

**Fernanda Lins Gonçalves Pereira**

**Metodologia semi-quantitativa para avaliação  
do risco da injeção de CO<sub>2</sub> para  
armazenamento em reservatórios geológicos**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Deane de Mesquita Roehl

Rio de Janeiro  
Abril de 2015

**Fernanda Lins Gonçalves Pereira**

**Metodologia semi-quantitativa para avaliação  
do risco da injeção de CO<sub>2</sub> para  
armazenamento em reservatórios geológicos**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof<sup>a</sup>. Deane de Mesquita Roehl**

Orientadora  
Departamento de Engenharia Civil — PUC-Rio

**Prof. Paulo Batista Gonçalves**

Departamento de Engenharia Civil — PUC-Rio

**Prof. Raul Rosas e Silva**

Departamento de Engenharia Civil — PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Andréia Abreu Diniz de Almeida**

Universidade Federal Fluminense

**Dr. Edgard Poiate Junior**

PETROBRAS

**Dr. João Paulo Laquini**

PETROBRAS

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de Abril de 2015

Todos os direitos reservados. Proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Fernanda Lins Gonçalves Pereira**

Graduou-se em engenharia civil pela UERJ em 2007. Titulou-se mestre pela PUC-Rio em 2009 e no mesmo ano, ingressou no curso de doutorado da PUC-Rio. Foi bolsista CNPq nos anos de 2007 a 2013. Participou de projetos de colaboração entre a Petrobras e o TecGraf/PUC-Rio, principalmente na área de análise probabilística de reservatórios geológicos. Participou de eventos científicos internacionais como ARMA-2012 e WCCM-2012. Publicou artigo intitulado *Fault Reactivation Case Study for Probabilistic Assessment of Carbon Dioxide Sequestration* em 2014 no IJRMMS.

#### Ficha Catalográfica

Pereira, Fernanda Lins Gonçalves

Metodologia semi-quantitativa para avaliação do risco da injeção de CO<sub>2</sub> para armazenamento em reservatórios geológicos / Fernanda Lins Gonçalves Pereira; orientadora: Deane de Mesquita Roehl. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

v., 160 f.: il. ; 30 cm

Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Avaliação de risco. 3. Análise de incerteza. 4. Sequestro de carbono. 5. Reservatório geológico. I. Roehl, Deane de Mesquita. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Para meu amigo e marido, André Luiz, pelo amor.  
E meus pais, Helida e Alvimar, pela educação.

## Agradecimentos

À minha orientadora, Deane de Mesquita Roehl, pela amizade, orientação e oportunidade de aprender e crescer mais.

Ao meu marido André Luiz Ferreira Pinto pelo apoio dado para o desenvolvimento deste trabalho, amizade, compreensão e paciência.

Aos meus pais, Alvimar e Helida, e meus avós, Dormecínio (in memoriam) e Ary-Cléa (in memoriam), por sempre terem me apoiado e incentivado, pelo amor e carinho deles.

À Monique Cordeiro Rodrigues, amiga sempre presente, pelas conversas quase que diárias repletas de carinho, paciência e compreensão.

Ao meu eterno orientador, Professor João Luís Pascal Roehl (in memoriam), pois nossas conversas e seus ensinamentos me ajudam até hoje.

Aos meus amigos e colegas da PUC-Rio e UERJ pela amizade e por sempre me mostrarem coisas boas da vida.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, amigos, colegas, professores e familiares.

Ao CNPq, à PUC-Rio e ao TecGraf, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado. E à Petrobrás, pelo apoio no fornecimento de dados.

E a Deus, por me permitir conquistar mais um sonho.

