e, finalmente, as tensões *in situ* determinadas pelo modelo de BLANTON (1983). Por outro lado, pode-se observar que com o aumento de ε_{xx} todas as curvas referentes a tensão horizontal mínima apresentaram aumento.

A Figura 5.9 apresenta a variação das tensões principais em função da variação de ε_{xx} , utilizando o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983). Observa-se que, com o aumento de ε_{xx} , aumentam as tensões horizontais principais mínimas e a tensão horizontal principal máxima permanece aproximadamente constante para o ROLLINS, aumenta para o BAKKEN 1 e diminui para o BAKKEN 2. Portanto, não se identifica um padrão de comportamento das tensões horizontais máximas com a variação de ε_{xx} .

É interessante lembrar que para o mesmo testemunho do BAKKEN, foram retiradas duas amostras, sendo que uma delas a 2973,3 m (BAKKEN 1) e 2974,8 m (BAKKEN 2) de profundidade. Houve variação de ε_{xx} para as duas amostras diferentes, possivelmente devido à heterogeneidade das camadas. Enfim, o padrão de variação das curvas para o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) manteve o mesmo perfil do modelo de BLANTON (1983), apenas trasladado pela consideração da poropressão, obtendo-se resultados de tensões superiores ao modelo de BLANTON (1983).

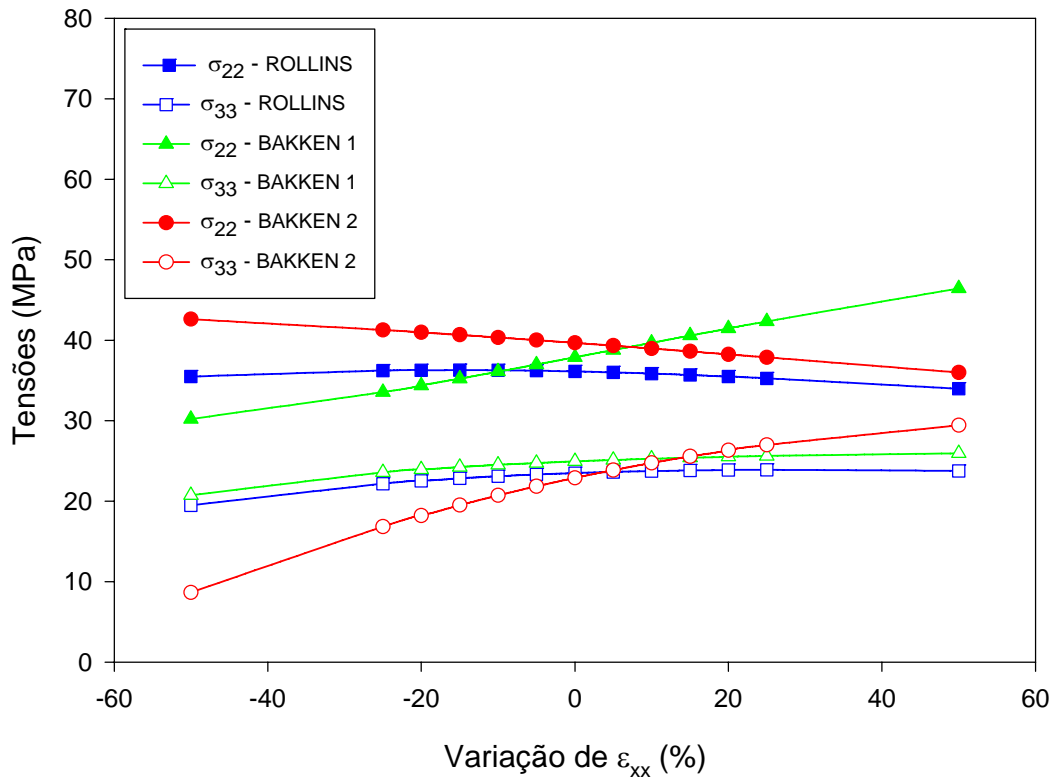


Figura 5.8. Variação das tensões principais em relação à variação de ϵ_{xx} (C-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).

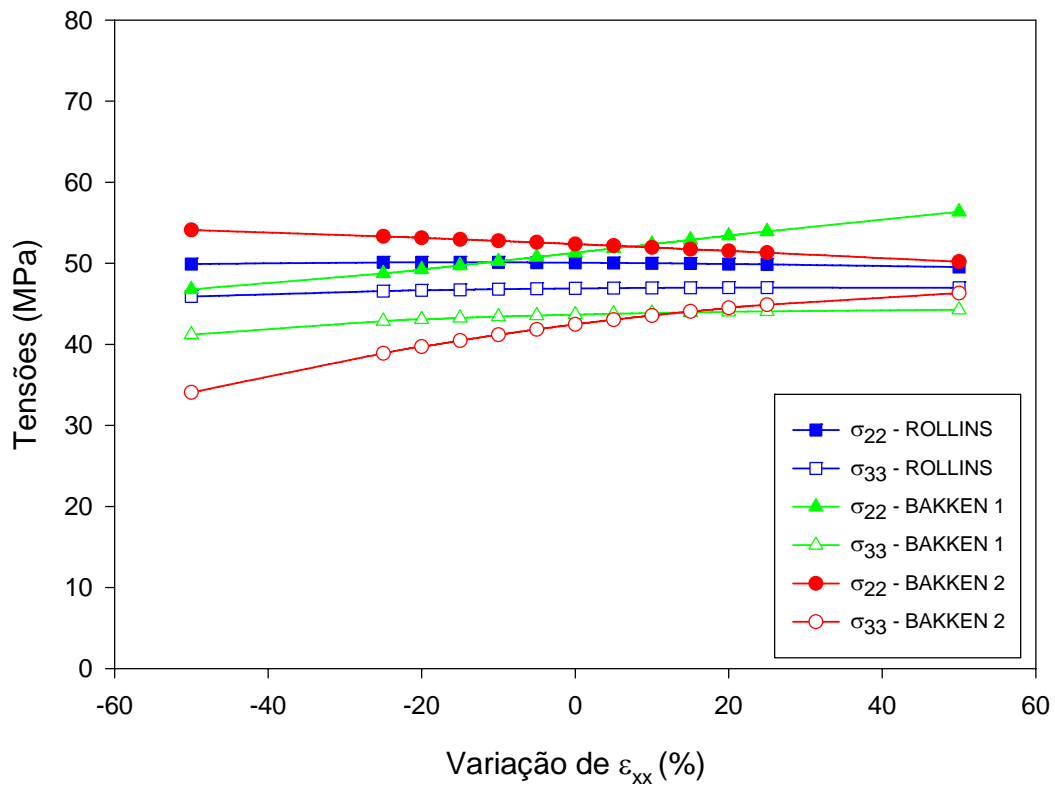


Figura 5.9. Variação das tensões principais em relação à variação de ϵ_{xx} (C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

Nas Tabelas A3.3 e A3.4 (Anexo 3), é possível observar e quantificar a influência das variações da deformação recuperada ε_{xx} atuando indiretamente nos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983) na determinação das tensões máximas e mínimas, respectivamente.

A Figura 5.10 apresenta a metodologia empregada na análise de sensibilidade em função da variação de ε_{yy} . Apenas a deformação recuperada ε_{yy} variou de $-50\% \varepsilon_{yy}$ a $+50\% \varepsilon_{yy}$. O objetivo desta análise é observar a influência do parâmetro ε_{yy} no cálculo das tensões *in situ* através dos dois modelos.

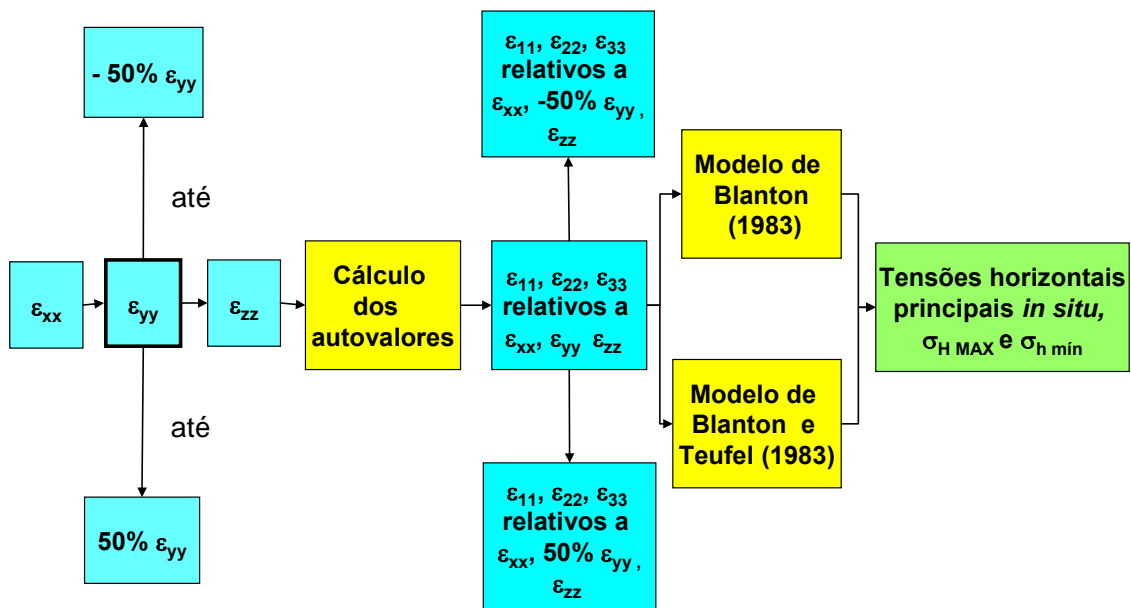


Figura 5.10. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação da deformação recuperada ε_{yy} .

A Figura 5.11 apresenta a variação das tensões principais em função da variação de ε_{yy} , utilizando o modelo de BLANTON (1983). Pode-se observar que, com o aumento de ε_{yy} , ocorre um aumento das tensões horizontais mínimas. De forma similar à variação de ε_{xx} não há um padrão para as tensões horizontais máximas.

Esta constatação indica que, caso ocorra uma variação de ε_{yy} , não é possível prever o comportamento da tensão horizontal máxima, ao contrário do que ocorre com

a tensão horizontal mínima. Caso ocorra uma redução ou aumento de ε_{yy} , pode-se aferir uma diminuição ou aumento da tensão horizontal mínima.

A Figura 5.12 apresenta a variação das tensões principais em função da variação de ε_{yy} , utilizando o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983). É possível observar na Figura que, para o aumento de ε_{yy} , para os casos do ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2, há o aumento das tensões horizontais máximas e mínimas, excetuando o decréscimo da tensão horizontal máxima do BAKKEN 1.

Nas Tabelas A3.5 e A3.6 (Anexo 3), é possível observar e quantificar a influência da variação da deformação recuperada ε_{yy} nos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983) para a determinação das tensões horizontais *in situ*, máximas e mínimas respectivamente.

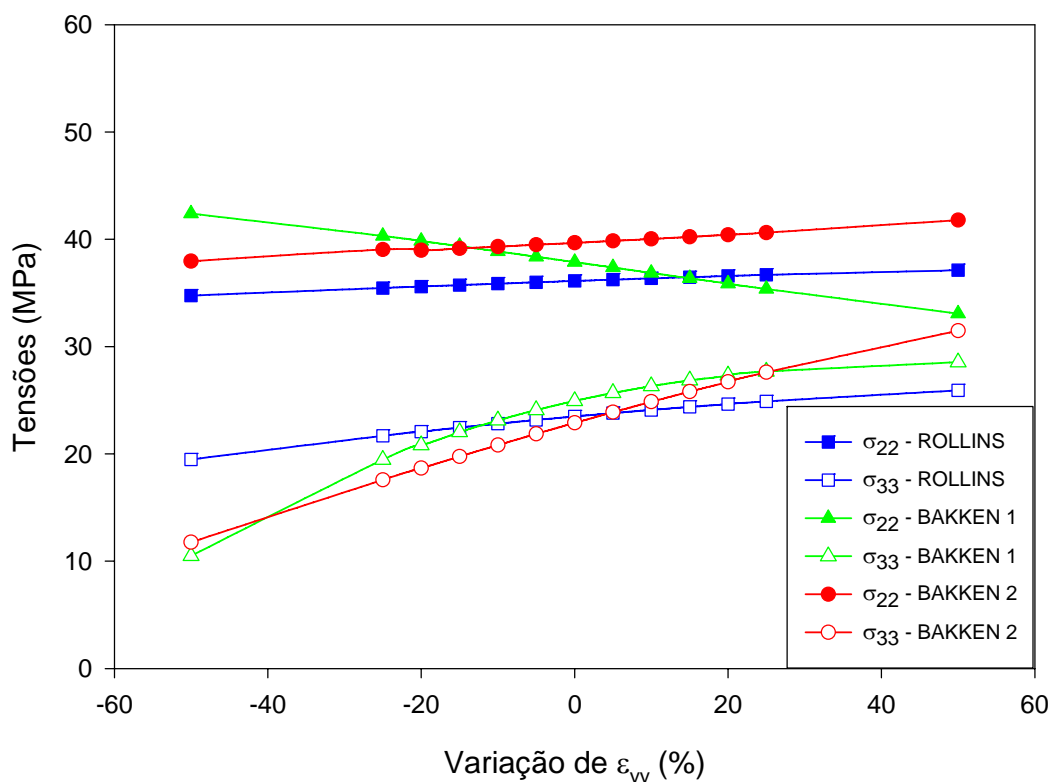


Figura 5.11. Variação das tensões principais em relação à variação de ε_{yy} (C-Temp) - Modelo de BLANTON(1983).

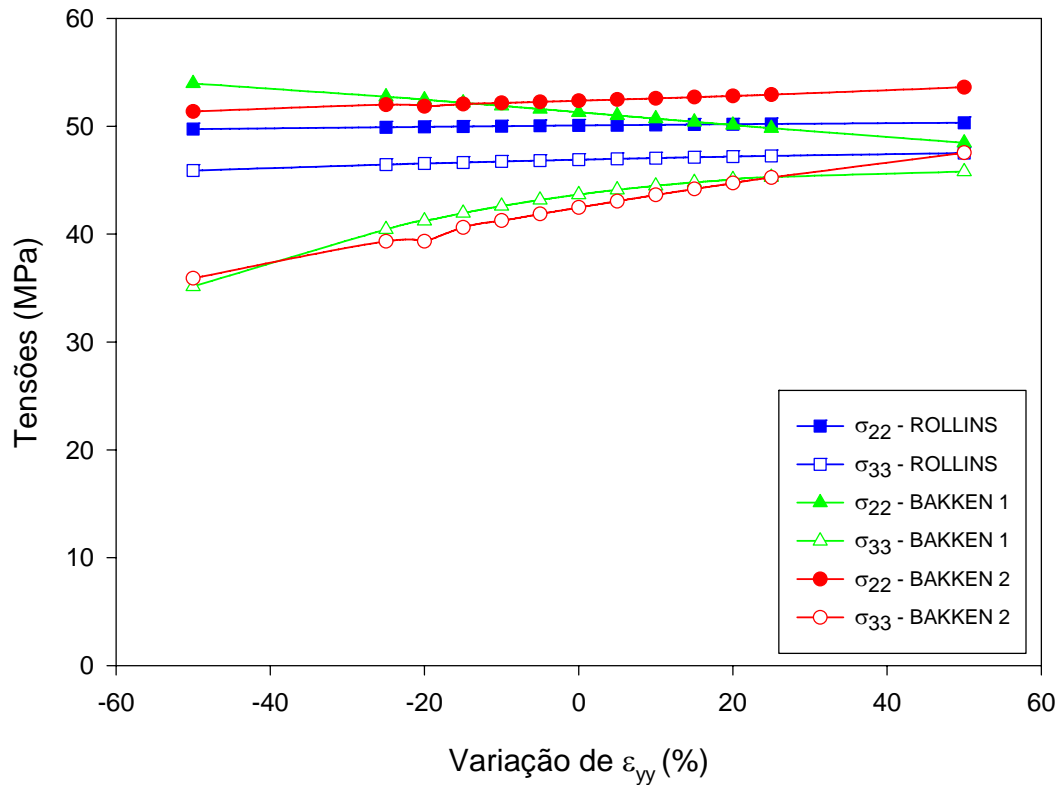


Figura 5.12. Variação das tensões principais em relação à variação de ϵ_{yy} (C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

A Figura 5.13 apresenta a metodologia empregada na análise de sensibilidade das tensões em função da variação de ϵ_{zz} , para os casos ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2.

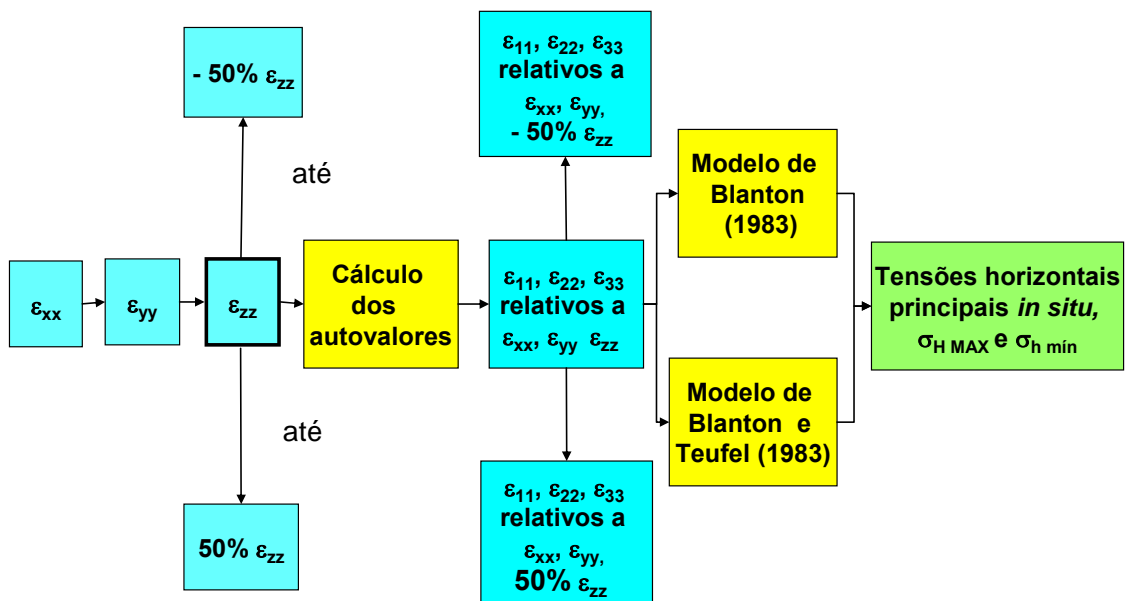


Figura 5.13. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação da deformação recuperada ϵ_{zz} .

Novamente, todos os outros parâmetros se mantiveram constantes, enquanto apenas a deformação recuperada ε_{zz} variou de $-50\% \varepsilon_{zz}$ a $+50\% \varepsilon_{zz}$.

A Figura 5.14 apresenta a variação das tensões principais em função da variação de ε_{zz} , utilizando o modelo de BLANTON (1983). Pode-se perceber que, com o aumento de ε_{zz} , ocorre um aumento das tensões horizontais máximas e mínimas para o modelo de BLANTON (1983), para o caso BAKKEN 1 e BAKKEN 2. Já para o caso do ROLLINS, as tensões horizontais máxima e mínima decrescem.

Já a Figura 5.15 apresenta a variação das tensões principais em função da variação de ε_{zz} , utilizando o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

Conforme ocorre na Figura 5.14, com o aumento de ε_{zz} , há um aumento das tensões horizontais máximas e mínimas para o caso BAKKEN 1 e BAKKEN 2. Já para o caso do ROLLINS, as tensões horizontais máxima e mínima decrescem.

Também nesse caso, todas as curvas apresentam um comportamento polinomial do quarto grau, com coeficiente próximo a 1. No que se refere a variação de ε_{zz} , não se observa comportamento semelhante ao das variações de ε_{yy} e ε_{xx} .

Nas Tabelas A3.7 e A3.8 (Anexo 3), é possível observar e quantificar a influência da variação da deformação recuperada ε_{zz} nos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983) para a determinação das tensões horizontais *in situ*, máximas e mínimas, respectivamente.

Cabe aqui salientar, que os resultados das Tabelas A3.7 e A3.8 incluem a variação de $-75\% \varepsilon_{zz}$ e $75\% \varepsilon_{zz}$, apenas para observação que nestes pontos o comportamento é distinto. Todavia, exata análise torna-se ineficaz em especial para as deformações recuperadas que são do ensaio ASR (C-Temp), pois a influência de um erro nas deformações recuperadas é menos significativa que nas deformações principais.

