

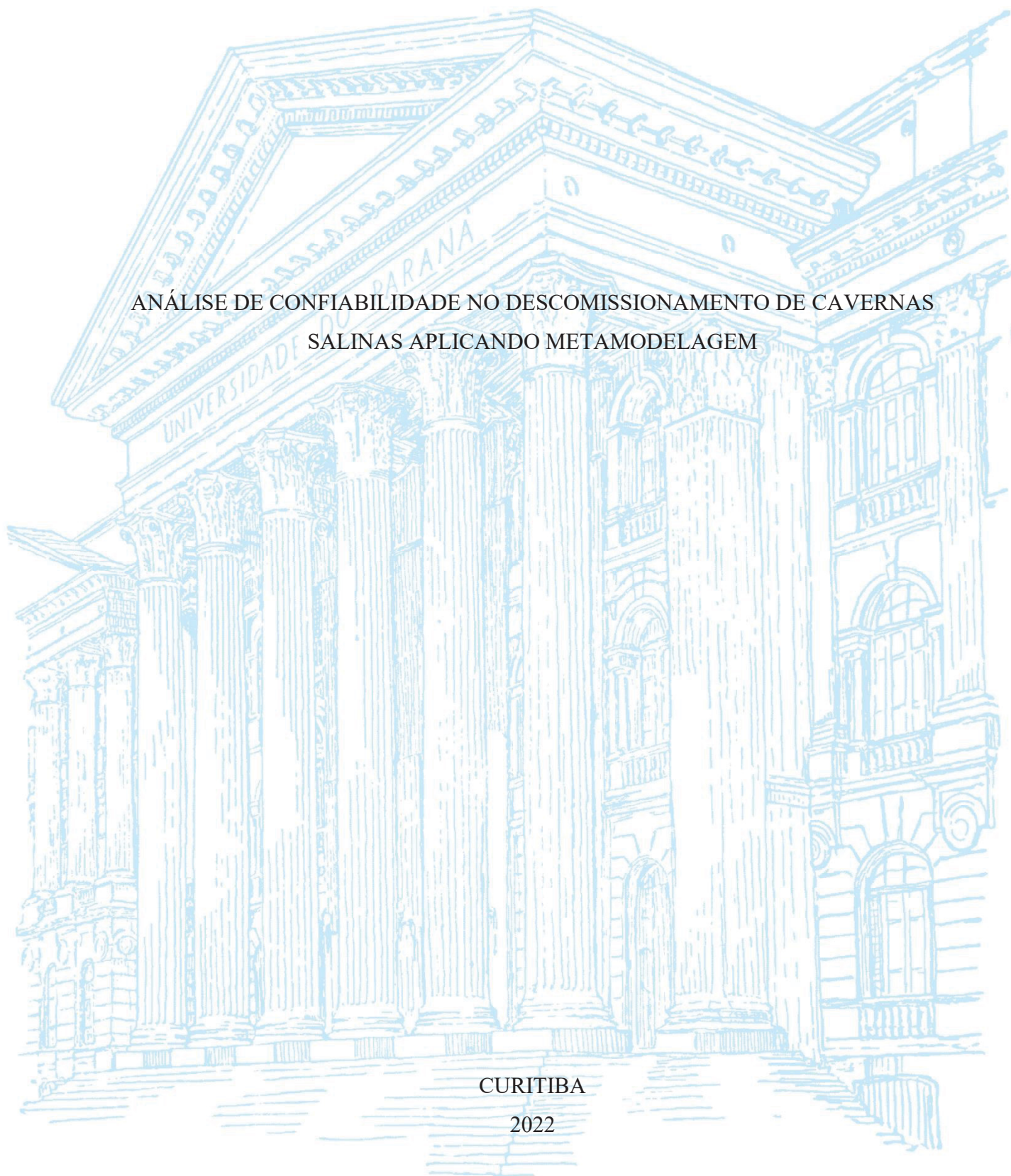
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RENATHIELLY FERNANDA DA SILVA BRUNETTA

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE NO DESCOMISSIONAMENTO DE CAVERNAS
SALINAS APLICANDO METAMODELAGEM

CURITIBA

2022



RENATHIELLY FERNANDA DA SILVA BRUNETTA

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE NO DESCOMISSIONAMENTO DE CAVERNAS
SALINAS APLICANDO METAMODELAGEM

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil na área de concentração de Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Kormann
Coorientador: Prof. Dr. Jucélio Tomás Pereira

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Brunetta, Renathielly Fernanda da Silva.

Análise de confiabilidade no descomissionamento de cavernas salinas aplicando metamodelagem. / Renathielly Fernanda da Silva Brunetta. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alessander Kormann.

Coorientador: Prof. Dr. Jucélio Tomás Pereira.

1. Construção civil. 2. Método dos elementos finitos. 3. Viscoplasticidade. 4. Depósitos salinos. I. Kormann, Alessander. II. Pereira, Jucélio Tomás. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Bibliotecário: Nilson Carlos Vieira Júnior CRB-9/1797



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL –
40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **RENATHIELLY FERNANDA DA SILVA** intitulada: **ANÁLISE DE CONFIABILIDADE NO DESCOMISSIONAMENTO DE CAVERNAS SALINAS APLICANDO METAMODELAGEM**

, sob orientação do Prof. Dr. ALESSANDER CHRISTOPHER MORALES KORMANN, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 18 de Agosto de 2022.

Assinatura Eletrônica
19/08/2022 16:13:49.0

ALESSANDER CHRISTOPHER MORALES KORMANN
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
13/09/2022 18:35:50.0

ANDRE PACHECO DE ASSIS
Avaliador Externo (null)

Assinatura Eletrônica
19/08/2022 16:36:36.0

CARLOS EMMANUEL RIBEIRO LAUTENSCHLÄGER
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA
GROSSA)

Assinatura Eletrônica 22/08/2022 17:02:19.0

GERMÁN MARCELO MARTINS VINUEZA FREIRE
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARANÁ)

Centro Politécnico - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3110 - E-mail: ppgecc@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 216520

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 216520

DEDICATÓRIA

Ao meu *pai*, à minha *mãe* e ao meu *irmão*.

AGRADECIMENTOS

O primeiro agradecimento, sem dúvidas, é ao meu orientador professor Alessandro Kormann, que mesmo com toda minha inexperiência geotécnica aceitou me conduzir nesta caminhada. Agradeço a ele também pela sugestão do tema e pelas excelentes aulas, que foram muito importantes para minha formação geotécnica.

Agradeço também ao meu coorientador, Jucélio Tomás, que deu todo o suporte necessário a parte numérica deste trabalho, tanto na implementação do modelo constitutivo quanto na concepção do modelo de elementos finitos. Agradeço pela confiança e também pela amizade construída nestes anos.

Além destes, a participação do meu colega José Eduardo Gubaua foi imprescindível para a execução deste trabalho. Agradeço a ele pelo suporte na implementação do modelo e na programação de interface entre *softwares*.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná (PPGEC/UFPR), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Araucária.

Também deixo meus agradecimentos ao professor Vitor Pereira Faro que me deu inúmeras oportunidades e muito apoio durante os primeiros anos de doutorado.

Além de conhecimento o doutorado trouxe grandes amizades, as quais foram extremamente necessárias para superar todos os obstáculos que surgem em uma pesquisa científica e, no neste momento da história, também os contratempos impostos pela pandemia. Foram inúmeras as amizades construídas, dentre elas agradeço especialmente aos meus companheiros de disciplinas: Amanda, Giancarlo, Leandro, Isabel, Isabela e Mariane. As minhas colegas Ana Mykos, Bianca e Elizangela, que compartilharam comigo os desafios de um doutorado em geotecnia. A Caroline que me ajudou revisando este texto. As minhas amigas de outras áreas: Ana Capraro, Eloíse, Giovana, Maria, Thaisa e Sarah, pelas conversas diárias relacionadas aos assuntos mais aleatórios. À Patrícia que me ajudou no período do processo seletivo e me ambientou à UFPR. E ao Cleyton que sempre esteve disposto a tirar minhas dúvidas sobre ensaios laboratoriais. Todos vocês foram importantes neste processo.

RESUMO

A alta solubilidade da halita possibilita sua extração pela técnica de dissolução. Este método destaca-se entre as demais técnicas de extração de sal-gema pelo baixo custo, em relação à mineração por galerias, e a não ocupação da superfície do terreno. No entanto, a ocorrência de eventos de subsidências em campos de mineração por dissolução é recorrente em várias partes do mundo. A subsidência é um fenômeno que consiste no solapamento do nível do terreno em decorrência da formação de cavidades em sub-superfície. Neste trabalho, estuda-se o comportamento de minas descomissionadas ao longo de um período de 50 anos, considerando as incertezas inerentes ao problema. A partir de uma revisão sistemática de literatura os principais métodos de controle de subsidência foram identificados e classificados quanto a sua aplicabilidade, como métodos de prevenção, monitoramento ou remediação. Diante do conhecimento das técnicas utilizadas é proposta uma metodologia de predição que combina três técnicas de controle: ensaios geofísicos, modelagem numérica do comportamento estrutural e análise de confiabilidade. Os ensaios geofísicos possibilitam o conhecimento dos estratos geológicos e formatos das minas, a modelagem geomecânica prevê o comportamento das cavernas salinas e a abordagem probabilística permite uma análise de confiabilidade do descomissionamento das minas. As simulações numéricas via Método dos Elementos Finitos foram baseadas no modelo constitutivo de Múltiplos Mecanismos de Deformação, o qual representa o comportamento de fluência da rocha salina. Ademais, é considerado o critério de Ratigan para verificação da ocorrência de dano na caverna. Análises de sensibilidade global Sobol'/Saltelli e aplicação do Método de Monte Carlo para verificação da probabilidade de falha requerem milhares de simulações para serem realizadas, com intuito de reduzir o custo computacional, utilizou-se a técnica de metamodelagem POD-RBF. O metamodelo foi capaz de substituir o modelo numérico com um ajuste satisfatório. A análise de sensibilidade mostrou que a grande sensibilidade do modelo à pressão interna da caverna, faz com que os outros parâmetros não influenciem significativamente no comportamento da caverna. Quanto a probabilidade de falha, foi realizada uma análise quanto ao nível de incerteza, onde os valores de probabilidade de falhas foram de 2,64% para o cenário pessimista, 0,34% para o cenário neutro e não ocorrem falhas nas 40000 avaliações realizadas no cenário otimista.

Palavras-chave: Sal-gema. Viscoplasticidade. Metamodelo. Análises probabilísticas. Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

The high solubility of halite allows its extraction by the solution technique. This method stands out among other techniques of rock salt extraction due to its low cost, compared to mining by galleries, and the non-occupancy of the land's surface. However, subsidence events in solution mining fields are recurrent in many parts of the world. Subsidence happens because of the ground-level undermining due to the formation of subsurface cavities. This work studies the behavior of decommissioned mines for over 50 years, considering the uncertainties inherent to the decommissioning problem. From a systematic literature review, the main subsidence control methods were identified and classified as to their applicability, as methods of prevention, monitoring or remediation. Given the knowledge of the techniques presented, this study introduces a prediction method of instability of salt caverns. This method combines geophysical tests, numerical modeling of structural behavior, and reliability analysis. The geophysical tests identify the characteristics of the geological strata and the mine's shape, The geomechanical modeling predicts the behavior of saline caverns, And the probabilistic approach performs a reliability analysis of the mine's decommissioning. The numerical approach uses the Finite Element Method, which allows simulating the creep behavior of the saline rock by using the Multiple Mechanisms of Deformation. Also, the Ratigan criterion is considered to predict the occurrence of damage in the cavern. Another behavior simulated in this study is the failure probability. Both Sobol'/Saltelli global sensitivity analysis and the Monte Carlo experiment need several simulations to verify the failure of the material. In this sense, the POD-RBF metamodel was implemented to reduce the computational cost. The metamodel replaces the numerical model with a satisfactory fit. The sensitivity analysis showed that the model has a meaningful sensitivity to the internal pressure of the cavern. Other parameters evaluated did not produce a significant influence on the behavior. As for the failure probability, it was carried out an analysis regarded three scenarios called pessimistic, neutral, and optimistic. The analysis considered the level of uncertainty and 40,000 interactions. The results showed a failure probability of 2.64%, 0.34%, and no failure for pessimistic, neutral, and optimistic scenarios.

Keywords: Rock salt. Viscoplasticity. Metamodel. Probabilistic analyses. Finite Element Method.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – (A) Estrutura atômica da halita. (B) Fotomicrografia de cristais de halita.....	27
FIGURA 2 – (A) Cristais de halita. (B) Testemunhos de sondagem de halita.....	27
FIGURA 3 – Distribuição global das bacias salinas	29
FIGURA 4 – Ocorrência de domos salinos em bacia sedimentar	30
FIGURA 5 - Litoestratigrafia geral da Bacia de Sergipe/Alagoas	31
FIGURA 6 – Dissolução subterrânea em sal-gema: (A) Poços múltiplos. (B) Poço isolado ..	35
FIGURA 7 – Principais fases da selagem e abandono da caverna.....	36
FIGURA 8 – Afundamento associado à convergência/colapso do teto de cavernas de sal	40
FIGURA 9 – Região em estudo.....	41
FIGURA 10 – Evolução da velocidade de subsidência semestral.....	42
FIGURA 11 – Levantamento interferométrico	42
FIGURA 12 – Modelo de densidades do corte ab.....	43
FIGURA 13 - Localização das minas de sal	44
FIGURA 14 - Seção transversal das minas 30D (a) e 31D (b)	45
FIGURA 15- Tensões verticais e temperatura ao longo do estrato	46
FIGURA 16 – Quantidade de artigos ao longo do tempo	51
FIGURA 17 – Número de aplicações de cada técnica nos artigos selecionados.	54
FIGURA 18 – Fases da deformação por fluência no sal (carga constante).....	59
FIGURA 19 – Estágios da deformação da rocha salina	60
FIGURA 20 – Curva genérica da taxa de fluência da halita	60
FIGURA 21 – Limites de dilatação apresentados em um mesmo espaço de tensões	64
FIGURA 22 – Esquematização do Modelo de Maxwell.....	66
FIGURA 23 –Esquematização do modelo de Kelvin/voigt.....	67
FIGURA 24 – Esquematização do Modelo de Burgers	68
FIGURA 25 – Mapa de Mecanismos de deformação.....	71
FIGURA 26 – Regimes de deformação ligados à lei Viscoplastica de Múltiplos Mecanismos	75
FIGURA 27 – Fluxograma da subrotina do modelo mmd com critério de dilatação	82
FIGURA 28 – Dimensões e condições de contorno aplicadas no modelo sintético.	83
FIGURA 29 – Comparação entre resultados numéricos e resultados experimentais de ensaios de compressão triaxial em sal gema	85

FIGURA 30 – Geometria e dimensões da caverna obtidas por sonar em 2015 (azul) e 2018 (marsala) e elipsoide que representa a simplificação adotada (vermelho). ...	86
FIGURA 31 – Estratigrafia, condições de contorno e dimensões usadas para representar a caverna.....	87
FIGURA 32 – Modelo axissimétrico e discretização da malha de elementos finitos. (a) detalhe dos pontos de análise. (b) revolução parcial do plano de análise	88
FIGURA 33 – Tensão equivalente de von Mises referente ao Doe 1.	91
FIGURA 34 – Deformação equivalente por fluência ao redor da caverna para os Does estudados	92
FIGURA 35 – Taxa de deformação equivalente no ponto C	93
FIGURA 36 – Deformação equivalente no ponto C.	93
FIGURA 37 – Percentual do redução do volume ao longo do tempo	94
FIGURA 38 – Magnitude dos deslocamentos dos pontos analisados.	95
FIGURA 39 – Fator de dano (D) ao redor da caverna para os DOEs analisados.	96
FIGURA 40 – Fator de dano (D) após 50 anos de análise	97
FIGURA 41 - Esquema simplificado da metodologia de análise de sensibilidade global Sobol.	100
FIGURA 42 - Vetores quase colineares e suas projeções no sistema de coordenadas original e novo sistema de coordenadas	105
FIGURA 43 - Fluxograma esquemático da abordagem POD-RBF.	109
FIGURA 44 – Hipercubo latino com 3 variáveis de entrada e 10 pontos amostrais visto em três dimensões juntamente com suas projeções bidimensionais. Todos os dez pontos são visíveis em cada um dos lados, mostrando que cada linha e coluna de cubos contém exatamente um ponto.	111
FIGURA 45 – Funções de densidade de probabilidade para distribuição normal dos parâmetros elásticos do sal e do <i>overburden</i>	114
FIGURA 46 – Funções de densidade de probabilidade para as distribuições lognormais dos parâmetros do modelo de múltiplos mecanismos de deformação	115
FIGURA 47 – Função de densidade de probabilidade para a distribuição normal da pressão interna da caverna salina.....	115
FIGURA 48 – Principais arquivos utilizados na automatização das simulações numéricas utilizadas para treinar o metamodelo	117
FIGURA 49 – Convergência do índice de sensibilidade primário para o critério de deformação.	119

FIGURA 50 - Convergencia do índice de sensibilidade total para o critério de deformação.	119
FIGURA 51 - Índices de sensibilidade primário e total do critério de deformação.	120
FIGURA 52 - Convergência do índice de sensibilidade primário para o critério de dano.....	121
FIGURA 53 - Convergencia do índice de sensibilidade total para o critério de dano.	121
FIGURA 54 - Índices de sensibilidade primário e total do critério de dano.	122
FIGURA 55 – Função de falha.....	125
FIGURA 56 – Função densidade de probabilidade.....	128
FIGURA 57 – Coeficiente de variação da probabilidade de falha versus o número de amostras	129
FIGURA 58 - Probabilidade de falha para os cenários considerados	131
FIGURA 59 – Relação entre o fator de dano e a pressão interna para as simulações dos três cenários de incertezas analisados	133
FIGURA 60 – Função de distribuição acumulada (FDA) do fator de dano para os cenários.	133
FIGURA 61 – Histograma bivariado com mapa de intensidade relacionando o fator de dano e a pressão interna.	134
FIGURA 62 - Diagrama de dispersão tridimensional relacionando a pressão interna da caverna a deformação no ponto C e a o fator de dano no ponto C.....	135

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Trabalhos que modelaram cavernas salinas pelo Método de Elementos Finitos	24
TABELA 2 – Composição química dos principais minerais evaporíticos	28
TABELA 3 – Resistência à compressão simples, parâmetros de elasticidade e massa específica dos principais evaporitos brasileiros.....	34
TABELA 4 – Ranque dos cenários de risco para abandono de minas de sal.....	37
TABELA 5 – Volume das minas 30d e 31d a partir de análise de sonares.....	45
TABELA 6 – Protocolo de pesquisa	49
TABELA 7 – Casos de subsidência reportados nos artigos selecionados.....	53
TABELA 8 – Parâmetros do modelo de múltiplos mecanismos para diferentes regiões.....	79
TABELA 9 – Projeto de experimentos determinísticos	89
TABELA 10 – Distribuições de probabilidade dos parâmetros analisados.	114
TABELA 11 – Relação do índice de confiabilidade e a probabilidade de falha.....	128
TABELA 12 – Representação da incerteza nos parâmetros de entrada	130
TABELA 13 – Probabilidade de falha e índices de confiabilidade dos cenários.....	131

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	-	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Ensaaios e Materiais)
DC	-	<i>Dislocation Climb</i> (escalonamento de discordâncias)
DG	-	<i>Dislocation Glid</i> (deslizamento de discordâncias)
FORM	-	<i>First Order Reliability Method</i> (Método de confiabilidade de primeira ordem)
GETVRM	-	<i>Get Variable Material</i> (Obter variável do material)
GNSS	-	<i>Global Navigation Satellite System</i> (Sistema global de navegação por satélite)
GPS	-	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de posicionamento global)
ISO	-	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
JCSS	-	<i>Joint Committee on Structural Safety</i> (Comitê Conjunto de Segurança Estrutural)
MMD	-	Múltiplos Mecanismos de Deformação
MPP	-	<i>Most Probable Point</i> (Ponto mais provável)
PDF	-	<i>Probability density function</i> (Função densidade de probabilidade)
PSInSAR	-	<i>Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar</i> (Interferometria por Radar de Abertura Sintética)
SORM	-	<i>Second Order Reliability Method</i> (Método de confiabilidade de primeira ordem)
SSC	-	<i>Steady State Cracking</i> (Fissuramento Estacionário)
UMC	-	<i>Undefined Mechanism</i> (Mecanismo indefinido)
USDFLD	-	<i>User Defined Field</i> (Campo definido pelo usuário)
WIPP	-	<i>Waste Isolation Pilot Plant</i> (Planta piloto de isolamento de resíduos)
TNO	-	<i>Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek</i> (Instituto Holandês de Geociência Aplicada)

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS LATINOS

A	- Produto da multiplicação entre B, C e D
$A_{1,2}$	- Constantes do critério de Hunsche modificado
A_1	- Parâmetro estrutural do material no domínio do <i>Dislocation climb</i>
A_2	- Parâmetro estrutural do material no domínio <i>Undefined mechanism</i>
a	- Constante do critério de Spiers e do critério de Ratigan
B	- Fator estrutural relacionado à tensão equivalente da Lei da potência
$B_{1,2}$	- Constantes do critério de Hunsche modificado
b	- Constante do critério de Spiers
C	- Fator estrutural relacionado ao tempo da Lei da potência
$C_{1,2}$	- Constantes do critério de Hunsche modificado
c	- Constante teórica
D	- Fator estrutural relacionado à temperatura da Lei da potência
D_1	- Constante do critério de DeVries
D_2	- Constante do critério de DeVries
E	- Módulo de elasticidade
F	- Função transiente
f_1	- Constante do critério de Hunsche
f_2	- Constante do critério de Hunsche
$f(\mathbf{X})$	- Função densidade de probabilidade multivariável
G	- Módulo de elasticidade transversal
$G_{1,2}$	- Constantes do critério de Hunsche modificado
G_1	- Coeficiente de amortecedor de Maxwell
G_2	- Coeficiente de amortecedor de Kelvin/ Voigt
g	- Aceleração da gravidade
$g(\mathbf{X})$	- Função de falha

I_1	- Primeiro invariante de tensões
J_2	- Segundo invariante de tensões desviadoras
K	- Limite de Prandtl
k	- Expoente do critério de DeVries
m	- Expoente relacionado ao tempo da Lei da potência
m	- Constante teórica
n	- Expoente relacionado à tensão equivalente da Lei da potência
n_1	- Expoente característico do mecanismo de deformação <i>Dislocation climb</i>
n_2	- Expoente característico do mecanismo de deformação <i>Undefined mechanism</i>
P_f	- Probabilidade de falha
Q_1	- Energia de ativação material no domínio do <i>Dislocation climb</i>
Q_2	- Energia de ativação material no domínio <i>Undefined mechanism</i>
R	- Constante universal dos gases
s	- Fator de escala viscoplástico
T	- Temperatura
t	- Tempo
$Z(X)$	- Função de performance

SÍMBOLOS GREGOS

α_h	- Constante de endurecimento
α_s	- Constante de amolecimento
β	- Índice de confiabilidade
β_h	- Constante de endurecimento
β_s	- Constante de amolecimento
Δ	- Parâmetro de endurecimento
δ	- Parâmetro de amolecimento
$\Delta\epsilon_n^{trial}$	Vetor de incremento de deformação elástica
$\Delta\epsilon_n^{vp}$	Vetor de incremento de deformação viscoplástica
γ	- Peso específico
ϵ	- Deformação
$\bar{\epsilon}^{tr}$	- Deformação equivalente transiente
$\bar{\epsilon}^{vp}$	- Deformação equivalente viscoplástica

$\dot{\varepsilon}_A$	- Taxa de deformação do amortecedor
$\dot{\varepsilon}_{DCL}$	- Taxa de deformação por fluência pelo mecanismo <i>Dislocation climb</i>
$\dot{\varepsilon}_{DGL}$	- Taxa de deformação por fluência pelo mecanismo <i>Dislocation glid</i>
$\dot{\varepsilon}_{FP}$	- Taxa de deformação por fluência primária
$\dot{\varepsilon}_{FS}$	- Taxa de deformação por fluência secundária
$\dot{\varepsilon}_M$	- Taxa de deformação da mola
$\dot{\varepsilon}_{UMC}$	- Taxa de deformação por fluência pelo <i>Undefined mechanism</i>
$\dot{\varepsilon}$	- Taxa de deformação por fluência
ε_{h1}	- Deformação horizontal menor <i>in situ</i>
ε_{h2}	- Deformação horizontal maior <i>in situ</i>
ε_{cr}	- Deformação por fluência
ε_e	- Deformação elástica
ε_p	- Deformação plástica
$\zeta^{(i)}$	- Controle do tamanho do <i>step</i> da função mérito
η_1	- Coeficiente de mola de Maxwell
η_2	- Coeficiente de mola de Kelvin/ Voigt
θ	- Ângulo de Lode
μ	- Módulo de cisalhamento
ν	- Coeficiente de Poisson
ρ	- Massa específica
σ	- Tensão principal
σ_{h1}	- Tensão horizontal menor <i>in situ</i>
σ_{h2}	- Tensão horizontal maior <i>in situ</i>
σ_d	- Tensão desviadora
$\sigma_{d.cr}$	- Tensão desviadora crítica
σ_{eq}	- Tensão equivalente
σ_n^{trial}	Vetor de tensões elásticas
σ_m	- Tensão média <i>in situ</i>
σ_v	- Tensão vertical <i>in situ</i>
v	- Expoente relacionado à temperatura da Lei da potência
$\omega^{(k)}$	- Valor da função de mérito

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 JUSTIFICATIVA	21
1.1.1 Justificativa técnico-científica	21
1.1.2 Justificativa econômica.....	21
1.1.3 Justificativa social	22
1.2 OBJETIVOS	23
1.2.1 Objetivo geral	23
1.2.2 Objetivos específicos.....	23
1.3 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	23
1.4 ESTRUTURA DA TESE	25
2 MINERAÇÃO DE SAL-GEMA.....	26
2.1 SAL-GEMA	26
2.2 DEPÓSITOS SALINOS.....	28
2.3 PARÂMETROS E PROPRIEDADES DA HALITA BRASILEIRA.....	33
2.4 MINERAÇÃO DE SAL-GEMA POR DISSOLUÇÃO	34
2.5 DESCOMISSIONAMENTO DE CAVERNAS SALINAS.....	35
2.6 MOVIMENTOS DE SUPERFÍCIE	37
2.6.1 Fatores que influenciam as subsidências em áreas de mineração	38
2.6.1.1 Fatores geológicos.....	39
2.6.1.2 Fatores relacionados à mineração.....	39
2.7 MINERAÇÃO DE SAL-GEMA NO BRASIL	41
2.7.1 Localização da região de estudo e contextualização do problema	41
2.7.2 Caracterização geológico-geotécnica	43
2.7.3 Geometria das cavernas	44
2.7.4 Tensões e temperaturas <i>in situ</i>	45
3 REVISÃO SISTEMÁTICA: TÉCNICAS DE CONTROLE DE SUBSIDÊNCIA.....	47
3.1 MÉTODO DE REVISÃO SISTEMÁTICA APLICADO.....	47
3.1.1 Coleta de material.....	48
3.1.2 Seleção do material.....	48
3.2 REVISÃO SISTEMÁTICA	51
3.2.1 Análise geral.....	51