## Resumo

Pereira, Fernanda Lins Gonçalves; Roehl, Deane de Mesquita. **Metodologia semi-quantitativa para avaliação do risco da injeção de CO<sub>2</sub> para armazenamento em reservatórios geológicos**. Rio de Janeiro, 2015. 160p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A última etapa do sequestro e armazenamento de carbono (CCS) pode ser realizada pela de injeção de CO<sub>2</sub> em reservatórios geológicos. Projetos de CCS fazem parte de uma série de técnicas para a mitigação dos gases do efeito estufa. Neste trabalho, uma metodologia semi-quantitativa para avaliação do risco da injeção de CO<sub>2</sub> em reservatórios geológicos é apresentada. Essa metodologia é desenvolvida a partir da criação e utilização de uma matriz de risco. Essa matriz possui em uma direção categorias de severidade ajustadas de forma qualitativa e na outra direção categorias de probabilidade ajustadas a partir de análises probabilísticas. Os valores de risco de uma fonte de perigo são calculados pelo produto de suas severidades com suas probabilidades associadas. As fontes de perigo são problemas relacionados à injeção de CO<sub>2</sub> que são selecionadas para análise de um cenário específico. As categorias de severidade são definidas por faixas de níveis de funcionamento de uma fonte de perigo. Diversos métodos de análise probabilística são investigados e a família de métodos do valor médio apresenta características favoráveis ao seu emprego em funções de estado limite complexas. A metodologia é aplicada em um estudo de caso ilustrativo. Com os valores de risco resultantes, faz-se a identificação da principal fonte de perigo e das variáveis aleatórias mais influentes. A avaliação da metodologia indica que ela é uma ferramenta poderosa para os analistas e tomadores de decisão, e tem potencial para auxiliar na fase de planejamento de projetos de CCS.

## Palavras-chave

Avaliação de risco; Análise de incerteza; Sequestro de carbono; Reservatório geológico.

## Abstract

Pereira, Fernanda Lins Gonçalves; Roehl, Deane de Mesquita (Advisor). **Semi-quantitative methodology for assessing the risk of CO<sub>2</sub> injection for storage in geological reservoirs**. Rio de Janeiro, 2015. 160p. PhD Thesis — Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The last stage of carbon capture and sequestration (CCS) can be performed by CO<sub>2</sub> injection process in geological reservoirs. CCS projects belong to a number of ways to mitigate greenhouse gases. In this work, a semi-quantitative methodology to assess the risk of CO<sub>2</sub> injection in geological reservoirs is developed. This methodology is based on the establishment and application of a risk matrix. This matrix has in one direction severity categories set in a qualitative way and in the other direction probability categories set from probabilistic analysis. The risk values of a hazard source are calculated by the product of their severities with their associated probabilities. Hazard sources are problems related to the injection of CO<sub>2</sub> that are selected for a specific scenario analysis. The severity categories are defined by operating level ranges of a hazard source. Several probabilistic analysis methods are investigated and the family of the mean value methods shows characteristics favoring their use in complex limit state functions. The methodology is applied in an illustrative case study. With the resulting risk values, the identification of the main hazard source and the most influential random variables are made. Assessment of the methodology indicates that it is a powerful tool for analysts and decision makers, and it has the potential to assist in the CCS project planning phase.

## Keywords

Risk assessment; Uncertainty analysis; Carbon sequestration; Geological reservoir.