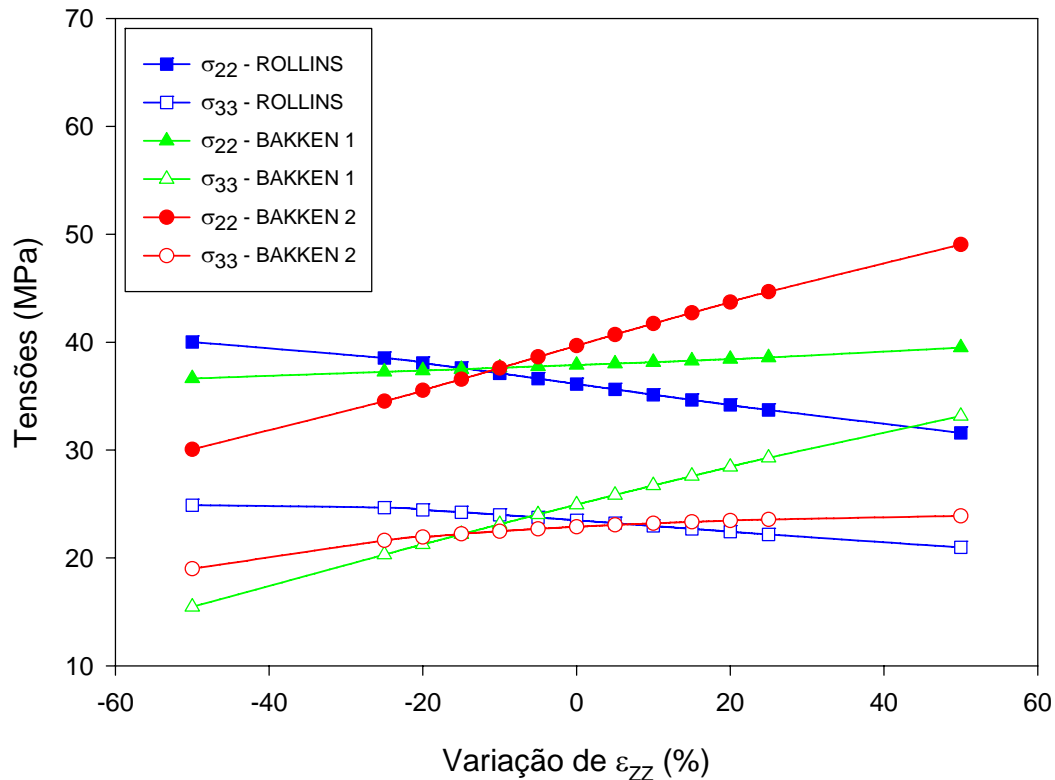


Figura 5.14. Variação das tensões principais em relação à variação de ε_{zz} (C-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).

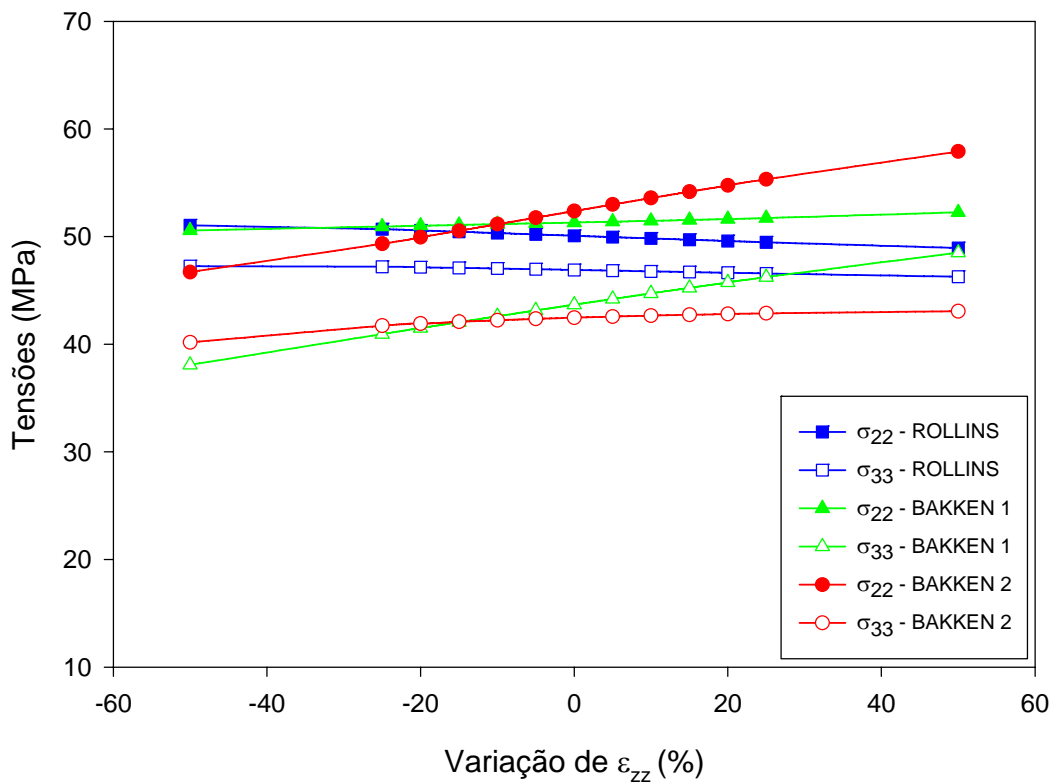


Figura 5.15. Variação das tensões principais em relação à variação de ε_{zz} (C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL(1983).

5.2.3 Influência da Deformações Principais

A análise de sensibilidade dos modelos procurou avaliar o impacto da variação das deformações principais na determinação das tensões *in situ* através dos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983). As deformações principais podem ser obtidas diretamente do ensaio ASR, com correção de temperatura ou do cálculo dos autovalores, que são as raízes da equação característica. Desta forma, a variação de ε_{11} , ε_{22} e ε_{33} irá se refletir diretamente nas tensões, pois elas são o *input* dos modelos, diferentemente do que ocorre com as deformações recuperadas ε_{xx} , ε_{yy} e ε_{zz} .

A Figura 5.16 apresenta a metodologia utilizada para a análise de sensibilidade correspondente à variação de ε_{11} , mantendo ε_{22} e ε_{33} constantes, tanto para o modelo de BLANTON (1983) quanto para o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

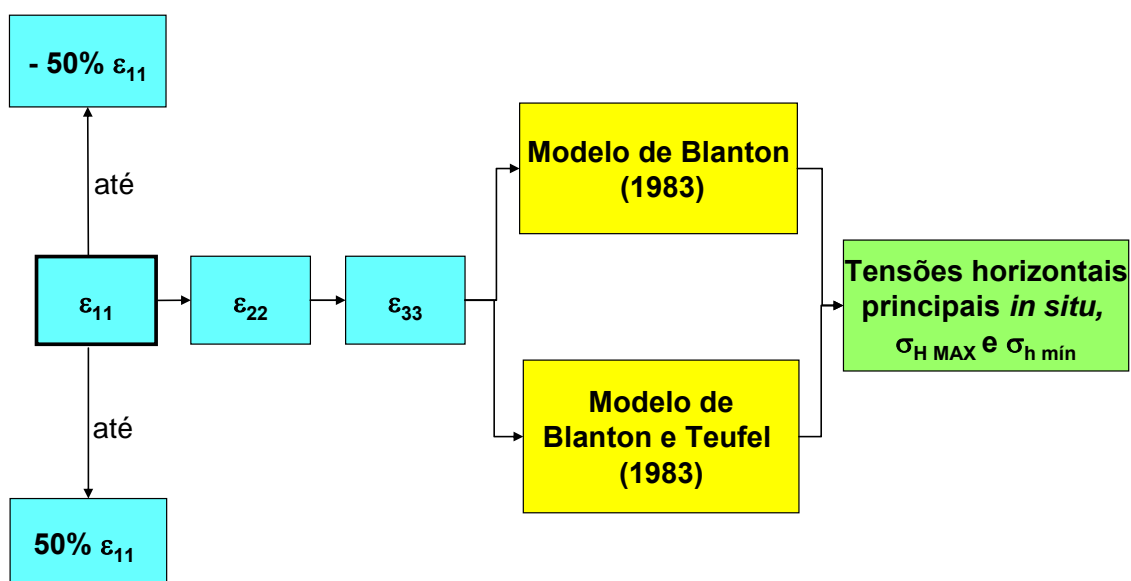


Figura 5.16. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação da deformação principal ε_{11} .

Nas Tabelas A3.9 e A3.10 (Anexo 3), é possível observar e quantificar a influência das variações da deformação principal ε_{11} do ensaio ASR (C-Temp) e nas Tabelas A3.15 e A3.16 (Anexo 3), é possível observar e quantificar a influência das variações da deformação principal ε_{11} obtida da equação característica (S-Temp), atuando diretamente nos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983)

na determinação das tensões horizontais *in situ*, máximas e mínimas, respectivamente.

A Figura 5.17 se refere à variação das tensões horizontais em função da variação da deformação principal ε_{11} , para o modelo de BLANTON (1983). Nessa Figura, diferentemente do que ocorre para as variações referentes às deformações recuperadas (ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz}), percebe-se que as tensões horizontais máximas decrescem para os três casos (ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2) com o aumento de ε_{11} . Já para o caso da tensão horizontal máxima do ROLLINS, no intervalo entre $-75\% \varepsilon_{11}$ e $-50\% \varepsilon_{11}$, o valor de ε_{22} torna-se maior que o de ε_{11} e ocorre uma inversão da curva e dos valores de tensão obtidas através do modelo de BLANTON (1983). Já as tensões horizontais mínimas para o BAKKEN 1 e BAKKEN 2 apresentam comportamento semelhante. Em contraponto, a tensão horizontal mínima para o caso do ROLLINS decresce com o aumento de ε_{11} .

A Figura 5.18 se refere à variação das tensões horizontais em função da variação da deformação principal ε_{11} , proveniente da equação característica, sem correção de temperatura, também para o modelo de BLANTON (1983). Pode-se observar que, com o aumento de ε_{11} , há um decréscimo das tensões horizontais máximas a uma taxa maior que a das tensões horizontais mínimas. A tensão horizontal mínima do ROLLINS aumenta com o aumento de ε_{11} , o contrário do que ocorre no caso do BAKKEN 1 e BAKKEN 2.

Para o caso do ROLLINS, a tensão horizontal máxima sofre uma inversão de valor de $-75\% \varepsilon_{11}$ a $-50\% \varepsilon_{11}$, devido ao fato da tensão máxima horizontal ter atingido um valor maior que a tensão vertical maior. Para o caso das raízes da equação característica (S-Temp), todavia, as tensões máximas e mínimas tiveram comportamento semelhante para todos os casos, diferente da análise de variação de ε_{11} obtida das deformações recuperadas do ensaio ASR (C-Temp), como se observa na Figura 5.17.

A Figura 5.19 mostra a variação das tensões horizontais devido à variação da deformação principal ε_{11} , com temperatura corrigida, proveniente do ensaio ASR, para o caso de BLANTON e TEUFEL (1983). Pode-se observar que, com o aumento de

ε_{11} , há um aumento das tensões horizontais mínimas para o caso do BAKKEN 1 e BAKKEN 2. Já as tensões horizontais máximas do BAKKEN 1 e BAKKEN 2 diminuem com o aumento de ε_{11} . Para o caso do ROLLINS, a tensão horizontal máxima sofre uma inversão de valor de -75% a - 50%, devido ao fato da tensão horizontal ter atingido um valor maior que a tensão vertical maior. Por isso a variação foi feita de -50% a +50% obtendo valores então padronizados.

A Figura 5.20 mostra a variação das tensões horizontais devido à variação da deformação principal ε_{11} , proveniente da equação característica, para o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983). Observa-se que as tensões horizontais principais máximas se reduzem com o aumento de ε_{11} , sendo que a tensão mínima do ROLLINS decresce, e tem valores aproximadamente constantes. Ou seja, a influência da variação de ε_{11} é maior nas tensões máximas principais.

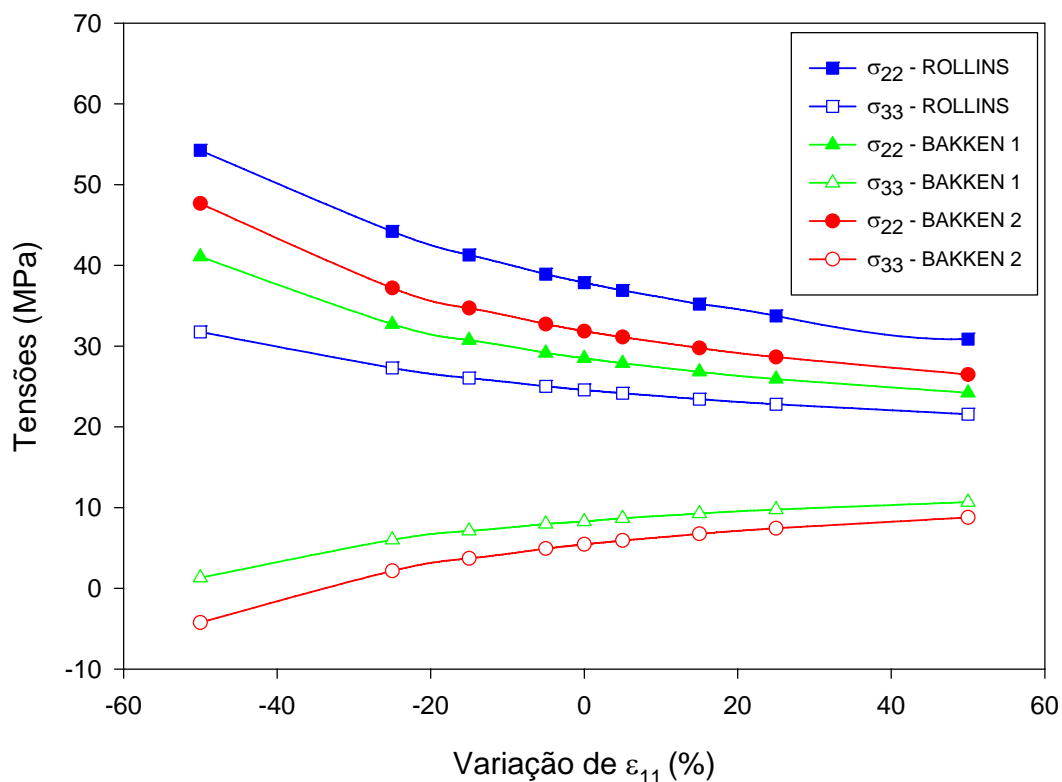


Figura 5.17. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{11} – (ensaio ASR - C-Temp) - Modelo de BLANTON (1983).

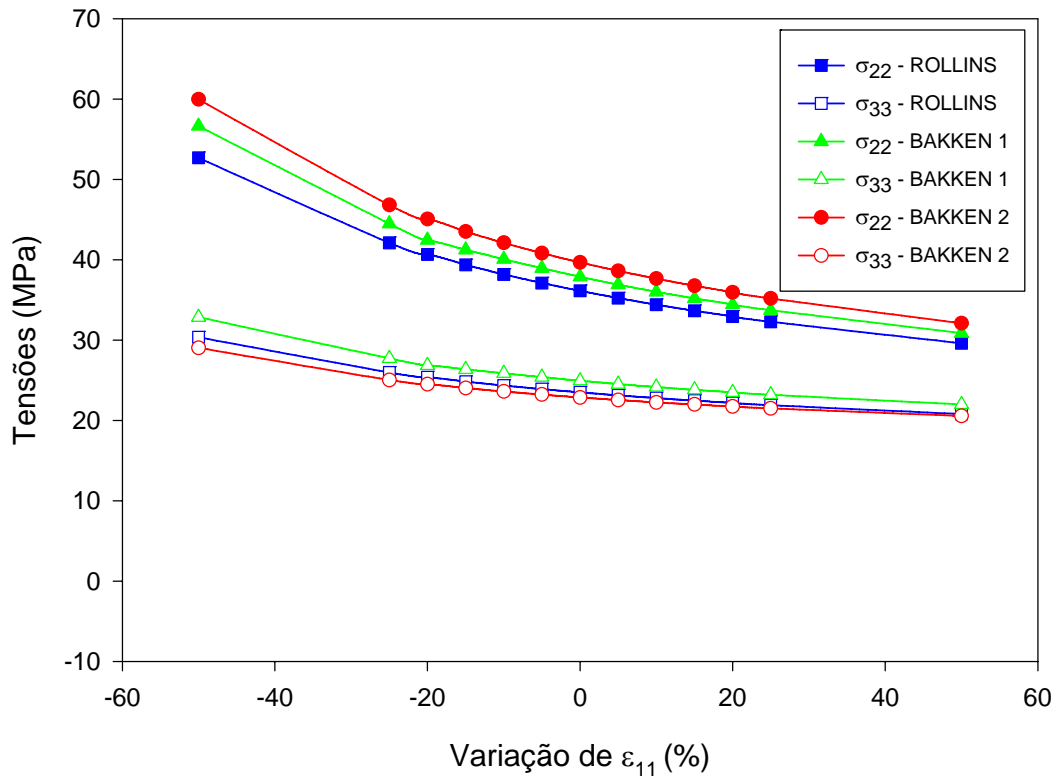


Figura 5.18. Variação das tensões horizontais em relação a variação de ε_{11} (equação característica – S-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).

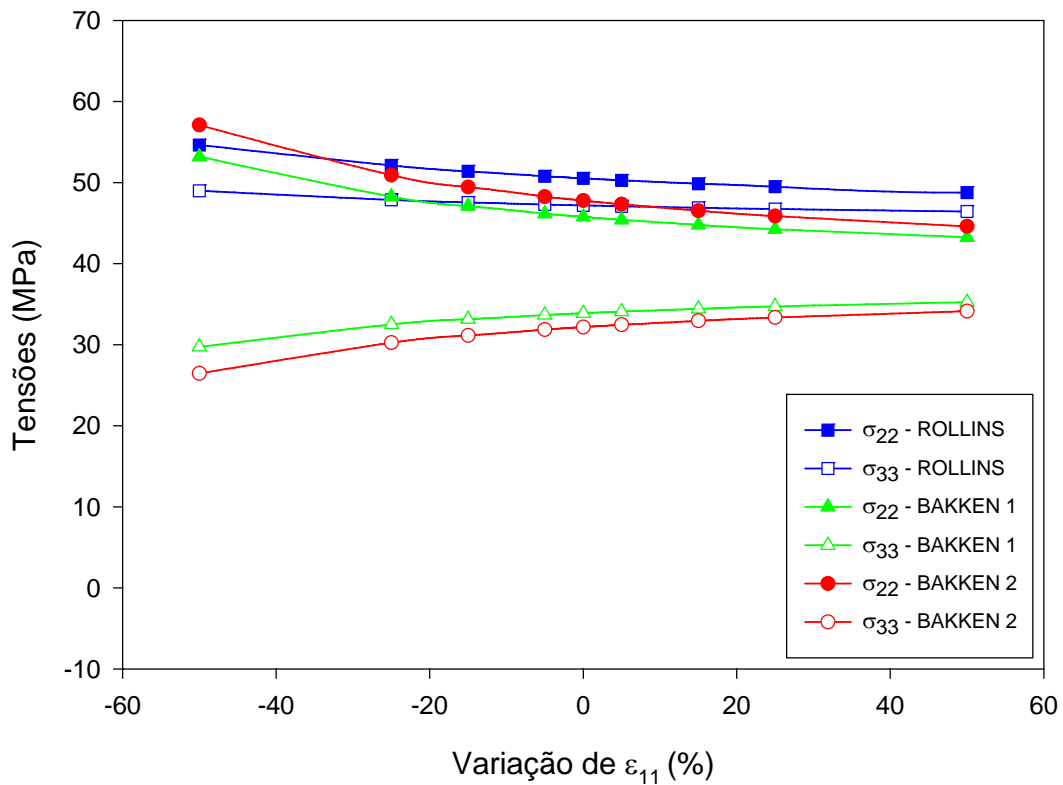


Figura 5.19. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{11} (ensaio ASR - C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

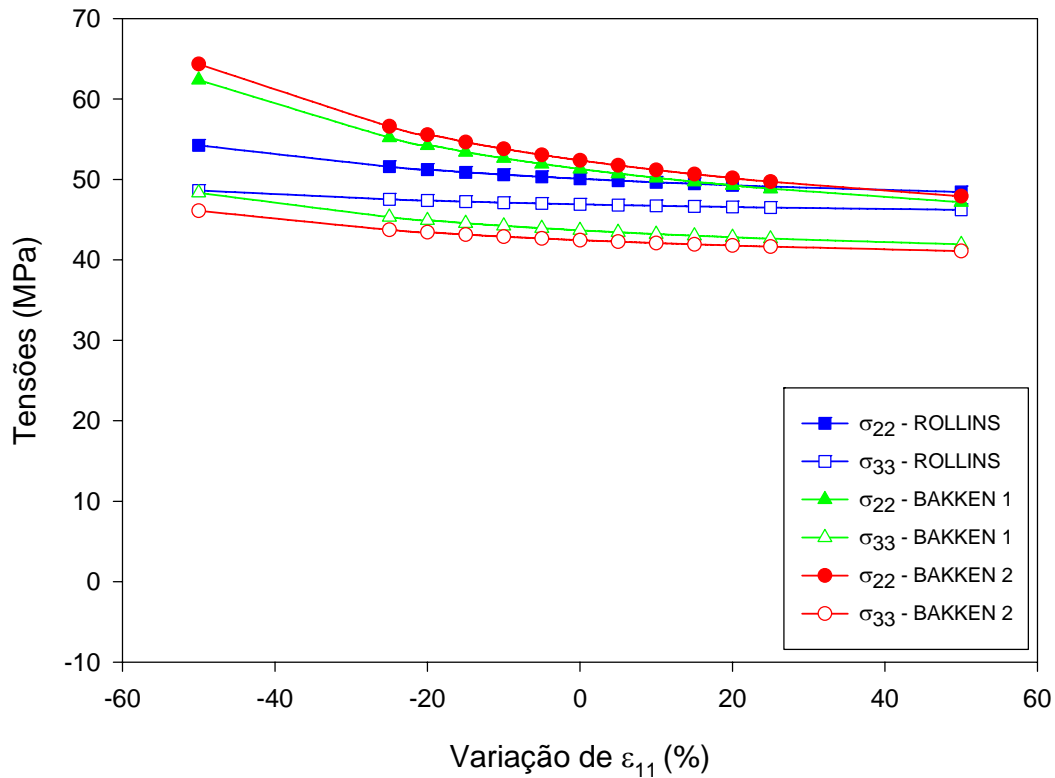


Figura 5.20. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ϵ_{11} (equação característica - S-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

Na Figura 5.21 pode-se observar a metodologia para o caso da variação de ϵ_{22} , mantendo ϵ_{11} e ϵ_{33} constantes, tanto para o modelo de BLANTON (1983) quanto para BLANTON e TEUFEL (1983).