3.2.2 Tipo de controle.....	52
3.2.3 Casos de subsidência	52
3.2.4 Técnicas de controle	54
3.3 CONCLUSÕES	56
4 COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE ROCHAS SALINAS.....	58
4.1 FLUÊNCIA DA ROCHA SALINA	58
4.2 DILATÂNCIA	61
4.3 MODELOS CONSTITUTIVOS REPRESENTATIVOS DO SAL-GEMA.....	64
4.3.1 Modelos reológicos	65
4.3.1.1 Modelo de Maxwell.....	65
4.3.1.2 Modelo de Kelvin/Voigt.....	67
4.3.1.3 Modelo de Burgers	68
4.3.2 Modelo empírico potencial.....	69
4.3.3 Modelo físico de múltiplos mecanismos de deformação.....	70
4.3.4 Modelo constitutivo de duplo mecanismo de deformação.....	74
4.4 PARÂMETROS DO MODELO DE MÚLTIPLOS MECANISMOS	78
5 MODELO NUMÉRICO DETERMINÍSTICO	80
5.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE MÚLTIPLOS MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO E DO CRITÉRIO DE DILATÂNCIA	80
5.2 VALIDAÇÃO DO MODELO CONSTITUTIVO	83
5.3 GEOMETRIA DA MINA	85
5.4 ESTRATIGRAFIA, CONDIÇÕES DE CONTORNO E CONDIÇÕES INICIAIS	86
5.5 EXPERIMENTOS NUMÉRICOS E CRITÉRIO DE ESTABILIDADE	88
5.5.1 Critério de deformação	89
5.5.2 Critério de dano	89
5.6 ANÁLISES DETERMINÍSTICAS	90
5.6.1 Deformação na caverna salina.....	90
5.6.2 Critério de dano	95
5.7 CONCLUSÕES.....	97
6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE GLOBAL	99
6.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DE SOBOL’/SALTELLI	102
6.2 METAMODELAGEM.....	103
6.2.1 Algoritmo POD-RBF.....	104
6.3 PROJETO DE EXPERIMENTOS	110

6.4 INCERTEZAS DO MODELO GEOMECÂNICO	112
6.5 INTERFACE ENTRE <i>SOFTWARES</i>	116
6.6 RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE SOBOL’/SALTELLI.....	118
6.7 CONCLUSÕES.....	122
7 ANÁLISES PROBABILÍSTICAS	124
7.1 FUNÇÕES DE ESTADO LIMITE	125
7.2 PROBABILIDADE DE FALHA E ÍNDICE DE CONFIABILIDADE	127
7.3 SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO.....	128
7.4 CONCLUSÕES.....	135
8 CONCLUSÕES.....	136
8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	138
REFERÊNCIAS	140

1 INTRODUÇÃO

A rocha formada pelo cloreto de sódio (NaCl) é chamada de sal-gema ou halita e é um recurso de alta demanda. O sal-gema começou a ser explorado no mesmo período em que as primeiras civilizações se fixaram, cerca de 10 mil anos atrás. O sal é uma substância essencial ao organismo do ser humano e dos demais animais, além disso, sua capacidade de conservar alimentos intensificou sua exploração. Devido a sua importância, este mineral já foi usado como moeda e foi também motivos de guerras entre povos. Hoje em dia, o sal-gema, além de ser utilizado na culinária, é empregado também para fabricação de fármacos, agroquímicos, produtos de limpeza, polímeros, para derreter a neve de pavimentos em regiões frias entre outras aplicações (RALSTON et al., 2020).

Depósitos de sal-gema podem ocorrer a centenas de metros de profundidade e a técnica utilizada para a extração em profundidade é a dissolução por poços. Utilizando esta técnica, são formadas cavidades, as chamadas cavernas salinas. A extração por dissolução é uma técnica aplicada há séculos, e se baseia na abertura de cavidades subterrâneas (o processo está detalhado no *CAPÍTULO 2*). Estas cavernas salinas, após a extração da quantidade planejada, devem ser pressurizadas de forma tal que seja gerado um equilíbrio entre o fluido de preenchimento e a tensão média *in situ*, para evitar instabilidades nas cavernas.

Thoraval et al. (2015) destaca que a pressão interna das cavernas de halita depende do aquecimento (e consequente expansão) da salmoura que é injetada como fluido de preenchimento, do fechamento da caverna por fluência, da permeabilidade da rocha salina circundante, das condições de selagem do poço de extração e da dissolução adicional ocorrida após a injeção da salmoura, pois esta nunca estará totalmente saturada.

Devido à dificuldade de controle de todos estes fatores e aliado ao comportamento geomecânico natural da halita, pequenas taxas de convergência das cavernas são inevitáveis. Este volume convergido pode deflagrar um movimento da superfície do terreno, fenômeno conhecido como subsidência. Apesar da subsidência ser um comportamento típico de áreas de mineração de sal por dissolução, suas taxas de abaixamento do terreno acima das cavernas devem ser as menores que as técnicas de engenharia possam garantir, tendo em vista a manutenção do desempenho das atividades realizadas na região.

Esta pesquisa foi motivada pela ocorrência de problemas geotécnicos em áreas de extração de sal-gema por dissolução localizadas em Maceió, capital de Alagoas, estado localizado na região nordeste do Brasil. Nesta localidade foi registrado o primeiro evento de subsidência desta natureza no Brasil. Como é mostrado nos próximos capítulos, diversas

pesquisas têm sido realizadas a fim de compreender o complexo comportamento de cavernas em ambientes evaporíticos.

Neste trabalho é proposta e aplicada uma combinação de técnicas para realizar uma análise de confiabilidade do descomissionamento de minas de sal. A necessidade deste estudo é justificada no item a seguir.

1.1 JUSTIFICATIVA

O estudo de subsidências em áreas de mineração de halita é necessário por demandas de dimensão técnico-científica, econômica e social. Estas demandas são discutidas na seções subsequentes.

1.1.1 Justificativa técnico-científica

A pesquisa nacional está bastante avançada no comportamento geomecânico do pré-sal devido à necessidade de sua perfuração para extração de petróleo e estudos de viabilidade de armazenagem de hidrocarbonetos em cavernas salinas. Neste sentido, pode-se citar os trabalhos de Costa et al. (2014), Costa et al. (2017) Firme et al. (2018), Firme et al. (2019), Quevedo et al. (2019) e Costa (2019) que foram publicados recentemente em periódicos de reconhecimento mundial.

No entanto, o estudo da convergência de minas de sal-gema *onshore* ainda não é muito abordado. Diante da ocorrência de eventos de afundamento de terreno no Nordeste da costa brasileira e em outros países, conforme mostra a revisão sistemática apresentada neste trabalho, pesquisas nesta área são necessárias. Esta necessidade é agravada pela ocupação do solo da região atingida, a qual é intensamente urbanizada.

Regionalmente, o estudo da deflagração de eventos de subsidência também é relevante devido as ocorrências já registradas. Zuquette (2018) apresenta casos de subsidência ocorrido em Curitiba – PR, devido ao ambiente cárstico. Nos casos registrados em Curitiba houve perdas econômicas e inviabilização de utilização de edificações.

1.1.2 Justificativa econômica

O método de extração de sal por dissolução é um processo acentuadamente menos oneroso que o método de extração por galerias, porque não utiliza maquinários pesados, não

requer grande quantidade de funcionários e o transporte até a estação de processamento pode ser realizada por salmoro-dutos. Outra vantagem da extração por dissolução é a não ocupação da superfície, permitindo utilização da área para outras finalidades, tendo em vista que na superfície situa-se apenas o topo de poço.

O desenvolvimento de técnicas seguras de mineração por dissolução também são de interesse econômico nacional, devido às reservas de potássio existentes no Brasil (silvinita e carnalita). Assis (1990) e Poiate Junior (2012), em seus trabalhos, apresentaram e analisaram o comportamento de fluência de rochas ricas em potássio.

Conforme apresentado no Sumário Mineral Brasileiro de 2018, elaborado pela Agência Nacional de Mineração (ANM, 2019), na última década, a produção brasileira de sal-gema foi de aproximadamente 7,5 milhões de toneladas por ano, sendo que em 2018 Alagoas e Bahia foram responsáveis por 20% desta quantidade.

O controle inadequado de subsidências pode também representar custos ao Estado, empresas e população. Estes custos são devidos às necessidades de campanhas da Defesa Civil para mitigar as consequências das subsidências, à demanda de recuperação de estruturas públicas e privadas afetadas pelo movimento de superfície, à desapropriação de moradias e outras edificações condenadas estruturalmente, entre outros custos diretos e indiretos.

1.1.3 Justificativa social

É recorrente a ocorrência de instabilidades de superfícies ocasionadas por dissolução de sal em áreas densamente urbanizadas, podendo provocar patologias em estruturas de engenharia como residências, comércios e obras de infraestrutura. Para reduzir estes efeitos estudos de confiabilidade do descomissionamento de cavernas de sal-gema são necessários. Melhorar as técnicas de extração também é um interesse social, pois o NaCl e o potássio são produtos de alta demanda da sociedade.

Eurípedes Malavolta, pesquisador brasileiro e professor da Universidade de São Paulo da área de manejo e fertilidade do solo, ressalta que o potássio é um mineral essencial ao desenvolvimento das plantas e que o teto de produtividade agrícola poderia diminuir com a escassez de potássio (MALAVOLTA et al., 1997; MALAVOLTA, 2006).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise de confiabilidade do descomissionamento de cavernas salinas pela análise numérica do comportamento geomecânico da halita a longo prazo, considerando da fluência transiente e estacionária e um critério de dilatância.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. Verificar, por meio de análises determinísticas, a relação entre a variação da pressão interna e o comportamento geomecânico de cavernas salinas;
- ii. Elaborar uma interface de programação de aplicação (API) que permita que o *software* de elementos finitos utilize o modelo constitutivo implementado em linguagem FORTRAN e que obtenha os *outputs* requeridos para todos os conjuntos de dados utilizados para desenvolver o metamodelo de forma automatizada;
- iii. Desenvolver um metamodelo que seja capaz de substituir o modelo de elementos finitos nas análises probabilísticas afim de diminuir o custo computacional para realizar tais análises;
- iv. Avaliar a sensibilidade do modelo aos parâmetros analisados, em relação a deformação da rocha salina e ao valor do fator de dano, possibilitando ranquear a influência dos parâmetros;
- v. Realizar uma análise probabilística para as cavernas em estudo aplicando o método de Monte Carlo e utilizando o metamodelo de desenvolvido;

1.3 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

A inovação deste trabalho consiste na combinação de três técnicas de controle para análise de subsidências. Esta escolha foi pautada na revisão sistemática de literatura apresentada

no *CAPÍTULO 3* desta tese. A TABELA 1 apresenta os 13 trabalhos encontrados na literatura sobre modelagem numérica de convergência de minas pelo Método dos Elementos Finitos e mostra quais utilizaram um formato da mina baseado em ensaios geofísicos, que aplicaram uma abordagem probabilística e qual modelo constitutivo utilizado.

Observando a TABELA 1, percebe-se que existem diversos trabalhos recentes sobre este tema. No entanto, alguns deles não retratam minas de extração de sal, e sim cavernas de armazenamento de gás natural *offshore*. A partir de revisão de literatura sistemática realizada, selecionaram-se as técnicas de controle de subsidência. Porém, com o aprofundamento do estudo, identificou-se a existência de diversos estudos sobre construção de cavernas em estratos salinos para armazenamento de hidrocarbonetos e observou-se a similaridade entre os temas. Desta forma, durante a pesquisa diversos trabalhos que utilizam cavernas salinas como reservatório foram utilizados como referência.

A concepção do modelo de tensões para cavernas salinas de extração de sal e de armazenamento de hidrocarbonetos são congruentes, por isso ambas as aplicações foram apresentadas na TABELA 1.

TABELA 1 – TRABALHOS QUE MODELARAM CAVERNAS SALINAS PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Trabalho	Abordagem probabilística	Conhecimento do formato da mina	Modelo constitutivo
Fokker (1995)	Não	Não	Mecanismos de deformação
Bérest et al. (2001)	Não	Sim	Norton-Hoff
Moghadam et al. (2013)	Não	Não	Cristescu
Ghasemloonia; Butt (2015)	Não	Não	Potencial
Yu; Liu (2015)	Não	Não	Proposta de modelo
Thoraval, et al. (2015)	Sim	Não	Norton-Hoff
Shahmorad et al. (2016)	Não	Não	Burger, WIPP e Potencial
Khaledi et al. (2016)	Não	Não	Lubby2
Zhang et al. (2017)	Sim	Não	Potencial
Costa et al. (2017)	Não	Sim	Mecanismos de deformação
Wang et al. (2018)	Não	Sim	Norton-Hoff
Reedlunn (2018)	Não	Sim	Mecanismos de deformação
Costa (2019)	Não	Sim	Mecanismos de deformação
Este trabalho	Sim	Sim	Mecanismos de deformação

FONTE: A AUTORA (2020).

1.4 ESTRUTURA DA TESE

O presente texto está organizado em oito capítulos a fim de apresentar o problema da pesquisa, contextualizar o atual estado da arte do tema abordado e propor uma metodologia de trabalho e apresentar os resultados e conclusões da pesquisa.

Os cinco primeiros capítulos fazem parte do estudo bibliográfico necessário para a realização desta pesquisa.

O *CAPÍTULO 1* introduz o tema, justifica a necessidade da pesquisa, propõe objetivos a serem atingidos pelo trabalho e destaca as contribuições e as inovações apresentadas neste trabalho.

No *CAPÍTULO 2* é apresentada uma revisão acerca dos conceitos básicos sobre o sal-gema. Observa-se que o estudo da composição mineral e características físicas, forma de deposição na natureza e método de extração são de extrema importância para uma modelagem coerente com o ambiente natural. Os fatores que deflagram subsidências em áreas de mineração são apresentados, considerando tanto as razões geológicas quanto as antrópicas.

Uma revisão sistemática de literatura é apresentada no *CAPÍTULO 3* com vistas à compreensão do atual estado da arte sobre as técnicas de controle de subsidências praticadas em todo o mundo.

O *CAPÍTULO 4* apresenta o comportamento geomecânico do sal-gema e os modelos constitutivos que costumam ser utilizados para representá-lo.

Os *CAPÍTULOS 5, 6 e 7* apresentam os resultados da pesquisa. Segundo Fossum; Fredrich (2007), para que uma abordagem probabilística seja utilizada, deve-se seguir uma modelagem determinística considerada suficiente. Neste sentido, o Modelo de Múltiplos Mecanismos de Deformação foi implementado em um *software* de elementos finitos por meio de um código escrito em linguagem FORTRAN, assim o *CAPÍTULO 5* apresenta o modelo determinístico concebido. O *CAPÍTULO 6* apresenta a metodologia de metamodelagem e as análises de sensibilidade. Devido às incertezas existentes quanto aos parâmetros do modelo, uma abordagem probabilística é utilizada para realizar uma análise de confiabilidade do descomissionamento das minas, esta análise é apresentada no *CAPÍTULO 7*.

As conclusões do trabalho são apresentadas no *CAPÍTULO 8*, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 MINERAÇÃO DE SAL-GEMA

A análise de um problema qualquer de engenharia geotécnica deve partir do conhecimento da geologia do ambiente de estudo. Por isso, torna-se necessário o conhecimento da litologia, estrutura e técnicas de prospecção do sal-gema.

Neste capítulo são apresentadas as características do sal-gema, sua forma de disposição na natureza, a técnica de lavra estudada neste trabalho, as práticas usuais no descomissionamento de minas por dissolução e os efeitos ambientais da extração de sal-gema.

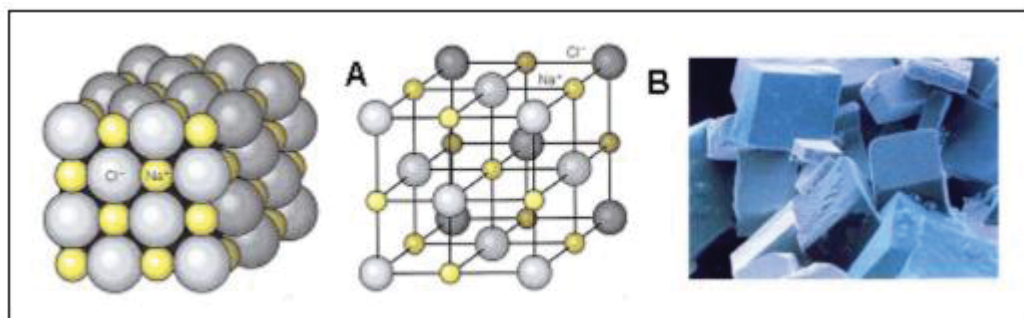
2.1 SAL-GEMA

O sal-gema é uma rocha sedimentar formada pela deposição de sais muito solúveis em água, podendo então, ser classificada como rocha química, ou seja, não-clástica, posto que não se origina de detritos de outras rochas. Menezes (2013) explica que estes sais dissolvidos precipitam quando uma solução salina evapora, sendo que precipitam primeiro os sais menos solúveis. O mesmo autor relata que estas precipitações ocorreram em períodos geológicos em que havia ambiente árido, condição mais favorável à ocorrência da sedimentação química. Como resultado, se formaram rochas chamadas evaporitos. O gipso, a anidrita e a halita (sal-gema) são os evaporitos mais comuns.

De acordo com Costa (2018), após a deposição dos minerais evaporíticos há a formação de uma espessa camada de sedimentos. Desta forma, os evaporitos são submetidos a altas pressões e temperatura. Em virtude do aumento do confinamento, este processo proporciona elevada resistência a estes materiais, no entanto, são sujeitos à fluência. A fluência pode ser definida como a deformação de materiais submetidos a uma carga constante ao longo do tempo. Essa é uma característica muito evidente em materiais viscoelásticos e viscoelastoplásticos.

A halita é formada pela ligação iônica entre íons de cloro e sódio, o cloreto de sódio (NaCl). De acordo com Florêncio (2001), os cristais de halita têm estrutura cristalina cúbica e coordenação octaédrica de cátions e ânions, dando forma a uma rede cúbica de faces centradas. Estas características podem ser observadas na FIGURA 1.

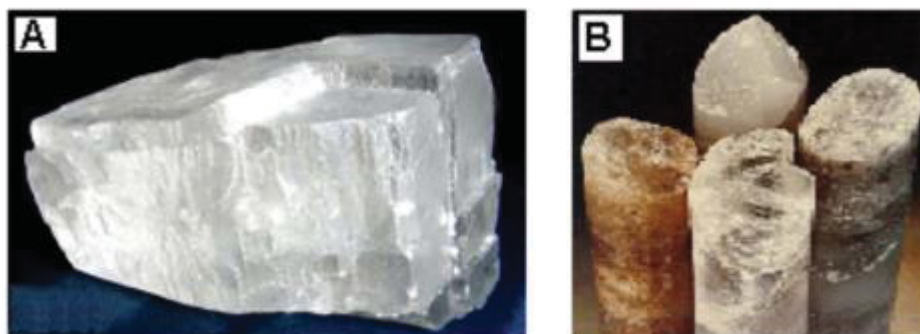
FIGURA 1 – (A) ESTRUTURA ATÔMICA DA HALITA. (B) FOTOMICROGRAFIA DE CRISTAIS DE HALITA



FONTE: Inácio et al. (2008).

Segundo Dana e Dana (1997), a halita é caracterizada por ser incolor ou branca quando pura, hábito normalmente cúbico, com clivagem perfeita $\{001\}$, geralmente octaédrico $\{111\}$. A halita possui fratura característica conchoidal e brilhante e sua dureza é relativamente baixa (2,5 na escala de Mohs). Sua massa específica é de aproximadamente $2,164 \text{ g/cm}^3$ e seu índice de refração é baixo (1,554). A FIGURA 2 apresenta um cristal de halita e testemunhos de sondagem de halita.

FIGURA 2 – (A) CRISTAIS DE HALITA. (B) TESTEMUNHOS DE SONDAGEM DE HALITA



FONTE: Inácio et al. (2008).

Quanto à condutividade hidráulica, Thoraval et al. (2015) explica que esta propriedade depende do nível de impurezas da halita e do histórico de tensões. O mesmo autor ressalta que os valores de condutividade hidráulica do sal-gema são muito baixos, entre 10^{-21} e 10^{-17} m/s .

Poiate Junior (2012) relata que, devido à ausência de estrutura porosa, a velocidade de propagação da onda compressional da halita é uma propriedade mecânica constante e independe da profundidade em que o material se encontra. Por este motivo, a velocidade de ondas sísmicas pode ser utilizada com um critério de análise de integridade de testemunhos. Em um testemunho

de halita pura esta velocidade de propagação da onda compressional é de aproximadamente 4500 m/s.

Em relação à composição química, sabe-se que os minerais evaporíticos têm sua composição definida a partir do material precipitado, podendo ser dividido em três classes minerais: cloretos, sulfatos e carbonatos. A TABELA 2 apresenta a composição química dos principais minerais evaporíticos, dentre eles a halita, que é classificada como um cloreto.

Costa (2018) explica que os cloretos se diferem dos sulfatos e carbonatos por seu comportamento distinto diante de condições compressivas. Os cloretos, especialmente a halita, passam por um processo de auto cicatrização quando submetido a tensões de compressão cisalhante, promovendo uma condição de estanqueidade. As demais rochas sedimentares apresentam fissuras ou micro fraturas em níveis de deformação sensivelmente menores que os suportados pelas rochas salinas.

TABELA 2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS PRINCIPAIS MINERAIS EVAPORÍTICOS

Classe mineral	Nome do mineral	Composição química
Cloretos	Halita	NaCl
	Silvita	KCl
	Taquidrita	$\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
	Carnalita	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Langbeinita	$\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$
	Polihalita	$\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$
	Kainita	$\text{KMg}(\text{SO}_4)\text{Cl} \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$
Sulfatos	Anidrita	CaSO_4
	Gipso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
	Kieserita	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Carbonatos	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	Calcita	CaCO_3
	Magnesita	MgCO_3

FONTE: Costa (2018).

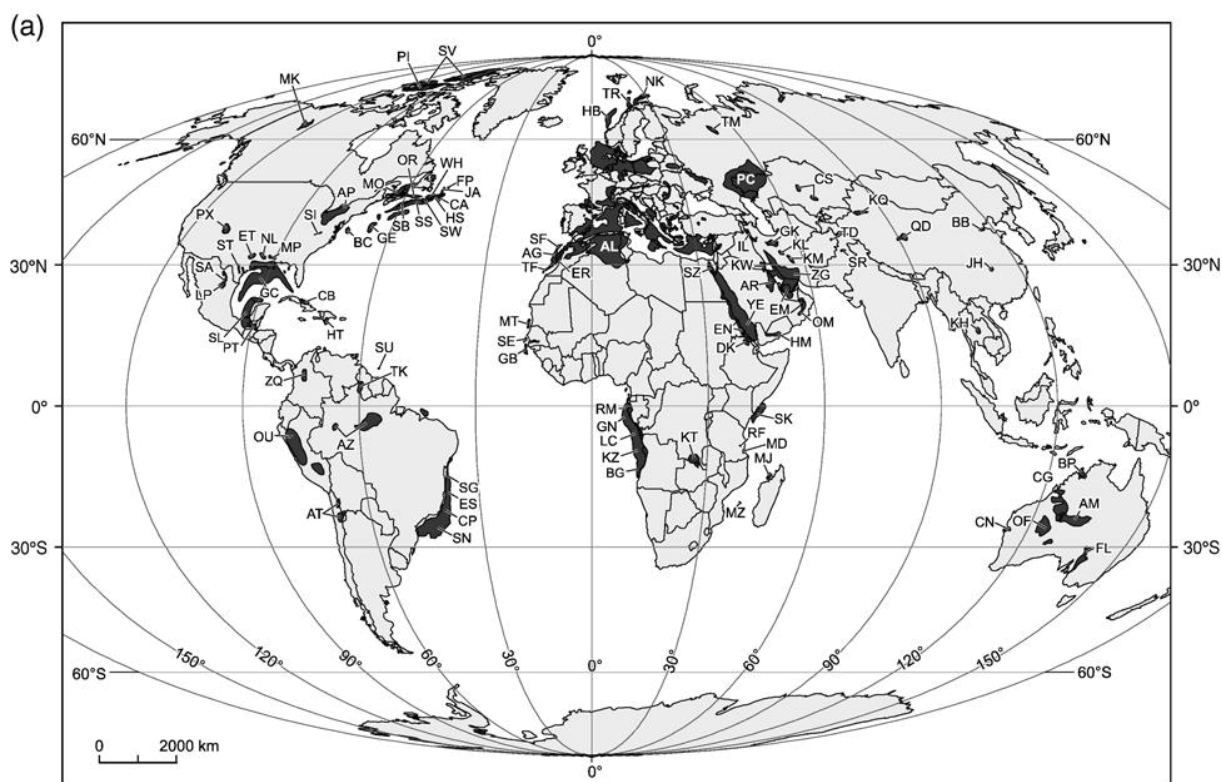
2.2 DEPÓSITOS SALINOS

Os depósitos de sal podem ocorrer em forma de solução em oceanos, lagos, aquíferos subterrâneos e fontes de salmoura, ou ainda, podem ocorrer no estado sólido, sendo depositados a céu aberto ou em depósitos subterrâneos em forma de camadas (estratos) ou domos salinos

(diápiros). Os depósitos de halita estudados neste trabalho são subsuperficiais, situados abaixo de camadas sedimentares clásticas.

A FIGURA 3 mostra a distribuição global de bacias salinas. Observa-se a ocorrência de depósitos salinos, principalmente, na costa leste do Canadá, sul dos Estados Unidos, costa brasileira e Europa Ocidental.

FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÃO GLOBAL DAS BACIAS SALINAS



FONTE: Hudec; Jackson (2007).