# Sumário

1	Introdução	20
2	Problemas associados à injeção de CO <sub>2</sub>	24
2.1	Comigração de poluentes	24
2.2	Sismicidade	24
2.3	Deslocamentos da superfície do solo	27
2.4	Deslocamento de solução salina	31
2.5	Perda da integridade do poço	32
2.6	Faturamento hidráulico	35
2.7	Reações químicas	37
2.8	Reativação de falhas	39
2.9	Cisalhamento induzido	41
3	Histórico de acidentes, formas de monitoramento e medidas de remediação	43
3.1	Histórico de acidentes	43
3.1.1	Montanha Mammoth	44
3.1.2	Colinas Albanas	45
3.1.3	Lagos Monoun e Nyos	46
3.1.4	Montanha Sheep	47
3.1.5	Bacia Florina	47
3.2	Formas de monitoramento	48
3.3	Medidas de remediação	52
4	Elementos da análise probabilística	55
4.1	Variáveis aleatórias e suas funções de distribuição	55
4.2	Métodos probabilísticos	58
4.2.1	Monte Carlo	58
4.2.2	Hipercubo Latino	60
4.2.3	Método de Confiabilidade de Primeira Ordem	60
4.2.4	Métodos do Valor Médio (MV, AMV, AMV+)	62
4.2.5	Superfície de Resposta	65
4.2.6	Superfície de Resposta Gaussiana	68
4.3	Fatores de importância e sensibilidade	68
4.3.1	Fatores de importância	68
4.3.2	Fatores de sensibilidade	69
5	Análise probabilística: Aplicação à reativação de falhas geológicas	71
5.1	Aplicação: Modelo sintético de reservatório com falha geológica	71
5.1.1	Solução analítica simplificada	71
5.1.2	Solução numérica	77
5.1.3	Comparação entre as soluções analítica simplificada e numérica	82
5.1.4	Discussão dos resultados	84
5.2	Aplicação: Campo de petróleo offshore brasileiro	85

5.2.1	Descrição do campo	86
5.2.2	Representação do caráter aleatório do problema	88
5.2.3	Resultados	89
5.2.4	Conclusões	95
5.3	Outras abordagens da análise probabilística da reativação de falhas geológicas	96
5.3.1	L. Chiaramonte	96
5.3.2	H. Soltanzadeh	96
5.3.3	J. Rohmer	97
5.3.4	L. C. Pereira	98
6	Metodologia de avaliação do risco	<b>99</b>
6.1	Alguns enfoques da literatura	99
6.1.1	O. Bouc	100
6.1.2	K. P. Saripalli	101
6.1.3	M. M. Paraguassú	103
6.2	Proposta	105
6.3	Aplicação	108
6.3.1	Análise probabilística	111
6.3.2	Classificação das categorias de severidade: Tipo I	115
6.3.3	Classificação das categorias de severidade: Tipo II	121
6.3.4	Classificação das categorias de severidade: Tipo III	127
6.3.5	Discussão dos resultados	133
6.4	Conclusões	136
7	Conclusões Finais	<b>138</b>
	Referências Bibliográficas	<b>141</b>
A	Distribuições probabilísticas utilizadas	<b>156</b>
A.1	Distribuição normal ou Gaussiana	156
A.2	Distribuição normal truncada	157
A.3	Distribuição lognormal	158
A.4	Distribuição extremo tipo I ou Gumbel	159
A.5	Distribuição extremo tipo III ou Weibull	160

## Lista de figuras

1.1	Esquema ilustrativo do efeito estufa.	20
1.2	Participação dos diferentes GEE antropogênicos no total de emissões em 2004 em termos de CO <sub>2</sub> -eq, dados obtidos em IPCC 2007.	21
2.1	Esquema da injeção induzindo a reativação da falha, a propagação de ondas e os movimentos da superfície.	27
2.2	Deslocamentos verticais em um reservatório em processo de: Produção e Injeção.	28
2.3	Reservatório idealizado na forma de um cilindro circular horizontal de espessura limitada.	29
2.4	Variação da função $A(\rho, \eta)$ em relação aos parâmetros $\rho$ e $\eta$ .	30
2.5	Esquema mostrando sistemas aberto, fechado e semi-fechado, adaptado de Zhou <i>et al.</i>	31
2.6	Possíveis caminhos de fuga do CO <sub>2</sub> através de poços, de acordo com Gasda <i>et al.</i> e ilustrado por Tavares.	33
2.7	Esquema de um poço de injeção de CO <sub>2</sub> , adaptado de Gaurina-Medimurec e Pašić.	34
2.8	Classificação Andersoniana de falhas geológicas.	35
2.9	Fratura hidráulica vertical carregada sob pressão uniforme com diferentes tensões <i>in situ</i> horizontais.	36
2.10	Desenvolvimento da fratura na região tensões horizontais elevadas, figura 2.9, em função do excesso de pressão e da diferença de tensão <i>in-situ</i> .	38
2.11	Envoltória de Mohr-Coulomb.	40
3.1	Esquema de vazamento de CO <sub>2</sub> da montanha Mammoth, adaptado de Sorey <i>et al.</i>	45
3.2	Foto da USGS, mostrando área de árvores mortas na região de Long Valley Caldera.	45
3.3	Esquema adaptado de Sigurdsson <i>et al.</i> apresentando a sequência de eventos que ocasionou o acidente natural no Lago Monoun.	46
3.4	Ilustração e foto de Melo e Bressan de uma torre micrometeorológica (Torre de Eddy).	49
3.5	Sensores para monitoramento de CO <sub>2</sub> , fotos de Melo e Bressan.	49
3.6	Câmara de fluxo que quantifica fluxos de CO <sub>2</sub> do solo em uma área pré-determinada, foto de Melo e Bressan.	49
3.7	Amostragem da água subterrânea e do solo para análises químicas básicas, foto de Melo e Bressan.	50
3.8	Amostragem de gases na zona vadosa/solo para análises de CO <sub>2</sub> , foto de Melo e Bressan.	51
3.9	Sensor hiperespectral, foto de Pickles e Cover.	51
4.1	Exemplos de coeficientes de correlação.	57