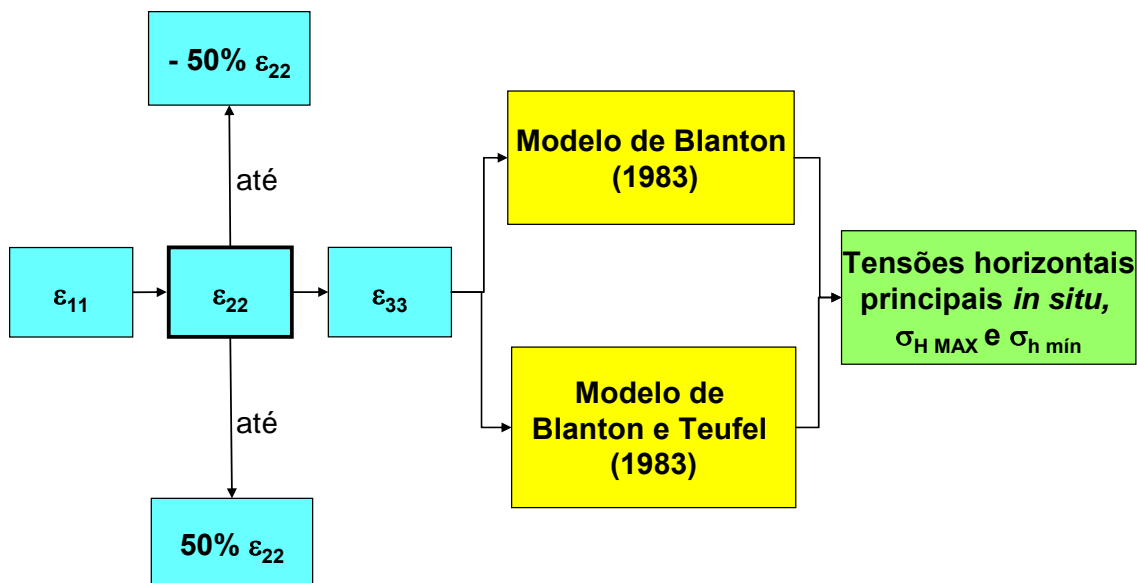


Figura 5.21. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação da deformação principal ϵ_{22} .

Além disso, são analisadas as deformações volumétricas provenientes do ensaio ASR, com correção de temperatura, C-Temp e proveniente da equação característica, sem correção de temperatura, S-Temp.

A Figura 5.22 mostra a variação das tensões horizontais devido à variação da deformação principal ε_{22} obtida do ensaio ASR (C-Temp), ou seja, com resultados com correção de temperatura para o modelo de BLANTON (1983). Observa-se que, com o aumento de ε_{22} , ocorre um aumento das tensões horizontais máximas e mínimas, para todos os casos.

As taxas de crescimento relativas à tensão máxima do ROLLINS, do BAKKEN 1 e do BAKKEN 2, são maiores que as taxas de crescimento da tensão mínima para os três casos. As retas das tensões máximas são aproximadamente paralelas, e apresentam uma variação máxima, entre $-50\% \varepsilon_{22}$ e $50\% \varepsilon_{22}$, de 15 MPa. Já a variação das tensões mínimas foi no máximo de 3 MPa, e também são paralelas entre si.

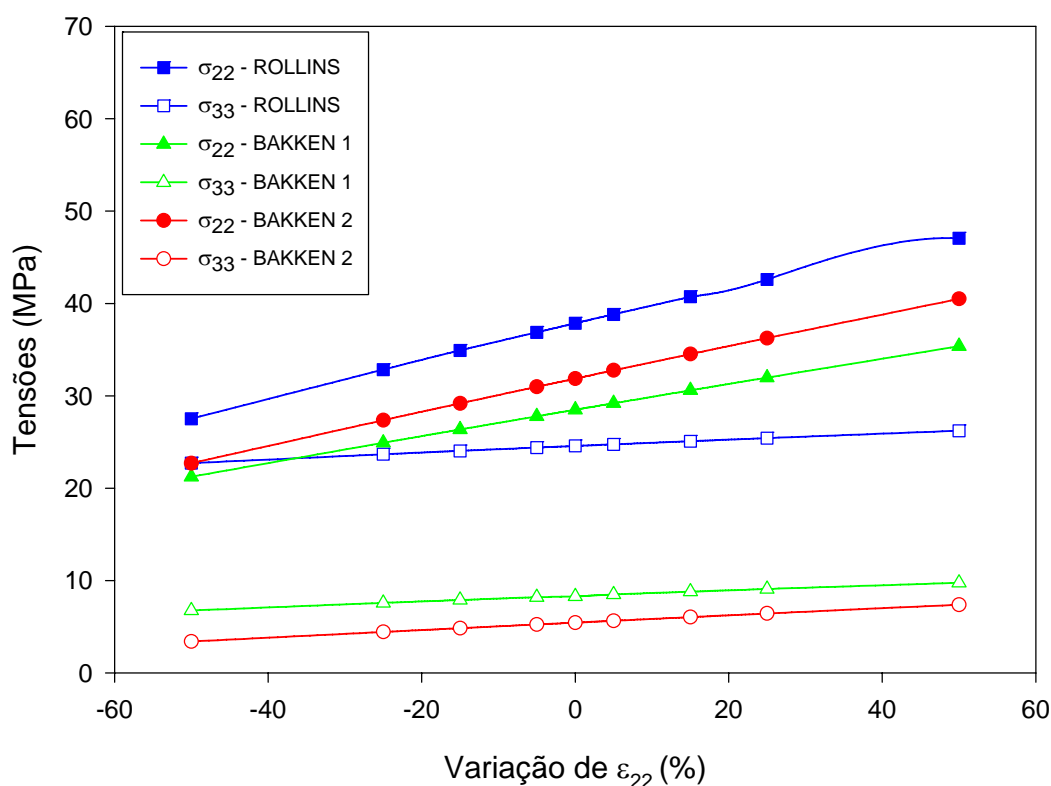


Figura 5.22. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{22} (ensaio ASR- C-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).

A Figura 5.23 mostra a variação das tensões horizontais devido à variação da deformação principal ε_{22} , proveniente da equação característica, logo sem correção de temperatura, S-temp, para o modelo de BLANTON (1983).

Com o aumento da deformação principal calculada ε_{22} , ocorre um aumento das tensões horizontais máxima e mínima, com uma taxa superior de aumento nas tensões máximas. As maior variação da tensão horizontal máxima do ROLLINS, do BAKKEN 1 e do BAKKEN 2, entre - 50% ε_{22} e 50% ε_{22} , equivale a aproximadamente 25 MPa e referente à tensão horizontal mínima do ROLLINS do BAKKEN 1 e do BAKKEN 2, são de 3 MPa.

Nas Tabelas A3.11 e A3.12 (Anexo 3), é possível observar e quantificar a influência da variação da deformação principal ε_{22} do ensaio ASR (C-Temp), com correção de temperatura.

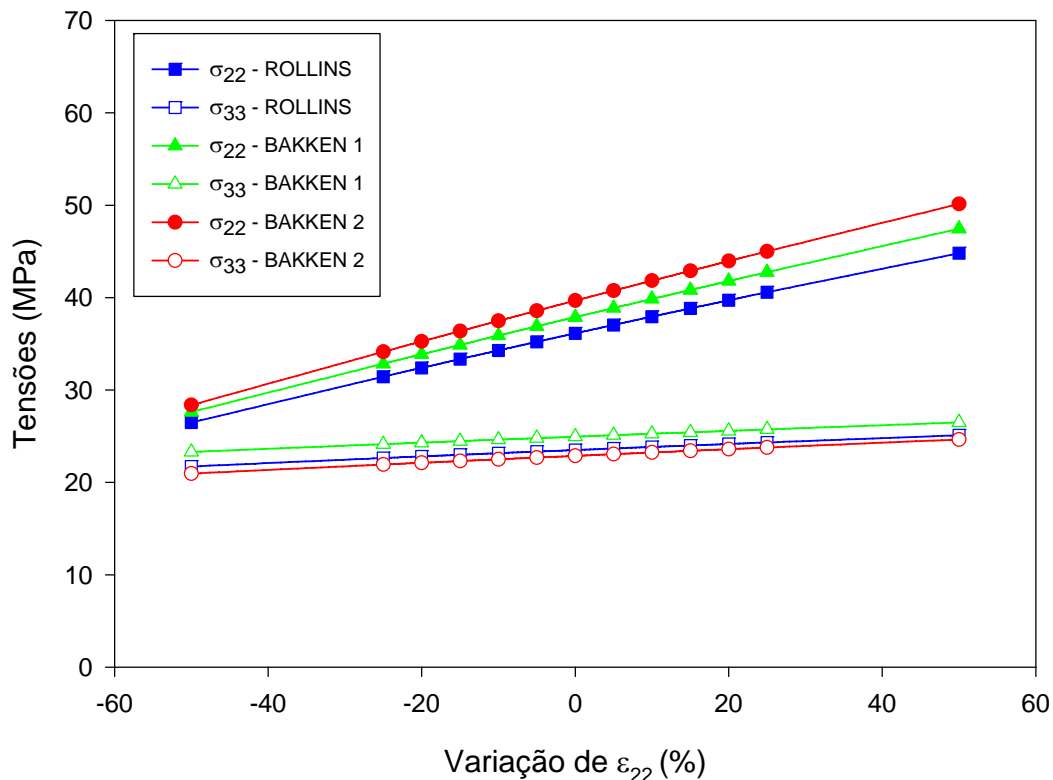


Figura 5.23. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{22} (equação característica- S-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).

Já nas Tabelas A3.17 e A3.18 (Anexo 3), é possível observar e quantificar a influência da variação da deformação principal ε_{22} obtidas da equação característica (S-Temp), nos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983) para a determinação das tensões horizontais *in situ*, máximas e mínimas, respectivamente.

A Figura 5.24 mostra a variação das tensões horizontais devido à variação da deformação principal ε_{22} , deformação proveniente de equação característica (S-Temp), sem correção de temperatura, para o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

Observa-se que as tensões horizontais máximas aumentam seu valor a uma taxa maior que as tensões horizontais mínimas. Todas as correlações têm aproximação perfeitamente linear.

Apenas as deformações principais foram analisadas tanto para casos com correção de temperatura como para casos sem correção de temperatura.

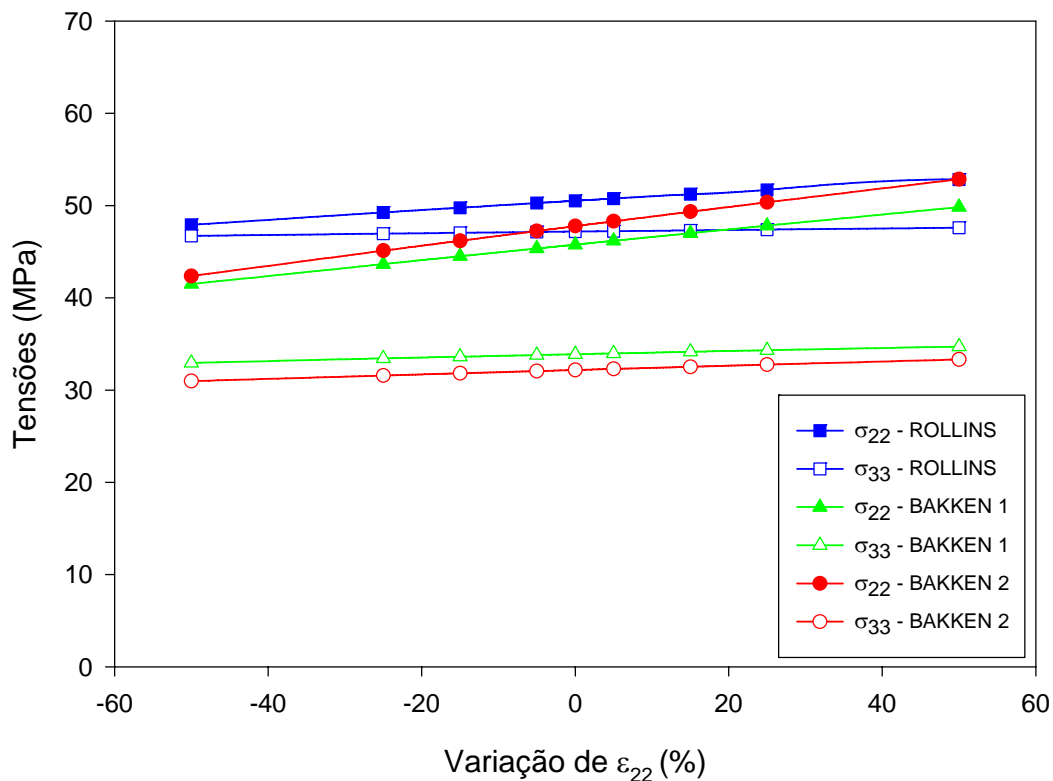


Figura 5.24. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{22} (ensaio ASR- C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

A Figura 5.25 mostra a variação das tensões horizontais devido à variação de ε_{22} , deformação proveniente de equação característica (S-Temp), para o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983). Observa-se que, com o aumento de ε_{22} , ocorre aumento das tensões horizontais máximas a uma taxa maior que o aumento das tensões horizontais mínimas.

Para uma variação de -50% ε_{22} a 50% ε_{22} , a variação máxima da tensão horizontal máxima é de aproximadamente 15 MPa para o BAKKEN 2, e para a tensão horizontal mínima é de aproximadamente 5 MPa para o Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

Observa-se nesse caso, de forma análoga às figuras anteriores, que a maior faixa de variação entre as tensões horizontais máxima e mínima equivale ao caso BAKKEN 2, seguido pelo BAKKEN 1 e ROLLINS.

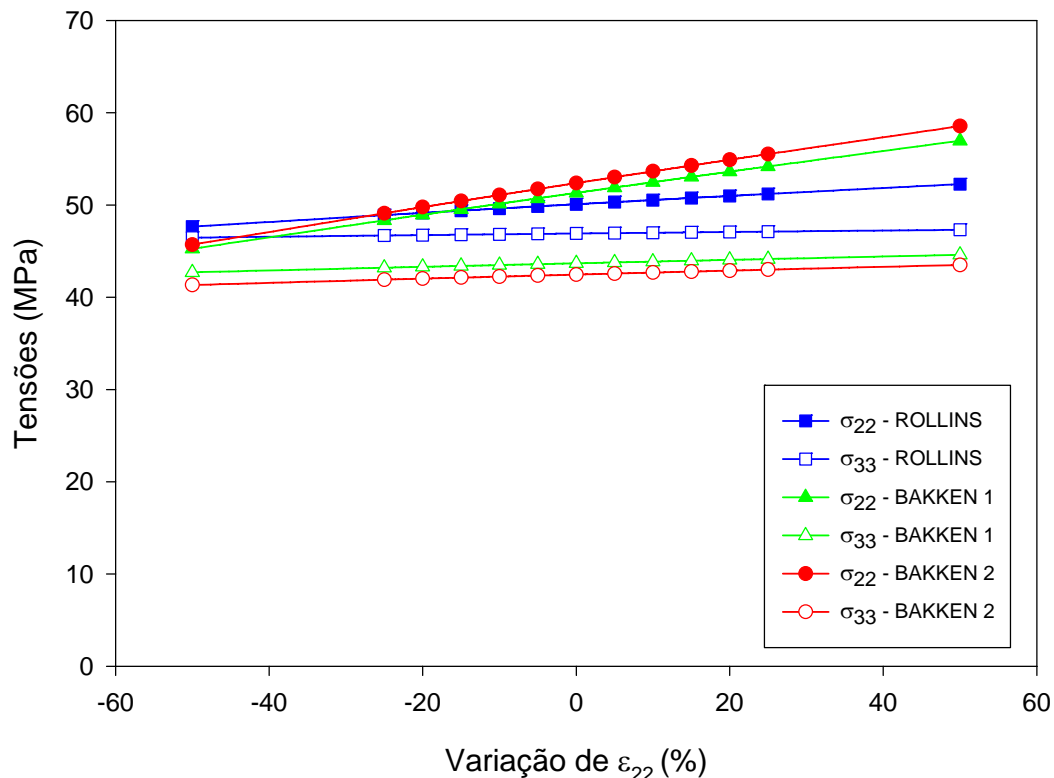


Figura 5.25. Variação das Tensões Horizontais em relação a Variação de ε_{22} (equação característica - S-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

Na Figura 5.26 pode-se observar a metodologia para o caso da variação da deformação principal mínima ϵ_{33} , na determinação das tensões *in situ* através dos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983). Novamente, considera-se que o parâmetro varia entre $-50\% \epsilon_{33}$ até $+50\% \epsilon_{33}$.

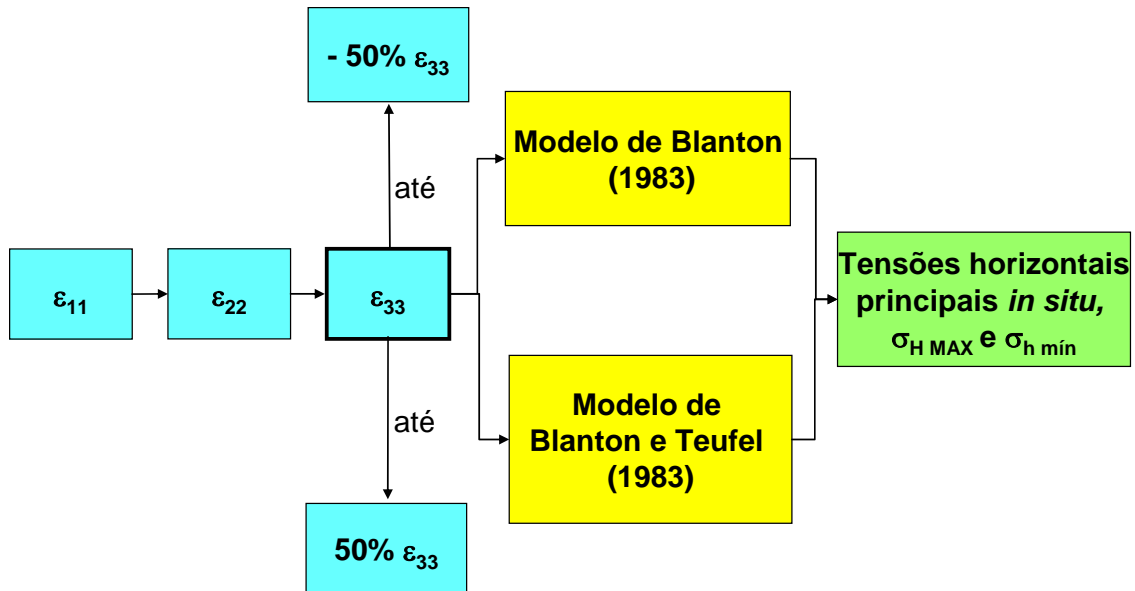


Figura 5.26. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação de ϵ_{33} .

A Figura 5.27 mostra a variação das tensões horizontais em relação à variação de ϵ_{33} , deformação proveniente de dados do ensaio ASR com correção de temperatura, para o modelo de BLANTON (1983).