Costa (2018) menciona que os domos salinos são formações propícias para escavação de cavernas de sal devido à maior proximidade com a superfície. Tais depósitos sedimentares são encontrados em todos os períodos geológicos, desde o Cambriano até o Terciário, e estão associados a outras rochas sedimentares, como folhelhos, calcários calcíferos e dolomíticos, gipsita, anidrita entre outros (INÁCIO et al., 2008).

Trusheim (1957) propôs o termo halocinese para um fenômeno essencial para compreensão do comportamento dos depósitos de halita. Esta nomenclatura tem origem etmológica grega e designa o efeito da movimentação do sal. A halocinese é um comportamento característico da tectônica salífera, onde a estrutura geológica busca reestabelecer o equilíbrio gravitacional. No entanto, para que essa movimentação de massa ocorra, é necessário que haja

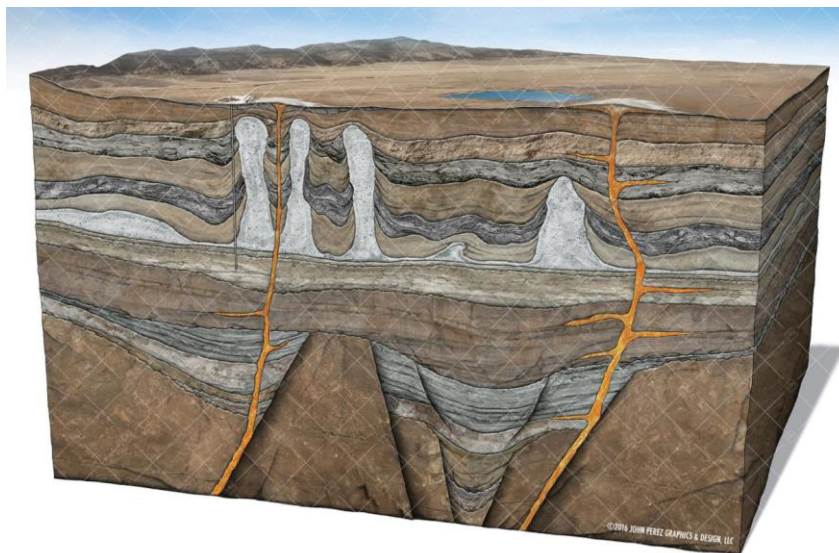
uma sobrecarga suficiente para causar uma deformação plástica do sal, sendo que nesta condição o sal-gema reage como um fluido viscoso.

Inácio et al. (2008) apontam que a halocinese ocorre devido ao peso das camadas sedimentares superiores e às tensões laterais provocadas pelo regime tectônico, formando camadas anticlinais até que ocorra a ruptura dos estratos sobrejacentes ocasionando a formação de domos, estruturas halotectônicas. Estes domos podem ter diâmetros entre 1.000 metros e 6.400 metros e sua profundidade pode ultrapassar 13.000 metros.

Para este tipo de depósito salino, a lavra pode ser realizada por mineração subterrânea convencional ou por dissolução subterrânea. Segundo Inácio et al. (2008), a mineração convencional pode ser aplicada apenas em localidades em que as galerias tenham no máximo 900 metros de profundidade e atendam os demais critérios para se utilizar a técnica de câmaras e pilares.

A FIGURA 4 apresenta um exemplo de estrutura geológica halotectônica em que os estratos salinos (material mais claro) ascendem rompendo os estratos superiores, formando domos salinos. O trabalho de Hudec e Jackson (2007) pode ser consultado para uma completa compreensão da tectônica salina.

FIGURA 4 – OCORRÊNCIA DE DOMOS SALINOS EM BACIA SEDIMENTAR



FONTE: Perez (2016).

Como o Brasil possui uma margem litorânea extensa, a costa é dividida diversas bacias evaporíticas, neste trabalho tomou-se como referência a Bacia Sergipe/Alagoas, onde foram observados problemas de subsidências recentes. A geocronologia da litoestratigrafia completa

desta bacia é apresentada em Campos Neto et al. (2007). A FIGURA 5 apresenta a litoestratigrafia geral da Bacia de Sergipe/Alagoas.

FIGURA 5 – LITOESTRATIGRAFIA GERAL DA BACIA DE SERGIPE/ALAGOAS

TEMPO / ANDAR		LITOLOGIA	FORMAÇÃO	SEQÜÊNCIA
Q	HOLOCENO		S P A	COBERTURA
T	PLIOCENO		BARREIRAS	
Ks	MIOCENO A ALBIANO		PIAÇABUÇU	MARINHA
			COTINGUIBA	
			RIACHUELO	
Ki	ALAGOAS		MURIBECA	PROTO-OCEANO
	JIQUIÁ		PONTA VERDE	RIFT
			C. SECO	
	BURACICA		M. CHAVES	
	ARATU		PENEDO	
	RIO DA SERRA		BARRA DE ITIÚBA	PRÉ-RIFT
JURÁSSICO			SERRARIA	
			BANANEIRAS	
PALEOZÓICO			CANDEEIRO	
			ARACARÉ	
			BATINGA	

FONTE: Shaller (1969) *apud* Florencio (2001).

Como citado anteriormente, os corpos salinos são auto cicatrizantes, o que lhes confere uma baixa permeabilidade. Desta forma, cavernas salinas são ambientes adequados a serem usados para armazenamento subterrâneo de gás natural (*Underground Gas Storage- UGS*). Moghadam et al. (2015), Costa (2019) e Firme et al. (2019) conduziram trabalhos acerca da modelagem do comportamento estrutural de cavernas de sal utilizadas para este fim. No entanto, a maioria destes reservatórios encontra-se *offshore*, diferente da condição em estudo.

Enquanto em reservatórios de petróleo e gás, as modelagens são voltadas a possíveis vazamentos, neste trabalho a simulação busca analisar o efeito de descomissionamento da caverna salina *onshore*, sobre as quais encontra-se uma região densamente urbanizada. Todavia, em ambos os casos, os fenômenos geomecânicos estão relacionados ao estado de tensões do sistema composto pela caverna salina e geomaterial adjacente.

As cavernas abertas para extração de sal alteram o estado inicial de tensões do subsolo, acarretando a necessidade da combinação de teorias geotécnicas e modelagem do comportamento estrutural para compreensão das tensões litostáticas de um campo de mineração fora de operação. Este problema é similar ao caso da estimativa das tensões em túneis subterrâneos. No entanto, reveste-se de maior complexidade na medida em que múltiplas

aberturas proporcionam um aumento na concentração de tensões. Duvall (1948) foi pioneiro no estudo de múltiplas cavernas e analisou aberturas circulares, elipsoidais e retangulares. Nesse estudo, o autor utilizou o método fotoelástico o que limita seus resultados apenas às configurações analisadas.

A tensão vertical usualmente é calculada a partir do peso específico dos materiais presentes nos estratos litológicos, ou seja, reflete a pressão aplicada pelo *overburden*¹. Desta forma, a tensão vertical *in situ* é dada por

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^{nc} \gamma_i \Delta z_i \quad (1)$$

em que nc são as camadas estratigráficas, γ_i é o peso específico do i -ésimo material, e Δz_i é a espessura da i -ésima camada do material i . Lautenschläger (2014) cita que o valor da densidade de materiais geotécnicos situados em grandes profundidades pode ser obtido por ensaios geofísicos, histórico geológico e investigações geotécnicas.

Por outro lado, a definição das tensões horizontais requer uma maior compreensão da formação geológica. Fredrich et al. (2003) afirmam que, em bacias sedimentares passivas, o estado de tensões é controlado por carregamentos gravitacionais.

Bruno e Dusseault (2002) apresentam uma formulação analítica para determinação das tensões horizontais, baseada na teoria da elasticidade clássica, em que as tensões são oriundas de carregamentos puramente gravitacionais. Seguindo essa formulação, o valor da tensão horizontal em qualquer ponto é dada por

$$\sigma_h = \frac{\nu}{(1 - \nu)} \sigma_v = \frac{\nu}{(1 - \nu)} \sum_{i=1}^{nc} \gamma_i \Delta z_i \quad (2)$$

em que ν é o coeficiente de Poisson. Vale ressaltar que, esta formulação é válida apenas para materiais normalmente consolidados.

No entanto, de acordo com Ruiz (2015), devido ao comportamento dúctil da halita as tensões relaxam até atingir um estado de tensões isotrópico. Bruno; Dusseault (2002) explicam

¹ Termo de origem inglesa que designa a camada de geomaterial não salino que existe acima do extrato ou domo salino.

que isso acontece, pois, o sal-gema flui ao longo do tempo igualando as tensões horizontais às verticais, ou seja, tem-se um coeficiente de empuxo em repouso (k_0) unitário. Os mesmos autores ressaltam que a tensão horizontal menor define a pressão de fratura da rocha salina. Assim, a correta determinação deste valor é imprescindível para o desempenho adequado de uma caverna salina.

Heusermann (2003), Xie; Tao (2013), Ruiz (2015) e Costa (2018) também afirmam que, para depósitos salinos espessos e profundos, o coeficiente de empuxo em repouso para determinação das tensões horizontais maior e menor (σ_{h1} e σ_{h2}) é correspondente a 1. Os autores citados justificam esse fato pelo comportamento viscoso que a rocha salina possui.

Arndt (2013) apresenta o exemplo de uma mina de sal no oeste da Austrália em que há atividade sísmica e que, em 1000 metros de profundidade, poderia haver uma tensão horizontal máxima de até 80 MPa devido a atividade sísmica. Neste caso, a tensão horizontal maior se torna a tensão principal, pois a tensão vertical, correspondente a 30 MPa.

Ainda baseados na teoria da elasticidade clássica, Bruno; Dusseault (2002) propõem, para carregamentos gravitacionais e com atuações tectônicas laterais, que a tensão horizontal maior e a tensão horizontal menor, respectivamente, sejam calculadas por

$$\sigma_{h1} = \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\varepsilon_{h1} + \nu \varepsilon_{h2}) + \frac{\nu}{(1 - \nu)} \int \rho g dz \quad (3)$$

$$\sigma_{h2} = \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\varepsilon_{h2} + \nu \varepsilon_{h1}) + \frac{\nu}{(1 - \nu)} \int \rho g dz \quad (4)$$

em que E é o módulo de elasticidade, ε_{h1} e ε_{h2} são as deformações horizontais maior e menor, respectivamente, ocasionadas pela movimentação tectônica e, as demais variáveis correspondem a parâmetros identificados anteriormente.

2.3 PARÂMETROS E PROPRIEDADES DA HALITA BRASILEIRA

Conforme citado anteriormente, este trabalho aplica o Método dos Elementos Finitos para analisar o comportamento da halita, a partir de um modelo constitutivo. Para a aplicação deste método é necessário informar ao software as características do material a ser analisado. Quanto à resistência à compressão simples, segundo Costa (2013), a halita apresenta valores similares aos do concreto de obras de arte especiais e acentuadamente maiores que de outros

evaporitos. Em relação aos parâmetros de elasticidade, Ruiz (2015) apresenta os valores obtidos para a mina de Taquari-Vassouras, os quais valores são mostrados na TABELA 3. Observa-se que o módulo de elasticidade da halita também é maior que dos demais evaporitos.

TABELA 3 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES, PARÂMETROS DE ELASTICIDADE E MASSA ESPECÍFICA DOS PRINCIPAIS EVAPORITOS BRASILEIROS

Rocha	Resistência à compressão simples σ_c (MPa)	Módulo de elasticidade E (GPa)	Coefficiente de Poisson ν	Massa específica ρ (kg/m ³)
Halita	35 a 40	20,40	0,36	2.170
Silvinita	-	15,74	0,33	1.860
Taquidrita	2	4,92	0,33	1.570
Carnalita	18	4,02	0,36	1.700

FONTE: Elaborado a partir de Costa (2013), Firme (2013) e Ruiz (2015).

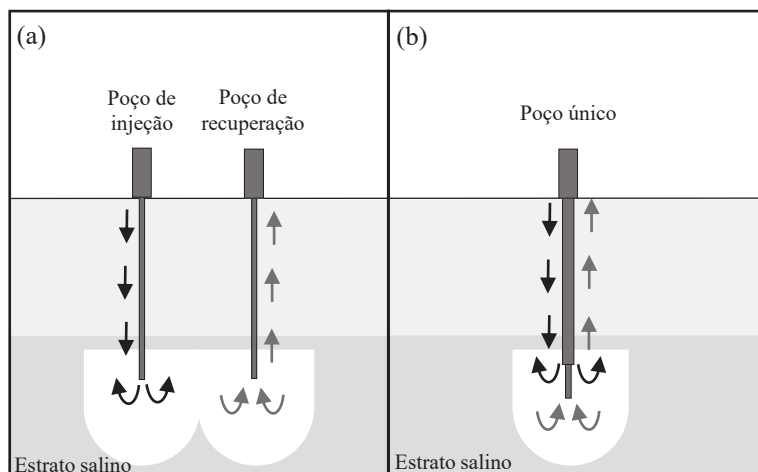
2.4 MINERAÇÃO DE SAL-GEMA POR DISSOLUÇÃO

De acordo com Curi (2017), a lavra por dissolução é feita com água ou solvente líquido. O fluido entra em contato com o mineral solúvel e o dissolve, possibilitando a extração do material pela recuperação do fluido. A lavra por dissolução pode ser realizada pelo método químico ou utilizando poços, os quais são utilizados no caso de depósitos salinos sólidos profundos.

Segundo Raucoules et al. (2003), a extração do sal-gema pode ser dar com emprego de poço único ou poços múltiplos. Em minas com poços múltiplos, alguns são poços de injeção do fluido e outros são poços de recuperação, pelos quais o minério é extraído. A técnica de dissolução em poço, que também é denominada de lixiviação *In Situ* (*In-Situ Leaching – ISL*), utiliza água quente como fluido de injeção e fornece como produto uma salmoura saturada em cloreto de sódio, a qual geralmente é transportada por tubovia até uma unidade de processamento (CURI, 2017).

A FIGURA 6 mostra o corte esquemático poços de dissolução. A FIGURA 6-a representa uma configuração de poços múltiplos em que o solvente entra pelo poço de injeção e a salmoura é extraída pelo poço de recuperação. Na FIGURA 6-b é ilustrado um poço único, onde a salmoura é recuperada pelo mesmo poço em que se injeta o solvente utilizando sistema anular. As setas pretas indicam o fluxo do solvente e as setas cinzas o fluxo da salmoura.

FIGURA 6 – DISSOLUÇÃO SUBTERRÂNEA EM SAL-GEMA: (A) POÇOS MÚLTIPLOS. (B) POÇO ISOLADO



FONTE: A autora (2020).

2.5 DESCOMISSIONAMENTO DE CAVERNAS SALINAS

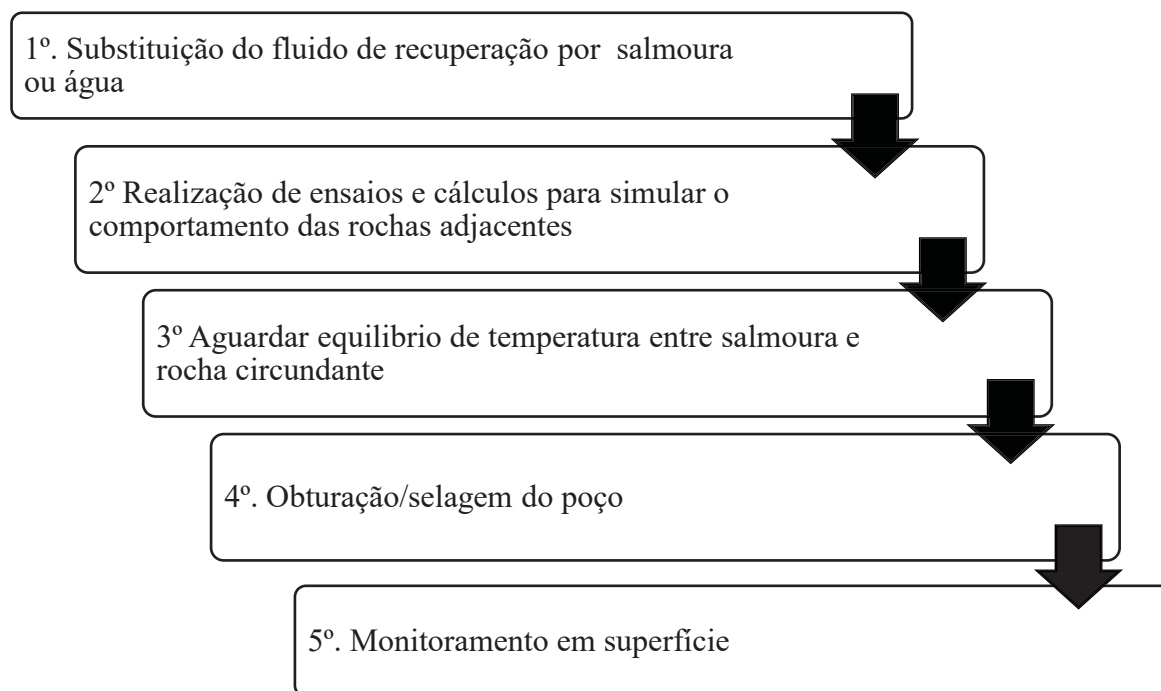
Sánchez et al. (2013) explicam que a desativação ou descomissionamento de uma mina inicia-se antes do fechamento da mina e conclui-se quando são asseguradas as condições de estabilidade e segurança da área. No entanto, no Brasil não existe uma normativa específica para o descomissionamento de minas de dissolução.

Na literatura internacional é comum a aplicação do termo “abandono” para este procedimento. Crotogino; Kepplinger (2006) apresentam no relatório “*Cavern Well Abandonment Techniques Guidelines Manual*” diretrizes técnicas para o abandono de minas de dissolução. Este material foi publicado pelo *Solution Mining Research Institute*. Segundo estes autores, se a caverna estiver localizada inteiramente dentro de uma estrutura salina homogênea e impermeável, preenchida com salmoura e selada, a estabilidade e a integridade podem ser garantidas.

Crotogino e Kepplinger (2006) explicam que um tempo de espera para o equilíbrio da temperatura entre o fluido de preenchimento e o sal-gema circundante é necessário, pois o aquecimento da salmoura ou água resulta num aumento de volume da cavidade ou da pressão em uma caverna fechada. O volume de convergência, a saturação da salmoura (quando o fluido de preenchimento é água) e infiltração da salmoura nas rochas também influenciam a pressão

no interior da caverna. Todos estes fatores devem ser analisados. Os procedimentos para Selagem e Abandono da Caverna (SAC)² são apresentados na FIGURA 7.

FIGURA 7 – PRINCIPAIS FASES DA SELAGEM E ABANDONO DA CAVERNA



FONTE: Elaborado pela autora a partir de Crotofino; Kepplinger (2006) Crotofino; Kepplinger (2006).

Outro material relevante sobre descomissionamento de minas de sal por dissolução foi publicado pelo *Instituto Holandês de Geociências Aplicada (TNO)* e elaborado por Kroon et al. (2003). Este material é um relatório intitulado *Abandonment of solution mined salt caverns in the Netherlands*.

Kroon et al. (2003) apresentam uma avaliação qualitativa de risco para o abandono de minas de dissolução de sal para sete cenários. Os cenários estão ranqueados e descritos na TABELA 4. Observa-se que a movimentação de superfície é causada pelos dois cenários mais prováveis no ranque apresentado. Kroon et al. (2003) afirmam que para uma avaliação de risco quantitativa é essencial uma simulação com dados específicos do local. Para estes autores, as descrições analíticas são úteis, mas, na maioria dos casos, os processos são não-lineares e interdependentes, portanto, é necessária uma abordagem numérica.

² Tradução do termo original em língua inglesa (*Cavern Sealing and Abandonment - CSA*).

TABELA 4 – RANQUE DOS CENÁRIOS DE RISCO PARA ABANDONO DE MINAS DE SAL

Ranque	Descrição	Probabilidade	Descrição do risco	Intensidade do risco
1	Colapso do teto	Baixa a alta	Movimento de superfície	Severa
2	Convergência da caverna	Alta	Movimento de superfície	Moderada a severa
3	Perda da integridade do selo	Moderada a alta	Poluição do lençol freático	Baixa a severa
4	Perda da integridade do poço	Moderada a alta	Poluição do lençol freático	Baixa a severa
5	Perda do controle do poço	Moderada a alta	Descontrole do fluxo	Baixa a média
6	Sufosão ³	Baixa	Descrição 1, 2 e 3	Moderada a severa
7	Migração de gás natural	Muito baixa	Explosão	Severa

FONTE: Kroon et al. (2003).

2.6 MOVIMENTOS DE SUPERFÍCIE

Zuquette (2018) define os deslocamentos verticais de uma massa de material geológico para um nível topográfico inferior como subsidência. O mesmo autor divide as subsidências em 3 classes: depressões rasas e locais, dolinas e *sinkholes*.

Neste trabalho adotou-se a classificação de Zuquette (2018), que diferencia dolina de *sinkhole* pelo formato da feição. Os *sinkholes* são poços profundos de mecanismo bem definido que ocorrem abruptamente ao longo de horas. Por outro lado, os demais tipos de subsidências tratam-se de lentos movimentos de massa que podem ser perceptíveis ao longo de meses ou anos.

Estes rebaixamentos da superfície são ocasionados por alterações em camadas subjacentes (XIA et al., 2019). Estas alterações podem ser ocasionadas por ações antrópicas, por processos naturais, como os que ocorrem em ambientes cársticos, e ainda pela combinação da geologia local com a ação humana.

O termo subsidência geralmente se refere ao movimento descendente de uma superfície do solo. No entanto, Pariseau (2006) esclarece que esta designação pode estar relacionada também com movimentos abaixo do solo. As causas mais comuns de subsidência são: retirada de fluidos de poros e fraturas e perturbação do solo por processos de escavação.

Existem diferentes padrões, magnitudes e causas de subsidência em áreas de mineração de solução salina. Muitas vezes, a mineração de sal está localizada próxima à

³ Comportamento geotécnico de erosão do subsolo em regiões em que há presença de evaporitos, onde a água é oriunda de infiltração ou lençol freático. Sua gênese está ligada à evacuação de sedimentos para uma fissura.

extração de gás natural e extração de petróleo e, dependendo das características geotécnicas locais, podem resultar em um cenário favorável aos movimentos do solo. Autin (2002), Gee et al. (2019), Kalia et al. (2017) e Kim et al. (2019) apresentam trabalhos em que a subsidência está relacionada à extração de hidrocarbonetos. Os itens a seguir apresentam os principais fatores que influenciam as subsidências nestas áreas.

2.6.1 Fatores que influenciam as subsidências em áreas de mineração

Em minas de dissolução, fatores, como por exemplo, as particularidades geológicas, desconhecimento dos volumes de extração, falta de parâmetros dos materiais e não execução de ensaios geofísicos, fazem com que seja difícil a previsão de eventos de subsidência. Segundo Zuquette (2018), essa dificuldade de predictabilidade da deflagração de eventos de subsidência existe no âmbito temporal e na dimensão espacial.

Zuquette (2018) afirma, que, a avaliação da possibilidade de ocorrência de subsidência em relação ao tempo pode ser desenvolvida para três situações: probabilidade associada à ocorrência em um determinado tempo, probabilidade de ocorrência em um intervalo temporal e probabilidade baseada em uma análise geral para um grande período de tempo.

Já a predictabilidade espacial, de acordo com Zuquette (2018), pode ser realizada a partir de registros em inventários, consideração de variáveis e valores limites, geração de índices relacionados a fatores e pesos com atributos e classes e pela consideração de modelos de terrenos e mecanismos.

Este trabalho concentra-se na mineração de halita por dissolução. No entanto os fatores que influenciam as subsidências em áreas de mineração, habitualmente, são os mesmos para extração de sal-gema por esse método ou pela técnica de câmaras e pilares.

Valentino (2016) elenca que os fatores que influenciam neste processo incluem: dimensões e geometria da mina, profundidade de mineração, avanço da extração, aterro, propriedades das camadas subjacentes e sobrejacentes, presença de juntas e falhas, variações na topografia, hidrogeologia e variação de sobrecarga no terreno. Os itens a seguir apresentam os principais agentes desencadeantes de subsidências.

2.6.1.1 Fatores geológicos

As subsidências ocorridas devido a geologia podem ser causadas por movimentações tectônicas, como as fases tafrogênicas de bacias geológicas, ou por causas não tectônicas, como por exemplo a dissolução de camadas sedimentares.

Segundo Neves et al. (1995), bacias tafrogênicas podem ser resultado de crátons, porções da litosfera estáveis a mais de 200 milhões de anos, que tendem a formar um rifteamento devido à deriva das massas. Ou ainda por orogênese, o processo de formação de montanhas, que também gera afundamentos causados pela tectônica compressional de placas.

As causas não tectônicas, como a dissolução de sedimentos, podem ser consideradas mais concernentes ao tema em estudo, pois são afundamentos com taxas de subsidência relativamente maiores. A dissolução de camadas sedimentares, de acordo com Christofolletti (1980), ocorre principalmente em ambientes cársticos.

Christofolletti (1980) explica que para o desenvolvimento de relevo cárstico é necessário que existam rochas solúveis próximas a superfície, sendo que a rocha mais comum nesta condição é o calcário, embora possam ocorrer outras rochas com alta solubilidade, como a gipsita e o sal-gema. O autor salienta indispensabilidade de chuvas e camada de rocha de alta solubilidade acima do nível freático para que possa haver livre fluxo da água por entre as aberturas da rocha para que a dissolução ocorra.

2.6.1.2 Fatores relacionados à mineração

Quang et al. (2018) explicam que, antes da operação de mineração, a água existente nas aberturas das rochas encontra-se em forma de salmoura saturada e, geralmente, está em equilíbrio dentro dessas formações geológicas. Com a presença de aberturas causadas por atividades antropogênicas, a introdução de água doce leva à dissolução de estratos de sal, alterações mecânicas, instabilidades e, finalmente, à subsidência superficial.

As subsidências ocorridas em regiões de minas de sal-gema podem ser decorrentes do processo de mineração que altera as tensões *in situ* podendo ocasionar colapsos do teto da mina ou deslocamentos. Com o avanço do deslocamento dos estratos superiores, pode-se chegar a um ponto em que a cavidade seja preenchida pelo material das camadas superiores. Porém, esse preenchimento resultará em um elevado índice de vazios, então dá-se início a uma fase de compactação que pode envolver sucessivos desabamentos do teto (HACIOSMANOĞLU, 2004).