4.2	Geração de um valor numérico para a VA definida por um dado espaço amostral.	59
4.3	Exemplo de FDA final do problema, utilizado para estimar $pf$ .	59
4.4	Exemplo de uma amostra com 2 VAs e 10 pontos por: Hipercubo Latino e Monte Carlo.	60
4.5	FDP conjunta e funções de estado limite original (não-linear) e linearizada no MPP, no espaço normal padrão.	61
4.6	Plano tangente em $g(x) = 0$ no MPP.	62
4.7	Variáveis codificadas para o método RSM_CC.	65
5.1	Seção transversal sintética analisada formada por três camadas e uma única falha.	72
5.2	Ajuste das VAs para a distribuição lognormal.	73
5.3	Diagrama de Mohr para o modelo sintético usando a abordagem analítica simplificada.	74
5.4	Convergência do método LHS para diferentes valores de probabilidade (solução analítica simplificada).	74
5.5	FDAs finais de $\Delta p$ para a solução analítica simplificada.	76
5.6	Fatores de sensibilidade para o método AMV+ em relação à média (solução analítica simplificada).	77
5.7	Fatores de sensibilidade para o método AMV+ em relação ao desvio padrão (solução analítica simplificada).	77
5.8	Fatores de importância para o método AMV+ (solução analítica simplificada).	78
5.9	Modelo em EF para a seção transversal sintética simulada usando o programa AEEPEC2D <sup>®</sup> .	78
5.10	Relação $ST$ (denominada como $RATIO$ no gráfico) ao longo da interseção da falha com o reservatório no primeiro estágio da reativação.	80
5.11	Convergência do método LHS para diferentes níveis de probabilidade (solução numérica).	80
5.12	FDAs de $\Delta p$ para a solução numérica (métodos LHS e AMV+).	81
5.13	Fatores de sensibilidade em relação à média para o método AMV+ (solução numérica).	81
5.14	Fatores de sensibilidade em relação ao desvio padrão para o método AMV+ (solução numérica).	82
5.15	Fatores de importância para o método AMV+ (solução numérica).	82
5.16	FDAs de $\Delta p$ para as soluções analítica simplificada e numérica para o método AMV+.	83
5.17	FDAs de $\Delta p$ com VAs ajustadas por diferentes FDPs.	84
5.18	Seções que compõem horizontes e falhas geológicas.	86
5.19	Valores médios de $\Delta p$ em relação à poropressão virgem.	87
5.20	Detalhe da malha em EF da seção 2.	87
5.21	Elementos monitorados durante as análises de deslizamento das falhas geológicas.	88
5.22	Curvas de probabilidade acumulada para a seção geológica 1.	90
5.23	Curvas de probabilidade acumulada para a seção geológica 2.	90
5.24	Curvas de probabilidade acumulada para a seção geológica 3.	91
5.25	Primeiro ponto de reativação da falha 5, seção 2.	91