Observa-se também que, com o aumento de ϵ_{33} , ocorre um decréscimo das tensões horizontais máximas do BAKKEN 1 e BAKKEN 2 a uma taxa menor que o decréscimo das tensões horizontais mínimas para a mesma variação. Para elevados valores de ϵ_{33} , as tensões horizontais mínimas atingem valores negativos. Já para o caso do ROLLINS, a tensão máxima horizontal permanece constante, independente da variação de ϵ_{33} e a tensão mínima aumenta com o aumento de ϵ_{33} . Enfim, as tensões máximas permanecem constantes com a variação de ϵ_{33} .

A Figura 5.28 mostra a variação das tensões horizontais em relação à variação de ϵ_{33} , deformação proveniente de equação característica (S-Temp), para o modelo de BLANTON (1983). Observa-se que, com o aumento de ϵ_{33} , as tensões horizontais

máximas do ROLLINS, do BAKKEN 1 e BAKKEN 2 permanecem constantes, e as tensões mínimas experimentam um leve acréscimo com o aumento de ε_{33} .

A Figura 5.29 mostra a variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{33} , deformação proveniente do ensaio ASR, para o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

Observa-se que, com o aumento de ε_{33} , ocorre um ecrésimo das tensões horizontais mínimas do BAKKEN 1 E BAKKEN 2 e aumento da tensão horizontal mínima para o caso do ROLLINS. Já para a tensão máxima, no caso do BAKKEN 2 o valor permaneceu constante, reduziu-se no caso do BAKKEN 1 e aumentou no caso do ROLLINS.

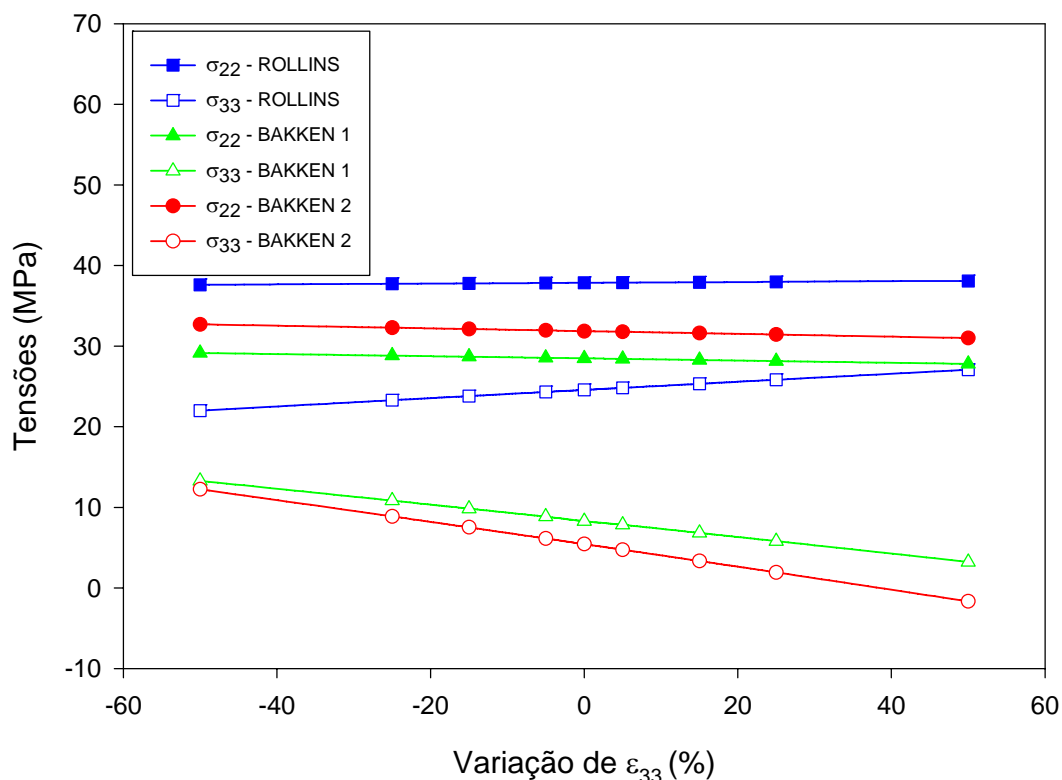


Figura 5.27. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{33} (ensaio ASR – C-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).

Assim, havendo erro em ε_{33} , apenas as tensões principais mínimas sofrem variações, porém não significativas. As tensões máximas são constantes independente da variação de ε_{33} .

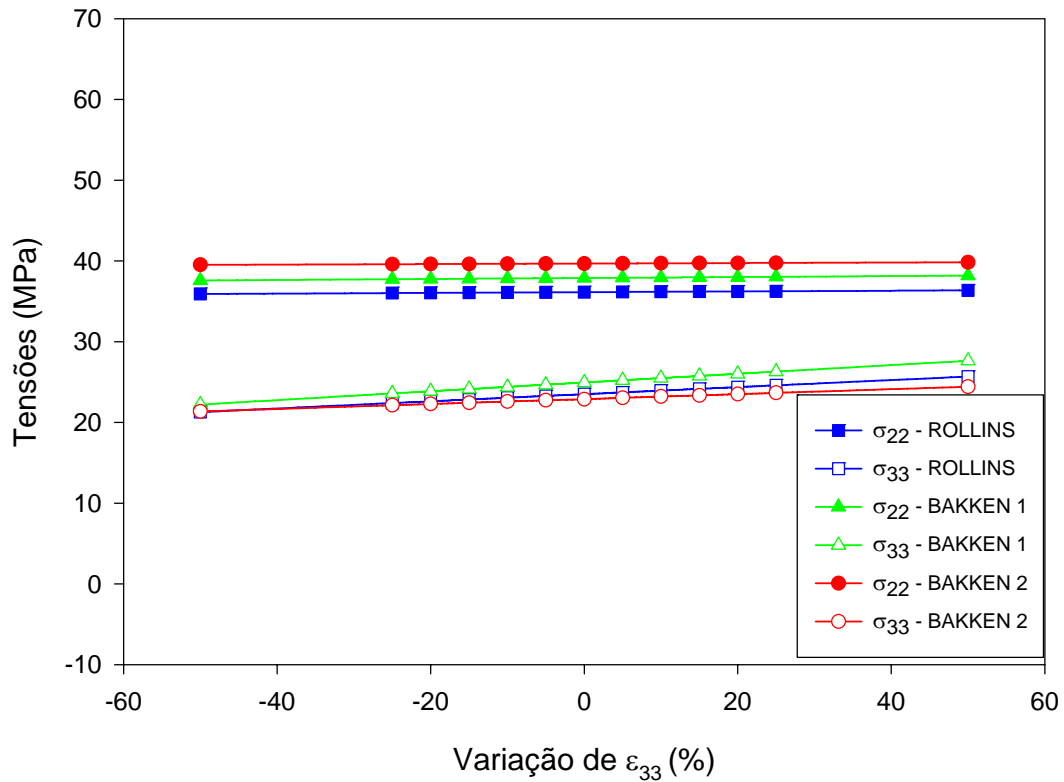


Figura 5.28. Variação das tensões horizontais em relação à variação de ϵ_{33} (equação característica – S-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).

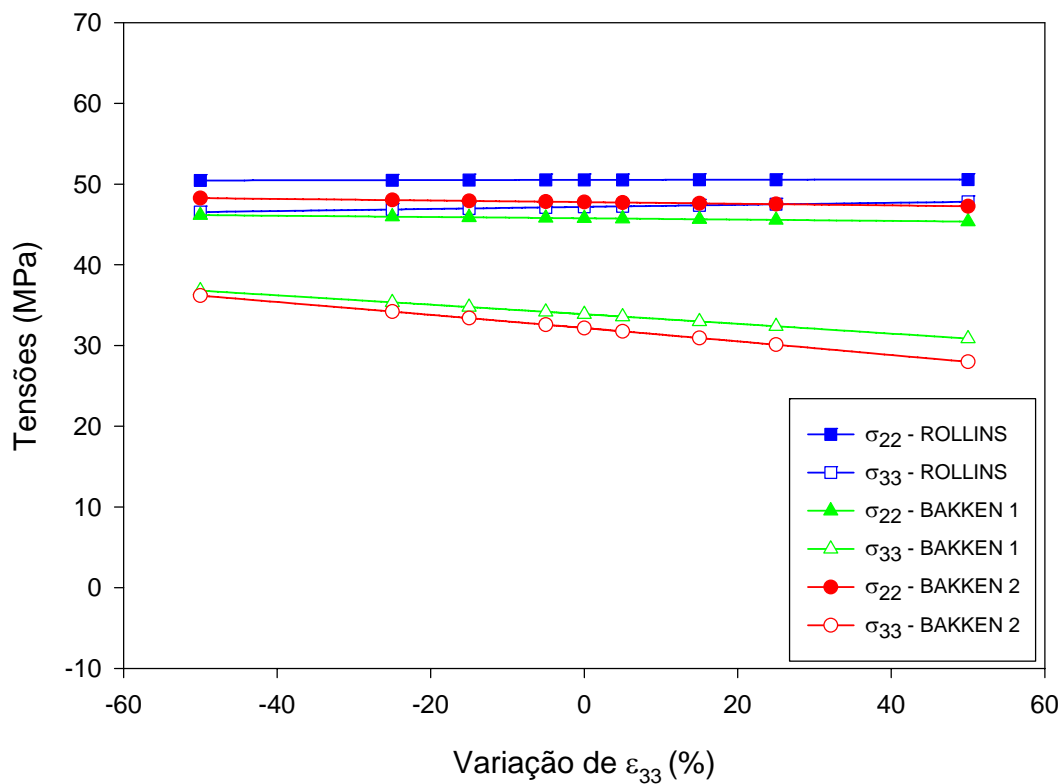


Figura 5.29. Variação das tensões horizontais em relação a variação de ϵ_{33} (ensaio ASR – C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

A Figura 5.30 mostra a variação das tensões horizontais em relação à variação de ε_{33} , deformação proveniente de equação característica, para o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983). Tanto as tensões máximas quanto as mínimas são constantes para os três casos.

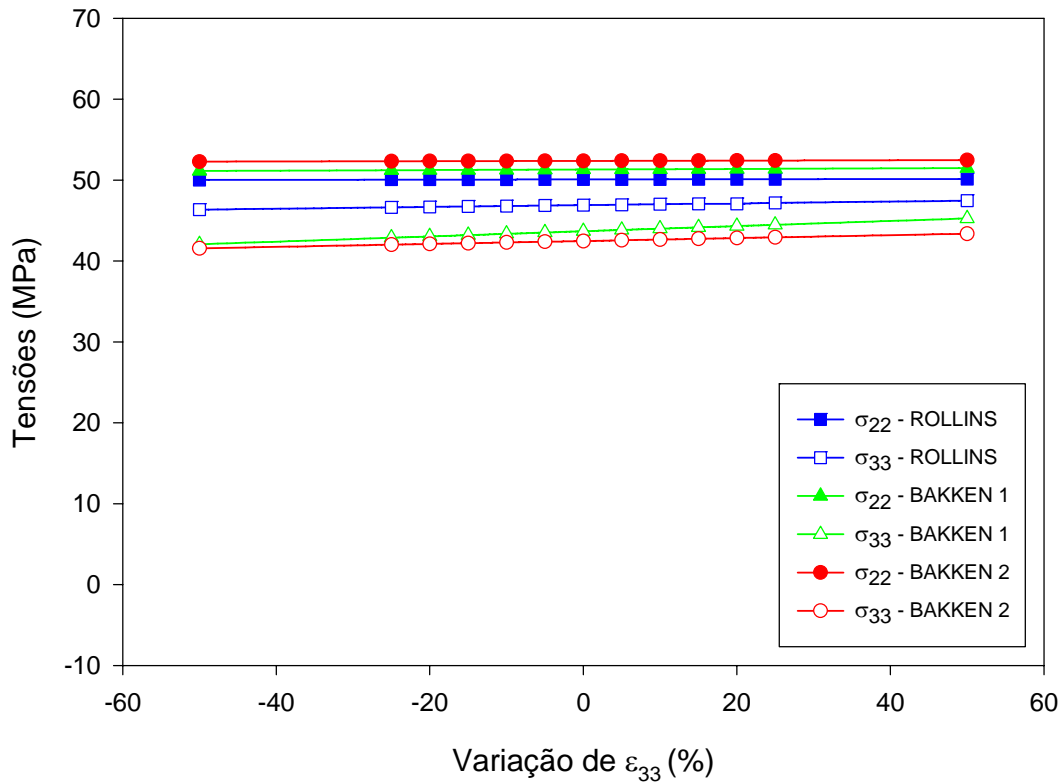


Figura 5.30. Variação das tensões horizontais em relação a variação de ε_{33} (equação característica – S-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

Nas Tabelas A3.13 e A3.14 (Anexo 3), é possível observar e quantificar a influência da variação das deformações principais ε_{33} do ensaio ASR (C-Temp) e nas Tabelas A3.19 e A3.20 (Anexo 3), é possível observar e quantificar a influência da variação das deformações principais ε_{33} obtidas da equação característica (S-Temp), nos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983) para a determinação das tensões horizontais *in situ*, máximas e mínimas, respectivamente.

5.2.4 Influência da Tensão de Sobrecarga

A Figura 5.31 apresenta a metodologia empregada na análise de sensibilidade em função da variação da tensão de sobrecarga (σ_V). A variação da tensão de sobrecarga foi considerada até o limite inferior de $-50\% \sigma_V$, a fim de evitar que o valor

da sobrecarga fosse inferior ao valor de poropressão, o que geraria tensões efetivas negativas. Essa situação foi simulada propositalmente para um ponto do ROLLINS a fim de observar a tendência das tensões principais horizontais totais *in situ*.

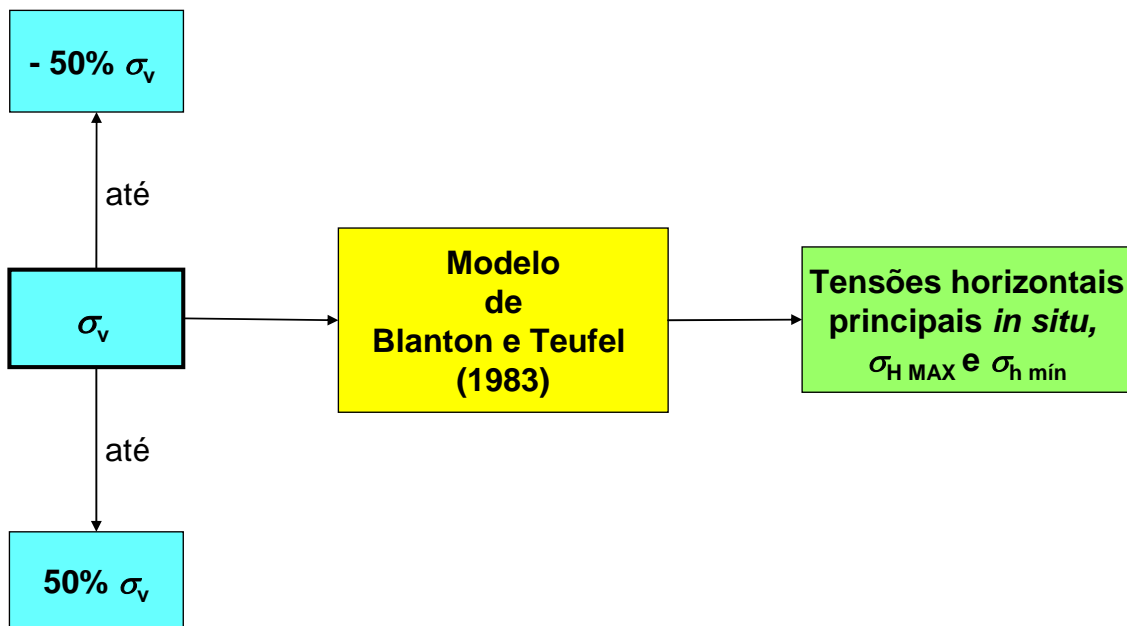


Figura 5.31. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação da tensão de sobrecarga σ_v .

Já a Figura 5.32 apresenta a variação das tensões principais em função da tensão de sobrecarga, utilizando o modelo de BLANTON (1983). Com o aumento da sobrecarga, as tensões horizontais máximas e mínimas aumentam, sendo mais significativo na tensão horizontal máxima do que para a tensão horizontal mínima nos casos ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2. A Figura 5.33 apresenta a variação das tensões principais em função da tensão de sobrecarga, utilizando o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983). Com aumento da tensão de sobrecarga, aumentam as tensões horizontais máximas e mínimas, sendo que a taxa de crescimento da tensão mínima horizontal é menor que a taxa da tensão horizontal máxima. No caso ROLLINS, para valores de tensão de sobrecarga inferiores a 41 MPa, valor da poropressão, ocorre uma queda brusca das tensões horizontais e inversão da tensão máxima e mínima *in situ*. Não se observa a mesma discrepância entre as tensões máxima e mínima nos casos BAKKEN 1 e BAKKEN 2.

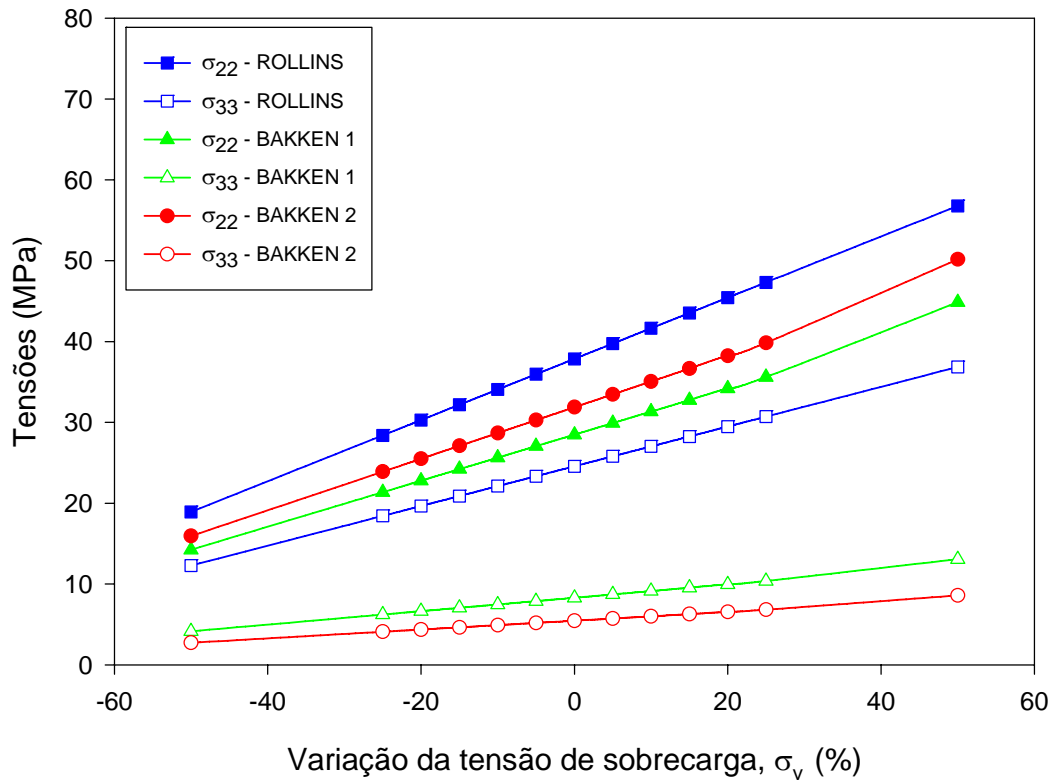


Figura 5.32. Variação das tensões principais em relação à tensão de sobrecarga σ_v (C-Temp) – Modelo de BLANTON (1983).