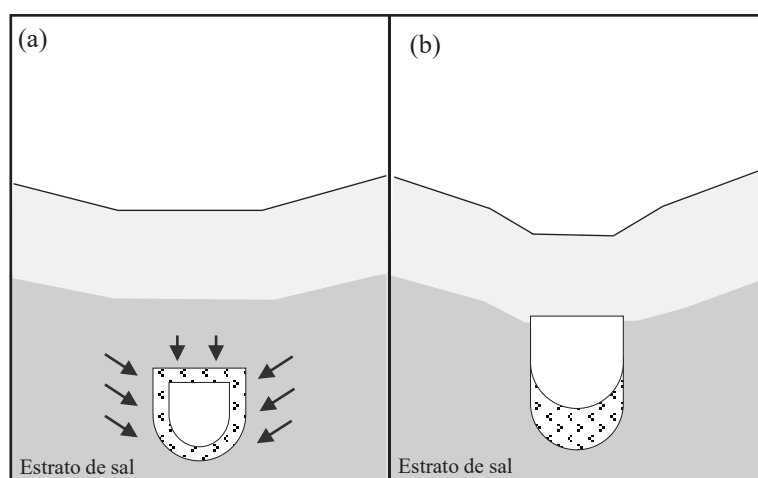
Segundo Land (2013), a solubilização do material salino pode ocorrer no topo da caverna, uma vez que a água doce injetada flutua sobre a salmoura que é mais densa. Com o objetivo de proteger o teto da caverna e garantir que a escavação ocorra na parte inferior da cavidade, uma camada de óleo diesel pode ser injetada na mina. Esta camada fará a proteção do teto da mina.

Além da ruína do teto, que pode ocorrer em cavernas dos mais diversos minérios, as cavernas de halita, de acordo com Neal (1991), sofrem uma redução de volume de 10% a cada 30 anos devido fluxo do sal que direciona-se para as cavernas. Nesse caso, enquanto o material se mantém em fluência secundária, são formadas bacias de subsidência com taxas constantes e relativamente baixas.

Na FIGURA 8 são apresentados dois mecanismos de afundamento de superfície ocasionados por convergência de minas de dissolução. Na FIGURA 9.a, a região hachurada representa o volume de sal deslocado para o interior da caverna por fluência. Este processo resulta em uma taxa de subsidência baixa. A área hachurada na FIGURA 9.b representa o volume deslocado do teto para o piso da mina devido ao deslocamento resultante de deformações plásticas. Este deslocamento é chamado de *spalling*.

Segundo Ege (1979), outro fator relacionado à mineração de sal por dissolução subterrânea seria a limitação do controle da geometria da caverna. No entanto, atualmente o formato das minas já pode ser investigado com técnicas que são apresentas no capítulo seguinte.

FIGURA 8 – AFUNDAMENTO ASSOCIADO À CONVERGÊNCIA/COLAPSO DO TETO DE CAVERNAS DE SAL



FONTE: A autora, 2020.

2.7 MINERAÇÃO DE SAL-GEMA NO BRASIL

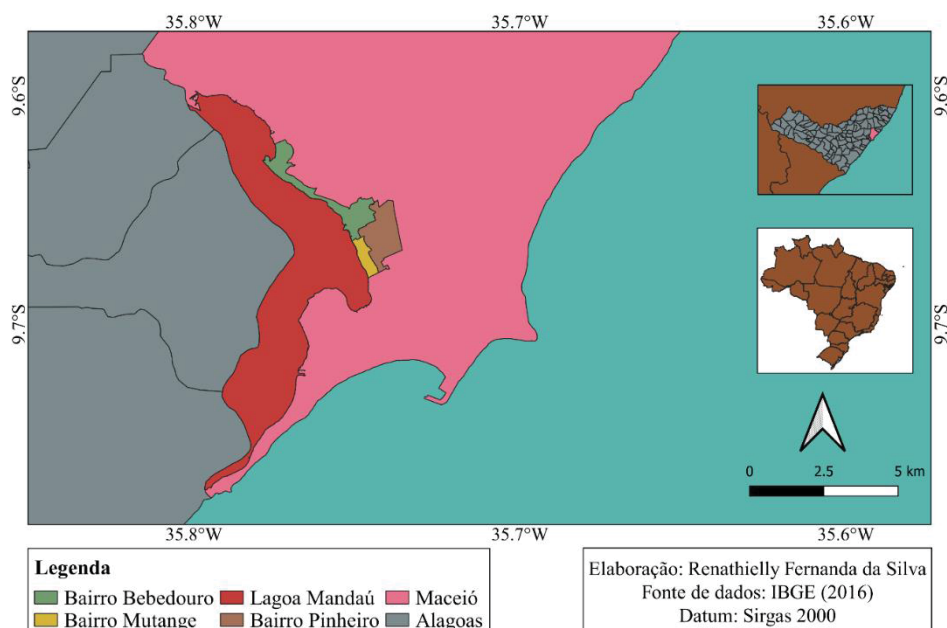
Este trabalho foi motivado por recentes ocorrências de instabilidades em um campo de mineração de sal gema no nordeste do Brasil. As análises realizadas nesta pesquisa baseiam-se em algumas informações relacionadas a esta ocorrência. No entanto, não se trata de um estudo de caso, pois alguns parâmetros utilizados na simulação são de outras localidades. Além disso, não se tem informações sobre as condições de pressão interna das cavernas desta região. Os próximos itens contextualizam este problema.

2.7.1 Localização da região de estudo e contextualização do problema

Em Maceió, Alagoas, a partir de 1975 o sal-gema começou a ser extraído para produção de cloro-soda e, a partir de 2012, para fabricação de policloreto de vinila (PVC). De acordo com a Brasken (2020), a indústria de cloro-soda e PVC, que era a maior do continente, encerrou suas atividades no final de 2019 devido a problemas geológico-geotécnicos em regiões próximas às minas.

A caverna utilizada neste trabalho como referência faz parte de um conjunto de 35 minas de sal-gema que foram exploradas pela técnica de dissolução. Este campo de mineração situa-se na cidade de Maceió, Alagoas. As minas estão localizadas sob a lagoa do Mundaú e os bairros circundantes são: Pinheiro, Mutange e Bebedouro. A FIGURA 9 apresenta esta região.

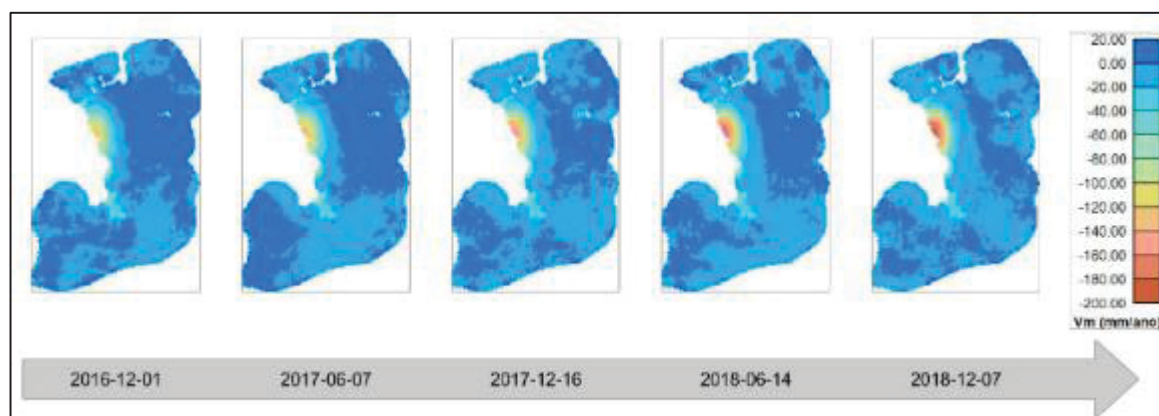
FIGURA 9 – REGIÃO EM ESTUDO



FONTE: A autora (2020).

De acordo com o levantamento interferométrico apresentado pelo CPRM (2019a) a subsidência alcançou uma taxa de 20 cm/ano. A coleta de imagens foi feita, aproximadamente, a cada seis meses, como mostra a FIGURA 10. A escala apresentada do lado direito da FIGURA apresenta as velocidades médias de subsidência na superfície da região que margeia a lagoa do Mundaú.

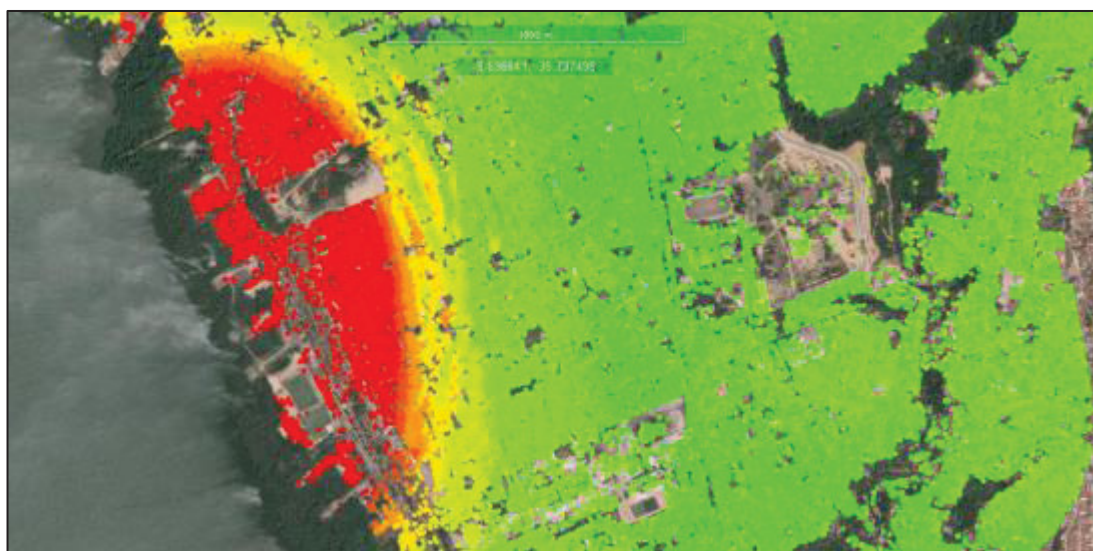
FIGURA 10 – EVOLUÇÃO DA VELOCIDADE DE SUBSIDENCIA SEMESTRAL



FONTE: CPRM (2019a).

A FIGURA 11 mostra a interpretação dos dados interferométricos obtidos em março de 2019, onde pode-se observar um afundamento com formato de semi-círculo. No período da interpretação, o afundamento já havia alcançado 40 cm na região em vermelho. Estes afundamentos são característicos de regiões em que há alívio da pressão litostática pela existência de minas sem preenchimento adequado.

FIGURA 11 – LEVANTAMENTO INTERFEROMÉTRICO



FONTE: CPRM (2019a).

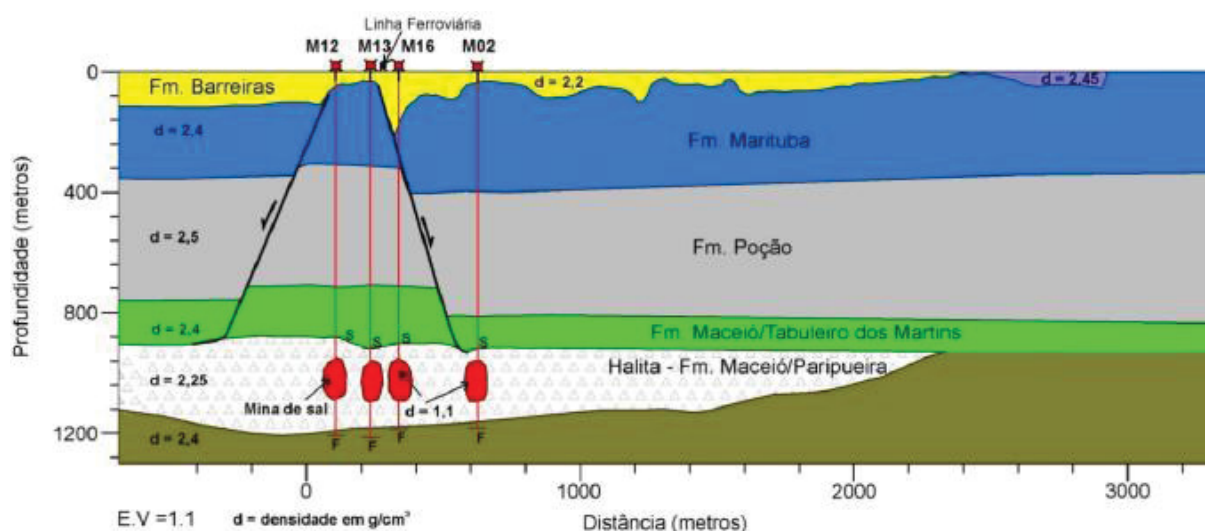
2.7.2 Caracterização geológico-geotécnica

Segundo Florencio (2001), a área em estudo encontra-se na bacia sedimentar Sergipe/Alagoas em que os primeiros sedimentos foram depositados entre os períodos Carbonífero e Permiano (Era Paleozoica) e os evaporitos começaram a ser precipitados no período Cretáceo (Era Mesozoica). As principais camadas sedimentares da região de estudo podem ser observadas na FIGURA 12.

O estrato de halita estudado faz parte da Formação Paripueira, situada na sub-bacia de Maceió. Durante os 43 anos de lavra, foi utilizada a técnica de extração por dissolução subterrânea, com água pressurizada sendo injetada por poços até a camada a ser minerada (não revestida) onde o sal é recuperado sob a forma de solução saturada de cloreto de sódio na concentração aproximada de 30 gramas/litro (FLORENCIO, 2001).

O modelo de densidades da região é apresentado na FIGURA 12 (esta FIGURA corresponde ao corte AB representado na FIGURA 13). No corte, observa-se que o *overburden* é formado por quatro estratos sedimentares: a formação Barreiras, a formação Marituba, a formação Poção e a formação Maceió/Tabuleiro dos Martins. Além dessas, há também a camada de halita (formação Paripueira) onde estão localizadas as cavernas salinas. Atenta-se para a densidade reduzida da halita comparada aos outros estratos.

FIGURA 12 – MODELO DE DENSIDADES DO CORTE AB



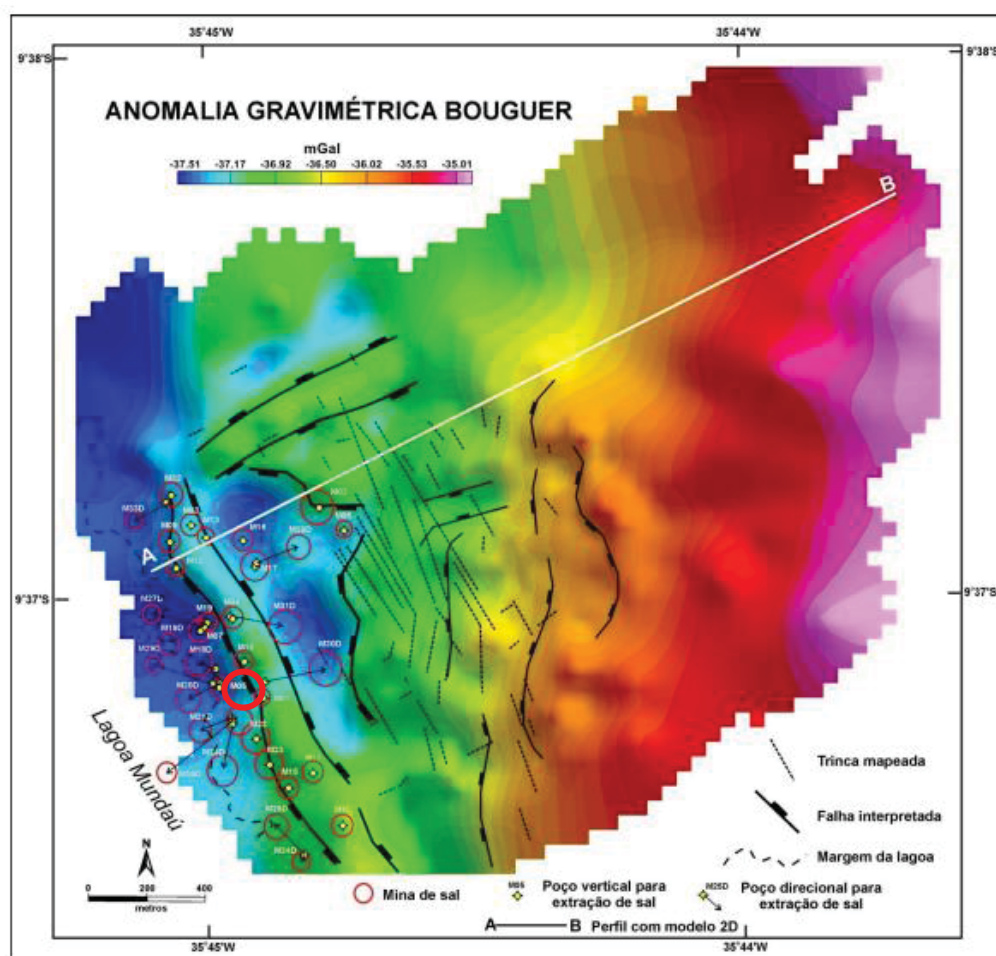
FONTE: CPRM (2019b).

2.7.3 Geometria das cavernas

As minas estão locadas como apresentado na FIGURA 13. Selecionou-se a geometria da mina 30D para o estudo realizado neste trabalho. Esta escolha foi pautada na disponibilidade de análise de sonares, os quais permitem conhecer a geometria e volume desta mina. Esta mina está destacada na FIGURA 13 pelo contorno de cor vermelha mais espesso que das demais minas.

Destaca-se, também, que há o registro de um sismo, cujo epicentro localizou-se próximo à mina 30D, fortalecendo a motivação para o estudo de tais minas. Como pode ser observado na FIGURA 13, estas minas foram formadas por poços direcionais, que tem como fator agravante o cruzamento com a falha geológica do Mutange.

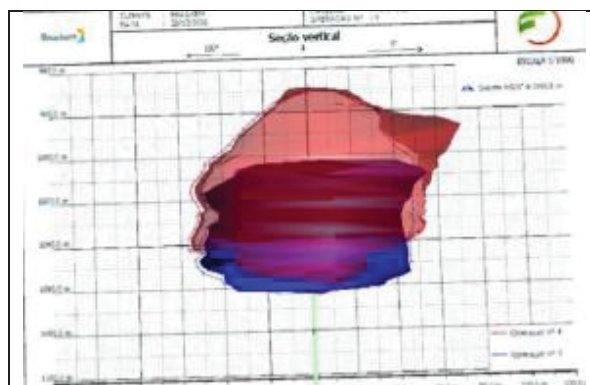
FIGURA 13 – LOCAÇÃO DAS MINAS DE SAL



FONTE: CPRM (2019b).

A análise dos sonares, publicada pelo CPRM (2019b), possibilitou o conhecimento da geometria da mina nos anos de 2015 e 2018, conforme mostra a FIGURA 14. A região em azul representa a geometria da mina em 2015 e a região em magenta a geometria em 2018.

FIGURA 14 – SEÇÃO TRANSVERSAL DAS MINAS 30D



FONTE: CPRM (2019b).

A TABELA 5 apresenta o volume da minas de referência nos anos de 2015 e 2018 e a diferença percentual de volume entre estes anos.

TABELA 5 – VOLUME DAS MINAS 30D A PARTIR DE ANÁLISE DE SONARES

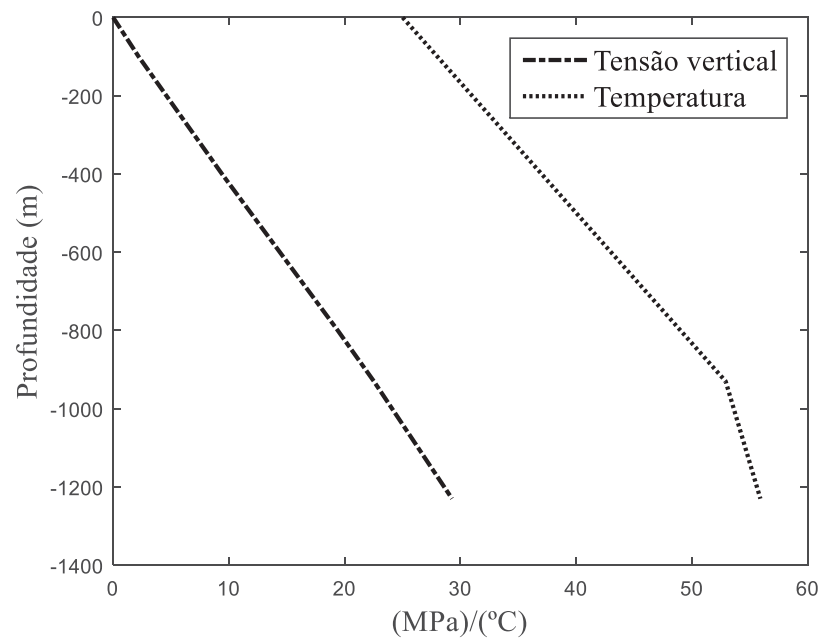
Ano de leitura	Mina 30D	
	Volume (m ³)	Diferença (%)
2015	285611,53	55 %
2018	442610,00	

FONTE: CPRM (2019a).

2.7.4 Tensões e temperaturas *in situ*

A temperatura no estrato de halita foi determinada a partir dos coeficientes geotérmicos indicados por Costa et al. (2012). Estes autores sugerem um aumento de 30°C/km no *overburden* composto por rochas sedimentares e 10°C/km na camada de halita. Neste trabalho, arbitrou-se a temperatura base na superfície terrestre como 25°C, que é a temperatura média na capital alagoana. A FIGURA 15 apresenta a tensão vertical de compressão e a temperatura ao longo do estrato.

FIGURA 15 – TENSÕES VERTICAIS E TEMPERATURA AO LONGO DO ESTRATO



FONTE: A AUTORA (2020).

3 REVISÃO SISTEMÁTICA: TÉCNICAS DE CONTROLE DE SUBSIDÊNCIA

Neste capítulo apresenta-se uma revisão sistemática sobre as técnicas de controle e estudo utilizadas em casos de subsidência em regiões de mineração de sal-gema por dissolução. São consideradas técnicas de controle e estudo de subsidência as metodologias de estudo, prevenção, monitoramento e remediação de movimentos de terreno. O objetivo deste capítulo é reunir, de forma sistemática, o conhecimento já consolidado sobre o assunto, apontando as dificuldades encontradas em trabalhos anteriores e possibilitando a indicação de uma ferramenta para o gerenciamento de subsidência.

Muitas pesquisas já foram conduzidas para analisar o comportamento da rocha salina relacionando seus estágios (fluências primária, secundária e terciária) com problemas de engenharia. Entre estes trabalhos estão Li et al. (2017), Mansouri; Ajalloeian (2018), Rouabhi et al. (2019), Singh et al. (2018) e Wang et al. (2014).

No entanto, esta pesquisa tem como foco principal as técnicas de controle de um risco específico: subsidência em áreas de mineração de sal-gema pela técnica de dissolução. Embora esse problema exista há séculos, ainda é difícil prever fenômenos devido às incertezas geológicas e geotécnicas e à ausência da aplicação de técnicas de controle.

Alguns países, como Holanda, Alemanha e Reino Unido, devido aos eventos recorrentes, já desenvolveram medidas legais para o gerenciamento de minas de sal. No Reino Unido, por exemplo, o atual processo de planejamento de minas proíbe a mineração próximas a centros urbanos e em profundidades rasas, relata Cooper (2002).

Existem muitos artigos que apresentam técnicas de controle de movimento do solo em áreas de mineração de sal. Devido a isto, neste trabalho aplica-se uma metodologia sistemática para apontar as lacunas existentes no estudo desse tipo de problema de geologia da engenharia.

3.1 MÉTODO DE REVISÃO SISTEMÁTICA APLICADO

Esta revisão sistemática foi conduzida por uma metodologia que permite selecionar e classificar artigos científicos relevantes, abrangendo o fator de impacto, número de citações e ano de publicação. Esta metodologia foi proposta por Pagani et al. (2015) e a ordenação dos trabalhos selecionados é dada por

$$InOrdinatio = (FI/1000) + \alpha * [10 - (APes - APub)] + (\sum Ci), \quad (5)$$

em que FI é o fator de impacto, α é um fator de ponderação que varia de 1 a 10, a ser atribuído pelo pesquisador (foi atribuído 5 como fator de ponderação), $APes$ é o ano em que a pesquisa foi desenvolvida, $APub$ é o ano em que o artigo foi publicado e Ci é o número de vezes que o artigo foi citado.

O protocolo utilizado para a realização desta pesquisa sistemática é apresentado na TABELA 6. Esta TABELA apresenta (A) as questões de pesquisa; (B) as bases de dados selecionadas para esta revisão sistemática; (C) os critérios de pesquisa para incluir um artigo; (D) os termos de pesquisa utilizados; (E) os critérios de exclusão e (F) os resultados da pesquisa.

3.1.1 Coleta de material

A coleta do material foi finalizada em 19 de agosto de 2019. A pesquisa incluiu artigos em inglês registrados como "*review*" ou "*research*". Não foram excluídas áreas científicas, periódicos ou período de publicação.

Foram utilizados três bases de dados: A *ScienceDirect* (2019) que oferece acesso a mais de 4,7 milhões de artigos de periódicos. A *Scopus* (2018) que inclui mais de 71 milhões de registros e 23.700 títulos; E a *Emerald* (2018) que contempla mais de 300 opções de periódicos.

Os termos de pesquisa foram compostos da palavra "*subsidence*" combinada com outras quatro palavras-chave, como mostra a etapa D do protocolo de pesquisa, resultando em 232 artigos.

3.1.2 Seleção do material

Para selecionar apenas artigos dentro do escopo da pesquisa, foram utilizados critérios de exclusão. Após consulta aos autores e bases de dados, inicialmente foram excluídos os artigos indisponíveis. Também foram excluídos artigos de conferências e editoriais e eliminados os trabalhos duplicados.

Foram excluídos os artigos relacionados ao processo geológico de dissolução de sal ocorridos por halocinese natural, pois o principal objetivo deste trabalho é analisar a subsidência induzida pelo homem.

TABELA 6 – PROTOCOLO DE PESQUISA

A – Questões de pesquisa				
Quais são os artigos mais relevantes sobre subsidência em área de mineração de sal-gema?				
Quais são os casos de subsidências reportados na literatura?				
Quais são as técnicas de controle de subsidência apresentadas na literatura?				
B – Bases de dados				
Science Direct (SD)				
Scopus (S)				
Emerald (E)				
C – Critérios de pesquisa				
Idioma	Inglês			
Área científica	Todos			
Periódico	Todos			
Tipo de artigo	Review ou research			
Campos de busca	Títulos, resumo e palavras-chaves			
Data de publicação	Até o momento de pesquisa			
Data de pesquisa	19 de agosto de 2019			
D – Termos de pesquisa				
Combinação utilizada	Total	Base de dados		
		SD	S	E
"subsidence" AND "salt mining"	48	7	25	16
"subsidence" AND "salt extraction"	16	1	5	10
"subsidence" AND "solution mining"	82	4	28	50
"subsidence" AND "salt dissolution"	86	23	61	2
Total	232	35	119	78
E – Critérios de exclusão				
Indisponibilidade de download		OU		
Eliminação de duplicatas		OU		
Livros e artigos de congresso		OU		
Artigos relacionados a subsidências deflagradas por eventos puramente geológicos		OU		
F – Resultado da busca				
A partir dos termos de pesquisa		232		
Depois da leitura do resumo		73		
Depois da leitura do artigo		25		

FONTE: A autora (2020).