5.26	Processo de convergência do método AMV+.	92
5.27	Fatores de importância das VAs para a falha 1 da seção 1.	93
5.28	Relação direta entre a VA $K_{0D}$ e a resposta ( $\alpha < 0$ ).	94
5.29	Relação inversa entre a VA $\nu_D$ e a resposta ( $\alpha > 0$ ).	94
6.1	Visualização do ajuste entre as probabilidades reais e as categorias da tabela 6.7.	107
6.2	Esquema ilustrativo da seção transversal de um poço com apenas um revestimento.	109
6.3	Distribuição de probabilidade acumulada (reativação da falha geológica).	111
6.4	Importância da cada VA (reativação da falha geológica).	112
6.5	Fatores de importância relativa das VAs para $ST \approx 1$ .	112
6.6	Distribuição de probabilidade acumulada (cimento do poço).	113
6.7	Importância da cada VA (falha do cimento do poço).	113
6.8	Fatores de importância relativa das VAs para $\tau_R/\tau_{Lim} = 0,88$ .	114
6.9	Distribuição de probabilidade acumulada (deslocamento vertical da superfície).	114
6.10	Importância da cada VA (deslocamento vertical da superfície).	115
6.11	Fatores de importância relativa das VAs para $u_z = 5$ mm.	115
6.12	Arranjo tipo I das categorias de severidade.	116
6.13	Distribuições de probabilidade das categorias tipo I de severidade para a reativação da falha.	116
6.14	Indicadores de risco para $17 \text{ MPa} \leq \Delta p \leq 21 \text{ MPa}$ (categoria tipo I de severidade - reativação da falha).	118
6.15	Distribuições de probabilidade das categorias tipo I de severidade para a falha do cimento do poço.	118
6.16	Indicadores de risco para $0 \text{ MPa} \leq \Delta p \leq 23 \text{ MPa}$ (categoria tipo I de severidade - falha do cimento do poço).	119
6.17	Distribuições de probabilidade das categorias tipo I de severidade para o deslocamento vertical da superfície.	120
6.18	Arranjo tipo II das categorias de severidade.	121
6.19	Distribuições de probabilidade das categorias tipo II de severidade para a reativação da falha.	122
6.20	Indicadores de risco para $0 \text{ MPa} \leq \Delta p \leq 21 \text{ MPa}$ (categoria tipo II de severidade - reativação da falha).	123
6.21	Distribuições de probabilidade das categorias tipo II de severidade para a falha do cimento do poço.	124
6.22	Indicadores de risco para $0 \text{ MPa} \leq \Delta p \leq 34 \text{ MPa}$ (categoria tipo II de severidade - falha do cimento do poço).	125
6.23	Distribuições de probabilidade das categorias tipo II de severidade para o deslocamento vertical da superfície.	126
6.24	Indicadores de risco para $7 \text{ MPa} \leq \Delta p \leq 21 \text{ MPa}$ (categoria tipo II de severidade - deslocamento vertical da superfície).	127
6.25	Arranjo tipo III das categorias de severidade.	127
6.26	Distribuições de probabilidade das categorias tipo III de severidade para a reativação da falha.	128
6.27	Indicadores de risco para $0 \text{ MPa} \leq \Delta p \leq 21 \text{ MPa}$ (categoria tipo III de severidade - reativação da falha).	129