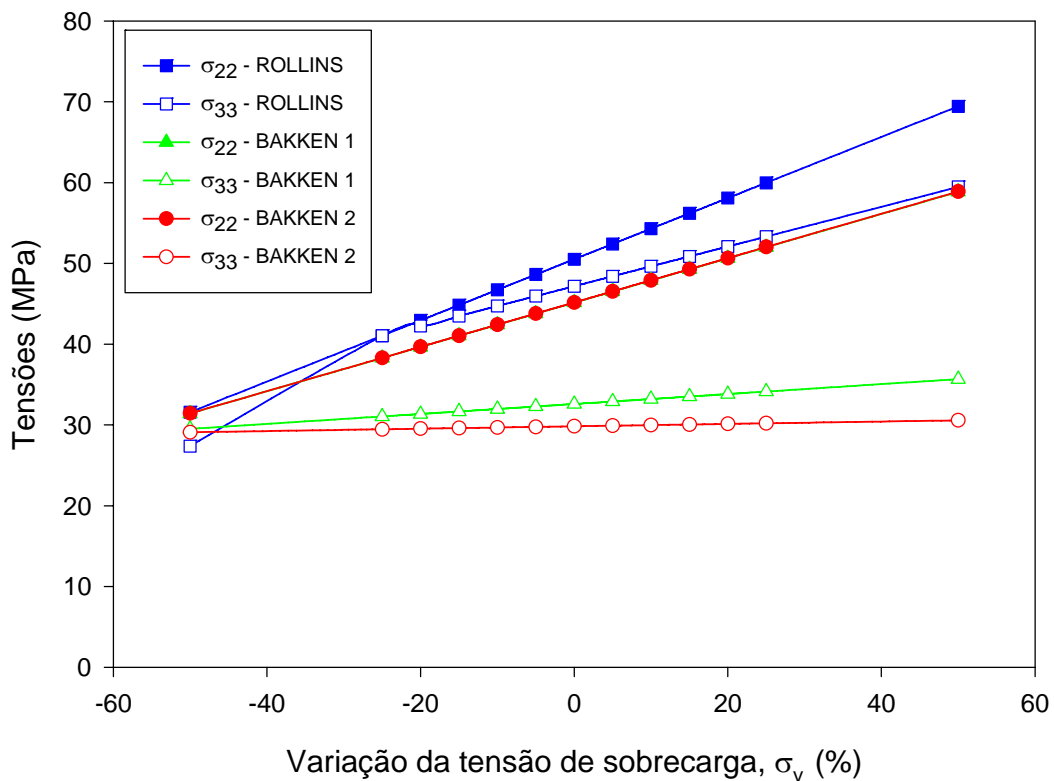


Figura 5.33. Variação das tensões principais em relação à tensão de sobrecarga σ_v – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

5.2.5 Influência da Poropressão

Na Figura 5.34 pode-se observar a metodologia para o caso da variação da poropressão para o caso de BLANTON e TEUFEL (1983). Esta variação foi de $-50\% P_p$ a $+50\% P_p$.

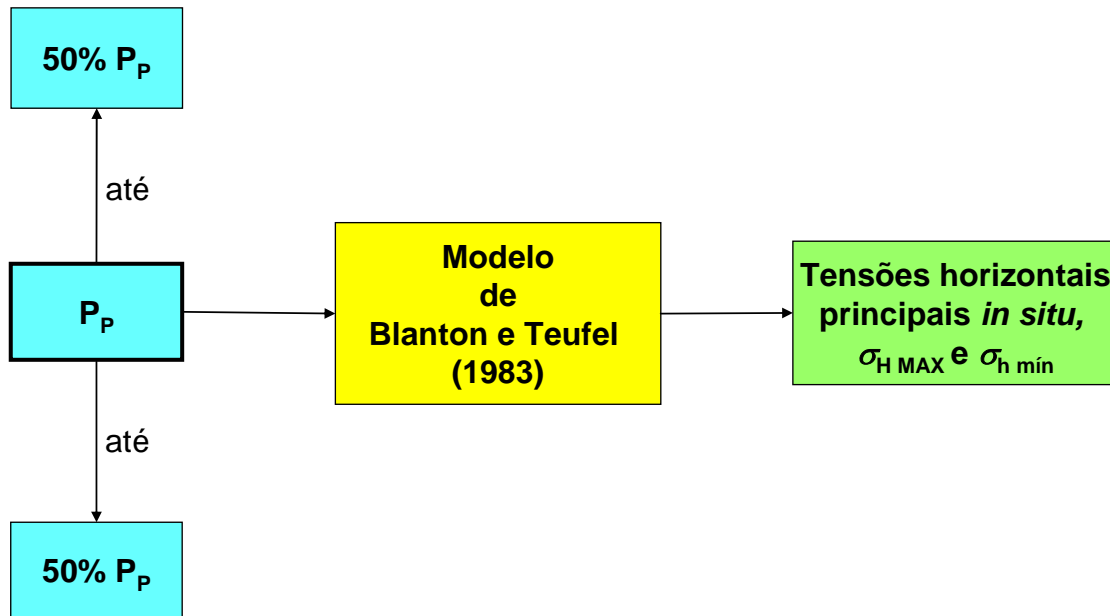


Figura 5.34. Metodologia de análise de sensibilidade em função da variação da poropressão, P_p .

Nas Tabelas A3.21 e A3.22 (Anexo 3), é possível observar e quantificar a influência da variação da poropressão no modelo BLANTON e TEUFEL (1983), para a determinação das tensões, máximas e mínimas, respectivamente.

A Figura 5.35 apresenta a influência da poropressão P_p nas tensões principais horizontais. É importante ressaltar que foi usado apenas o modelo de BLANTON e TEUFEL (1983), pois só ele considera o parâmetro da poropressão. Nesta análise, a relação entre a variação das tensões horizontais principais e a variação da poropressão é perfeitamente linear, com um coeficiente $R^2 = 1$, e as taxas de aumento das tensões horizontais mínimas, para o caso ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2 apresentam-se superiores às taxas de aumento das tensões horizontais máximas.

Enfim, para todos os casos com o aumento da poropressão ocorre um aumento das tensões horizontais mínimas e máximas. O erro na estimativa da poropressão terá mais impacto na determinação da tensão horizontal mínima.

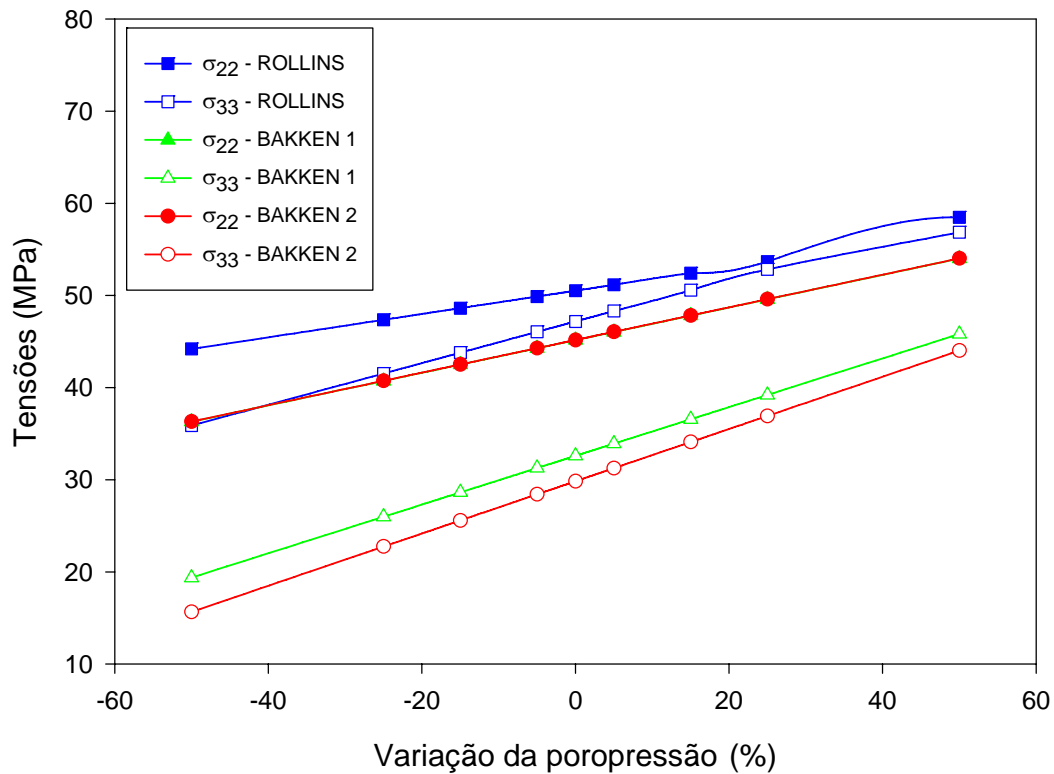


Figura 5.35. Influência da poropressão P_p nas tensões horizontais (C-Temp) – Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983).

5.3 Comentários a respeito da Análise de Sensibilidade

A Tabela 5.7, apresenta uma comparação quantitativa e qualitativa das análises de sensibilidade. O tipo refere-se a amostra. Todos os graus das curvas escolhidos como os mais adequados para o comportamento das tensões equivalem ao coeficiente de correlação $R^2 = 1$.

O comportamento das tensões pode ser caracterizado pelo crescimento ou decréscimo com o aumento do parâmetro escolhido. A taxa de variação, pode ser caracterizada pelo símbolo de aumento (>), se referenciando qual das tensões máxima ou mínima é mais alterada, em função da variação do parâmetro.

Tabela 5.7. Resumo das análises de sensibilidade. *

Análise de sensibilidade						
Parâmetro	Tensão	BLANTON (1983)			BLANTON e TEUFEL (1983)	
		Tipo	Grau	Comportamento	Comportamento	
ν C-Temp	σ_{22}	R	2	↑	↑	
		B1	2	↑	↑	
		B2	2	↑	↑	
	$\sigma_{33} >$	R	2	↑	↑	
		B1	2	↑	↑	
		B2	2	↑	↑	
ε_{11}	C-Temp	$\sigma_{22} >$	R	4	↓	↓ cte
			B1	4	↓	↓
			B2	4	↓	↓
	S-Temp	$\sigma_{22} >$	R	4	↓	↓ cte
			B1	4	↓	↓
			B2	4	↓	↓
	C-Temp	σ_{33}	R	4	↓	↓ cte
			B1	4	↑	↑
			B2	4	↑	↑
	S-Temp	σ_{33}	R	4	↓	↓ cte
			B1	4	↓	↓
			B2	4	↓	↓
ε_{22}	C-Temp	$\sigma_{22} >$	R	2	↑	↑
			B1	2	↑	↑
			B2	2	↑	↑
	S-Temp	$\sigma_{22} >$	R	2	↑	↑ cte
			B1	2	↑	↑
			B2	2	↑	↑
	C-Temp	σ_{33}	R	2	—cte	—cte
			B1	4	↑ cte	—cte
			B2	2	↑ cte	—cte
	S-Temp	σ_{33}	R	2	—cte	—cte
			B1	4	↑ cte	—cte
			B2	2	↑ cte	—cte
ε_{33}	C-Temp	σ_{22}	R	2	—cte	—cte
			B1	2	—cte	—cte
			B2	2	—cte	—cte
	S-Temp	σ_{22}	R	2	—cte	—cte
			B1	2	—cte	—cte
			B2	1	—cte	—cte
ε_{33}	C-Temp	$\sigma_{33} >$	R	2	↑ cte	↑ cte
			B1	2	↓	↓
			B2	2	↓	↓

Tabela 5.7. (cont.) Resumo das análises de sensibilidade.

Análise de sensibilidade						
Parâmetro		Tensão	BLANTON (1983)			BLANTON e TEUFEL (1983)
			Tipo	Grau	Comportamento	Comportamento
ε_{33}	S-Temp	$\sigma_{33} >$	R	2	↑ cte	—cte
			B1	2	↑ cte	—cte
			B2	1	↑ cte	—cte
ε_{xx}	C-Temp	σ_{22}	R	4	—cte	—cte
			B1	3	↑	↑
			B2	3	↓	↓
	$\sigma_{33} >$	R	3	—cte	—cte	
		B1	4	↑ cte	↑ cte	
		B2	3	↑	↑	
ε_{yy}	C-Temp	$\sigma_{22} >$	R	3	↑ cte	—cte
			B1	3	↓	↓
			B2	4	↑ cte	↑ cte
	σ_{33}	R	2	↑ cte	—cte	
		B1	3	↑	↑	
		B2	3	↑	↑	
ε_{zz}	C-Temp	σ_{22}	R	4	↓	↓ cte
			B1	3	—cte	—cte
			B2	3	↑	↑
	$\sigma_{33} >$	R	4	↓ cte	↓ cte	
		B1	3	↑	↑	
		B2	4	↑ cte	↑ cte	
σ_v	C-Temp	$\sigma_{22} >$	R	1	↑	↑
			B1	4	↑	↑
			B2	4	↑	↑
	σ_{33}	R	1	↑	↑	
		B1	4	↑	↑	
		B2	4	↑	—cte	
P_p	C-Temp	σ_{22}	R	1	X	↑
			B1	1	X	↑
			B2	1	X	↑
	$\sigma_{33} >$	R	1	X	↑	
		B1	1	X	↑	
		B2	1-	X	↑	

* ↑ = aumenta; ↓ = diminui; —cte = constante; ↑ cte = aumento suave com o aumento do parâmetro;
 ↓ cte = diminuição suave com o aumento do parâmetro;
 R = Rollins; B1 = Bakken 1; B2 = Bakken 2;
 > = associado à tensão (máxima ou mínima) que tiver o comportamento mais afetado pela variação do parâmetro;
 X = não foi feita a simulação da poropressão para o modelo de Blanton (1983)

A Tabela 5.7 que resume as análises de sensibilidade, e torna nítida a diferença do comportamento em função dos parâmetros. Desta forma, a escolha dos dois modelos, BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983), foi mais importante em termos de verificar o impacto da variação dos parâmetros sobre as tensões *in situ*, do que validar as diferenças dos mesmos, que na maioria apresentaram comportamento similar apenas pelo fato do modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) ser mais robusto que o modelo de BLANTON (1983) e obter tensões mais realísticas por levar em consideração a poropressão.

6 CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Conclusões

O estudo realizado nesta dissertação possibilitou uma maior compreensão da técnica ASR e da interpretação de resultados através dos modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983), além da análise da influência da variação dos parâmetros envolvidos na determinação das tensões horizontais *in situ* das formações ROLLINS e BAKKEN. Algumas conclusões gerais são aqui ressaltadas.

As tensões *in situ* calculadas através dos modelos nesta dissertação foram comparadas com outras fontes de informação, por exemplo a literatura, a fim de checar a confiabilidade dos resultados. No caso do ROLLINS, foi possível comparar os valores de tensão *in situ* calculados através do modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) com os valores obtidos de ensaios de microfraturamento realizados na área de estudo. Ambos foram considerados bastante similares.

O comportamento das deformações recuperadas e principais ao longo do tempo para os três casos (ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2) pode ser caracterizado por uma equação polinomial de 4º grau, o que permite identificar ou extrapolar resultados de amostras não ou mal instrumentadas.

Os modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983) apresentaram resultados que permitiram a observação de um padrão de comportamento em função do tipo de rocha, características de isotropia e heterogeneidade da amostra. No caso da amostra ROLLINS, que é um arenito isotrópico, o comportamento foi elástico, comportamento este distinto do padrão das amostras de calcáreo BAKKEN 1 e BAKKEN 2, provavelmente anisotrópicas e heterogêneas.

Além disso, observou-se que os modelos de BLANTON (1983) e BLANTON e TEUFEL (1983) apresentaram comportamentos distintos para os casos com e sem correção de temperatura.

Determinando-se as raízes da equação característica, sem correção de temperatura, e comparando-as com as deformações principais com correção de temperatura, foi possível perceber que esta não influencia deformação volumétrica.

O modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) é mais robusto na análise de sensibilidade de todos os parâmetros. Ou seja, um erro em parâmetros que sejam inseridos (*input*) no modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) afeta menos o valor do *output*, tensões horizontais principais que no caso do modelo de BLANTON (1983).

O modelo de BLANTON e TEUFEL (1983) mostra a influência significativa da variação da poropressão nas tensões, sendo mais coerente com a realidade das tensões *in situ* que o modelo de BLANTON (1983), que despreza a poropressão em sua formulação ao considerar que a poropressão atinge a pressão atmosférica instantaneamente no momento da perfuração.

No que se refere à análise de sensibilidade dos modelos, pode-se resumir as seguintes conclusões:

Apesar de ter sido feita a análise de sensibilidade de -75% a 75%, a escolha de -50% a 50% dos parâmetros para fazer os gráficos tornou a análise dos mesmos mais consistente, além da obtenção de padrões de comportamento expressivos.

Comparando-se os dois modelos em relação à variação do coeficiente de Poisson, constata-se que em ambos os modelos e considerando os três casos (ROLLINS, BAKKEN 1 e BAKKEN 2), as tensões máximas σ_{22} aumentaram com o aumento do coeficiente de Poisson, sendo que a taxa de aumento de σ_{22} é menor que a de aumento das tensões mínimas σ_{33} . Além disso, o comportamento foi caracterizado por um polinômio do 2º grau com coeficiente de correlação igual a 1.

O comportamento das tensões horizontais máximas e mínimas não é o mesmo para as variações das três deformações principais. Em relação à ε_{11} , ocorre uma redução maior das máximas tensões em relação às mínimas, enquanto para ε_{22} , as tensões máximas crescem a uma taxa superior que a das tensões mínimas.

Para as deformações principais mínimas ε_{33} , as tensões máximas se mantêm aproximadamente constantes, enquanto as tensões mínimas apresentam maior variação, representada por um polinômio de 4º grau. Tais comportamentos foram constatados para os dois modelos.

A influência da variação das componentes das três deformações recuperadas ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz} nas tensões horizontais principais é aproximadamente constante para todas as tensões, fato que não foi observado com tanta nitidez no caso das deformações recuperadas.

Quanto à tensão de sobrecarga, as análises indicaram que, para ambos os modelos, com o aumento da tensão de sobrecarga, ocorre um aumento significativo das tensões máximas e mínimas. As tensões máximas variam com uma taxa de aumento superior que a das tensões mínimas. Ainda nas tensões de sobrecarga, foi possível observar entre os valores de -25% e -50% uma queda das tensões máxima e mínima do caso do ROLLINS, devido ao fato de neste valor a poropressão ser inferior ao valor da tensão vertical.

Em relação à variação da poropressão, as análises mostram que com o crescimento deste parâmetro as tensões *in situ* aumentam de forma linear, sendo a taxa de variação da tensão máxima inferior à taxa da tensão mínima.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- ❖ Analisar a influência e o impacto de um ou mais parâmetros em todos os modelos para comparação da sensibilidade
- ❖ Coletar dados de ensaios ASR realizados em diferentes tipos de rocha e interpretá-los com diversos modelos da literatura para fins de avaliação de utilização e comparação.
- ❖ Verificar o coeficiente de expansão dos ensaios ASR para obter uma relação definida deste em função do tipo de rocha e dos limites aceitáveis para não invalidar o ensaio

BIBLIOGRAFIA

- ABOULEISMAN, Y., CHENG, A.H.-D., ROEGIERS, J.C., 1996, "Poroviscoelastic Analysis of Borehole and Cylinder Problems", *Acta Mechanica*, v. 119, pp. 199-219.
- ADDIS, T., BOULTER, D., ROCA-CAMISA, L., *et al.*, "The Quest for Borehole Stability in the Cuisiana Field", Colombia, april/july1993, Schlumberger, disponível em http://www.oilfield.slb.com/media/services/resources/oilfieldreview/ors93/4793/p3_3_43.pdf, acesso em 5 de maio de 2005.
- BLANTON, T.L., 1983, "The Relation Between Recovery Deformation and In-Situ Stress Magnitudes". *SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium*, SPE 11624, 213 - 218, Denver, Colorado, USA, 14-16 March.
- BLANTON, T.L., TEUFEL, L.W., 1983, "A Field Test of The Strain Recovery Method of Stress Determination in Devonian Shale", *SPE Eastern Regional Meeting*, SPE 12304, 71-76, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 9-11 November.
- BLANTON, T.L., TEUFEL, L.W., 1985, "In-Situ Stress Determination From Wellbore Elongation Measurements", *SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium*, SPE 13877, pp 279-291, Denver, Colorado, USA, 19-22 March.
- BLANTON, T.L., TEUFEL, L.W., 1986, "A Critical Evaluation of Recovery Deformation Measurement as a Means of In-Situ Stress Determination", *SPE Unconventional Gas Technology Symposium*, SPE 15217, 121-126, Louisville, Kentucky, USA, 18-21 May.
- BLANTON, T.L., 1989, "Discussion of a Viscoelastic Constitutive Model for Determining In-Situ Stress Magnitudes From Anelastic Strain Recovery of Core", *SPE Production Engineering*, SPE 15368, v. 4, n. 3 (Aug), 281-287.
- BLOCH, M., SIQUEIRA, C.A.M., FERREIRA, F.H. *et al.*, 1997, "Techniques for Determining In-Situ Stress Direction and Magnitudes", *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference and Exhibition – LACPEC*, SPE 39075, 1-13, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, August.
- BLOCH, M., 1999, *In-Situ Stress Determination in Porous Formation*, Ph.D. Dissertation, The University of Oklahoma, Norman/OK, USA.