Em seguida, após as exclusões exibidas na etapa E do Protocolo de Pesquisa, foram selecionados 25 artigos considerados relevantes para este trabalho. Em outras áreas da geologia ou geotecnia, esse número de artigos seria considerado pequeno, porém, esse é um assunto muito específico.

A revisão sistemática elaborada neste trabalho analisou os artigos selecionados em seis aspectos: tipo de controle, técnica de controle, localização, taxa máxima de subsidência, período em que ocorreu a subsidência máxima e ocupação do solo na região de subsidência.

Analisando os artigos, foram observadas dez técnicas de controle e estudo de subsidência: Interferometria [1], métodos numéricos [2], nivelamento topográfico [3], sistema global de navegação por satélite (*GNSS- Global Navigation Satellite System*) [4], revisão de literatura [5], avaliação de risco [6], fotografia aérea [7], geofísica [8], sismômetro [9] e perfuração de poços [10].

Os artigos são apresentados no QUADRO 1, ordenados de acordo com a classificação de relevância estabelecida pelo Method Ordinathio proposto por Pagani et al. (2015). O QUADRO 1 apresenta o nome do periódico, a referência, o tipo de controle e a técnica de controle.

QUADRO 1 – ORDENAÇÃO DOS ARTIGOS SELECIONADOS

[#]	Revista	Referência	Tipo de controle	Técnica
1	Engineering Geology	Perski et al. (2009)	Monitoramento	[1][3]
2	Remote Sensing of Environment	Raucoules et al. (2003)	Monitoramento	[1][3]
3	Engineering Geology	Yerro et al. (2014)	Monitoramento	[1][3][4]
4	Scientific Reports	Kim; Lu (2018)	Monitoramento	[1]
5	IEEE Geoscience and Rem.Sensing Letters	Pipia et al. (2009)	Monitoramento	[1]
6	Remote Sensing of Environment	Kalia et al. (2017)	Monitoramento	[1] [4]
7	Remote Sensing of Environment	Kim et al. (2019)	Monitoramento	[1][7]
8	Engineering Geology	Gee et al. (2019)	Monitoramento	[1][3][4]
9	Mine Water and the Environment	Quang et al. (2019)	Prevenção	[2]
10	Engineering Geology	Mancini et al. (2009a)	Monitoramento	[6]
11	Netherlands Journal of Geosciences	Van Der Spek (2018)	Prevenção	[5]
12	IEEE Trans.on Geo. e and Rem. Sensing	Pipia et al. (2013)	Monitoramento	[1]
13	Environmental Geology	(Mancini et al., 2009b)	Monitoramento	[4]
14	J. of Loss Prev. in the Process Industries	Zhang et al. (2017)Zhang et al. (2017)	Prevenção	[6]
15	Hydrology and Earth System Sciences	Zidane et al.(2014a)	Prevenção	[2]
16	Journal of Contaminant Hydrology	Zidane et al.(2014b)	Prevenção	[2]

Continua...

Continuação...

[#]	Revista	Referência	Tipo de controle	Técnica
17	Netherlands Journal of Geosciences	De Waal et al.(2012)	Prevenção	[6]
18	Carbonates and Evaporites	Land (2013)	Monitoramento	[8][9]
19	Comptes Rendus – Geoscience	Contrucci et al. (2011)	Monitoramento	[4][9]
20	Environmental Geology	Cooper (2002)	Prevenção	[5]
21	Geomorphology	Stecchi et al. (2009)	Monitoramento	[3]
22	Geomorphology	Autin (2002)	Prevenção	[5]
23	Mathematical Geology	Zijl et al. (2005)	Prevenção	[2]
24	Int. J. of Rock Mech. and Mining Sciences	(Bauer et al.(1997)	Prevenção	[2][8][10]
25	Engineering Geology	Bell (1975)	Remediação	[5]

3.2 REVISÃO SISTEMÁTICA

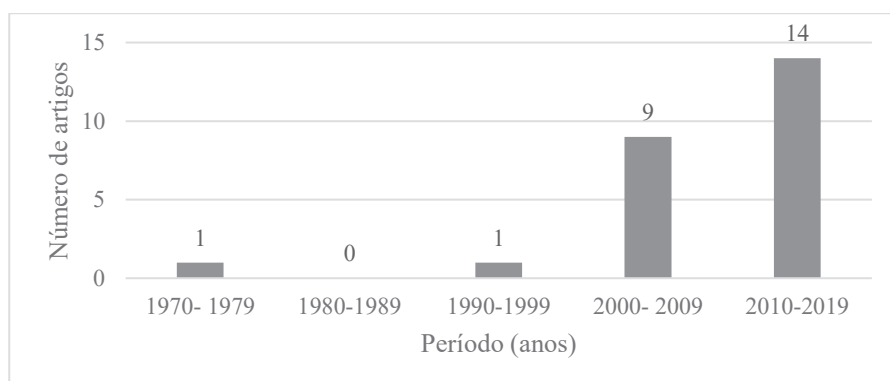
Este item apresenta os trabalhos antecedentes disponíveis sobre os movimentos de superfície de solo nas áreas de mineração de sal-gema por dissolução.

3.2.1 Análise geral

Os artigos selecionados foram publicados em 17 periódicos diferentes, 5 deles colaborando com 48% das publicações. A revista Engineering Geology destacou-se por ser responsável por 20% das publicações.

A FIGURA 16 mostra o número de artigos ao longo do tempo. Pode-se observar um aumento após o ano 2000, especialmente após 2010. Esse fato pode ser explicado pelo desenvolvimento de técnicas que permitem análises de fenômenos de subsidência e, principalmente, por novos casos de subsidência que ocorreram, inclusive em minas fora de operação.

FIGURA 16 – QUANTIDADE DE ARTIGOS AO LONGO DO TEMPO



3.2.2 Tipo de controle

Quanto ao tipo de controle, verificou-se que 14 artigos (56%) estão relacionados ao monitoramento de subsidência já ocorridos, 10 artigos (40%) estão relacionados à prevenção de subsidências e apenas 1 (4%) disserta sobre técnicas de remediação.

Vale ressaltar que o trabalho sobre abordagens probabilísticas foi considerado um artigo de prevenção, mesmo que já houvessem subsidências nessa região.

Os artigos que abordam as técnicas de monitoramento se destacam em quantidade e classificação. Essa supremacia é justificada pela dificuldade em interpretar o comportamento da deformação da rocha salina e de cessar os processos de subsidência.

3.2.3 Casos de subsidência

Exceto o artigo Zijl et al. (2005), posição 23 do ranque, todos os artigos aplicaram suas metodologias à alguma mina existente. A TABELA 7 mostra os casos de subsidência relatados nos artigos selecionados. A taxa máxima de subsidência relatada no artigo, o período em que essa subsidência ocorreu e a ocupação do solo da região são apresentadas nesta tabela.

A taxa máxima de subsidência é muito variável, pois depende do mecanismo de subsidência. Movimentos lentos do solo são típicos de regiões onde há rochas salinas devido ao seu comportamento de fluência, no entanto o efeito das rochas adjacentes influencia na magnitude dos movimentos, as suas propriedades de rigidez regem o seu nível de deformações podendo ocasionar um amortecimento das deformações em superfície. Os artigos 18 e 24 (Bauer et al., 1997; Land, 2013) apresentam casos em que certamente não houve deformação apenas por fluência, mas também formação de *skinholes*, porque o movimento do solo ocorreu abruptamente e com profundidade acentuada.

Van Der Spek (2018), artigo 11, destaca-se como o único que mostra previsões de taxas futuras de subsidência e apresenta a interferência de subsidências à elevação do nível do mar ocasionada por mudanças climáticas.

É interessante notar também que vários casos ocorreram em áreas urbanas e, portanto, podem causar perdas econômicas e risco de vida.

TABELA 7 – CASOS DE SUBSIDÊNCIA REPORTADOS NOS ARTIGOS SELECIONADOS

[#]	Localização	Taxa de subsidência máxima (cm/ano)	Período	Ocupação do solo
1	Wieliczka, Polônia	72	1962	Área urbana
2	Vauvert, França	2,1	1995-1998	Área rural
3	Suria, Espanha	30	1995–2000	Área urbana
4	Grandfalls, EUA	23	2014-2017	Área rural
	Wink, EUA	40		
5	Sallent, Espanha	5	2006- 2007	Área urbana
6	Germany	0,67	1992 -1999	Área urbana
7	Winkler County, EUA	53	2015 - 2016	Vegetação nativa
8	Veendam, Holanda	1,83	2015 - 2017	Área rural
	Frísia, Holanda	1,38	2016 - 2017	
9	Dombasle, França	14	-	-
10	Tuzla, Bósnia e Herzegovina	25	1982	Área urbana
	Vlie, Holanda	0,01	2030	Região costeira
11	Pinkegat, Holanda	0,02		
	Zoutkamp, Holanda	0,01		
12	Vila de Sallent, Espanha	-	-	Área urbana
13	Tuzla, Bósnia e Herzegovina	25	1982	Área urbana
14	Jintan, China	-	-	Área urbana
15	Suíça	12	-	-
16	Suíça	10	-	-
17	Holanda	-	-	Diversas regiões
18	New Mexico e Texas, USA	Abruptamente (45m)	-	Vegetação nativa
19	Cerville, França	1 m/h	2008	-
20	Reino Unido	-	-	Diversas regiões
21	Tuzla, Bósnia e Herzegovina	30	1956 - 2003	Área urbana
22	Five Islands, EUA	-	-	-
24	Weeks Island, EUA	Abruptamente (9 m)	1992	Área urbana
25	Cheshire, Reino Unido	-	-	Área urbana

FONTE: A autora (2020).

Perski et al. (2009) explicam que a taxa de subsidência é um parâmetro importante no estudo de subsidência; no entanto, esta taxa nem sempre é constante. A taxa de subsidência está diretamente relacionada ao volume de sal extraído. Em Tuzla, foi detectada uma redução nas taxas de subsidência, relacionada à redução da exploração de sal (Mancini et al., 2009b). Em Sevilha, Espanha, de acordo com Contrucci et al. (2011), foram observados três regimes micro-sísmicos, cada um correlacionado com alterações na taxa de subsidência de superfície e nível de salmoura na caverna.

Em Wieliczka, Polônia, dois tipos principais de subsidência foram observados: lento, devido à convergência de câmaras, e rápido, causado pelo fluxo de água subterrânea na mina (Perski et al., 2009).

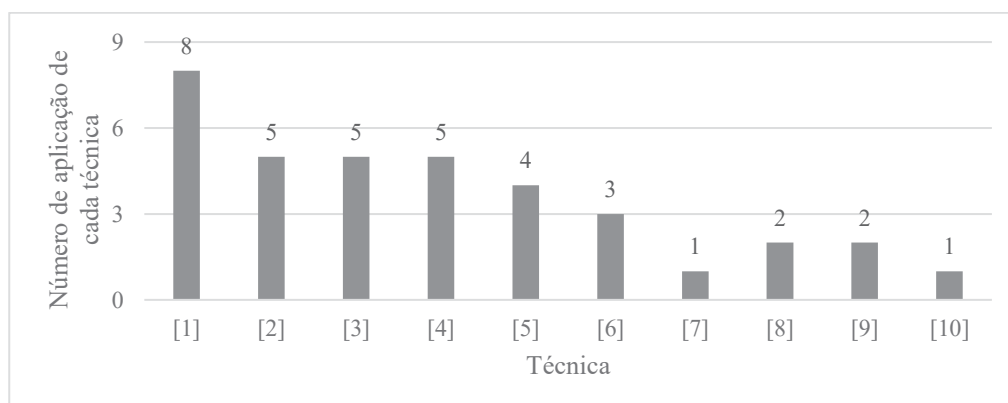
Na Catalunha, Espanha, foram identificados quatro tipos de movimentos no solo. Com o progresso da extração de sal, ocorre subsidência de deslocamento contínuo. Nas galerias abandonadas, a subsidência residual é desencadeada com uma taxa decrescente de fechamento. O soerguimento (termo da geologia que designa elevação da superfície do solo) é identificado devido à intrusão do domo de sal. E colapsos rápidos do solo, causados pela dissolução de materiais solúveis próximos à superfície do solo (Yerro et al., 2014).

Uma diminuição da taxa de subsidência também se refere ao volume total de câmaras. Por exemplo, em Wieliczka, Polônia, a taxa de subsidência diminuiu devido ao preenchimento de areia em algumas cavernas (Perski et al. 2009).

3.2.4 Técnicas de controle

Técnicas de controle são os métodos utilizados para monitorar ou prever a magnitude da subsidência. Alguns artigos usaram mais de uma metodologia, como pode ser visto no QUADRO 1. No entanto, os artigos que abordaram o assunto como revisão de literatura e avaliação de risco, foram considerados como tendo usado uma única metodologia. A FIGURA 17 mostra o número de aplicações de tecnologia nesta revisão sistemática.

FIGURA 17 – NÚMERO DE APLICAÇÕES DE CADA TÉCNICA NOS ARTIGOS SELECIONADOS.



Interferometria [1], métodos numéricos [2], nivelamento topográfico [3], GNSS [4], revisão de literatura [5], avaliação de risco [6], fotografia aérea [7], geofísica [8], sismômetro [9] e perfuração de poços [10].

FONTE: A autora (2020).

O QUADRO 2 apresenta as finalidades dessas técnicas e as principais considerações dos autores dos artigos sobre essas metodologias.

QUADRO 2 – TÉCNICAS DE CONTROLE DE SUBSIDÊNCIA

Técnica	Principais considerações apresentadas nos artigos
Interferometria	É um processo remoto que permite consultar dados passados. Satisfatório para movimentos lentos do solo. A principal desvantagem é a incapacidade de registrar movimentos bruscos na superfície do terreno. A interferometria permite definir o local mais adequado para a instalação de <i>benchmarks</i> para o nivelamento topográfico. Para eliminar o efeito atmosférico na fase do sinal, foi desenvolvida uma técnica PSInSAR (<i>Persistent Scatterers</i>). Eventualmente, é necessário executar um reprocessamento que consiste em um algoritmo para resolver problemas de embaralhamento das fases.
Modelagem numérica	A modelagem numérica de subsidências causada pela dissolução de sal ainda é usada com restrições, principalmente, em virtude da dificuldade de simular o comportamento de fluência da rocha de sal. Nos artigos selecionados foram usadas as seguintes leis: lei de Hooke, lei de fluxo de Stokes e lei de fluxo de Darcy, além de outras equações físicas relacionadas à advecção, dissolução e porosidade. O artigo mais recente adota um modelo baseado na lei de Darcy e uma equação simplificada que vincula fluxo, dissolução e porosidade. No entanto, os resultados não apresentam uma convergência muito satisfatória com dados medidos de casos reais (QUANG et al., 2019).
Nivelamento topográfico	Todos os artigos usam as informações obtidas por medições topográficas para comparar ou calibrar informações obtidas por interferometria. Em Tuzla, Bósnia e Herzegovina, os dados topográficos foram utilizados em dois métodos de análise de curvatura: curvatura direcional e curvatura Gaussiana analítica para análise de subsidência. A curvatura direcional apresentada pelos mapas gerados a partir dos métodos de curvatura mostrou boa concordância com as fendas mais pronunciadas observadas no campo. Os mapas Gaussianos foram mais satisfatórios na representação das

Técnica	Principais considerações apresentadas nos artigos
	falhas normais do subsolo (STECCHI; ANTONELLINI; GABBIANELLI, 2009).
GPS	O GPS estático com posicionamento relativo tem potencial para detectar deformações lentas. O GPS também é eficiente na calibração de leituras interferométricas. No entanto, as duas técnicas não são totalmente comparáveis, porque a estação de GPS frequentemente é instalada no topo de prédios altos, que podem sofrer recalques.
Revisões de literatura	As revisões de literatura são relevantes porque são registros públicos de experiências de casos anteriores, diferentemente de projetos e planos de gerenciamento que envolvem arquivos de acesso restrito.
Avaliação de risco	Esses produtos podem ser aplicáveis em políticas públicas para selecionar as ações de mitigação. Existem várias técnicas de avaliação de risco. Nos trabalhos selecionados, abordagens probabilísticas baseadas em testes geotécnicos são utilizadas. O uso do ambiente GIS é uma boa alternativa para a representação de resultados, pois permite a manipulação de dados e a produção de mapas e relatórios.
Outras técnicas	Fotografia aérea, geofísica, rede microssísmica e perfuração foram as técnicas menos utilizadas, com duas ou menos aplicações. Entre estes, destacam-se a tomografia sísmica e a resistividade elétrica, técnicas geofísicas. Essas técnicas tornam possível conhecer o material de subsuperfície sem o uso de procedimentos invasivos, os quais geralmente são mais caros e podem até afetar a estabilidade da mina ou gerar caminhos de drenagem.

FONTE: A autora (2020).

3.3 CONCLUSÕES

Este capítulo tem como objetivo apresentar as técnicas de controle e de estudo de subsidências em áreas de mineração de sal por método de dissolução. O conhecimento dessas técnicas possibilitou algumas considerações para que a metodologia deste trabalho seja proposta. Diante desta revisão sistemática de literatura observou-se que:

- Os estudos não apresentam técnicas de desativação de minas de sal e são necessários estudos sobre pressão de fluido no interior da caverna adequada para garantir os parâmetros de segurança;
- Verificou-se que a interferometria é a técnica mais utilizada, principalmente por fornecer um histórico de movimento do solo. Essa técnica é considerada bem estabelecida, mas também possui limitações de aplicação, como por exemplo em casos de altas taxas de subsidências;
- GNSS, nivelamento topográfico, sismógrafo e fotografia aérea são técnicas amplamente utilizadas em outros campos da engenharia e, dentro de suas limitações, podem ser muito úteis no controle de subsidências;
- O propósito desta revisão sistemática foi estudar as técnicas atualmente empregadas para controle de subsidências para auxiliar na definição da metodologia desta tese. Considerando as informações disponíveis para a mina em estudo e visando propor uma metodologia que possa ser utilizada no descomissionamento de outras minas de dissolução, foram selecionadas três técnicas para compor uma ferramenta de prevenção de subsidências: ensaios geofísicos para conhecimento da geometria e dimensões das minas, além da composição dos estratos litológicos; a modelagem numérica para estudo da estabilidade das minas e a abordagem probabilística, a fim de obter um estudo de confiabilidade de projetos de descomissionamento.

4 COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE ROCHAS SALINAS

Shahmorad et al. (2016) afirmam que, devido às grandes dimensões e considerável profundidade, os deslocamentos em decorrência da fluência da halita, a dilatação da rocha que forma a caverna e a resistência à tração são os fatores mais importantes na análise de estabilidade de cavernas salinas.

Ressalta-se que, mesmo com a frequente ocorrência de comportamento dilatante em cavernas salinas, os critérios utilizados ainda são empíricos e devem ser aplicados com cautela. Em relação aos modelos constitutivos, contabiliza-se uma grande diversidade de propostas, que incluem desde modelos empíricos com apenas 3 parâmetros até modelos físicos com 16 parâmetros de entrada. A disponibilidade de parâmetros calibrados é um fator que deve direcionar a escolha das equações constitutivas.

Neste capítulo são apresentados o comportamento geomecânico do sal-gema, critérios de dilatância e os modelos constitutivos representativos do comportamento desta rocha.

4.1 FLUÊNCIA DA ROCHA SALINA

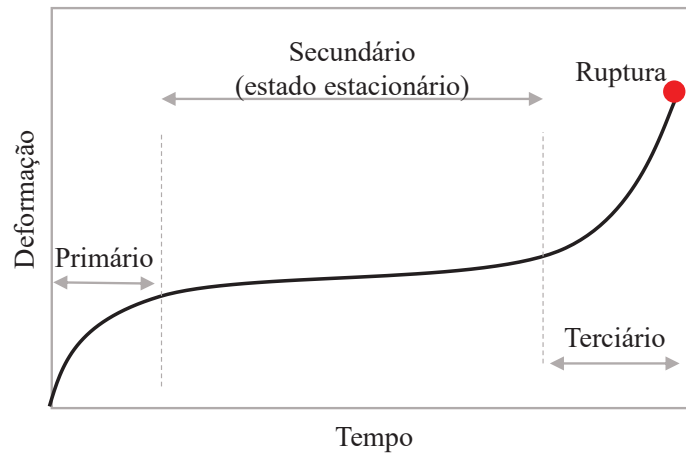
Segundo Thoraval et al. (2015), o sal-gema é um material viscoplástico que não resiste a tensões desviadoras, sendo que qualquer que seja a condição de tensões desviadoras impostas há deformação por fluência. Os deslocamentos das paredes da caverna salina devido à fluência do sal-gema podem ocasionar a convergência da caverna. Este movimento halocinético provoca também o deslocamento dos estratos próximos à camada de sal, causando assim a subsidência.

A fluência pode ser descrita como a característica do meio de, sobre carregamentos constantes e/ou temperaturas elevadas, sofrer deformações permanentes sem causas fissuras. Uma melhor compreensão do fenômeno de fluência da halita é necessária para o estudo do descomissionamento de minas de sal por dissolução.

Atualmente a norma D-7070, publicada pela ASTM (2016), fornece as diretrizes para a execução de ensaios triaxiais de fluência sob tensão e temperatura constante.

A FIGURA 18 apresenta as fases da deformação por fluência da halita em carga constante. Ao longo do tempo, a halita passa por três estágios característicos de fluência. Inicialmente, ocorre uma resposta rápida transiente (fluência primária), depois um estágio de fluxo contínuo (fluência secundária) e, em algumas vezes há um aumento da taxa de deformação antes da ruptura (fluência terciária).

FIGURA 18 – FASES DA DEFORMAÇÃO POR FLUÊNCIA NO SAL (CARGA CONSTANTE)



FONTE: Adaptado de Neal (1991).

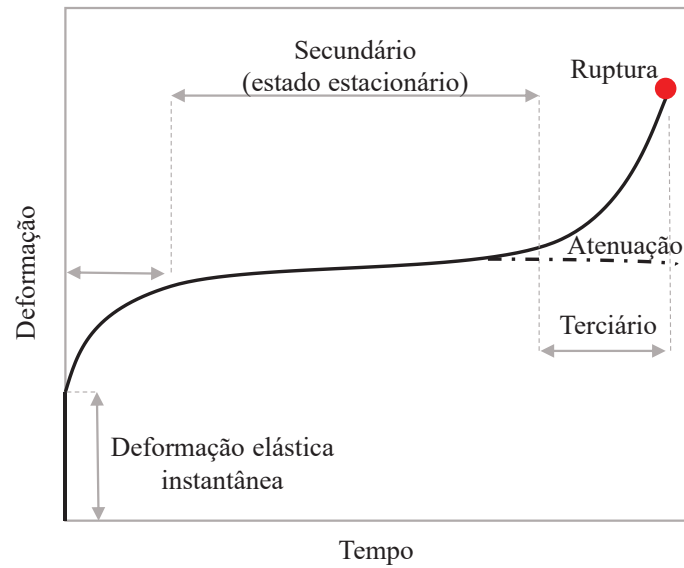
Costa (1984) afirma que a fluência e a plasticidade são deformações não recuperáveis e devem ser analisadas de forma conjunta. Assim, a deformação total que pode ocorrer em um corpo sólido é dada por

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{cr}, \quad (6)$$

sendo ε a matriz de deformação total, ε_e a matriz de deformação elástica, ε_p a matriz de deformação plástica e ε_{cr} a matriz de deformação por fluência (*creep*).

Adicionando a parcela elástica ao gráfico da FIGURA 18 obtém-se o gráfico mostrado na FIGURA 19. Observa-se que, após a deformação elástica instantânea, o material entra numa fase transiente de desaceleração da deformação até chegar em um vetor de taxa estacionária. Neste período, a velocidade do fluxo de deformação do sal é baixa e constante. A fluência secundária é um estágio que pode se estender por anos. Após o período estacionário, a halita pode entrar em uma fluência atenuante (linha tracejada) dependendo das condições de tensão e temperatura ou entrar em uma aceleração de deformação até chegar a ruptura. Ruiz (2015) explica que a condição de atenuação é atingida quando a tensão sob a qual o material é submetido, não é capaz de vencer a imbricação dos retículos cristalinos em uma zona de fraqueza da rocha.

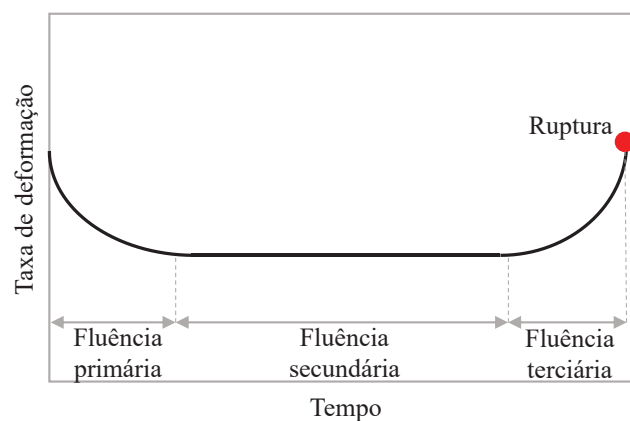
FIGURA 19 – ESTÁGIOS DA DEFORMAÇÃO DA ROCHA SALINA



FONTE: Adaptado de Costa (1984).

Costa (1984) explica que a taxa de deformação da halita é tão maior quanto maiores forem a temperatura ou o nível de tensão. No entanto, se estas condições forem constantes o comportamento característico da taxa de deformação poderá ser similar ao apresentado na FIGURA 20.

FIGURA 20 – CURVA GENÉRICA DA TAXA DE FLUÊNCIA DA HALITA



FONTE: A autora (2020).