6.28	Distribuições de probabilidade das categorias tipo III de severidade para a falha do cimento do poço.	130
6.29	Indicadores de risco para $0 \text{ MPa} \leq \Delta p \leq 29 \text{ MPa}$ (categoria tipo III de severidade - falha do cimento do poço).	131
6.30	Distribuições de probabilidade das categorias tipo III de severidade para o deslocamento vertical da superfície.	132
6.31	Representação esquemática da metodologia para avaliar o risco da injeção de $\text{CO}_2$ .	136
A.1	Função densidade de probabilidade normal.	156
A.2	Função densidade de probabilidade normal truncada.	157
A.3	Função densidade de probabilidade lognormal.	158
A.4	Função densidade de probabilidade extremo tipo I (Gumbel).	159
A.5	Função densidade de probabilidade extremo tipo III (Weibull).	160

## Lista de tabelas

2.1	Escalas de magnitude e intensidade para sismos.	25
2.2	Escala de intensidade para sismos e seus efeitos.	26
2.3	Classificação dos sistemas e suas características de acordo com Cavanagh e Wildgust.	32
3.1	Casos de vazamento industrial de CO <sub>2</sub> através de poço.	43
3.2	Casos de vazamento natural de CO <sub>2</sub> através de falhas/fraturas.	44
4.1	Principais passos da família dos métodos do valor médio	64
5.1	Propriedades das rochas.	71
5.2	Intervalo de valores para cada VA do modelo sintético e os parâmetros ajustados para uma distribuição lognormal (Solução analítica simplificada).	72
5.3	Erros de $\Delta p$ (%) para diferentes níveis de probabilidade e para os métodos estudados (parte 1 de 2).	75
5.4	Erros de $\Delta p$ (%) para diferentes níveis de probabilidade e para os métodos estudados (parte 2 de 2).	75
5.5	Intervalo de valores para cada VA do modelo sintético e os parâmetros ajustados para uma distribuição lognormal (solução numérica).	79
5.6	Pontos retirados das curvas da figura 5.16 (FDAs de $\Delta p$ para as soluções analítica simplificada e numérica para o método AMV+).	83
5.7	Propriedades das rochas.	88
5.8	Intervalo de valores para cada VA.	89
5.9	Resultados finais de $\Delta p$ para os métodos MV e AMV+ para probabilidade de 5%.	92
5.10	Variáveis mais importantes para as falhas investigadas.	93
6.1	Frequências dos perigos ( $F_P$ ), retirados de Saripalli <i>et al.</i>	101
6.2	Valores de consequência para concentrações de CO <sub>2</sub> (X) e magnitude das consequências [X].	102
6.3	Consequências [X] e valor final do risco ( $\times 10^{-5}$ ) para cada meio e devido a um evento, retirados de Saripalli <i>et al.</i>	103
6.4	Matriz de classificação de risco de Paraguassú.	104
6.5	Matriz de risco proposta por Hnottavange-Telleen <i>et al.</i> formada por categorias classificadas de forma qualitativa.	105
6.6	Matriz de risco formada quantitativamente nas duas direções.	106
6.7	Probabilidades relacionadas com expressões qualitativas (parte da tabela de Sollie <i>et al.</i>	106
6.8	Matriz de risco formada quantitativamente na direção horizontal e qualitativamente na direção vertical.	108
6.9	Participação das VAs nos problemas avaliados.	111
6.10	Classificação tipo I das categorias de severidade.	115

6.11 Risco de cada categoria tipo I de severidade para a reativação da falha.	117
6.12 Risco de cada categoria tipo I de severidade para a falha de cimentação do poço.	119
6.13 Risco de cada categoria tipo I de severidade para o deslocamento vertical da superfície.	120
6.14 Classificação tipo II das categorias de severidade.	121
6.15 Risco de cada categoria tipo II de severidade para a reativação da falha.	122
6.16 Risco de cada categoria tipo II de severidade para a falha de cimentação do poço.	124
6.17 Risco de cada categoria tipo II de severidade para o deslocamento vertical da superfície.	126
6.18 Classificação tipo III das categorias de severidade.	128
6.19 Risco de cada categoria tipo III de severidade para a reativação da falha.	129
6.20 Risco de cada categoria tipo III de severidade para a falha de cimentação do poço.	131
6.21 Risco de cada categoria tipo III de severidade para o deslocamento vertical da superfície.	132
6.22 Risco de cada categoria tipo I de severidade para a falha de cimentação do poço utilizando parâmetros de resistência do cimento superiores.	134
6.23 Risco de cada categoria tipo II de severidade para a falha de cimentação do poço utilizando parâmetros de resistência do cimento superiores.	135
6.24 Risco de cada categoria tipo III de severidade para a falha de cimentação do poço utilizando parâmetros de resistência do cimento superiores.	135