- BLOCH, M., 2004, *Determinação da Orientação das Tensões In-Situ no Poço A*. In: Comunicação Técnica PDP, PETROBRAS, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BLOCH, M., 2005, Comunicação Pessoal, CENPES, PETROBRAS, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BLOCH, M., 2005, *Determinação das Tensões In-Situ no Campo B*. In: Comunicação Técnica DIPLOT, PETROBRAS, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BRERETON, N.R., CHROSTON, P.N., EVANS, C.J., 1995, "Pore Pressure as an Explanation of Complex Anelastic Strain Recovery Results", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 28, n. 1, pp. 59-66.
- BRUCE, S., 1990, "A Mechanical Stability Log", *1990 IADC/SPE Drilling Conference*, SPE 19942, 275-281, Houston, Texas, USA, 27- 2 March.
- BRUMLEY, J., CHRISTIANSEM, C., JORGESON, L.N., *et al.*, 1994, "In-Situ Stress Field Determination and Formation Characterization – Offshore Catar Case History", *SPE / ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference*, SPE 28143, 905-919, Delft, Netherlands, 29-31 August.
- BUTTERWORTH, S., BURTON, P.W., 1993, "Variability and Quality in ASR Data Represented by the Sandia Model", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, v. 30, n. 7, pp. 1009-1012.
- CHENG, A. H.-D., 1997, "Material Coefficients of Anisotropic Poroelasticity", *International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanical Abstracts*, Vol. 54, No. 2, pp. 199-205.
- CSIRO PETROLEUM, <http://www.dpr.csiro.au/researchforindustry/drillingandwellperformance/wellborestability/aboutus/>, acesso em 10 de maio de 2005.
- CUI, L., CHENG, A.H.-D., KALIAKIN, V.N., ABOUSLEIMAN, Y., ROEGIERS, J.-C., 1996, "Finite Element Analyses of Anisotropic Poroelasticity: A Generalized Mandel's Problem and Inclined Borehole Problem", *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 20, pp. 381-401.
- DANESHY, A.A., SLUSHER, G.L., CHISHOLM, P.T., MAGEE, D.A., 1986, "In-Situ Stress Measurements During Drilling", *Journal of Petroleum Technology*, August. *Journal of Petroleum Technology*, SPE 16911, v. 42, n. 9 (Sep), pp. 1199-1203.

- DETOURNAY, E., CHENG, A.H.D., 1993, *Fundamentals of Poroelasticity - Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects, Analysis and Design Method*, v. 2, Burlington, Pergamon Press.
- EL RABBA, A.W.M., MEADOWS, D.L., 1986, "Laboratory and Field Application of The Strain Relaxation Method", *SPE California Regional Meeting*, SPE 15072, 259-272, Oakland, CA, USA, 2-4 April.
- FERREIRA, F.H., ROSOLEN, M.A., GARCIA, J.E.L., *et al.*, 2002, *Fraturamento Hidráulico*. In: Programa Trainees PETROBRAS – Eng. Petróleo Jr., PETROBRAS, Salvador, BA.
- FJÆR, E., HOLT, R., PER HOSRUD, R., *et al.*, 1992, *Petroleum Related Rock Mechanics*, Burlington, MA, Elsevier Science.
- FLÜGGE, W., 1975, *Viscoelasticity*, 2 ed. New York, Springer-Verlag.
- FUNG, Y.C., 1965, *Foundations of Solid Mechanics*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1, 2, 3.
- GOODMAN, R.E., 1980, *Introduction to Rock Mechanics*, 2 ed. New York, John Wiley & Sons.
- HAIMSON, B.C., FAIRHURST, C., 1967, "Initiation and Extension of Hydraulic Fractures in Rocks", *SPE Journal*, SPE 1710, September, pp. 310 – 318.
- HAYETT, A.J., DYKE, C.G., HUDSON, J.A., 1986, A Critical Evaluation of Basic Concepts Associated with the existence and Measurement of In-Situ Stress. In: International Symposium on Rock Stresses and Rock Stress Measurements, Stockholm, p.387-396.
- HERGET, G., 1988, *Stresses in Rock*, 1a. ed. Rotterdam, Balkema.
- HILL, R.E., PETERSON, R.E., WARPINSKI, N.R., *et al.*, 1994, "Techniques for Determining Subsurface Stress Direction and Assessing Hydraulic Fracture Azimuth", *SPE Eastern Regional Conference and Exhibition*, SPE 29192, 305-320, Charleston, West Virginia, USA, 8-10 November.
- JÄGER, J.C., COOK, N.G.W., 1979, *Fundamentals of Rock Mechanics*, 3 ed. Great Britain, Chapman & Hall.

- LANTZ, T., 2000, *Reservoir Analysis Summary and Recommendations – Burning Tree State 36-2*. In: Nota Técnica Halliburton, Richland County, Montana, USA.
- LANTZ, T., 2005a, *BTS 36-2 Vertical Survey*. In: Sperry Sun Drilling Services, Halliburton, Denver, CO, USA.
- LANTZ, T., 2005b, *Burning Tree State #36-2*. In: ASR Report #36-2, Halliburton, Denver, CO, USA.
- LANTZ, T., 2005c, *Comunicação Pessoal*, Halliburton, Denver, CO, USA.
- LANTZ, T., 2005d, *Lycó Burning Tree State 36-2 Middle Bakken Dolomite*. In: Nota Técnica Halliburton, Denver, CO, USA.
- LATIF, A.A., SUNGUR, D., STOCKDEN, I., *et al.*, “The Value of Variation”, disponível em <http://www.oilfield.slb.com/content/services/resources/mewr/mewr18.asp?>, acesso em 22 de julho de 2005.
- LeFEVER, J.A., “Evolution of Oil Production in the Bakken Formation”, disponível em <http://www.state.nd.us/ndgs/>, acesso em 22 de julho de 2005.
- LeFEVER, J.A., 2005, *Comunicação Pessoal*.
- LIMA, B.B., VIANA, R., 1994, “Application of Multiple Techniques to Determine In-Situ Directions in Marlin and Albacora Fields”, *SPE Petroleum Conference and Exhibition of Mexico*, SPE 28711, 425-432, Veracruz, Mexico, 10-13 October.
- LJUNGGREN, C., CHANG, Y., JANSON, T., *et al.*, 2003, “An Overview of Rock Stress Measurement Methods”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 40, pp. 975-989.
- MATSUKI, K., TAKEUCHI, K., 1990, “Three-dimensional In-situ Stress Determination by Anelastic Strain Recovery of a Rock Core”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, v. 30, n. 7, pp. 1019-1022.
- MIOTO, J.A., COELHO, L.F.M., 1998, “Estado de Tensões em Maciços Rochosos”. In: *Geologia de Engenharia*, 1 ed. Capítulo 10

- MORITA, N., WHITFILL, D.L., FEDDE, O.P., *et al.*, 1987, "Parametric Study of Sand-Production Prediction: Analytical Approach", *62nd SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 16990, Dallas, Texas, USA.
- NUNES, A.L.L.S., 1997, *Nouvelle méthode de détermination de la déformabilité des roches transversalement isotropes avec la cellule triaxiale CSIR.*, Thèse de Philosophie Doctor, Dep. Génie Minéral, École Polytechnique de Montreal, Montreal, Canada, 491p.
- NUNES, A.L.L.S., 1998, "Medidas de Tensões em Maciços Rochosos". In: *Anais do 1^o Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Sul*, GEOSUL, pp. 239-266, Porto Alegre.
- NUNES, A.L.L.S., 2000, *Mecânica das Rochas Aplicada*, In: Notas da Aula da Disciplina de Estudos Especiais em Engenharia Civil, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- OWEN, L.B., TORONTO, T.W., PETERSON, R.E., 1988, "Reability of Anelastic Strain Recovery Estimates for Stresses Orientation in the Travis Peak Formation, *63rd Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 18165, 1-7, Houston, Texas, USA, 2-5 October.
- PENNINGTON, W.D., EDWARDS, D.P., 1994, "Integrating Well Log Data, Drilling Data, and Laboratory Data for the Determination of Maximum Drawdown Limits in the Presence of Weak Sands", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 28453, 937-945, New Orleans, Louisiana, USA, 25-28 September.
- PERREAU, P.J., HEUGAS, O., SANTARELLI, F.J., 1989, "Tests of ASR, DSCA, and Core Discing Analyses To Evaluate In-Situ Stresses", *Middle East Oil Show*, SPE 17960, 1-12, Manama, Bahrain, 11-14 March.
- RAMOS, G., KATAHARA, K., KECK, R., BAZTLE, M., 1994, "In-Situ Predictions and Measurements in an Unconsolidated Sandstone Formation, the Lower Frio, East Texas", *Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference held in Delft*, 361-368, The Netherlands, 29-31 August.
- ROCHA, L.A.S., 2005, *Comunicação Pessoal*, PETROBRAS, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- ROEGIERS, J.-C., VANDAMME, L., 1999, "Rock Mechanics for the Petroleum Engineer", unpublished.
- SANTA MARIA, P.E.R., 1996, *Fundamentos da Viscoelasticidade Linear*. In: Notas da Aula da Disciplina de Estudos Especiais em Engenharia Civil, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- SANTA MARIA, P.E.R., 2003, *Análise de Tensões I*. In: Notas da Aula da Disciplina de Estudos Especiais em Engenharia Civil, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- SCHMITT, D. R., ZOBACK, M.D., 1989, "Poroelastic Effects in the Determination of the Maximum Horizontal Principal Stress in Hydraulic Fracturing Tests – A proposed Breakdown Equation Employing a modified Effective Stress Relation for Tensile Failure", *International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanical Abstracts*, v. 26, n. 6, pp. 499-506.
- State of Montana Board of Oil Gas Website, disponível em: <http://bogc.dnrc.state.mt.us/>, acesso em 10 de julho de 2005.
- TERRATEK Inc., 1995, *Anelastic Strain Recovery*, ASR 3D Operations Manual.
- TERRATEK Inc., 2005, "Three-Dimensional Anelastic Strain Recovery Measurement System", disponível em: <http://www.terratek.com/test-systems/asr.html>, acesso em 30 de julho de 2005.
- TEUFEL L. W., 1982, "Prediction of Hydraulic Fracture Azimuth from Anelastic Strain Recovery of Oriented Core". In: *Proceedings of the 23rd Symposium on Rock Mechanics*, New York.
- TEUFEL, L.W., 1983, "Determination of In-Situ Stress From Anelastic Strain Recovery Measurements of Oriented Core", *SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium*, SPE 11649, 419- 427, Denver, Colorado, USA, 14-16 March.
- TEUFEL, L.W., WARPINSKI, N.R., 1984, "Determination of an In-Situ Stress from Anelastic Strain Recovery Measurements of Oriented Core: Comparison to Hydraulic Fracture Stress Measurements in the Rollins Sandstone, Piceance Basin, Colorado"; In: *Proceedings of 25th Symposium on Rock Mechanics*, pp.176-185, Illinois, USA.

- TEUFEL, L.W., 1985a, "In-Situ Stress Measurements in Inclined Holes in the North Sea: Application to Water Flooding and Enhanced Oil Recovery", *Offshore Europe 85 Conference*, SPE 13986, 1-22, Aberdeen, United Kingdom, 10-13 September.
- TEUFEL, L.W., 1985b, "In-Situ Stress State in The Mounds Test Well as Determined by the Anelastic Strain Recovery Method", *1985 SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium*, SPE 13896, 467-471, Denver, Colorado, USA, 19-22 May.
- TEUFEL, L.W., HART, C.M., SATTLER, A.R., 1986, "Determination of Hydraulic Fracture Azimuth by Geophysical, Geological, and Oriented-Core Methods at The Multiwell Experiment Site, Rifle, CO", *59th Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 13226, 1-7, Houston, Texas, USA, 16-19 September.
- TEUFEL, L.W., RHETT, D.W., 1992, "Failure of Chalk During Waterflooding of the Ekofisk Field", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 24911, Washington, D.C., USA, 4-7 October.
- TEUFEL, L.W., 1993, "Determination of *In situ* Stress from Partial Anelastic Strain Recovery Measurements of Oriented Cores from Deep Boreholes". In: *Lecture Notes of Short Course in Modern in-situ Stress Measurement Methods*, 34th US Symposium on Rock Mechanics, Chapter 19, Madison, USA.
- THOMAS, J. E., 2001, *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, 1^a. ed, Rio de Janeiro, Editora Interciência.
- VANDAMME, L.M., ROEGIERS, J-C., 1990, "Poroelectricity in Hydraulic Fracturing Simulators" *Journal of Petroleum Technology*, SPE 16911, v. 42, n. 9 (Sep), pp. 1199-1203.
- VOIGHT, B., 1968, "Determination of the Virgin State of Stress in the Vicinity of a Borehole from Measurements of a Partial Anelastic Strain Tensor in Drill Cores", *Felsmechanik u. Ingenieurgeologie*, v.6, pp. 201-215.
- WARPINSKI, N.R., TEUFEL, L.W., 1989a, "A Viscoelastic Constitutive Model for Determining In-Situ Stress Magnitudes From Anelastic Strain Recovery of Core", *SPE Production Engineering*, SPE 15368, v. 4, n. 3 (Aug), pp. 272-280.

- WARPINSKI, N.R., TEUFEL, L.W., 1989b, "Author's Reply to Discussion of a Viscoelastic Constitutive Model for Determining In-Situ Stress Magnitudes From Anelastic Strain Recovery of Core", *SPE Production Engineering*, SPE 15368, v. 4, n. 3 (Aug), pp. 287-289.
- WARPINSKI, N.R., TEUFEL, L.W., 1989c, "In-Situ Stresses in Low-Permeability, Nonmarine Rocks", *Journal of Petroleum Technology*, SPE 16402, v. 41, n.4, pp. 405-414.
- WILEY, C., BARREE, B., EBERHARD, M., LANTZ, T., 2004, "Improved Horizontal Well Stimulations in the Bakken Formation, Williston Basin, Montana", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 90697, pp. 1-10, Houston, Texas, USA, 26-29 September.
- WOLTER, K.E., BERKHEMER, H., 1989, "Time Dependent Strain Recovery of Cores from the KTB – Deep Drill Hole", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 22, pp. 273-287.
- YASSIR, N., WANG, D.F., DAVIES, P.J., 1998, "An Experimental Analysis of Anelastic Strains Recovery of Synthetic Sandstone Subjected to Polyaxial Stresses", *SPE / ISRM Eurock'98*, SPE 47238, pp. 161-170, Trondheim, Norway, 8-10 July.

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Características da formação BAKKEN e perfis do poço BTS-36-2H (Halliburton).

Anexo 2. Relatórios de acompanhamento do poço obtidos através do programa Compass (Petrobrás)

Tabela A2. 1. Relatório da Primeira Fase de Perfuração do Poço BTS-36-2H

Tabela A2. 2. Relatório da Segunda Fase de Perfuração do Poço BTS-36-2H (desvio)

Anexo 3. Tabelas representativas da análise de sensibilidade dos modelos.

Tabela A3. 1. Análise da variação de V (para σ_{22}).

Tabela A3. 2. Análise da variação de V (para σ_{33})

Tabela A3. 3. Análise da variação de ε_{xx} (para σ_{22}).

Tabela A3. 4. Análise da variação de ε_{xx} (para σ_{33}).

Tabela A3. 5. Análise da variação de ε_{yy} (para σ_{22}).

Tabela A3. 6. Análise da variação de ε_{yy} (para σ_{33}).

Tabela A3. 7. Análise da variação de ε_{zz} (para σ_{22}).

Tabela A3. 8. Análise da variação de ε_{zz} (para σ_{33}).

Tabela A3. 9. Análise da variação de ε_{11} **C-Temp** (para σ_{22}).

Tabela A3. 10. Análise da variação de ε_{11} **C-Temp** (para σ_{33}).

Tabela A3. 11. Análise da variação de ε_{22} **C-Temp** (para σ_{22}).

Tabela A3. 12. Análise da variação de ε_{22} **C-Temp** (para σ_{33}).

Tabela A3. 13. Análise da variação de ε_{33} **C-Temp** (para σ_{22}).

Tabela A3. 14. Análise da variação de ε_{33} **C-Temp** (para σ_{33}).

Tabela A3. 15. Análise da variação de ε_{11} **S-Temp** (para σ_{22}).

Tabela A3. 16. Análise da variação de ε_{11} **S-Temp** (para σ_{33}).

Tabela A3. 17. Análise da variação de ε_{22} **S-Temp** (para σ_{22}).

Tabela A3. 18. Análise da variação de ε_{22} **S-Temp** (para σ_{33}).

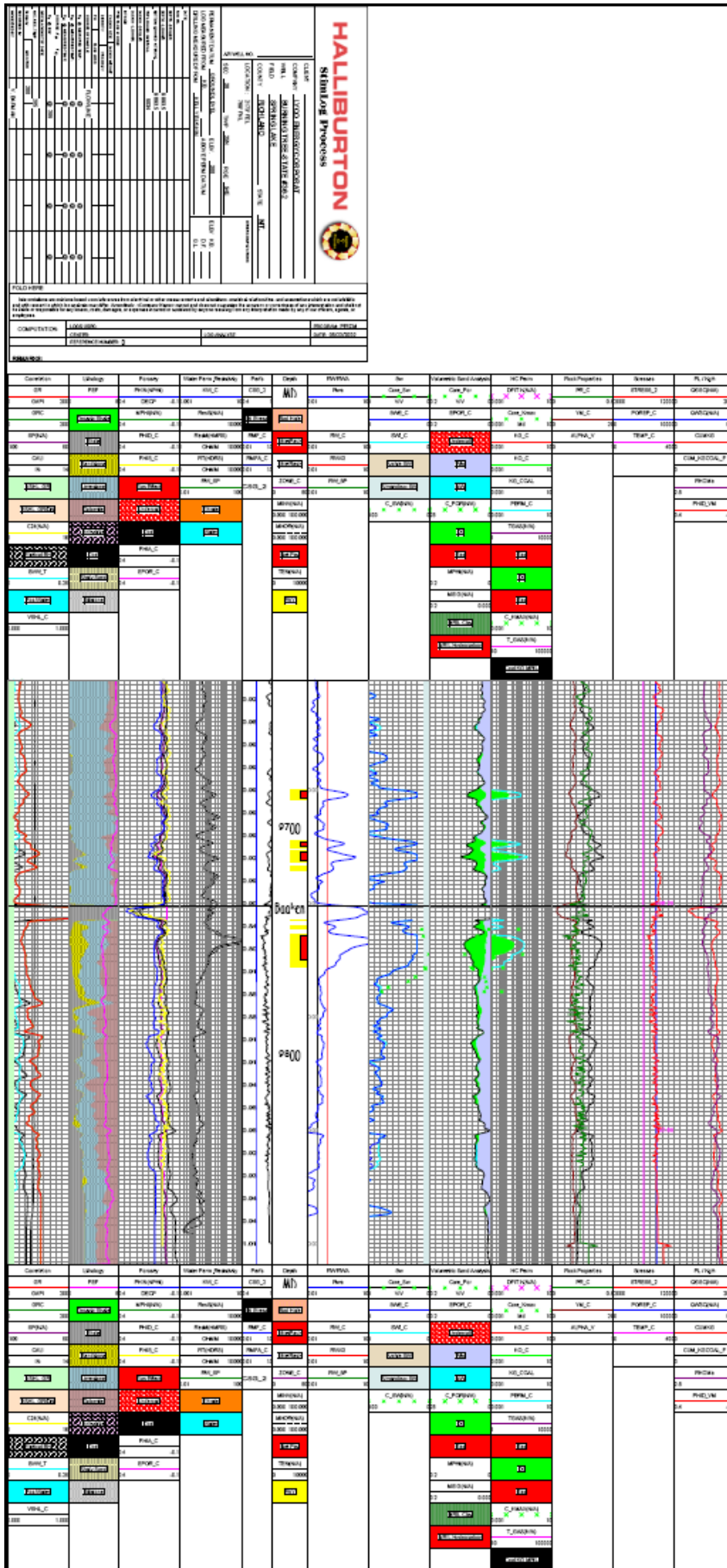
Tabela A3. 19. Análise da variação de ε_{33} **S-Temp** (para σ_{22}).

Tabela A3. 20. Análise da variação de ε_{33} **S-Temp** (para σ_{33}).

Tabela A3. 21. Análise da variação de P_p (para σ_{22}).

Tabela A3. 22. Análise da variação de P_p (para σ_{33}).