4.2 DILATÂNCIA

O conceito de comportamento dilatante da rocha salina foi introduzido por Cristescu (1993) após a realização de ensaios triaxiais executados em duas etapas: na fase inicial, a tensão desviadora mantinha-se constante e na etapa seguinte a tensão principal mantinha-se constante e a tensão desviadora aumentava com tempo. O autor observou um comportamento denominado compressão-dilatância (C-D). Este comportamento é descrito por dois domínios: inicialmente observa-se o comportamento compressivo dúctil e, posteriormente, é visto um comportamento semi-frágil dilatante. A definição do limite entre compressão e dilatância é importante na análise de estabilidade de minas de sal, pois as microfissuras existentes nos geomateriais interferem significativamente em seu comportamento geomecânico.

Enquanto a halita encontra-se no regime compressivo dúctil, ocorre a cicatrização das fissuras, característica anteriormente citada. No entanto, quando a rocha salina atinge a expansão volumétrica inelástica, as microfissuras tendem a aumentar ocasionando o fenômeno denominado deslocamento.

Firme et al. (2019) atentam para as dificuldades de monitoramento e controle do comportamento dilatante da rocha salina que forma as cavernas de dissolução. Nos poços de extração de petróleo, que atravessam espessas camadas de sal, os furos são revestidos e cimentados. Por outro lado, nas cavernas de dissolução de sal as paredes estão diretamente em contato com a salmoura. Outro fator agravante é a impossibilidade de inspeção visual e a possibilidade de acesso de ferramentas de medição com tamanhos compatíveis às dimensões do poço. De acordo com o referido autor, é um consenso entre pesquisadores que o estado de tensões influencia significativamente o comportamento dilatante. Em contrapartida, a geometria da carga, a litologia, o tipo de sal, a temperatura e a taxa de deformação são fatores que exercem uma influência relativamente baixa sobre a dilatância.

A grande dificuldade do estudo do comportamento dilatante das cavernas salinas é que as formulações são empíricas. A seguir são apresentadas cinco formulações empíricas para determinação da tensão desviadora crítica ($\sigma_{d,cr}$), ou seja, do limite entre comportamento de variação volumétrica compressivo ou dilatante, em função da tensão média (σ_m). Devido à origem empírica das formulações, ainda é difícil apresentar resultados confiáveis acerca deste comportamento.

Spiers et al. (1988) propõem um limite de tensão desviadora crítica a partir de ensaios triaxiais. Os testes foram realizados com uma pressão de confinamento de 50 MPa, com uma faixa de temperatura entre 20°C e 200°C e uma faixa para valores de taxa de deformação

constante entre 10^{-7} e 10^{-4} m/s e utilizando testemunhos da mina de Asse, norte da Alemanha, e do domo de Avery Island, New México. Por esse método o valor da deformação crítica é dado por

$$\sigma_{d.cr} = (a\sigma_m + b)\sqrt{3}, \quad (7)$$

em que $a = 0,83$ e $b = 1,9$ MPa.

A formulação de Ratigan et al. (1991) vem sendo utilizada com sucesso para a halita brasileira. Este comportamento foi traçado a partir de ensaios triaxiais para a formação de WIPP (*Waste Isolation Pilot Plant*)⁴ e para o domo de Avery Island. O valor limite proposto por Ratigan et al. (1991) é

$$\sigma_{d.cr} = (a\sigma_m)\sqrt{3}, \quad (8)$$

onde $a = 0,81$.

Hunsche (1993) propõe um critério a partir de ensaios que identificaram a falha em corpos de prova em várias condições. Este autor conduziu ensaios de compressão uniaxial e triaxial em testemunhos provindos da mina de Asse e Gorleben, Alemanha. Este critério é uma função quadrática elaborada a partir do melhor ajuste dos resultados experimentais. Neste critério a tensão desviadora crítica é dada por

$$\sigma_{d.cr} = (f_1\sigma_m^2 + f_2\sigma_m)\left(\frac{3}{\sqrt{2}}\right), \quad (9)$$

onde $f_1 = -0,0168$ e $f_2 = 0,86$. As tensões devem ser inseridas em MPa.

DeVries et al. (2005a) e DeVries et al. (2005b) apresentam o critério de DeVries, que foi estabelecido também por testes laboratoriais em testemunhos de sal com alta pureza oriundos de uma formação em camada próximo a Cayuta, Nova Iorque. Este critério é uma função não-linear baseada na tensão principal e no Ângulo de Lode (θ), o qual é dado por

⁴ Repositório para disposição de resíduos nucleares.

$$\sigma_{d.cr} = \left(\frac{D_1(|3\sigma_m|)^k + T_0}{\sqrt{3}\cos\theta - D_2\sin\theta} \right) \sqrt{3}, \quad (10)$$

em que $D_1 = 0,773$, $D_2 = 0,524$, $T_0 = 1,95$ e $k = 0,693$. As tensões são dadas em MPa. O ângulo de Lode é de $+30^\circ$ para condição triaxial de compressão e -30° para condição triaxial de extensão.

Popp et al. (2001) observaram que o critério de Hunshe, devido a consequências matemáticas, após uma determinada tensão média, descendia. Assim, esses autores propuseram uma modificação da equação deste critério de maneira tal que a descendência da parábola fosse substituída com uma linha reta. Estes autores ainda introduziram o conceito de limites máximo e mínimo. Desta forma estabeleceu-se o critério de Hunsche modificado, onde a tensão desviadora crítica correspondente ao limite superior e inferior, respectivamente, são dadas por

$$\sigma_{d.cr} = (A_1 \exp(B_1 \sigma_m)) - (C_1 \exp(G_1 \sigma_m)), \quad (11)$$

e

$$\sigma_{d.cr} = (A_2 \exp(B_2 \sigma_m)) - (C_2 \exp(G_2 \sigma_m)) \quad (12)$$

em que os parâmetros de ajuste $A_1 = 25,02$, $B_1 = 0,004636$, $C_1 = 17,9$, $G_1 = -0,1285$, $A_2 = 19,06$, $B_2 = 0,005629$, $C_2 = 19,23$ e $G_2 = -0,1139$. Os parâmetros subscritos com 1 correspondem ao limite superior e os parâmetros subscritos com 2 correspondem ao limite inferior.

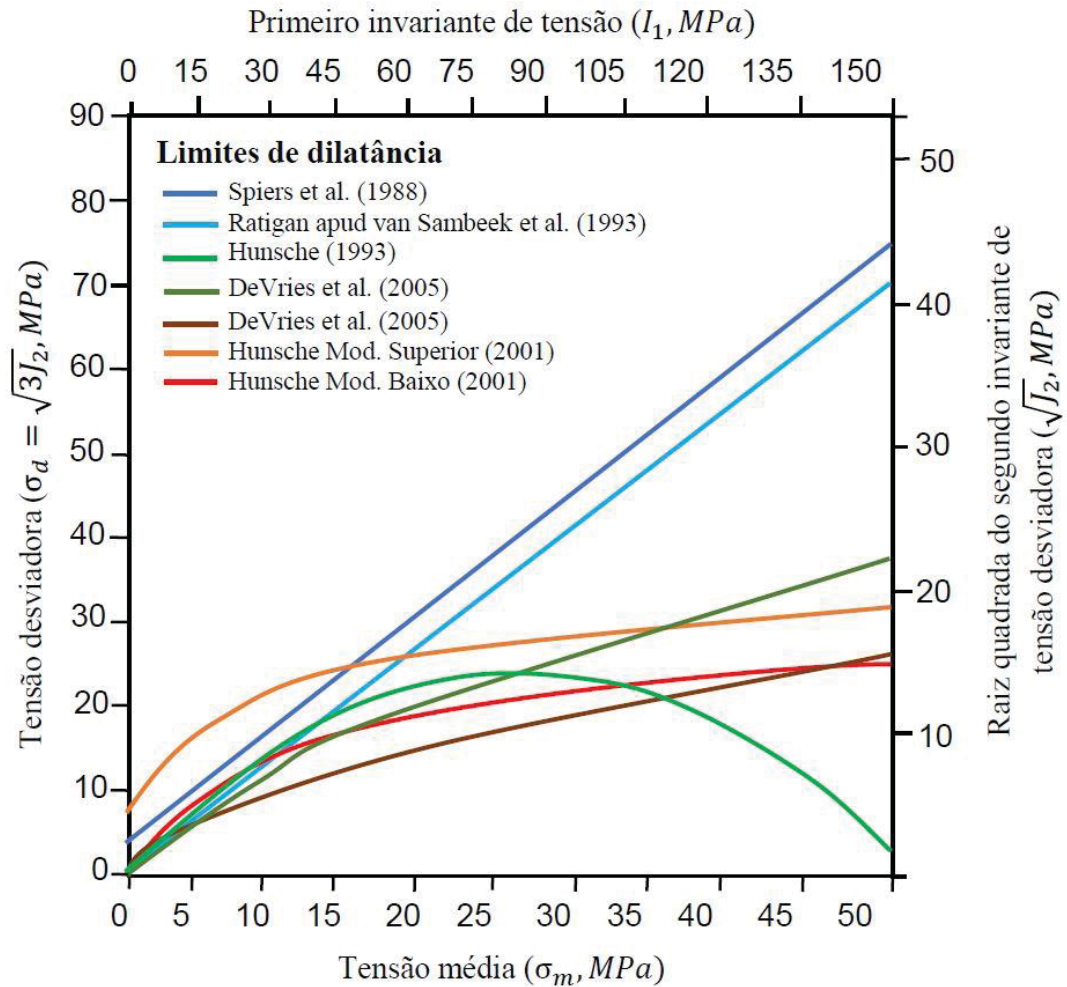
Conforme mostra a FIGURA 21 o trabalho de Firme et al. (2019) apresenta os limites mencionados no mesmo espaço de tensões.

Ratigan et al. (1991) apresentam também uma estimativa do fator de segurança quanto à dilatação em cavernas subterrâneas, dado por

$$FS = \frac{-0,27I_1}{\sqrt{J_2}} \quad (13)$$

em que I_1 é o primeiro invariante de tensões e J_2 é o segundo invariante de tensão desviadora. Quando o fator de segurança é menor que 1, a tensão cisalhante octaédrica é maior que a tensão média então a dilatação da rocha inicia.

FIGURA 21 – LIMITES DE DILATÂNCIA APRESENTADOS EM UM MESMO ESPAÇO DE TENSÕES



FONTE: Firme et al. (2019).

4.3 MODELOS CONSTITUTIVOS REPRESENTATIVOS DO SAL-GEMA

Os modelos constitutivos para representação da fluência da halita são derivados dos modelos de fluência em metais. Estes modelos podem ser de origem física, empírica ou reológica.

Os modelos físicos para fluência são baseados em comportamentos microfísicos. Assis (1990) explica que estas leis microfísicas são baseadas no processo de deformação dos cristais. Um cristal pode ser definido como uma matriz de átomos que estão em uma condição estática. Segundo o mesmo autor, nestes modelos o comportamento elástico dos cristais se deve às forças interatômicas que tendem a manter os átomos em equilíbrio. Por outro lado, as deformações

permanentes são resultado de defeitos de um elemento de uma malha reticulada (*Lattice*) e, consequentemente, do rearranjo desta malha.

Por outro lado, os modelos empíricos são resultados de sucessivos aperfeiçoamentos de uma relação potencial entre tensão e deformação. A primeira versão desta formulação foi apresentada por Norton (1929) para aplicação em materiais metálicos. Com a colaboração de Bailey (1935), foi adicionado o efeito do tempo. A versão atualmente utilizada foi proposta por Lomenick; Bradshaw (1969) e inclui, além da tensão e do tempo, a influência da temperatura. Costa (1984) aplicou esta formulação no Brasil pela primeira vez no projeto de painéis e galerias da mina de Taquari-Vassouras.

Segundo Firme (2013), modelos reológicos são aqueles que apresentam a reologia dos materiais, ou seja, a resposta de deformação de um material por um fluxo. Este tipo de modelo pode ser aplicado para fluidos e sólidos homogêneos e usualmente são compostos por molas e amortecedores. Em mecânica das rochas os seguintes modelos reológicos são recorrentemente usados: Modelo de Maxwell, Modelo de Kelvin/Voight, Modelo de Maxwell Generalizado, Modelo de Kelvin Generalizado e Modelo de Burgers. Os itens a seguir apresentam os principais modelos reológicos, empíricos e físicos.

4.3.1 Modelos reológicos

Gonçalves (2011) explica que os modelos reológicos podem ser aplicados, inclusive, para representação do comportamento de deformação unidimensional de um material submetido a uma tensão ao longo do tempo. De acordo com Jeremic (1994), a reologia é o estudo do fluxo (deformabilidade) de materiais.

Poiate Junior (2012) explica que estes modelos utilizam molas, amortecedores e deslizantes em série e/ou paralelo, para representar o comportamento de materiais homogêneos. Nesses modelos as molas representam a parcela elástica que é definida por sua rigidez. O amortecedor representa a parcela de dissipação de energia e o comportamento dependente da velocidade de deformação. O elemento deslizante representa a deformação plástica.

4.3.1.1 Modelo de Maxwell

Conforme explicam Papanicolaou e Zaoutsos (2019), o modelo de Maxwell, representado na FIGURA 22, é composto por uma mola e um amortecedor viscoso arranjado em série. Quando submetido a ensaios de cisalhamento puro, dois parâmetros materiais

caracterizam o modelo e definem o comportamento do material: o módulo de cisalhamento da mola (G_1) e a viscosidade do amortecedor (η_1). Utilizando este modelo, obtém-se uma relação linear da deformação com o tempo, ou seja, taxa de deformação constante que representa a fluência secundária.

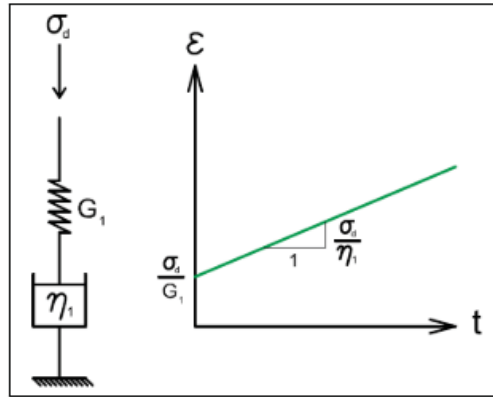


FIGURA 22 – REPRESENTAÇÃO MECÂNICA DO MODELO DE MAXWELL

FONTE: Firme (2013).

Neste modelo, é considerado que a taxa total de deformação por fluência ($\dot{\epsilon}$) é a soma das taxas de deformação da mola ($\dot{\epsilon}_M$) e do amortecedor ($\dot{\epsilon}_A$). Considerando que é um ensaio de fluência, assume-se um valor constante de tensão desviadora (σ_d) e uma deformação elástica. Como esta deformação não aumenta e não diminui ao longo do tempo, tem-se uma taxa de deformação elástica nula. Assim, a taxa de deformação total será igual a taxa de deformação do amortecedor dependendo exclusivamente da viscosidade do amortecedor.

Considerando essas premissas, a deformação do amortecedor ao longo do tempo pode ser obtida por

$$\epsilon_d = \frac{\sigma_d}{\eta_1} t, \quad (14)$$

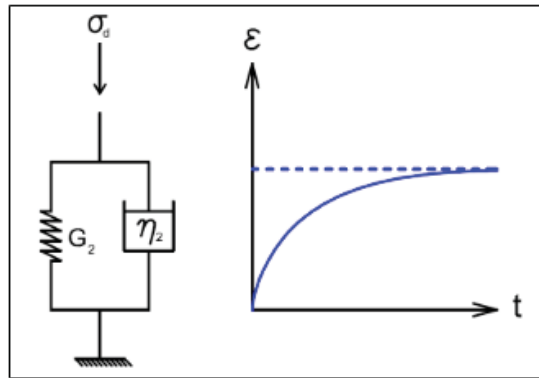
Com isso a deformação total ao longo do tempo $\epsilon(t)$ é dada por

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_d}{2G_1} + \frac{\sigma_d}{\eta_1} t. \quad (15)$$

4.3.1.2 Modelo de Kelvin/Voigt

Como exposto em Goodman (1989), o modelo de Kelvin/ Voigt diferencia-se do modelo de Maxwell por dispor a mola e o amortecedor em paralelo, conforme mostra a FIGURA 23. Como pode ser observado no gráfico que representa a deformação ao longo do tempo, a taxa de deformação tem comportamento exponencial decrescente tendendo a uma taxa constante e nula.

FIGURA 23 – REPRESENTAÇÃO MECÂNICA DO MOEDELO DE KELVIN/VOIGT



FONTE: Firme (2013).

Considerando um ensaio de fluência em cisalhamento puro, tem-se que, nesse caso, a tensão desviadora pode ser dividida entre a tensão na mola (σ_d^M), que tem seu comportamento definido por seu módulo cisalhante (G_2), e a tensão no amortecedor (σ_d^A), que depende de sua viscosidade (η_2). Assim, a tensão desviadora total é dada por

$$\sigma_d = \sigma_d^A + \sigma_d^M. \quad (16)$$

Podendo ser calculada por

$$\sigma_d = 2G_2\varepsilon + \eta_2 \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (17)$$

Segundo Epaarachchi (2011), se a tensão desviadora total é constante, a deformação ao longo do tempo pode ser obtida por

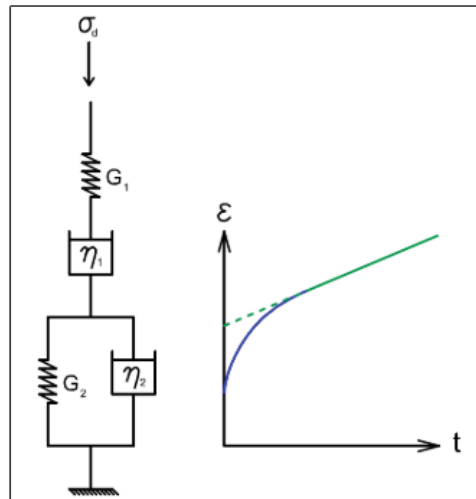
$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_d}{2G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2G_2}{\eta_2} t\right) \right]. \quad (18)$$

Observa-se que este modelo representa apenas a fluência primária e não possibilita representar a deformação elástica instantânea.

4.3.1.3 Modelo de Burgers

O modelo de Burgers é uma junção dos modelos de Maxwell e Kelvin/ Voigt. Os dois modelos são acoplados em série, formando o sistema apresentado na FIGURA 24. Com esta configuração, a equação que define a deformação final é dependente de quatro parâmetros materiais, referentes a cada elemento do modelo.

FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO MECÂNICA DO MODELO DE BURGERS



FONTE: Firme (2013).

Com isso, obtém-se a equação para a deformação total segundo o modelo de Burgers, em que os termos com índice 1 referem-se aos modelos de Maxwell e os termos com índice 2 referem-se a elementos pertencentes ao modelo de Kelvin/Voigt:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_d}{2G_1} + \frac{\sigma_d}{\eta_1} t + \frac{\sigma_d}{2G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2G_2}{\eta_2} t\right) \right]. \quad (19)$$

Este modelo é capaz de simular as etapas de fluência primária e secundária mostradas na FIGURA 18 superpostas a uma deformação elástica instantânea. Desta forma, dentre os modelos apresentados este é o modelo mais representativo da fluência salina.

Firme (2013) ressalta que estes modelos que não compreendem a fluência terciária. Para que deformações plásticas sejam consideradas, é necessário, por exemplo, um critério de dano.

4.3.2 Modelo empírico potencial

Pela Lei da Potência, a deformação da rocha salina pode ser calculada utilizando três funções (LOMENICK; BRADSHAW, 1969). Estas funções são dependentes da tensão equivalente (σ_{eq}), do tempo (t) e da temperatura (T), isto é,

$$\varepsilon = f_1(\sigma_{eq})f_2(t)f_3(T). \quad (20)$$

A função da tensão equivalente pode ser descrita por uma relação de potência, na forma

$$f_1(\sigma_{eq}) = B\sigma_{eq}^n. \quad (21)$$

Está é a forma original da Lei da Potência proposta por Norton (1929). A tensão equivalente (σ_{eq}) corresponde a tensão equivalente de von Mises dada por

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{3}}, \quad (22)$$

em que σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões principais, autovalores da matriz de tensões corrente.

A função do tempo, incluída por Bailey (1935) é também uma relação de potência, é dada por

$$f_2(t) = Dt^m. \quad (23)$$

A influência da temperatura pode ser descrita por outra relação de potência, dada por

$$f_3(T) = CT^v. \quad (24)$$

Nessas equações os parâmetros B, D e C são fatores estruturais e os expoentes n, m e v são determinados empiricamente.

A junção das três funções anteriormente apresentadas resulta então na equação da deformação ao longo do tempo, conforme a expressão geral

$$\varepsilon(t) = A\sigma_{eq}^n t^m T^\nu, \quad (25)$$

sendo que o fator A representa o produto dos fatores B , D e C . No caso de temperatura constante, deve-se preservar o fator estrutural A e desconsiderar a função da temperatura, obtendo-se então a equação

$$\varepsilon(t) = A\sigma_{eq}^n t^m. \quad (26)$$

4.3.3 Modelo físico de múltiplos mecanismos de deformação

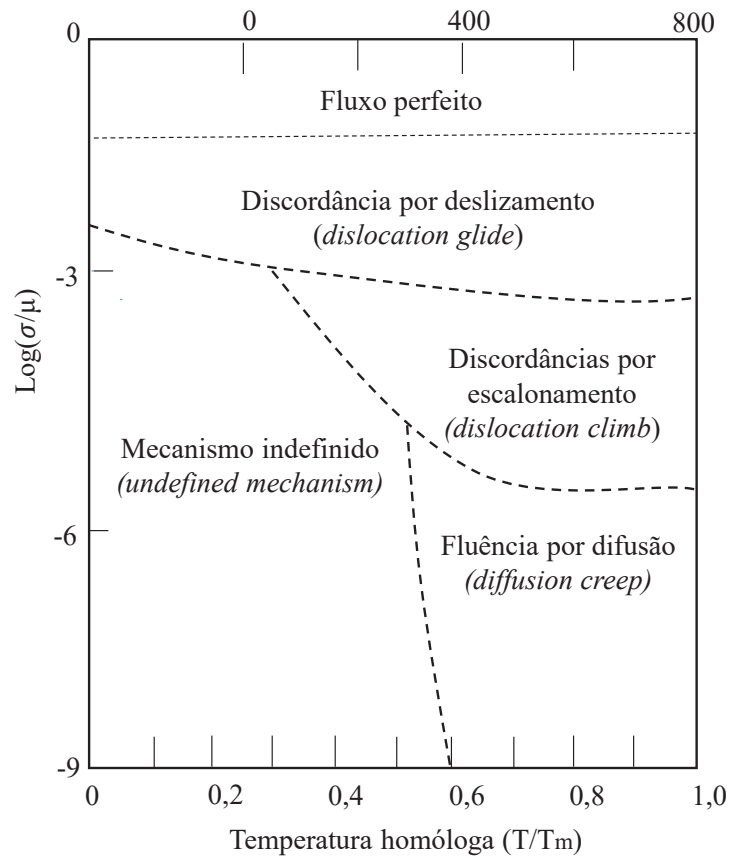
O Modelo de Múltiplos Mecanismos de Deformação (MMD) é um modelo físico, que procura representar a fluência primária e a fluência secundária da rocha salina submetida a tensões desviadoras, proposto, em sua primeira forma, por Munson (1979). De maneira similar os modelos reológicos mencionados, este é um modelo baseado na deformação de metais.

Segundo Assis (1990), os mecanismos de deformação são governados por defeitos em forma reticulada (*lattice*). Estes são defeitos na rede cristalina do material, comumente chamados de discordâncias (*dislocations*). Tais discordâncias são mecanismos micromecânicos. O modelo de múltiplos mecanismos pode sobrepor até três mecanismos de deformação. No entanto, sua utilização pode ser restringida devido à indisponibilidade de parâmetros de entrada.

Firme et al. (2016) esclarecem que estes mecanismos são influenciados pelo estado de tensões, temperatura, composição química e outros fatores. Além destes fatores citados, um processo de difusão interna pode ser responsável pela fluência do sal.

O mapa de mecanismos de deformação, apresentado na FIGURA 25, e sugerido por Munson; Dawson (1979) e Munson (1997), relaciona o logaritmo da razão entre a tensão principal (σ) e o módulo cisalhamento (μ) com a temperatura em que o sal-gema se encontra ou com a temperatura homóloga do sal-gema para identificar o mecanismo que está ocorrendo.

FIGURA 25 – MAPA DE MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO



FONTE: Traduzido de Munson (1997).

Neste mapa proposto por Munson e Dawson (1997), pesquisadores do laboratório SANDIA (EUA), são apresentados cinco mecanismos de deformação. De acordo com estes autores, a taxa de deformação por fluência secundária ($\dot{\epsilon}_{FS}$) é obtida pela soma das taxas de fluência dos mecanismos *dislocation glide*, *dislocation climb* e *undefined mechanism*. Esta afirmação é baseada nas condições de tensão e temperatura de cavernas de sal subterrâneas. Desta forma, a taxa de deformação por fluência secundária pode ser obtida por

$$\dot{\epsilon}_{FS} = \dot{\epsilon}_{DGL} + \dot{\epsilon}_{DCL} + \dot{\epsilon}_{UMC}, \quad (27)$$

em que $\dot{\epsilon}_{DGL}$ é a taxa de deformação por fluência do mecanismo *dislocation glide*, $\dot{\epsilon}_{DCL}$ é a taxa de deformação por fluência do mecanismo *dislocation climb* e $\dot{\epsilon}_{UMC}$ é a taxa de deformação por fluência do *undefined mechanism*.

- *Mecanismo 1 - Dislocation climb*

O mecanismo 1, escalonamento ou galgamento de discordâncias, atribui à redistribuição das moléculas o aumento da capacidade de fluência. O *dislocation climb* é ativado por alteração de temperatura. Segundo Munson (1991), se a temperatura do geomaterial encontra-se de moderada à alta e existe uma tensão desviadora, a taxa de deformação por escalonamento de discordâncias ($\dot{\varepsilon}_{DCL}$) é dada pela equação

$$\dot{\varepsilon}_{DCL} = A_1 \exp\left(-\frac{Q_1}{RT}\right) \left(\frac{\sigma_{eq}}{G}\right)^{n_1}, \quad (28)$$

em que A_1 é um parâmetro estrutural do material, Q_1 é a energia de ativação do material, T é a temperatura, R a constante universal dos gases, σ_{eq} é a tensão equivalente à qual o material está submetido, G é o módulo de elasticidade transversal e n_1 é um expoente característico do mecanismo de deformação.