## Lista de siglas

<b>AMV</b>	Valor Médio Avançado ( <i>Advanced Mean Value</i> )
<b>AMV+</b>	Valor Médio Avançado com Iterações ( <i>Advanced Mean Value Plus</i> )
<b>CCS</b>	Sequestro e Armazenamento de Carbono ( <i>Carbon Capture and Sequestration</i> )
<b>DNV</b>	<i>Det Norske Veritas</i>
<b>EF</b>	Elementos Finitos
<b>EOR</b>	Recuperação Avançada de Petróleo ( <i>Enhanced Oil Recovery</i> )
<b>FDA</b>	Função de Distribuição Acumulada
<b>FDP</b>	Função de Densidade de Probabilidade
<b>FORM</b>	Método de Confiabilidade de Primeira Ordem ( <i>First Order Reliability Method</i> )
<b>GEE</b>	Gases do Efeito Estufa
<b>InSAR</b>	Interferometria por radar de abertura sintética ( <i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i> )
<b>IPCC</b>	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas ( <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> )
<b>LHS</b>	Hipercubo Latino ( <i>Latin Hypercube Sampling</i> )
<b>MC</b>	Monte Carlo
<b>MEF</b>	Método dos Elementos Finitos
<b>MPP</b>	Ponto Mais Provável ( <i>Most Probable Point</i> )
<b>MV</b>	Valor Médio ( <i>Mean Value</i> )
<b>RSM</b>	Método da Superfície de Resposta ( <i>Response Surface Method</i> )
<b>RSM_BB</b>	Método da Superfície de Resposta com <i>Box Behnken</i>
<b>RSM_CC</b>	Método da Superfície de Resposta com <i>Central Composite</i>
<b>RSM_GP</b>	Método da Superfície de Resposta com Processo Gaussiano ( <i>Gaussian Process Response Surface Method</i> )
<b>RSM_K</b>	Método da Superfície de Resposta com <i>Koshal</i>
<b>USGS</b>	Serviço Geológico dos Estados Unidos ( <i>United States Geological Survey</i> )
<b>VA</b>	Variável Aleatória

## Lista de símbolos

$C$	Coesão
$C_b$	Compressibilidade volumétrica
$C_C$	Coesão do cimento
$C_f$	Coesão da falha
$C_m$	Coefficiente de compactação ou de compressibilidade uniaxial
$E$	Módulo de elasticidade
$E_A$	Módulo de elasticidade do revestimento
$E_C$	Módulo de elasticidade do cimento
$F(\cdot)$	Função de distribuição acumulada
$H$	Distância do reservatório até a superfície
$K_I$	Fator de intensidade de tensão
$K_{IC}$	Fator de intensidade de tensão crítica
$K_0$	Coefficiente de pressão lateral
$L$	Metade da espessura da rocha reservatório
$R$	Raio do reservatório
$S_\mu$	Sensibilidade probabilística em relação às mudanças no valor médio
$S_\sigma$	Sensibilidade probabilística em relação às mudanças no desvio padrão
$ST$	Tendência de Deslizamento ( <i>Slip Tendency</i> )
$V$	Volume do reservatório
$Z(X)$	Função resposta da análise probabilística
$Z_{AMV}$	VA que representa a soma dos termos de primeira ordem para o método AMV
$Z_{exact}$	Função resposta do método MV calculado para os MPP
$Z_{MV}$	VA que representa a soma dos termos de primeira ordem para o método MV
$a$	Raio interno do revestimento
$b$	Raio interno do cimento e raio externo do revestimento
$c$	Raio interno do poço e raio externo do cimento
$d$	Raio externo da formação
$f(\cdot)$	Função de densidade de probabilidade
$g(\cdot)$	Função de estado limite da análise probabilística
$h$	Espessura do reservatório
$h(X)$	Termos de ordem maior no método MV
$h(Z_{MV})$	Diferença de entre os valores de $Z_{MV}$ e $Z_{exact}$
$k_n$	Rigidez normal da falha
$k_t$	Rigidez tangencial da falha
$l$	Metade da espessura da fratura
$p$	Pressão na fratura
$pf$	Probabilidade de falha
$pf_{AS}$	Probabilidade de falha para solução analítica simplificada
$pf_{EF}$	Probabilidade de falha para solução numérica em EF
$p_{Fluid}$	Pressão do fluido de perfuração do poço
$p_{Int}$	Pressão interna no revestimento do poço