**Anexo 1. Características da formação e dos perfis corridos no poço BAKKEN
BTS-36-2H (Halliburton).**



Anexo 2. Relatórios de acompanhamento do poço obtidos através do programa Compass (Petrobrás)

Tabela A2.1. Relatório da Primeira Fase de Perfuração do Poço BTS-36-2H

PETROBRAS Survey Report

Company: Bakken - Halliburton		Date: 18/7/2005	Time: 10:19:44	Page: 1						
Field: Bakken		Co-ordinate(NE) Reference:	Well: Burning Tree State 36-2H							
Site: Burning Tree State 36-2H		Vertical (TVD) Reference:	SITE 0,0							
Well: Burning Tree State 36-2H		Section (VS) Reference:	Well (0,00N,0,00E,275,94Azi)							
Wellpath: 36-2H - Vertical		Survey Calculation Method:	Minimum Curvature	Db: Sybase						
Field: Bakken										
Map System: Universal Transverse Mercator		Map Zone: UTM Zone 24, South 42W to 36W								
Geo Datum: Hayford International 1924		Coordinate System: Well Centre								
Sys Datum: Mean Sea Level		Geomagnetic Model: igrf200510								
Site: Burning Tree State 36-2H										
Site Position: Lease Line		Northing: m	Latitude:							
From: Lease Line		Easting: m	Longitude:							
Position Uncertainty: 0,0 ft			North Reference: Grid							
Ground Level: 300,0 ft			Grid Convergence: 0,00 deg							
Well: Burning Tree State 36-2H										
Well Position: +N/-S 0,0 ft		Northing: 0,00 m	Latitude: -90 0 0,000 S							
+E/-W 0,0 ft		Easting: 0,00 m	Longitude: 180 0 0,000 E							
Position Uncertainty: 0,0 ft										
Wellpath: 36-2H - Vertical										
Current Datum: SITE		Height: 0,0 ft	Drilled From: Surface							
Magnetic Data: 4/7/2005			Tie-on Depth: 0,0 ft							
Field Strength: 56557 nT			Above System Datum: Mean Sea Level							
Vertical Section: Depth From (TVD)			Declination: 160,76 deg							
ft		+N/-S ft	+E/-W ft							
0,0		0,0	Mag Dip Angle: 88,01 deg							
			Direction deg							
			275,94							
Survey Program for Definitive Wellpath										
Date: 18/7/2005		Validated: No	Version: 2							
Actual From	To	Survey	Toolcode	Tool Name						
ft	ft									
1520,0	9700,0	Vertical (1520,00-9700,00)	MWD Standard	MWD Magnetic (Thorogood)						
Survey										
MD	Incl	Azim	TVD	+N/-S	+E/-W	VS	DLS	Build	Turn	Tool/Comment
ft	deg	deg	ft	ft	ft	ft	deg/100ft	deg/100ft	deg/100ft	
0,0	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	TIE LINE
1520,0	0,00	0,00	1520,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
1576,8	0,85	154,33	1576,8	-0,4	0,2	-0,2	1,49	1,49	0,00	MWD Standard
1670,0	1,14	164,83	1670,0	-1,9	0,7	-0,9	0,37	0,31	11,26	MWD Standard
1765,1	1,52	169,88	1765,1	-4,1	1,2	-1,6	0,42	0,40	5,31	MWD Standard
1865,6	1,49	176,21	1865,5	-6,7	1,5	-2,2	0,17	-0,03	6,30	MWD Standard
1949,3	1,45	183,33	1949,2	-8,8	1,5	-2,4	0,22	-0,05	8,51	MWD Standard
2044,0	1,35	196,53	2043,9	-11,1	1,1	-2,3	0,35	-0,10	13,92	MWD Standard
2137,8	1,30	207,04	2137,7	-13,1	0,3	-1,7	0,26	-0,05	11,22	MWD Standard
2231,6	1,26	223,47	2231,4	-14,8	-0,9	-0,7	0,39	-0,04	17,51	MWD Standard
2323,2	1,48	236,37	2323,0	-16,2	-2,5	0,9	0,41	0,24	14,08	MWD Standard
2416,7	1,75	246,67	2416,4	-17,4	-4,9	3,0	0,43	0,29	11,02	MWD Standard
2511,0	1,87	236,34	2510,7	-18,8	-7,5	5,5	0,37	0,12	-10,95	MWD Standard
2697,2	2,24	236,52	2696,8	-22,5	-13,0	10,6	0,20	0,20	0,09	MWD Standard
2790,7	2,09	245,65	2790,3	-24,2	-16,1	13,5	0,40	-0,16	9,75	MWD Standard
2883,1	1,78	254,89	2882,5	-25,3	-19,0	16,3	0,47	-0,33	10,02	MWD Standard
2976,0	1,54	244,13	2975,5	-26,2	-21,5	18,7	0,42	-0,26	-11,58	MWD Standard
3068,1	1,35	244,79	3067,5	-27,2	-23,6	20,7	0,21	-0,21	0,71	MWD Standard
3158,6	1,22	243,51	3158,0	-28,1	-25,5	22,4	0,15	-0,14	-1,41	MWD Standard
3251,9	1,11	245,91	3251,2	-28,9	-27,2	24,0	0,13	-0,12	2,57	MWD Standard
3342,3	1,03	242,41	3341,7	-29,7	-28,7	25,5	0,12	-0,09	-3,86	MWD Standard
3436,8	0,95	243,63	3436,2	-30,4	-30,2	26,9	0,08	-0,08	1,30	MWD Standard
3528,5	0,85	248,56	3527,8	-31,0	-31,5	28,1	0,14	-0,11	5,37	MWD Standard
3621,0	0,77	250,21	3620,3	-31,5	-32,7	29,3	0,10	-0,09	1,78	MWD Standard
3714,5	0,74	250,18	3713,8	-31,9	-33,9	30,4	0,03	-0,03	-0,04	MWD Standard
3806,6	0,66	251,26	3805,9	-32,2	-34,9	31,4	0,09	-0,08	1,18	MWD Standard
3897,1	0,74	258,03	3896,4	-32,5	-36,0	32,4	0,13	0,09	7,48	MWD Standard
3990,5	0,77	266,15	3989,8	-32,7	-37,2	33,6	0,12	0,03	8,70	MWD Standard

PETROBRAS

Survey Report

Company: Bakken - Halliburton			Date: 18/7/2005		Time: 10:19:44		Page: 2	
Field: Bakken			Co-ordinate(NE) Reference: Well: Burning Tree State 36-2H					
Site: Burning Tree State 36-2H			Vertical (TVD) Reference: SITE 0.0					
Well: Burning Tree State 36-2H			Section (VS) Reference: Well (0,00N,0,00E,275,94Azi)					
Wellpath: 36-2H - Vertical			Survey Calculation Method: Minimum Curvature		Db: Sybase			

MD ft	Incl deg	Azim deg	TVD ft	+N/-S ft	+E/-W ft	VS ft	DLS deg/100ft	Build deg/100ft	Turn deg/100ft	Tool/Comment
4083,2	0,98	272,22	4082,5	-32,7	-38,6	35,0	0,25	0,22	6,54	MWD Standard
4117,2	0,92	274,28	4116,4	-32,7	-39,2	35,6	0,19	-0,16	6,10	MWD Standard
4270,3	0,97	273,76	4269,5	-32,5	-41,7	38,1	0,03	0,03	-0,34	MWD Standard
4363,4	0,98	273,03	4362,6	-32,4	-43,3	39,7	0,01	0,01	-0,78	MWD Standard
4456,0	0,89	285,77	4455,2	-32,2	-44,7	41,2	0,24	-0,09	13,76	MWD Standard
4549,6	0,77	305,78	4548,9	-31,6	-46,0	42,4	0,34	-0,14	21,36	MWD Standard
4637,4	0,78	326,95	4636,6	-30,8	-46,8	43,3	0,32	0,02	24,11	MWD Standard
4727,7	0,93	347,78	4726,9	-29,5	-47,2	43,9	0,38	0,17	23,08	MWD Standard
4821,2	0,58	340,84	4820,3	-28,3	-47,6	44,4	0,38	-0,37	-7,43	MWD Standard
4914,2	0,29	14,58	4913,4	-27,7	-47,7	44,5	0,41	-0,32	36,27	MWD Standard
5008,4	0,65	25,61	5007,6	-26,9	-47,4	44,3	0,39	0,38	11,70	MWD Standard
5102,3	0,82	38,53	5101,5	-25,9	-46,7	43,8	0,25	0,18	13,77	MWD Standard
5194,6	0,63	49,45	5193,8	-25,1	-45,9	43,1	0,25	-0,20	11,83	MWD Standard
5288,6	0,51	80,27	5287,7	-24,7	-45,1	42,3	0,35	-0,13	32,80	MWD Standard
5382,6	0,76	102,68	5381,7	-24,8	-44,1	41,3	0,37	0,27	23,83	MWD Standard
5476,7	0,46	107,45	5475,8	-25,0	-43,1	40,3	0,32	-0,31	5,07	MWD Standard
5570,4	0,28	172,08	5569,6	-25,4	-42,7	39,9	0,46	-0,19	68,94	MWD Standard
5663,9	0,50	240,22	5663,0	-25,8	-43,1	40,2	0,51	0,23	72,91	MWD Standard
5758,3	1,16	233,38	5757,4	-26,6	-44,2	41,2	0,70	0,69	-7,24	MWD Standard
5851,8	1,57	247,51	5850,9	-27,6	-46,1	43,0	0,57	0,45	15,11	MWD Standard
5945,0	2,45	245,24	5944,1	-28,9	-49,1	45,9	0,95	0,94	-2,44	MWD Standard
6037,1	2,87	277,90	6036,1	-29,4	-53,2	49,9	1,68	0,45	35,47	MWD Standard
6127,7	3,40	290,34	6126,5	-28,2	-58,0	54,7	0,95	0,59	13,74	MWD Standard
6220,9	3,40	294,74	6219,6	-26,1	-63,1	60,0	0,28	0,00	4,72	MWD Standard
6311,4	3,58	304,73	6309,9	-23,3	-67,8	65,0	0,70	0,20	11,04	MWD Standard
6405,9	3,56	316,54	6404,2	-19,5	-72,3	69,9	0,78	-0,02	12,49	MWD Standard
6497,5	3,18	313,63	6495,7	-15,7	-76,1	74,0	0,46	-0,42	-3,17	MWD Standard
6590,0	2,67	311,94	6588,0	-12,5	-79,5	77,8	0,56	-0,55	-1,83	MWD Standard
6683,5	2,23	312,17	6681,4	-9,8	-82,5	81,0	0,47	-0,47	0,25	MWD Standard
6775,6	1,64	304,67	6773,5	-7,9	-84,9	83,6	0,70	-0,64	-8,14	MWD Standard
6866,1	1,54	303,01	6864,0	-6,5	-87,0	85,8	0,12	-0,11	-1,83	MWD Standard
6959,3	1,41	309,62	6957,1	-5,1	-88,9	87,9	0,23	-0,14	7,10	MWD Standard
7053,6	1,24	303,60	7051,4	-3,8	-90,7	89,8	0,23	-0,18	-6,39	MWD Standard
7145,5	1,36	305,15	7143,3	-2,6	-92,4	91,6	0,13	0,13	1,69	MWD Standard
7238,8	1,23	306,98	7236,5	-1,3	-94,1	93,4	0,15	-0,14	1,96	MWD Standard
7330,3	1,16	301,14	7328,0	-0,3	-95,7	95,1	0,15	-0,07	-6,39	MWD Standard
7423,2	0,99	289,63	7420,9	0,5	-97,2	96,7	0,30	-0,19	-12,38	MWD Standard
7515,1	0,81	291,08	7512,8	1,0	-98,6	98,1	0,19	-0,19	1,57	MWD Standard
7608,3	0,71	288,50	7606,0	1,4	-99,7	99,3	0,12	-0,11	-2,77	MWD Standard
7700,6	0,52	278,32	7698,3	1,6	-100,7	100,3	0,23	-0,20	-11,03	MWD Standard
7793,9	0,68	283,06	7791,6	1,8	-101,6	101,3	0,17	0,16	5,08	MWD Standard
7886,1	0,87	301,59	7883,7	2,3	-102,8	102,5	0,34	0,22	20,11	MWD Standard
7977,2	0,58	331,36	7974,9	3,1	-103,6	103,3	0,52	-0,33	32,66	MWD Standard
8070,2	0,61	331,05	8067,9	3,9	-104,0	103,9	0,04	0,04	-0,33	MWD Standard
8164,4	0,63	327,79	8162,1	4,8	-104,6	104,5	0,04	0,02	-3,46	MWD Standard
8257,6	0,62	325,34	8255,2	5,7	-105,1	105,1	0,03	-0,01	-2,63	MWD Standard
8350,8	0,47	322,86	8348,4	6,4	-105,6	105,7	0,16	-0,15	-2,67	MWD Standard
8443,2	0,55	320,16	8440,8	7,0	-106,2	106,3	0,09	0,08	-2,92	MWD Standard
8533,8	0,63	305,45	8531,4	7,7	-106,8	107,1	0,19	0,09	-16,23	MWD Standard
8626,1	0,69	302,93	8623,8	8,2	-107,7	108,0	0,08	0,07	-2,74	MWD Standard
8718,3	0,72	296,65	8716,0	8,8	-108,7	109,0	0,09	0,02	-6,81	MWD Standard
8811,1	0,65	299,60	8808,7	9,3	-109,7	110,1	0,08	-0,07	3,19	MWD Standard
8905,0	0,67	302,00	8902,6	9,9	-110,6	111,1	0,04	0,03	2,56	MWD Standard
8998,1	0,71	298,69	8995,7	10,5	-111,6	112,1	0,06	0,04	-3,56	MWD Standard
9091,2	0,68	299,64	9088,8	11,0	-112,6	113,1	0,03	-0,03	1,02	MWD Standard
9183,8	0,65	292,60	9181,4	11,5	-113,5	114,1	0,10	-0,04	-7,60	MWD Standard
9277,5	0,61	288,13	9275,1	11,8	-114,5	115,1	0,06	-0,04	-4,77	MWD Standard
9365,3	0,48	282,32	9362,9	12,1	-115,3	116,0	0,16	-0,15	-6,62	MWD Standard

PETROBRAS

Survey Report

Company: Bakken - Halliburton	Date: 18/7/2005	Time: 10:19:44	Page: 3
Field: Bakken	Co-ordinate(NE) Reference: Well: Burning Tree State 36-2H		
Site: Burning Tree State 36-2H	Vertical (TVD) Reference: SITE 0,0		
Well: Burning Tree State 36-2H	Section (VS) Reference: Well (0,00N,0,00E,275,94Azi)		
Wellpath: 36-2H - Vertical	Survey Calculation Method: Minimum Curvature	Db: Sybase	

Survey										
MD ft	Incl deg	Azim deg	TVD ft	+N/-S ft	+E/-W ft	VS ft	DLS deg/100ft	Build deg/100ft	Turn deg/100ft	Tool/Comment
9455,5	0,40	269,32	9453,1	12,1	-116,0	116,6	0,15	-0,10	-14,40	MWD Standard
9549,0	0,28	262,43	9546,6	12,1	-116,6	117,2	0,13	-0,12	-7,37	MWD Standard
9642,0	0,31	269,37	9639,6	12,1	-117,0	117,7	0,05	0,03	7,46	MWD Standard
9652,0	0,40	286,26	9649,6	12,1	-117,1	117,7	1,37	0,91	168,88	MWD Standard
9683,0	0,47	303,21	9680,6	12,2	-117,3	117,9	0,47	0,23	54,68	MWD Standard
9700,0	0,20	264,08	9697,6	12,2	-117,4	118,0	1,97	-1,55	-230,19	MWD Standard

Tabela A2.2. Relatório da Segunda Fase de Perfuração do Poço BTS-36-2H (desvio).

**PETROBRAS
Planning Report**

Company: Bakken - Halliburton		Date: 18/7/2005		Time: 10:21:27		Page: 1				
Field: Bakken		Co-ordinate(NE) Reference: Well: Burning Tree State 36-2H								
Site: Burning Tree State 36-2H		Vertical (TVD) Reference: SITE 0,0								
Well: Burning Tree State 36-2H		Section (VS) Reference: Well (0,00N,0,00E,163,20Azi)								
Wellpath: 36-2H - Desvio		Plan: Plan #1								
Field: Bakken										
Map System: Universal Transverse Mercator				Map Zone: UTM Zone 24, South 42W to 36W						
Geo Datum: Hayford International 1924				Coordinate System: Well Centre						
Sys Datum: Mean Sea Level				Geomagnetic Model: igrf200510						
Site: Burning Tree State 36-2H										
Site Position:		Northing:		m		Latitude:				
From: Lease Line		Easting:		m		Longitude:				
Position Uncertainty: 0,0 ft						North Reference: Grid				
Ground Level: 300,0 ft						Grid Convergence: 0,00 deg				
Well: Burning Tree State 36-2H				Slot Name:						
Well Position:		+N/-S		0,0 ft		Northing: 0,00 m				
+E/-W		0,0 ft		Easting : 0,00 m		Latitude: -90 0 0,000 S				
Position Uncertainty: 0,0 ft						Longitude: 180 0 0,000 E				
Wellpath: 36-2H - Desvio				Drilled From: 36-2H - Vertical						
Current Datum: SITE				Tie-on Depth: 9250,0 ft						
Magnetic Data: 18/7/2005				Above System Datum: Mean Sea Level						
Field Strength: 56560 nT				Declination: 160,80 deg						
Vertical Section:				Mag Dip Angle: 88,01 deg						
Depth From (TVD)		+N/-S		ft		Direction				
ft		ft		ft		deg				
0,0		0,0		0,0		163,20				
Survey										
MD	Incl	Azim	TVD	+N/-S	+E/-W	VS	DLS	Build	Turn	Tool/Comment
ft	deg	deg	ft	ft	ft	ft	deg/100ft	deg/100ft	deg/100ft	
9250,0	0,62	289,50	9247,6	11,7	-114,2	-44,3	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
9300,0	4,85	165,59	9297,5	9,8	-114,0	-42,3	10,44	8,45	-247,82	MWD Standard
9350,0	10,06	162,62	9347,1	3,6	-112,1	-35,8	10,44	10,42	-5,92	MWD Standard
9400,0	15,27	161,67	9395,9	-6,9	-108,8	-24,9	10,44	10,43	-1,90	MWD Standard
9450,0	20,49	161,20	9443,4	-21,4	-103,9	-9,5	10,44	10,44	-0,95	MWD Standard
9500,0	25,71	160,91	9489,4	-39,9	-97,5	10,1	10,44	10,44	-0,58	MWD Standard
9550,0	30,93	160,72	9533,4	-62,3	-89,7	33,7	10,44	10,44	-0,39	MWD Standard
9600,0	36,15	160,57	9575,1	-88,4	-80,5	61,3	10,44	10,44	-0,29	MWD Standard
9650,0	41,37	160,46	9614,0	-117,9	-70,1	92,6	10,44	10,44	-0,22	MWD Standard
9700,0	46,59	160,37	9650,0	-150,6	-58,5	127,3	10,44	10,44	-0,18	MWD Standard
9750,0	51,81	160,29	9682,7	-186,2	-45,7	165,0	10,44	10,44	-0,15	MWD Standard
9800,0	57,03	160,23	9711,7	-224,5	-32,0	205,6	10,44	10,44	-0,13	MWD Standard
9850,0	62,25	160,17	9737,0	-265,1	-17,4	248,7	10,44	10,44	-0,12	MWD Standard
9900,0	67,47	160,11	9758,2	-307,6	-2,0	293,9	10,44	10,44	-0,11	MWD Standard
9921,2	69,69	160,09	9766,0	-326,2	4,7	313,6	10,44	10,44	-0,10	Objetivo
9950,0	72,69	160,06	9775,3	-351,8	14,0	340,8	10,44	10,44	-0,10	MWD Standard
10000,0	77,91	160,02	9788,0	-397,2	30,5	389,1	10,44	10,44	-0,09	MWD Standard
10020,0	80,00	160,00	9791,8	-415,7	37,2	408,7	10,44	10,44	-0,09	MWD Standard
10100,0	80,00	160,00	9805,7	-489,7	64,1	487,4	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
10200,0	80,00	160,00	9823,0	-582,3	97,8	585,7	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
10300,0	80,00	160,00	9840,4	-674,8	131,5	684,0	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
10400,0	80,00	160,00	9857,8	-767,3	165,2	782,3	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
10500,0	80,00	160,00	9875,1	-859,9	198,9	880,7	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
10600,0	80,00	160,00	9892,5	-952,4	232,6	979,0	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
10700,0	80,00	160,00	9909,9	-1045,0	266,2	1077,3	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
10800,0	80,00	160,00	9927,2	-1137,5	299,9	1175,6	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
10900,0	80,00	160,00	9944,6	-1230,1	333,6	1274,0	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
11000,0	80,00	160,00	9962,0	-1322,6	367,3	1372,3	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
11100,0	80,00	160,00	9979,3	-1415,1	401,0	1470,6	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
11200,0	80,00	160,00	9996,7	-1507,7	434,7	1569,0	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
11300,0	80,00	160,00	10014,1	-1600,2	468,3	1667,3	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
11400,0	80,00	160,00	10031,4	-1692,8	502,0	1765,6	0,00	0,00	0,00	MWD Standard
11500,0	80,00	160,00	10048,8	-1785,3	535,7	1863,9	0,00	0,00	0,00	MWD Standard

PETROBRAS

Planning Report

Company: Bakken - Halliburton Field: Bakken Site: Burning Tree State 36-2H Well: Burning Tree State 36-2H Wellpath: 36-2H - Desvio	Date: 18/7/2005 Co-ordinate(NE) Reference: Well: Burning Tree State 36-2H Vertical (TVD) Reference: SITE 0,0 Section (VS) Reference: Well (0,00N,0,00E,163,20Azi) Plan: Plan #1	Time: 10:21:27 Page: 2
---	--	---

Survey

MD ft	Incl deg	Azim deg	TVD ft	+N/-S ft	+E/-W ft	VS ft	DLS deg/100ft	Build deg/100ft	Turn deg/100ft	Tool/Comment
11560,0	80,00	160,00	10059,2	-1840,8	555,9	1922,9	0,00	0,00	0,00	MWD Standard

Targets

Name	Description Dip.	Dir.	TVD ft	+N/-S ft	+E/-W ft	Map Northing m	Map Easting m	<--- Latitude ---> Deg Min Sec	<--- Longitude ---> Deg Min Sec
Objetivo			9766,0	-1907,0	578,0	-581,25	176,17	-90 0 0,000 S	180 0 0,000 E
	-Plan out by 1681,54 at		9766,0	-326,2	4,7	-99,43	1,44	90 0 0,000 S	-180 0 0,000 E

Anexo 3. Tabelas representativas da análise de sensibilidade dos modelos.