- *Mecanismo 2 - Undefined mechanism*

O mecanismo indefinido, após o estudo de Hansen (2014), passou a ser classificado como mecanismo de deslizamento cruzado de discordâncias (*Cross-slip*). Este mecanismo controla a fluência da rocha evaporítica que está sujeita a uma baixa temperatura e um baixo nível de tensões. A taxa de deformação deste mecanismo ($\dot{\varepsilon}_{UMC}$) é análoga à equação representativa do mecanismo *Dislocation Climb*, sendo dada por

$$\dot{\varepsilon}_{UMC} = A_2 \exp\left(-\frac{Q_2}{RT}\right) \left(\frac{\sigma_{eq}}{G}\right)^{n_2}. \quad (29)$$

- *Mecanismo 3 - Dislocation glide*

Este é um mecanismo lento em que há deslocamento das discordâncias. Quando há ocorrência deste mecanismo, ocorrem deformações plásticas e endurecimento do material. Segundo Jeremic (1994), este mecanismo está associado à fluência primária. Este mecanismo, em escala microscópica, pode ocorrer em todos os níveis de tensão. No entanto, segundo Munson; Dawson (1979), para que o efeito atinja a escala macroscópica, uma tensão cisalhante

limite deve ser atingida, a qual está associada a um valor limite de energia de deformação. A taxa de deformação devida a este mecanismo ($\dot{\varepsilon}_{DGL}$) é dada por

$$\dot{\varepsilon}_{DGL} = |H(\sigma_{eq} - \sigma_0)| \cdot \left(B_1 \exp\left(-\frac{Q_1}{RT}\right) + B_2 \exp\left(-\frac{Q_2}{RT}\right) \right) \cdot \sinh\left(\frac{q \cdot (\sigma_{eq} - \sigma_0)}{G}\right) \quad (30)$$

em que $|H(\sigma_{eq} - \sigma_0)|$ é uma função degrau com argumento $(\sigma_{eq} - \sigma_0)$, σ_{eq} é a tensão equivalente no ponto em análise, T é a temperatura, R a constante universal dos gases, σ_0 é o valor mínimo de tensão a partir da qual há a atuação do mecanismo DGL, B_1 e B_2 são os fatores estruturais do mecanismo, Q_1 e Q_2 são as energias de ativação associadas ao mesmo, q é uma constante de tensão e G é o módulo de cisalhamento.

A fluência primária é considerada a partir de uma retroanálise envolvendo a taxa de fluência secundária. O parâmetro K_0 é obtido a partir do cruzamento entre a curva experimental de fluência e a curva de fluência secundária e uma posterior estimativa da taxa de deformação na fase de fluência primária, a qual é obtida por

$$\varepsilon_t^* = K_0 \exp(cT) \left(\frac{\sigma_{eq}}{G}\right)^m, \quad (31)$$

em que c e m são constantes teóricas, características do material, a serem obtidas experimentalmente.

Tendo a taxa de fluência primária, deve-se obter a função transiente F , que é dada por

$$F = \begin{cases} \exp\left[\Delta\left(-1\frac{\zeta}{\varepsilon_t^*}\right)^2\right] & \text{se } \zeta < \varepsilon_t^* \\ 1 & \text{se } \zeta = \varepsilon_t^* \\ \exp\left[-\delta\left(-1\frac{\zeta}{\varepsilon_t^*}\right)^2\right] & \text{se } \zeta > \varepsilon_t^* \end{cases} \quad (32)$$

onde Δ é o parâmetro de endurecimento, δ o é parâmetro de amolecimento, ζ é uma variável interna de endurecimento isotrópico, cuja taxa de variação é dada por

$$\dot{\zeta} = (F - 1)\dot{\varepsilon}_{FS}. \quad (33)$$

O símbolo $\dot{\zeta}$ pode ser descrito como a taxa de deformação equivalente transiente.

Os parâmetros de endurecimento e amolecimento podem ser obtidos pelas seguintes equações:

$$\Delta = \alpha_h + \beta_h \log \left(\frac{\sigma_{eq}}{G} \right) \text{ e} \quad (34)$$

$$\delta = \alpha_s + \beta_s \log \left(\frac{\sigma_{eq}}{G} \right), \quad (35)$$

em que $\alpha_h, \beta_h, \alpha_s, \beta_s$ são constantes.

Por sua vez, a taxa de fluência primária e secundária ($\dot{\varepsilon}$) é fornecida por

$$\dot{\varepsilon} = F \dot{\varepsilon}_{FS}. \quad (36)$$

Por fim, a deformação total por fluência (ε), segundo o modelo de múltiplos mecanismos, pode ser obtida pelo processo de integração da Equação (36), como

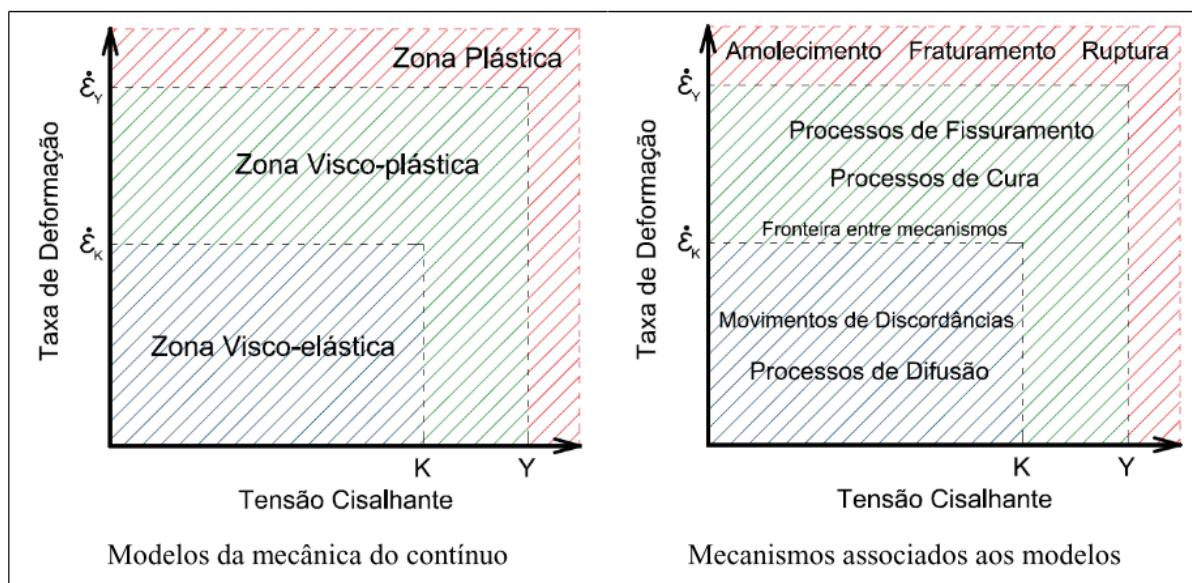
$$\varepsilon(t) = \int_0^t (F \dot{\varepsilon}_{FS}) dt. \quad (37)$$

4.3.4 Modelo constitutivo de duplo mecanismo de deformação

O modelo constitutivo de duplo mecanismo de deformação, utilizado em pesquisas brasileiras após a publicação de Costa et al. (2005), é análogo à Lei Viscoplastica de Múltiplos Mecanismos proposta por Dusseault et al. (1987).

A Lei Viscoplastica de Múltiplos Mecanismos tem como premissa que o corpo salino está sujeito a dois regimes de deformação. Um regime viscoelástico, em que há predominância de deformações lentas, e um regime viscoplastico, que envolve o fissuramento e o processo de cura do material. A FIGURA 26, apresentada no trabalho de Firme (2013), demonstra os regimes de deformação da Lei Viscoplastica de Múltiplos Mecanismos.

FIGURA 26 – REGIMES DE DEFORMAÇÃO LIGADOS À LEI VISCOPLÁSTICA DE MÚLTIPLOS MECANISMOS



FONTE: Firme (2013).

A formulação da Lei Viscoplastica de Múltiplos Mecanismos tem como limite entre os regimes de deformação o parâmetro limite de Prandtl (K ou $2K$), que é definido como a tensão cisalhante de mudança de mecanismo, obtida por ensaios experimentais.

Se a tensão cisalhante se situa abaixo do limite de Prandtl, o material encontra-se no domínio viscoelástico. Nesta condição dois mecanismos podem ser deflagrados, simultaneamente ou separadamente. Um destes mecanismos é chamado por Dusseault et al. (1987) de *Solution Precipitation* (SP) e pode ser comparado ao *Undefined Mechanism* do modelo de Múltiplos Mecanismos de Deformação, visto que ambos possuem a mesma formulação e origem física. O outro mecanismo, passível de ocorrência no regime visco-elástico, é o *Dislocation Glide* (DG). No entanto, este mecanismo não tem a mesma formulação nem critério de ocorrência que seu mecanismo homônimo do modelo de Múltiplos Mecanismos de Deformação.

Dusseault et al. (1987) formularam uma equação potencial para modelagem do mecanismo de deslocamento de discordância para baixos níveis de tensão. Esta abordagem tem como foco o processo lento de deslizamento em regime visco-elástico que ocorre na fluência secundária. A taxa de deformação por deslizamento de discordâncias para tensões baixas ($\dot{\epsilon}_{DG}$) é calculada por

$$\dot{\varepsilon}_{DG} = \left\{ A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left(\frac{\sigma_{eq}}{2K}\right)^n \right\}, \text{ para } \sigma_{eq} < 2K \quad (38)$$

em que, $2K$ é o limite de Prandtl, A é um fator estrutural do mecanismo e n é o expoente de tensão. As demais variáveis foram identificadas anteriormente.

Desta forma, para níveis de tensão inferiores ao Limite de Prandtl são modelados mecanismos de deformação lenta que, em termos de tensões desviadoras, podem ser obtidos por

$$\dot{\varepsilon}_i = \sum_{NM}^{i=1} \left\{ A_i \exp\left(-\frac{Q_i}{RT}\right) \left(\frac{\sigma_{eq}}{2K}\right)^{n_i} \right\}, \quad (39)$$

em que NM é o número de mecanismos de deformação lenta considerados no modelo. Segundo Firme (2013), o único parâmetro que varia entre mecanismos é o expoente n .

Para tensões cisalhantes superiores ao Limite de Prandtl pode ocorrer um mecanismo denominado *Steady State Cracking* (SSC), o qual pode ser traduzido como fissuramento estacionário. Este mecanismo foi proposto por Dusseault (1989) e compreende o fissuramento estacionário que ocorre em elevados níveis de tensão. Quando este mecanismo é ativado, o sal-gema entra em regime viscoplástico. No entanto, de acordo com Dusseault (1989), este mecanismo ainda não é bem compreendido. O SSC é formulado de maneira similar ao deslizamento de discordâncias do modelo de múltiplos mecanismos de deformação, sendo que a taxa de deformação é dada por

$$\dot{\varepsilon}_{SSC} = |H(\sigma_{eq} - 2K)| \left(C \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \right) \sinh\left(\frac{q \cdot (\sigma_{eq} - 2K)}{\sigma_0}\right), \quad (40)$$

onde C é um fator estrutural do mecanismo, σ_0 é a tensão efetiva de referência e σ_{eq} é a tensão equivalente no ponto em análise.

A função seno hiperbólica apresentada na equação anterior pode ser aproximada por uma equação potencial tendo em vista o menor custo computacional. Esta equação, geralmente, utiliza expoentes elevados e é análoga à formulação de deslizamento de discordâncias (DG). Assim, pode-se obter a taxa de deformação no mecanismo SSC por

$$\dot{\varepsilon}_{SSC} = |H(\sigma_{eq} - 2K)| \left[A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left(\frac{\sigma_{eq}}{2K}\right)^n \right]. \quad (41)$$

Se a preponderância de um mecanismo for considerada, e ele for acatado como único no seu domínio, essa taxa é calculada por

$$\dot{\varepsilon} = \begin{cases} A_{VE} \exp\left(-\frac{Q_{VE}}{RT}\right) \left(\frac{\sigma_{eq}}{2K}\right)^{n_{VE}} & ; \text{ se } \sigma_{eq} \leq 2K \text{ ou} \\ A_{VP} \exp\left(-\frac{Q_{VP}}{RT}\right) \left(\frac{\sigma_{eq}}{2K}\right)^{n_{VP}} & ; \text{ se } \sigma_{eq} > 2K. \end{cases} \quad (42)$$

O índice VE refere-se ao domínio viscoelástico e o índice VP faz referência ao domínio viscoplástico. Caso os coeficientes e as energias de ativação não sofram variações significativas pode-se simplificar a equação anterior por

$$\dot{\varepsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left(\frac{\sigma_{eq}}{2K}\right)^n ; n = \begin{cases} n_{VE} & ; \text{ se } \sigma_{eq} \leq 2K \\ n_{VP} & ; \text{ se } \sigma_{eq} > 2K. \end{cases} \quad (43)$$

O coeficiente A, como foi definido para uma certa temperatura T_0 , engloba a ativação térmica oriunda desta temperatura. Com a intenção de obter um coeficiente $\tilde{A}$ que seja genérico pode-se isolar o efeito da ativação pela seguinte forma

$$\dot{\varepsilon} = \left\{ \tilde{A} \left(-\frac{Q}{RT_0}\right) \right\} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left(\frac{\sigma_{eq}}{2K}\right)^n ; n = \begin{cases} n_{VE} & ; \text{ se } \sigma_{eq} \leq 2K \\ n_{VP} & ; \text{ se } \sigma_{eq} > 2K. \end{cases} \quad (44)$$

O coeficiente $\tilde{A}$ é uma taxa de deformação padrão ($\dot{\varepsilon}_0$) a partir da qual estima-se as taxas de deformação por fluência para outras condições de tensão e temperatura. Desta forma pode-se reescrever

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \exp\left(\frac{Q}{RT_0} - \frac{Q}{RT}\right) \left(\frac{\sigma_{eq}}{2K}\right)^n ; n = \begin{cases} n_{VE} & ; \text{ se } \sigma_{eq} \leq 2K \\ n_{VP} & ; \text{ se } \sigma_{eq} > 2K. \end{cases} \quad (45)$$

Podendo assim chegar a formulação que é apresentada na literatura como a formulação de duplo mecanismo por

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \exp\left(\frac{Q}{RT_0} - \frac{Q}{RT}\right) \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0}\right)^n ; \text{ onde } n = \begin{cases} n_1 & ; \text{ se } \sigma_e \leq \sigma_0 \\ n_2 & ; \text{ se } \sigma_{eq} > \sigma_0 \end{cases} \quad (46)$$

em que a parcela $\left(\frac{Q}{RT_0} - \frac{Q}{RT}\right)$ é o fator de ativação térmica, que corrige a taxa de fluência de acordo com a profundidade analisada e n é o expoente de tensão, que indica o mecanismo de fluência que governa o estado de tensões em estudo. Considera-se que este modelo é adequado para a simulação de fluência em estado estacionário, ou seja, a fluência secundária.

4.4 PARÂMETROS DO MODELO DE MÚLTIPLOS MECANISMOS

Um dos objetivos deste trabalho é comportar um banco de dados de parâmetros para o MMD. Neste sentido, a TABELA 8 apresenta parâmetros ajustados por pesquisadores do laboratório SANDIA para depósitos salinos dos Estados Unidos e dois ajustes de parâmetros de depósitos brasileiros realizados por Firme (2013).

Observa-se na tabela que as energias de ativação Q_1 e Q_2 possuem sempre o mesmo valor, bem como a tensão de mudança de mecanismo σ_0 . A constante de tensão q , a constante universal dos gases R e o expoente m da função transiente não se alteram.

TABELA 8 – PARÂMETROS DO MODELO DE MÚLTIPLOS MECANISMOS PARA DIFERENTES REGIÕES

Referência	Fossum; Munson (1996)	Firme (2013) ⁵	Firme (2013) ⁶	Munson (1998)	Munson (1998)
Localidade	WIPP, Kansas, EUA	Sergipe, BR	Sergipe, BR	Week Island, Louisiana, EUA	Avery Island, Louisiana, EUA
$A_1 (s^{-1})$	$8,386 \times 10^{22}$	$1,638 \times 10^{27}$	$3,635 \times 10^{22}$	$4,948 \times 10^{22}$	$1,137 \times 10^{22}$
Q_1	$1,0450 \times 10^5$	$1,0450 \times 10^5$	$1,0450 \times 10^5$	$1,0450 \times 10^5$	$1,0450 \times 10^5$
n_1	5,5	7,2	5,5	5,5	5,5
$B_1 (s^{-1})$	$6,086 \times 10^6$	$9,981 \times 10^6$	$9,981 \times 10^6$	$5,417 \times 10^6$	$0,825 \times 10^6$
$A_2 (s^{-1})$	$9,672 \times 10^{12}$	$1,924 \times 10^6$	$6,309 \times 10^{10}$	$5,706 \times 10^{12}$	$6,869 \times 10^{12}$
Q_2	$4,18 \times 10^4$	$4,18 \times 10^4$	$4,18 \times 10^4$	$4,18 \times 10^4$	$4,18 \times 10^4$
n_2	5,0	3,2	5,5	5,0	5,0
$B_2 (s^{-1})$	$3,034 \times 10^{-2}$	$4,976 \times 10^{-2}$	$4,976 \times 10^{-2}$	$2,700 \times 10^{-2}$	$2,155 \times 10^{-2}$
σ_0 (MPa)	20,57	20,57	20,57	20,57	20,57
q	$5,335 \times 10^3$	$5,335 \times 10^3$	$5,335 \times 10^3$	$5,335 \times 10^3$	$5,335 \times 10^3$
R (J/mol.K)	8,3143	8,3143	8,3143	8,3143	8,3143
m	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
K_0	$6,275 \times 10^5$	$7,750 \times 10^4$	$7,750 \times 10^4$	$6,275 \times 10^5$	$1,342 \times 10^6$
c (K ⁻¹)	0,009198	0,009198	0,009198	0,009198	0,009198
α	-17,37	-17,37	-17,37	-17,37	-13,2
β	-7,738	-7,738	-7,738	-7,738	-7,738
δ	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58

FONTE: A AUTORA (2020).

⁵ Ajuste 1.⁶ Ajuste 2.

5 MODELO NUMÉRICO DETERMINÍSTICO

A qualidade dos resultados de uma análise probabilísticas está condicionada ao modelo determinístico em que o estudo se baseia. Diante disto e dada a complexidade da construção de modelos geomecânicos para estudos numéricos, é necessário utilizar um modelo constitutivo, adequado para o material em estudo, e adotar condições de contorno que representem satisfatoriamente o modelo de terreno em análise.

Como programas computacionais comerciais não tem o modelo de Múltiplos Mecanismos de Deformação em seu *default*, neste capítulo é apresentada a implementação deste modelo e, também, de um critério de dano para a análise numérica de cavernas salinas. É realizada a validação da implementação deste modelo a partir da reprodução de ensaios de compressão triaxial. Finalmente, os critérios de estabilidade adotados e os resultados de análises determinísticas são apresentados.

5.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE MÚLTIPLOS MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO E DO CRITÉRIO DE DILATÂNCIA

O modelo de Múltiplos Mecanismos de Deformação (MMD) foi selecionado para representar o comportamento do sal-gema por ser um modelo que permite simular tanto a fluência primária quanto a fluência secundária. No entanto, os programas computacionais de modelagem geotécnica comerciais ainda não dispõem do modelo MMD entre as opções de modelos constitutivos. Desta forma, selecionou-se um programa computacional de elementos finitos que permitisse a inserção de um modelo constitutivo pelo usuário por meio de customização de sub-rotinas. Para realização da modelagem numérica, foi selecionado o programa computacional ABAQUS®, da *Dassault Systèmes*®. Esta escolha foi baseada na sua robustez e na flexibilidade de modelagem. Além do modelo MMD, o critério de dilatação de Ratigan foi usado como indicador de dano.

A implementação do modelo de MMD e do critério de Ratigan foi realizada utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado *Microsoft Visual Studio*®. Para a elaboração do código foram empregados o conjunto de ferramentas e bibliotecas *one API Base Toolkit* e a ferramenta complementar *one API HPC Toolkit* que forneceu o compilador Fortran, linguagem empregada na implementação das sub-rotinas, ambos fornecidos pela Intel®.

O programa computacional ABAQUS® oferece um extenso catálogo de sub-rotinas que possibilitam a inserção de modelos constitutivos não nativos do programa computacional, leituras de informações em pontos específicos (nos nós do elemento, no centroide ou nos pontos de Gauss), aplicação de condições iniciais (distribuições de tensões, deslocamentos e de propriedades do material, como o módulo de elasticidade ou a densidade), esforços (diferentes casos de carregamento como pressões ou forças pontuais que estão postas em uma dada direção específica) ou comportamentos inerentes de materiais específicos. Para a simulação de fluência utilizando o modelo desejado, a subrotina CREEP foi utilizada e as subrotinas USDFLD e GETVRM foram utilizadas como rotinas auxiliares para a obtenção de informações necessárias para a simulação do comportamento do material. Para a implementação do limite de Ratigan, foi necessário utilizar a sub-rotina SINV para obter o primeiro invariante de tensões (I) e, assim, poder calcular a tensão média ($\sigma_m = I/3$) em cada ponto de Gauss.

O manual do ABAQUS (2020) explica que, utilizando a sub-rotina CREEP, os incrementos de deformações equivalentes desviadora e volumétrica, respectivamente $\Delta\bar{\varepsilon}^{cr}$ e $\Delta\bar{\varepsilon}^{sw}$, podem ser obtidos a partir das equações da taxa de deformação equivalente de fluência fornecidas pelo modelo constitutivo implementado (devendo obrigatoriamente ser dependentes da tensão equivalente de von Mises, no caso isotrópico, ou de Hill para problemas de fluência anisotrópica).

A técnica de solução para as equações discretizadas no tempo que governam este modelo deve ser iterativa e capaz de resolver sistemas não-lineares. Neste trabalho foi utilizada a integração temporal pelo método de Euler explícito para obter os valores dos incrementos de deformação. Assim, o *software* determina os incrementos de deformação por fluência por

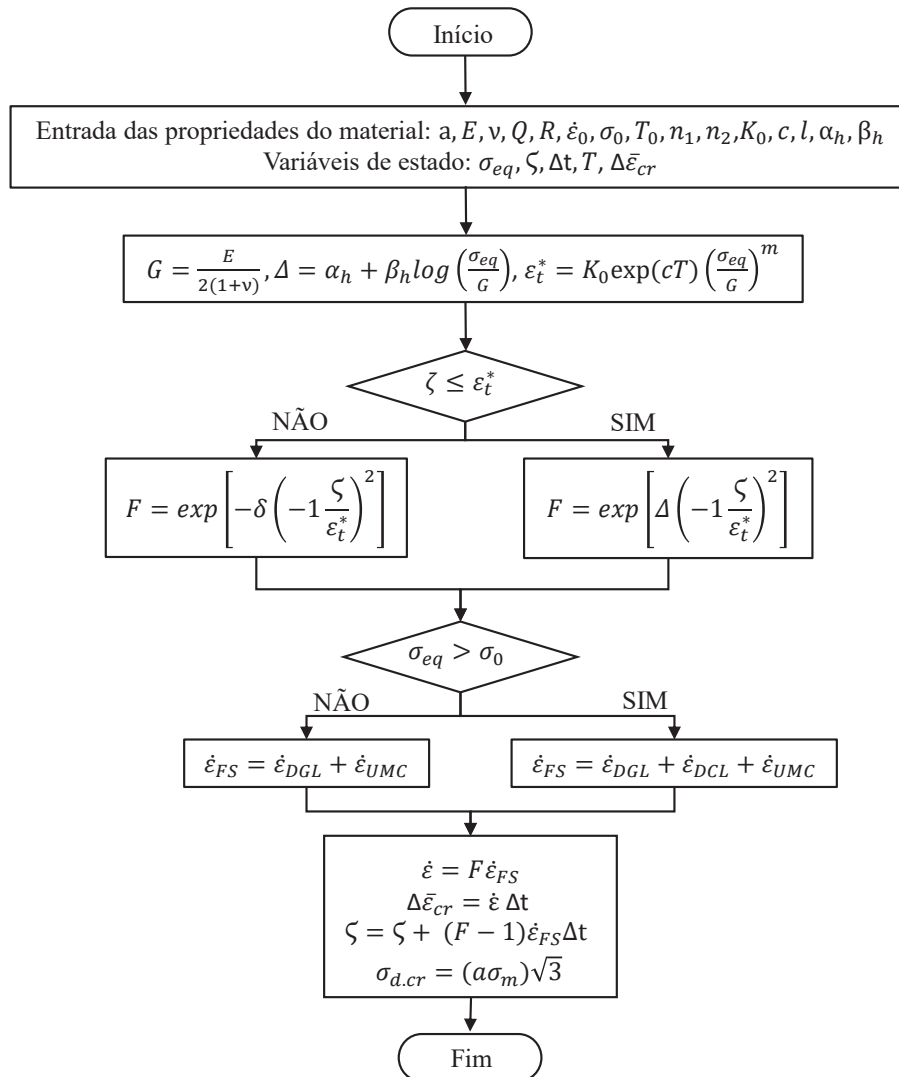
$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{cr} = \frac{1}{3}\Delta\bar{\varepsilon}^{sw}\mathbf{R} + \Delta\bar{\varepsilon}^{cr}\mathbf{n}, \quad (47)$$

onde $\mathbf{R}$ é uma matriz diagonal com coeficientes diferentes de zero nas direções onde ocorrem as deformações volumétricas. Por outro lado, as componentes de $\mathbf{n}$, quando a taxa de deformação equivalente é função da tensão equivalente de von Mises (σ_{eq}), são dadas por

$$n_{ij} = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}}{\sigma_{eq}} \quad (48)$$

No Capítulo 4 foi apresentado o conjunto de equações que compõem o modelo MMD. Conforme explicado, este é um modelo elastoviscoplastico. Nesta implementação o comportamento elástico é obtido pelo próprio *software* e o comportamento viscoplastico é introduzido pela subrotina CREEP. Assim, os parâmetros elásticos do material são inseridos diretamente no software pelo ambiente CAE ou pelo *input file.inp*. Já os parâmetros do comportamento viscoplastico, estes são inseridos pela subrotina CREEP. A FIGURA 27 apresenta o fluxograma da implementação numérica do modelo MMD e a aplicação do critério de dano ao final de cada iteração do modelo. Durante cada chamada da subrotina, duas decisões são tomadas pelo modelo: (i) verifica-se se está ocorrendo endurecimento ou amolecimento do material e (ii) verifica-se se a tensão desviadora atuante é maior que o valor mínimo de tensão para atuação do mecanismo DGL (σ_0).