$p_0$	Pressão na fratura para fazê-la avançar pela interface das camadas quando $\epsilon = 0$
$t$	Espessura equivalente da falha
$u_z$	Deslocamento vertical na superfície
$z$	Valor particular de $Z(X)$
$\Delta h$	Expansão vertical do reservatório
$\Delta p$	Variação de poropressão na falha ou no reservatório
$\Delta p_{AS}$	Variação de poropressão na falha ou no reservatório para a solução analítica simplificada
$\Delta p_{EL}$	Variação de poropressão na falha ou no reservatório para a solução numérica em EF
$\Delta T$	Variação de temperatura em um ponto dentro do reservatório
$\alpha$	Fator de importância
$\alpha_B$	Coeficiente de Biot
$\alpha_{B_f}$	Coeficiente de Biot da falha
$\alpha_V$	Coeficiente de expansão térmica volumétrica do reservatório
$\beta$	Mínima distância do ponto de projeto até a origem no espaço independente com distribuição normal padrão
$\gamma_E$	Gradiente de tensão vertical efetiva
$\gamma_R$	Gradiente de tensão vertical total
$\epsilon$	Distância relativa da fratura propagada na região de maior tensão
$\zeta$	Desvio padrão de $\ln X$ , sendo $X$ uma variável aleatória
$\theta$	Ângulo da falha geológica
$\lambda$	Média de $\ln X$ , sendo $X$ uma variável aleatória
$\mu_X$	Média de $X$ , sendo $X$ uma variável aleatória
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\nu_A$	Coeficiente de Poisson do revestimento
$\nu_C$	Coeficiente de Poisson do cimento
$\rho$	Coeficiente de correlação
$\sigma_A$	Tensão horizontal total nas camadas adjacentes ao reservatório
$\sigma_B$	Tensão horizontal total no reservatório
$\sigma_{hmax}$	Tensão horizontal total máxima
$\sigma_{hmin}$	Tensão horizontal total mínima
$\sigma_n$	Tensão normal total
$\sigma_n'$	Tensão normal efetiva
$\sigma_{Tect}$	Tensão tectônica
$\sigma_v$	Tensão vertical total
$\sigma_X$	Desvio padrão de $X$ , sendo $X$ uma variável aleatória
$\sigma_{0C}$	Tensão inicial do cimento
$\tau$	Tensão cisalhante
$\tau_{Lim}$	Tensão cisalhante limite
$\tau_R$	Resistência ao cisalhamento do cimento
$\tau_{slip}$	Tensão cisalhante de reativação da falha
$\phi$	Ângulo de fricção
$\phi_C$	Ângulo de fricção do cimento
$\phi_f$	Ângulo de fricção da falha

*“Absolute certainty is a privilege of  
uneducated minds - and fanatics. It is,  
for scientific folk, an unattainable ideal.”*

**Cassius Jackson Keyser** , *Mathematical Philosopher of early 1900 and  
Professor of Mathematics at Columbia University .*