Tabela A3. 1. Análise da variação do ν (para σ_{22}).

Caso de estudo		Modelo de BLANTON (1983)			Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)		
		$\nu = 0,15$	ν	$\nu = 0,35$	$\nu = 0,15$	ν	$\nu = 0,35$
ROLLINS $\nu = 0,21$	σ_{22}	34,8 -7,9%	37,8	45,5 20,3%	49,7 -1,5%	50,5	52,4 3,7%
BAKKEN 1 $\nu = 0,18$	σ_{22}	24,9 -12,35%	28,5	45,34 59,1%	43,7 -4,5%	45,8	55,7 21,6%
BAKKEN 2 $\nu = 0,18$	σ_{22}	25,1 -21%	31,8	44,9 41,2%	43,8 -8,3%	47,8	55,4 15,8%

Tabela A3. 2. Análise da variação do ν (para σ_{33}).

Caso de estudo		Modelo de BLANTON (1983)			Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)		
		$\nu = 0,15$	ν	$\nu = 0,35$	$\nu = 0,15$	ν	$\nu = 0,35$
ROLLINS $\nu = 0,21$	σ_{22}	19,2 -21,9%	24,6	38,2 55,3%	45,8 -2,9%	47,2	50,6 6,7%
BAKKEN 1 $\nu = 0,18$	σ_{22}	2,5 30%	8,3	32,89 296%	30,4 -10,1%	33,8	48,3 30,02%
BAKKEN 2 $\nu = 0,18$	σ_{22}	-2,25 -131%	5,5	29,4 434,5%	27,62 -14,2%	32,2	46,3 30,40%

Tabela A3. 3. Análise da variação de ε_{xx} (para σ_{22}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		$-75\% \varepsilon_{xx}$	$-50\% \varepsilon_{xx}$	$50\% \varepsilon_{xx}$	$75\% \varepsilon_{xx}$	$-75\% \varepsilon_{xx}$	$-50\% \varepsilon_{xx}$	$50\% \varepsilon_{xx}$	$75\% \varepsilon_{xx}$
ROLLINS	σ_{22}	34,1 -5,6%	35,5 -1,7%	33,9 -5,9%	32,5 -10,0%	49,5 -1,0%	49,9 -0,3%	49,5 -1,1%	49,1 -1,82%
BAKKEN 1	σ_{22}	28,3 -25%	30,2 -20,2%	46,4 22,6%	49,9 31,7%	45,6 -11,0%	46,8 -8,8%	56,3 9,8%	58,4 13,83%
BAKKEN 2	σ_{22}	43,6 9,9%	42,6 7,4%	35,9 -9,2%	34,2 -13,8%	54,7 4,4%	54,1 3,3%	50,2 -4,1%	49,1 -6,2%

Tabela A3. 4. Análise da variação de ε_{xx} (para σ_{33}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{xx}	-50% ε_{xx}	50% ε_{xx}	75% ε_{xx}	-75% ε_{xx}	-50% ε_{xx}	50% ε_{xx}	75% ε_{xx}
ROLLINS	σ_{33}	15,14 -35,57%	19,49 -17,03%	23,77 1,19%	23,39 -0,44%	44,80 -4,48%	45,90 -2,14%	46,97 0,15%	46,88 -0,06%
BAKKEN 1	σ_{33}	16,02 -31,80%	20,74 -11,72%	25,95 4,05%	26,06 4,46%	38,41 -18,11%	41,19 -12,17%	44,27 1,36%	44,33 1,50%
BAKKEN 2	σ_{33}	-1,68 -107,3%	8,66 -62,17%	29,42 28,54%	350%6 33,49%	27,97 -34,15%	34,07 -19,78%	46,32 9,08%	46,99 10,65%

Tabela A3. 5. Análise da variação de ε_{yy} (para σ_{22}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{yy}	-50% ε_{yy}	50% ε_{yy}	75% ε_{yy}	-75% ε_{yy}	-50% ε_{yy}	50% ε_{yy}	75% ε_{yy}
ROLLINS	σ_{22}	27,73 -23,34%	34,76 -3,77%	37,12 2,76%	37,37 3,45%	47,97 -4,21%	49,74 -0,68%	50,33 50%0%	50,39 0,62%
BAKKEN 1	σ_{22}	43,96 16,05%	42,40 11,94%	33,07 -12,7%	31,21 -17,61%	54,89 6,99%	53,97 5,20%	48,47 -5,53%	47,37 -7,67%
BAKKEN 2	σ_{22}	37,11 -6,45%	37,96 -4,31%	41,79 5,33%	43,29 9,11%	50,86 -2,88%	51,36 -1,93%	53,62 2,38%	54,50 4,07%

Tabela A3. 6. Análise da variação de ε_{yy} (para σ_{33}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{yy}	-50% ε_{yy}	50% ε_{yy}	75% ε_{yy}	-75% ε_{yy}	-50% ε_{yy}	50% ε_{yy}	75% ε_{yy}
ROLLINS	σ_{33}	19,77 -15,85%	19,49 -17,05%	25,93 10,36%	26,62 13,30%	45,97 -1,99%	45,90 -2,15%	47,52 1,30%	47,69 1,67%
BAKKEN 1	σ_{33}	-2,37 -109,5%	10,49 -57,93%	28,55 14,47%	28,22 13,15%	27,56 -36,89%	35,15 -19,52%	45,80 4,88%	45,61 4,43%
BAKKEN 2	σ_{33}	5,57 -75,66%	11,77 -48,60%	31,49 37,58%	34,29 49,81%	32,25 -24,07%	35,90 -15,46%	47,54 11,95%	49,20 15,84%

Tabela A3. 7. Análise da variação de ε_{zz} (para σ_{22}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{zz}	-50% ε_{zz}	50% ε_{zz}	75% ε_{zz}	-75% ε_{zz}	-50% ε_{zz}	50% ε_{zz}	75% ε_{zz}
ROLLINS	σ_{22}	39,50 9,37%	40,01 10,76%	31,59 -12,5%	29,80 -17,51%	50,93 1,70%	51,05 1,95%	48,94 -2,27%	48,49 -3,17%
BAKKEN 1	σ_{22}	36,01 -4,94%	36,63 -3,30%	39,49 4,26%	41,07 8,43%	50,20 -2,15%	55,07 -1,44%	52,26 1,85%	53,19 3,67%
BAKKEN 2	σ_{22}	27,20 -31,44%	30,06 -24,22%	49,05 23,64%	52,42 32,15%	45,01 -14,05%	46,70 -10,83%	57,91 %	59,90 14,37%

Tabela A3. 8. Análise da variação de ε_{zz} (para σ_{33}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{zz}	-50% ε_{zz}	50% ε_{zz}	75% ε_{zz}	-75% ε_{zz}	-50% ε_{zz}	50% ε_{zz}	75% ε_{zz}
ROLLINS	σ_{33}	22,47 -4,35%	24,89 5,97%	20,97 -10,7%	19,93 -15,17%	46,65 -50,65%	47,26 75,6%	46,27 -1,35%	46,01 -1,91%
BAKKEN 1	σ_{33}	10,43 -58,20%	15,46 -38,01%	33,15 32,90%	36,05 44,55%	35,11 -19,61%	38,08 -12,81%	48,52 11,09%	50,23 15,01%
BAKKEN 2	σ_{33}	14,29 -37,55%	19,00 -17,02%	23,90 4,40%	23,96 4,67%	37,40 -11,94%	40,17 -5,41%	43,06 1,40%	43,10 1,49%

Tabela A3. 9. Análise da variação de ε_{11} C-Temp (para σ_{22}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{11}	-50% ε_{11}	50% ε_{11}	75% ε_{11}	-75% ε_{11}	-50% ε_{11}	50% ε_{11}	75% ε_{11}
ROLLINS	σ_{22}	37,71 -0,37%	54,23 43,29%	30,86 -18,5%	28,742 -24,1%	50,46 -0,10%	54,63 8,15%	48,75 -3,47%	48,41 -4,14%
BAKKEN 1	σ_{22}	65,09 128,6%	41,07 44,24%	24,21 -14,9%	22,98 -19,3%	67,36 47,21%	53,19 16,25%	43,24 -5,49%	42,18 -7,80%
BAKKEN 2	σ_{22}	64,27 101,7%	47,66 49,56%	26,47 -16,9%	24,93 -21,8%	66,89 40,04%	57,08 19,51%	44,58 -6,66%	43,67 -8,57%

Tabela A3. 10. Análise da variação de ε_{11} C-Temp (para σ_{33}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{11}	-50% ε_{11}	50% ε_{11}	75% ε_{11}	-75% ε_{11}	-50% ε_{11}	50% ε_{11}	75% ε_{11}
ROLLINS	σ_{33}	29,24 19,05%	31,75 29,25%	28,74 17,01%	20,65 -15,9%	48,34 2,49%	48,97 3,83%	46,41 -1,60%	46,18 -2,09%
BAKKEN 1	σ_{33}	-12,03 -245,1%	1,30 -84,33%	10,66 28,56%	11,35 36,82%	21,85 -35,43%	29,72 -12,19%	35,250 4,12%	35,65 5,32%
BAKKEN 2	σ_{33}	-20,65 -478,5%	-4,25 -177,9%	8,76 60,69%	9,72 78,16%	16,76 -47,89%	26,44 -17,81%	34,13 6,08%	34,69 7,82%

Tabela A3. 11. Análise da variação de ε_{22} C-Temp (para σ_{22}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{22}	-50% ε_{22}	50% ε_{22}	75% ε_{22}	-75% ε_{22}	-50% ε_{22}	50% ε_{22}	75% ε_{22}
ROLLINS	σ_{22}	21,86 -42,26%	27,52 -27,30%	47,05 24,31%	51,28 35,50%	46,49 -7,96%	47,91 -5,15%	52,82 4,57%	53,88 6,69%
BAKKEN 1	σ_{22}	17,48 -38,61%	21,24 -25,43%	35,36 24,19%	38,69 35,87%	39,27 -14,17%	41,48 -9,34%	49,82 8,88%	51,78 13,17%
BAKKEN 2	σ_{22}	17,89 -43,84%	22,69 -28,77%	40,49 27,05%	44,61 39,99%	39,52 -17,26%	42,35 -11,33%	48,25 1,03%	46,76 2,09%

Tabela A3. 12. Análise da variação de ε_{22} C-Temp (para σ_{33}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{22}	-50% ε_{22}	50% ε_{22}	75% ε_{22}	-75% ε_{22}	-50% ε_{22}	50% ε_{22}	75% ε_{22}
ROLLINS	σ_{33}	21,69 -11,69%	22,71 -7,56%	26,22 6,73%	26,97 9,82%	46,45 -1,53%	46,71 -0,98%	47,59 0,88%	47,78 1,28%
BAKKEN 1	σ_{33}	5,94 -28,32%	6,74 -18,71%	9,75 17,5%	10,45 26,02%	32,47 -4,09%	32,94 -2,71%	34,71 2,53%	35,13 3,76%
BAKKEN 2	σ_{33}	2,32 -57,56%	3,39 -37,77%	7,39 35,51%	8,32 52,48%	30,33 -5,76%	30,96 -3,78%	21,02 -34,68%	23,53 -26,88%

Tabela A3. 13. Análise da variação de ε_{33} C-Temp (para σ_{22}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{33}	-50% ε_{33}	50% ε_{33}	75% ε_{33}	-75% ε_{33}	-50% ε_{33}	50% ε_{33}	75% ε_{33}
ROLLINS	σ_{22}	37,48 -0,96%	37,61 -0,63%	38,08 0,62%	38,19 0,92%	50,42 -0,18%	50,45 -0,12%	50,70 0,11%	50,99 0,17%
BAKKEN 1	σ_{22}	29,46 3,48%	29,14 2,34%	27,79 -2,41%	27,44 -3,64%	46,34 1,28%	46,15 0,86%	45,35 -0,88%	45,14 -1,34%
BAKKEN 2	σ_{22}	33,10 3,87%	32,69 2,61%	30,99 -2,74%	30,43 -4,15%	48,49 -4,15%	48,25 1,53%	47,25 -1,08%	46,98 -1,64%

Tabela A3. 14. Análise da variação de ε_{33} C-Temp (para σ_{33}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{33}	-50% ε_{33}	50% ε_{33}	5% ε_{33}	-75% ε_{33}	-50% ε_{33}	50% ε_{33}	75% ε_{33}
ROLLINS	σ_{33}	20,67 -15,82%	21,99 -7,56%	27,29 6,73%	28,29 15,17%	46,19 -2,07%	46,53 -1,36%	47,8 1,33%	48,10 1,98%
BAKKEN 1	σ_{33}	15,69 89,19%	13,14 58,41%	3,23 -61,1%	0,61 -92,6%	38,22 12,90%	36,79 8,69%	30,86 -8,83%	29,32 -13,38%
BAKKEN 2	σ_{33}	15,52 184,5%	12,23 124,2%	-1,66 -1350%	-5,33 -197%	38,12 18,47%	36,18 12,43%	27,97 -13,06%	25,81 -19,79%

Tabela A3. 15. Análise da variação de ε_{11} S-Temp (para σ_{22}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{11}	-50% ε_{11}	50% ε_{11}	75% ε_{11}	-75% ε_{11}	-50% ε_{11}	50% ε_{11}	75% ε_{11}
ROLLINS	σ_{22}	39,24 8,64%	52,67 45,81%	29,59 -18,1%	27,62 -23,5%	50,86 1,57%	54,23 8,30%	48,43 -3,28%	47,94 -4,27%
BAKKEN 1	σ_{22}	56,81 46,31%	58,03 49,46%	31,57 -18,7%	29,40 -24,26%	62,47 20,46%	63,19 21,84%	47,58 -8,25%	46,30 -10,71%
BAKKEN 2	σ_{22}	50,99 18,94%	64,83 35,32%	34,44 -19,66%	31,91 -25,56%	67,22 23,89%	67,22 23,89%	49,28 -9,17%	47,79 -11,92%

Tabela A3. 16. Análise da variação de ε_{11} S-Temp (para σ_{33}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{11}	-50% ε_{11}	50% ε_{11}	75% ε_{11}	-75% ε_{11}	-50% ε_{11}	50% ε_{11}	75% ε_{11}
ROLLINS	σ_{33}	28,79 22,59%	30,35 29,19%	20,78 -11,5%	19,96 -15%	48,23 2,84%	48,62 3,67%	46,22 -1,45%	46,01 -1,89%
BAKKEN 1	σ_{33}	41,60 53,03%	36,81 35,39%	23,57 -13,3%	22,47 -17,4%	53,50 18,9%	50,67 12,62%	42,85 -4,76%	42,21 -6,19%
BAKKEN 2	σ_{33}	37,66 36,03%	37,46 35,32%	23,93 -13,55%	22,81 -17,6%	51,18 13%	51,07 12,74%	43,42 -4,15%	42,42 -6,36%

Tabela A3. 17. Análise da variação de ε_{22} S-Temp (para σ_{22}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{22}	-50% ε_{22}	50% ε_{22}	75% ε_{22}	-75% ε_{22}	-50% ε_{22}	50% ε_{22}	75% ε_{22}
ROLLINS	σ_{22}	21,21 -41,28%	26,46 -26,74%	44,80 24,01%	48,81 35,12%	46,33 -7,48%	47,65 -4,85%	52,25 4,35%	52,26 4,37%
BAKKEN 1	σ_{22}	24,72 -36,33%	28,32 -27,06%	28,60 -26,32%	53,25 37,14%	43,54 -16,04%	45,66 -11,95%	57,63 11,12%	60,37 16,4%
BAKKEN 2	σ_{22}	24,76 42,22%	30,50 -28,85%	54,23 26,5%	59,57 38,96%	43,57 -19,69%	46,88 -13,6%	60,93 12,3%	64,09 18,13%

Tabela A3. 18. Análise da variação de ε_{22} S-Temp (para σ_{33}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{22}	-50% ε_{22}	50% ε_{22}	75% ε_{22}	-75% ε_{22}	-50% ε_{22}	50% ε_{22}	75% ε_{22}
ROLLINS	σ_{33}	20,74 -11,68%	21,71 -7,56%	25,60 9,01%	25,82 9,94%	46,21 -1,47%	46,45 -0,95%	47,30 0,85%	47,49 1,25%
BAKKEN 1	σ_{33}	22,76 -16,26%	25,57 -5,93%	28,69 5,52%	29,40 8,15%	42,39 -5,79%	44,04 -2,11%	45,88 1,97%	46,30 2,9%
BAKKEN 2	σ_{33}	23,89 -13,7%	25,78 -6,88%	29,44 6,32%	30,26 9,29%	43,06 -4,94%	43,58 -3,79%	45,79 1,09%	46,29 2,19%

Tabela A3. 19. Análise da variação de ε_{33} S-Temp (para σ_{22}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{33}	-50% ε_{33}	50% ε_{33}	75% ε_{33}	-75% ε_{33}	-50% ε_{33}	50% ε_{33}	75% ε_{33}
ROLLINS	σ_{22}	35,78 -0,95%	35,90 -0,63%	36,34 0,61%	36,45 0,92%	49,99 -0,17%	50,02 -0,11%	50,13 0,11%	50,16 0,17%
BAKKEN 1	σ_{22}	38,21 -1,58%	38,42 -1,05%	39,22 1,02%	39,42 1,52%	51,50 -0,7%	51,62 -0,46%	52,10 0,45%	52,21 0,67%
BAKKEN 2	σ_{22}	42,35 -1,21%	42,52 -0,8%	43,20 0,78%	43,24 0,88%	53,95 -0,57%	54,05 -0,37%	54,45 0,36%	54,55 0,55%

Tabela A3. 20. Análise da variação de ε_{33} S-Temp (para σ_{33}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-75% ε_{33}	-50% ε_{33}	50% ε_{33}	75% ε_{33}	-75% ε_{33}	-50% ε_{33}	50% ε_{33}	75% ε_{33}
ROLLINS	σ_{33}	20,18 -14,1%	21,27 -9,46%	25,66 9,25%	26,73 13,8%	46,06 -1,8%	46,34 -1,19%	47,45 1,16%	47,71 1,74%
BAKKEN 1	σ_{33}	21,49 -20,9%	23,42 -13,9%	30,86 13,52%	32,66 20,1%	41,64 -7,46%	42,77 -4,94%	47,16 4,82%	48,23 7,18%
BAKKEN 2	σ_{33}	22,19 -19,86%	24,04 -13,16%	31,24 12,85%	32,99 19,15%	42,05 -7,17%	43,15 -4,75%	47,40 4,63%	48,43 6,91%

Tabela A3. 21. Análise da variação de P_p (para σ_{22}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		-50% P_p	-25% P_p	0,25 P_p	50% P_p	-50% P_p	25% P_p	25% P_p	50% P_p
ROLLINS	σ_{22}	x	x	X	x	41,02 -18,80%	44,18 -12,53%	56,84 12,53%	60,01 18,80%
BAKKEN 1	σ_{22}	x	x	X	x	32,79 -28,32%	37,12 -18,88%	54,40 18,88%	58,72 28,33%
BAKKEN 2	σ_{22}	x	x	x	x	35,84 -24,97%	39,82 -16,64	55,72 16,64%	59,7 24,97%

Tabela A3. 22. Análise da variação de P_p (para σ_{33}).

Caso de estudo		Magnitudes das Tensões							
		Modelo de BLANTON (1983)				Modelo de BLANTON e TEUFEL (1983)			
		$-50\% P_p$	$-25\% P_p$	$0,25 P_p$	$50\% P_p$	$-50\% P_p$	$25\% P_p$	$0,25 P_p$	$50\% P_p$
ROLLINS	σ_{33}	x	x	x	x	30,22 -35,95%	35,868 -23,96%	54,761 16,09%	54,761 16,09%
BAKKEN 1	σ_{33}	x	x	x	x	14,68 -56,62%	21,076 -37,74%	46,632 37,74%	53,022 56,62%
BAKKEN 2	σ_{33}	x	x	x	x	12,14 -62,28%	18,818 -41,52%	45,541 41,52%	52,221 62,28%