FIGURA 27 – FLUXOGRAMA DA SUBROTINA DO MODELO MMD COM CRITÉRIO DE DILATÂNCIA



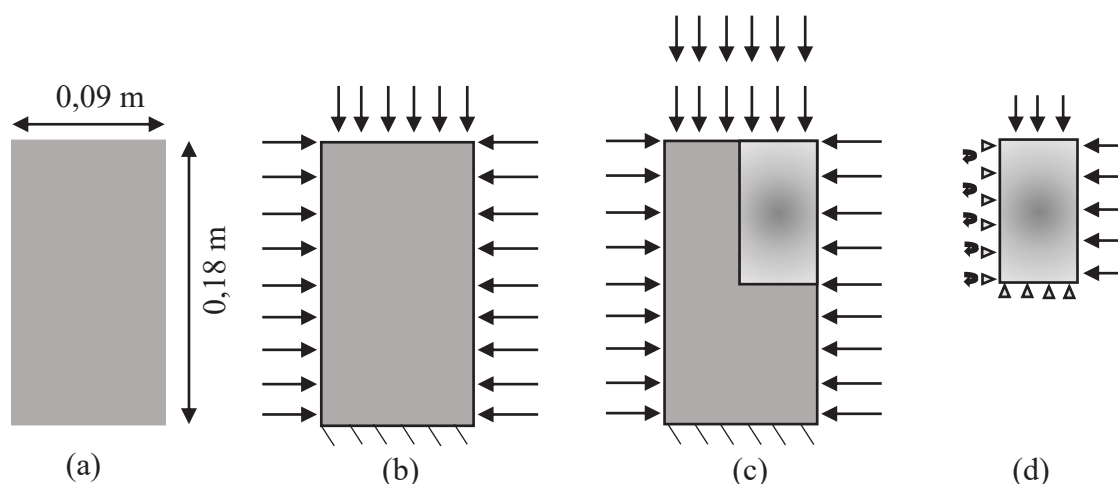
FONTE: A autora (2022).

5.2 VALIDAÇÃO DO MODELO CONSTITUTIVO

O modelo constitutivo MMD é consagrado na simulação de rochas evaporíticas. Como exemplo de aplicação bem sucedida pode-se citar o trabalho de Munson (1997) que apresenta resultados acurados para simulações de ensaios laboratoriais e simulações de campo. Assim, o exercício de validação apresentado neste item visa apenas verificar se a implementação foi realizada corretamente e não analisar a eficiência do modelo MMD.

Foram simulados três ensaios de compressão triaxial para validar a implementação. Os corpos de prova (CP) originais eram cilíndricos com altura total 18cm e diâmetro de 9cm, como mostrado na FIGURA 28(a). Durante os experimentos laboratoriais, os CPs foram submetidos em um primeiro estágio FIGURA 28(b) a uma tensão confinante de 10 MPa. Num segundo estágio, FIGURA 28(c) os corpos de prova foram submetidos a tensões desviadoras de 10, 14 e 17 MPa. Poiate et al. (2006) apresenta o teste com tensão desviadora de 10 MPa e os demais são apresentados em Costa et al. (2005). Durante os ensaios, a temperatura foi mantida em 86°C.

FIGURA 28 – DIMENSÕES E CONDIÇÕES DE CONTORNO APLICADAS NO MODELO SINTÉTICO.



FONTE: A autora (2022).

Em virtude da axissimetria dos CPs e das condições de contorno e de sua isotropia material (por premissa), foi implementado um modelo de elementos finitos do tipo axissimétrico de metade do sólido. Como condições de contorno de Dirichlet (vínculos), a base foi definida como apoio fixo na direção vertical e livre na horizontal e o contrário no eixo de revolução, conforme é visto na FIGURA 28 (d).

A massa específica do CP considerada foi de 2100 kg/m^3 . O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson foram de 20,4 GPa e 0,36, respectivamente, conforme apresentado por Costa et al. (2005). Os parâmetros do modelo MMD considerados são os valores de MMD-A apresentados na Tabela 8.

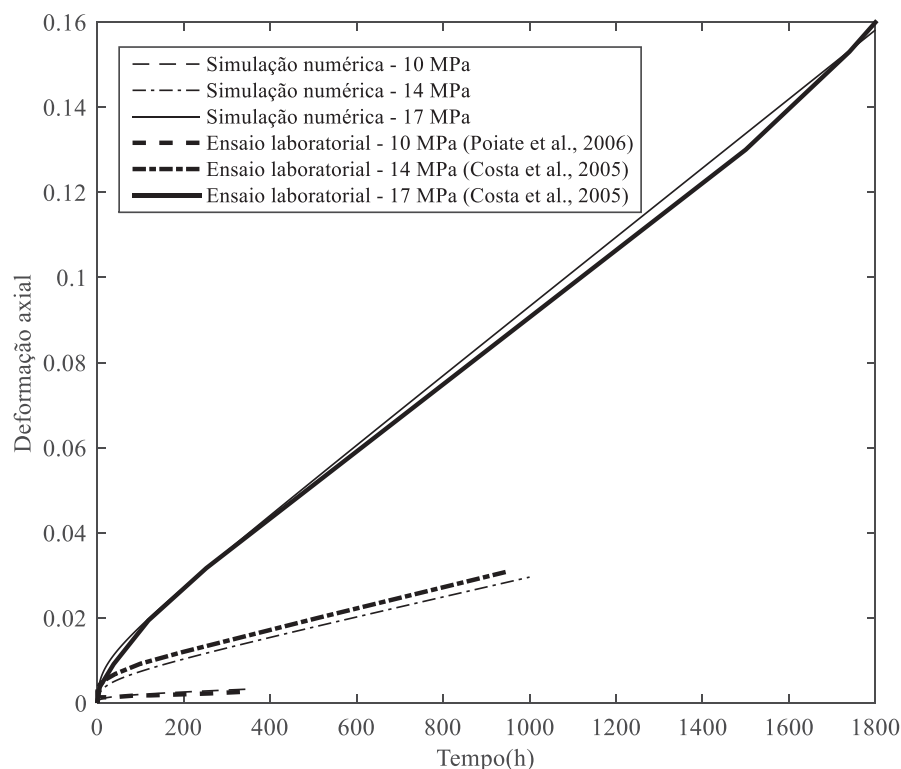
A construção do modelo numérico foi realizada em quatro *steps* (passos):

1. **Inicial:** faz parte do *default* do software, e é onde são inicializadas as variáveis e aplicadas as condições iniciais;
2. **Aplicação da tensão confinante:** Neste *step* são aplicadas a força da gravidade (*geostatic*) e a tensão de confinamento. O método de incremento utilizado foi o automático e o tempo é correspondente a uma unidade de tempo, que neste modelo corresponde a 1 segundo;
3. **Aplicação de sobrecarga no topo do CP:** Neste *step* foi aplicada uma sobrecarga no topo do CP, a qual é responsável por gerar uma tensão desviadora. O tipo de incremento também foi automático.
4. **Fluência da rocha salina ao longo do tempo:** Neste *step* foi simulada a fluência do sal-gema ao longo do tempo. O tipo do *step* utilizado foi *visco*. Esta opção é utilizada para obter uma resposta quase-estática transiente em uma análise de materiais com comportamento dependente do tempo (fluência, inchaço e viscoelasticidade).

Os efeitos de não-linearidade de grandes deformações e deslocamentos foram considerados ativando a opção *Nlgeom* (*Non-Linear Geometry*) para todos os *steps*. O ensaio foi simulado considerando um modelo de elementos finitos do tipo axissimétrico. O tipo de elemento considerado foi o *CAX4*: quadrilátero axissimétrico bilinear de 4 nós. Este elemento não considera a poropressão, que, de acordo com Firme (2013), é uma consideração em conformidade com a idealização de poro pressão nula da rocha salina.

A FIGURA 29 apresenta os valores de deformações ao longo do tempo para os ensaios simulados e para as curvas ajustadas para os respectivos ensaios reais. Observa-se uma representação satisfatória dos ensaios utilizando um modelo MMD.

FIGURA 29 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS NUMÉRICOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL EM SAL GEMA

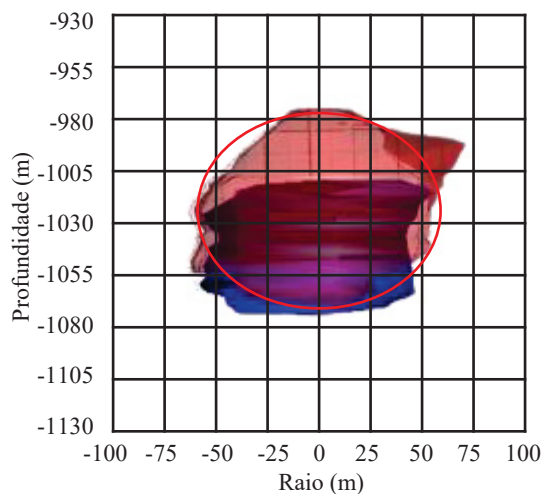


FONTE: A autora (2022).

5.3 GEOMETRIA DA MINA

As geometrias das minas de cloro-soda são muito variáveis devido à sua técnica construtiva e às características do material. Para efeito do estudo apresentado neste trabalho, optou-se por adotar uma caverna com geometria e dimensões semelhantes às das minas existentes no nordeste do Brasil. A FIGURA 30 apresenta as geometrias obtidas por sonar em 2015, em azul, e 2018, em marsala, para uma mina real (CPRM, 2019). Neste trabalho, considera-se a geometria mais recente obtida por medição de sonar (2018). No entanto, a geometria foi simplificada substituindo o formato original por uma elipse, com altura e raio semelhantes à geometria original. A FIGURA 30 também mostra a geometria simplificada.

FIGURA 30 – GEOMETRIA E DIMENSÕES DA CAVERNA OBTIDAS POR SONAR EM 2015 (AZUL) E 2018 (MARSALA) E ELIPSOIDE QUE REPRESENTA A SIMPLIFICAÇÃO ADOTADA (VERMELHO).



FONTE: Adaptado de CPRM (2019).

Simplificações são comuns em estudos de cavernas de sal subterrâneas (Goulart et al., 2020; Li et al., 2021). As simplificações evitam pontos de concentração de tensão. Outro ponto importante é a qualidade da malha utilizada para discretizar o modelo. Uma geometria mais simples evita o uso de um número maior de elementos em regiões com cantos vivos, por exemplo. Além disso, a discretização pode ser realizada com elementos mais uniformes, o que reduz os erros numéricos do modelo.

A simulação, apesar de ser baseada em dados de parâmetros brasileiros e geometria de minas brasileiras, não é representativa para nenhum caso específico. Trata-se de uma situação hipotética que visa analisar o comportamento para condições que guardem semelhança com situações reais.

5.4 ESTRATIGRAFIA, CONDIÇÕES DE CONTORNO E CONDIÇÕES INICIAIS

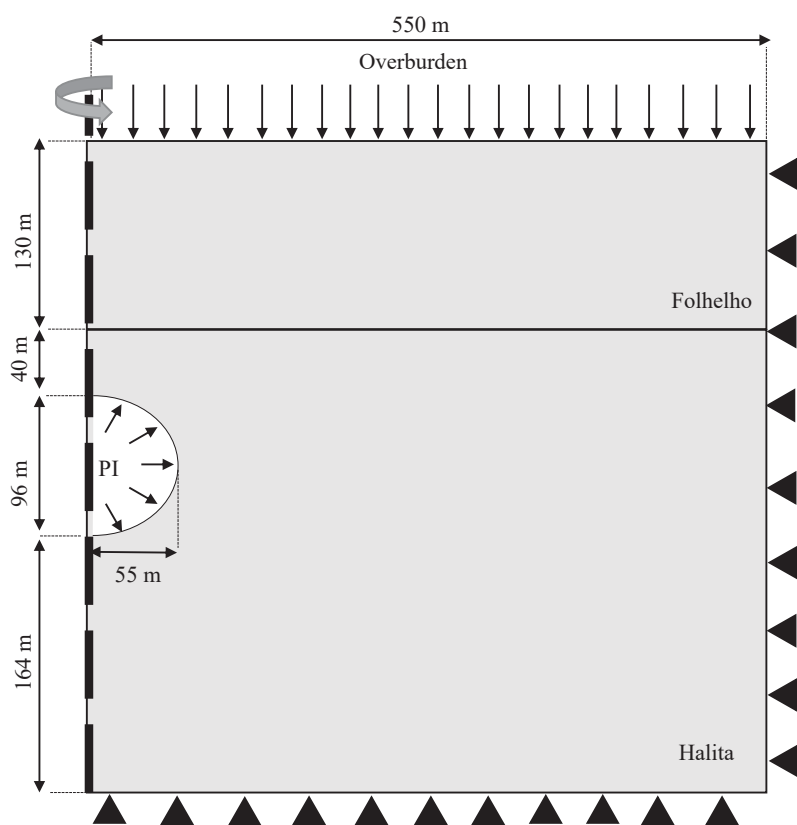
A estratigrafia utilizada se baseia nas características da bacia sedimentar Sergipe-Alagoas. Neste perfil, o estrato de sal-gema inicia-se a aproximadamente 900 metros de profundidade e o *overburden* é composto principalmente por folhelho com intercalações de arenito, podendo haver a presença de outras rochas sedimentares.

A FIGURA 31 apresenta o modelo utilizado para a realização das simulações. Foi aplicada uma tensão de 19,03 MPa no topo do modelo, que caracteriza a sobrecarga. Esta tensão representa os sedimentos acima da camada de folhelho. A altura da mina é de 96 metros e o raio aproximado é de 55 metros. A FIGURA 31 também apresenta as demais medidas do

modelo. O modelo é do tipo axissimétrico e é composto por elementos CAX4R (quadrilátero axissimétrico bilinear de 4 nós, com integração reduzida).

Dois materiais compuseram o modelo: halita e folhelho (FIGURA 31). O modelo elastoplástico proposto por Mohr-Coulomb é utilizado para modelar o comportamento do folhelho. Para este, foram considerados módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, ângulo de atrito e peso específico iguais a 18,97 GPa, 0,15, 22° e 24,00 kN/m³ respectivamente (Costa et al., 2015). Consideraram-se os gradientes geotérmicos sugeridos por Costa et al. (2012) de 30°C/km para o *overburden* e 10°C/km para o material salino.

FIGURA 31 – ESTRATIGRAFIA, CONDIÇÕES DE CONTORNO E DIMENSÕES USADAS PARA REPRESENTAR A CAVERNA

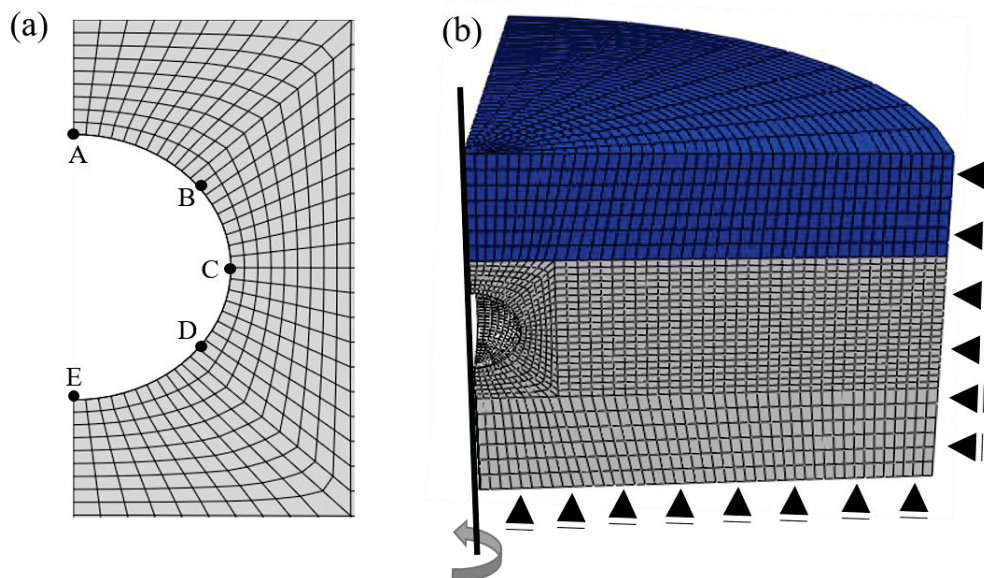


FONTE: A autora (2022).

A FIGURA 32 (a) apresenta a discretização da malha ao redor da caverna e cinco pontos de interesse (A, B, C, D e E). Nesta região, foram utilizados elementos finitos menores devido à concentração de tensões e, também, por ser a região de maior interesse no modelo. Utilizou-se esses pontos para realizar algumas análises apresentadas na seção 5.4. A FIGURA 32 (a) apresenta a malha e as condições de contorno. A linha preta com maior espessura indica o eixo de revolução para a inserção das condições de contorno que representam o modelo. A FIGURA

32 (b) representa uma revolução de 90 graus da FIGURA 31. Entretanto, o software entende o modelo como uma revolução completa de 360 graus. As compartimentações azul e cinza representam, respectivamente, o folhelho e a halita.

FIGURA 32 – MODELO AXISSIMÉTRICO E DISCRETIZAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS. (A) DETALHE DOS PONTOS DE ANÁLISE. (B) REVOLUÇÃO PARCIAL DO PLANO DE ANÁLISE



FONTE: A autora (2022).

Em relação às condições de contorno, no lado direito do modelo, restringiram-se os deslocamentos horizontais e permitiu-se o movimento vertical. Na parte inferior do modelo, restringiu-se o deslocamento vertical, considerando que se atingiu uma camada indeslocável. Estas condições foram colocadas distantes o suficiente da perturbação imposta pela escavação afim de representar a continuidade da camada e não interferir no comportamento do modelo.

A simulação foi realizada em 3 *steps*. O primeiro passo é a escavação instantânea da mina. A segunda etapa é o comportamento elástico instantâneo do material. Por fim, a terceira etapa se refere ao comportamento viscoplástico usando o modelo MMD para um período de 50 anos.

5.5 EXPERIMENTOS NUMÉRICOS E CRITÉRIO DE ESTABILIDADE

A Tabela 9 apresenta o projeto de experimentos (*design of experiments* – DOEs). Foram realizadas cinco simulações considerando diferentes pressões internas aplicadas à

caverna. Os valores das pressões internas são uma porcentagem da tensão vertical efetiva no topo da caverna. Esses valores variam de 40 a 80% do valor da tensão vertical efetiva.

TABELA 9 –PROJETO DE EXPERIMENTOS DETERMINÍSTICOS

DOE	Pressão interna (MPa)	Símbolo
DOE 1	9,19	PI40
DOE 2	11,49	PI50
DOE 3	13,79	PI60
DOE 4	16,09	PI70
DOE 5	18,38	PI80

FONTE: A autora (2022).

A escolha das pressões internas analisadas foi baseada na literatura, que indicam valores entre 30% e 85% da tensão vertical efetiva no topo da caverna. Pressões inferiores a 30% causam instabilidade nas cavernas, enquanto que pressões superiores a 85% podem gerar tensão de tração. As rochas salinas não resistem a este tipo de esforço (Bérest et al., 2020; Costa et al., 2015; Yuan et al., 2021).

Dois critérios de desempenho foram considerados. O primeiro deles está relacionado à deformação e o segundo à tensão e, portanto, ao dano material.

5.5.1 Critério de deformação

O critério de deformação foi baseado em Costa et al. (2015) que sugere uma deformação admissível de 10% (0,10). Sendo que o ponto de análise foi ponto C.

5.5.2 Critério de dano

O modelo constitutivo utilizado nesta pesquisa não considera o terceiro estágio da fluência (acelerativa). No entanto, um critério de dilatância foi utilizado para monitorar os danos na rocha salina. As rochas salinas *in situ* são, geralmente, impermeáveis ou com permeabilidade desprezável. Mas, quando ocorre um aumento na deformação, pode ocorrer uma elevação na permeabilidade da rocha devido ao dano (SAMBEEK ET AL., 1993; FIRME ET AL., 2016). Utilizou-se o critério de Ratigan (VAN SAMBEEK ET AL., 1993) para determinar o fator de dano, que é amplamente utilizado para modelar a halita brasileira (Costa et al., 2015; Firme et al., 2016; Firme et al., 2019). Este critério considera a tensão média (σ_m)

em cada ponto para estimar a tensão desviadora crítica ($\sigma_{d,cr}$) para cada ponto aplicando a seguinte equação

$$\sigma_{d,cr} = (a\sigma_m)\sqrt{3}, \quad (49)$$

em que a recebe o valor de 0,81.

Van Sambeek et al. (1993) indica que haverá dano se os valores de tensão desviadora forem superiores ao valor crítico indicado pelo critério. A razão entre a tensão desviadora (σ_d) e a tensão desviadora crítica ($\sigma_{d,cr}$) é o fator de dano (D) definido como

$$D = \frac{\sigma_d}{\sigma_{d,cr}} \quad (50)$$

A tensão desviadora efetiva considerada neste trabalho é a tensão equivalente de von Mises ($\sigma_d = \sqrt{3J_2}$) que pode ser descrita a partir do segundo invariante do tensor de tensões desviadoras (J_2). Quando o fator de dano (D) é um valor maior que 1 indica o comportamento de dilatação e quando este valor está entre 0,8 e 1,0 já existe possibilidade de microfissuramentos. Desta forma, o fator de dano é considerado neste trabalho como um critério de falha baseado em tensão.

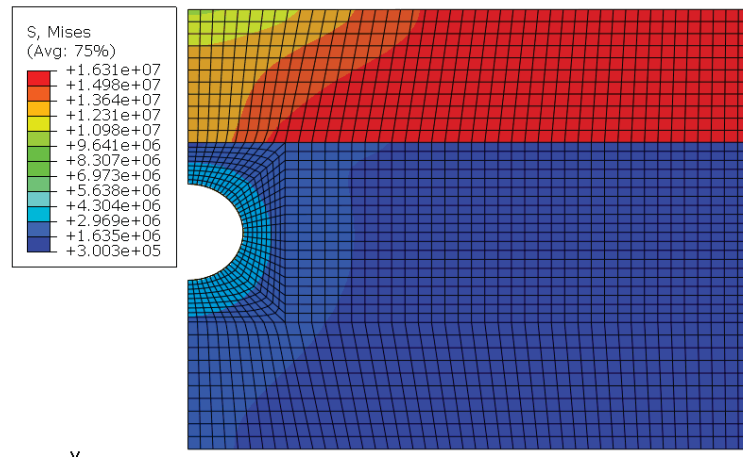
5.6 ANÁLISES DETERMINÍSTICAS

5.6.1 Deformação na caverna salina

Conforme destacado anteriormente, o comportamento de fluência é responsável pela convergência da caverna de sal, ou seja, o volume de encolhimento da caverna. A deformação em cada ponto do modelo depende da tensão desviadora atuante (tensão equivalente de Von Mises). Assim, o volume de retração é dependente da tensão equivalente de Von Mises.

A FIGURA 33 mostra a tensão equivalente de von Mises para DOE 1 (PI40). Pode-se observar que o *overburden* causa um efeito de arqueamento de tensão, o que resulta em um alívio de tensões no material salino. Essa característica indica que o comportamento geomecânico dos materiais que circundam as cavernas é muito importante para simulações. Zhang et al., (2020) também verificaram a importância das rochas circundantes.

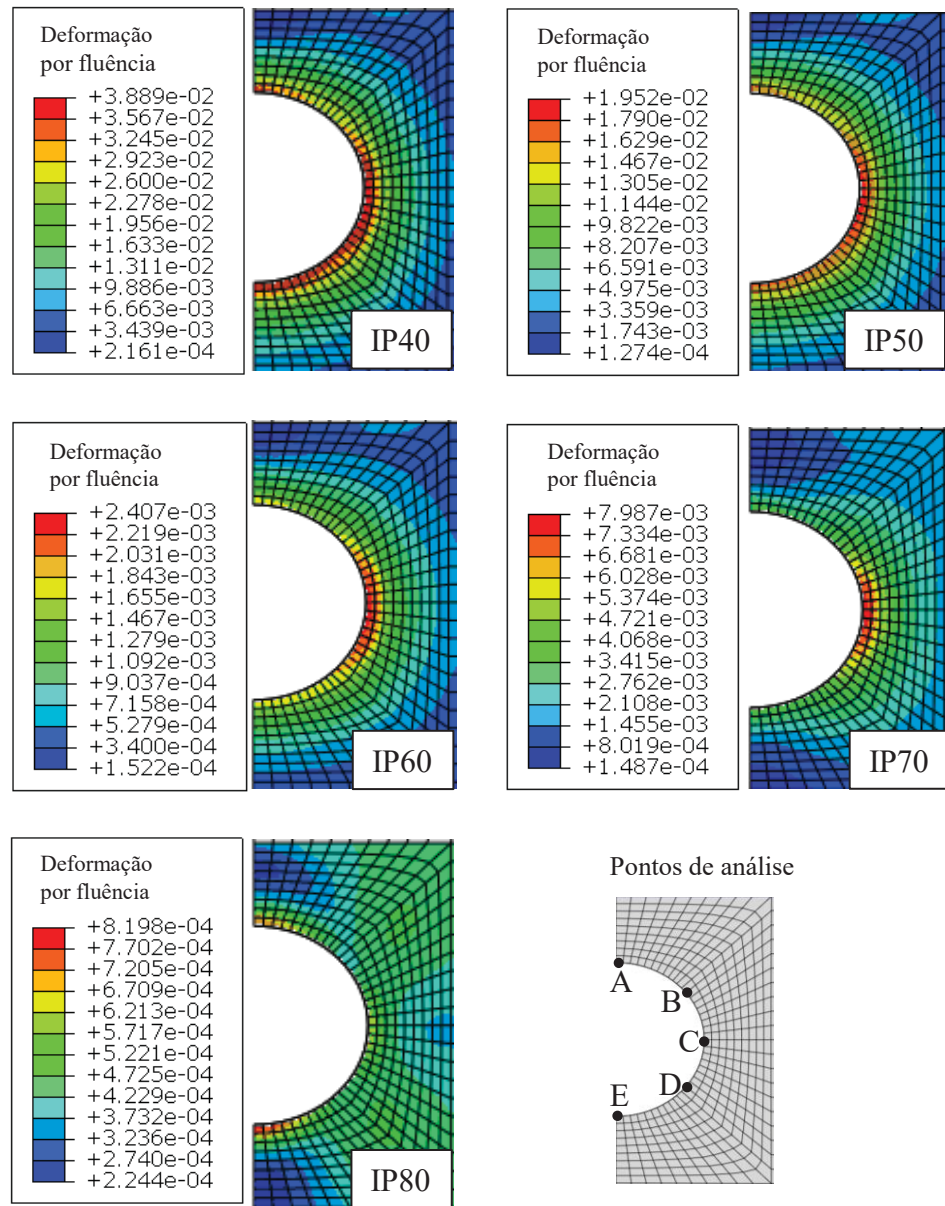
FIGURA 33 – TENSÃO EQUIVALENTE DE VON MISES REFERENTE AO DOE 1.



FONTE: A autora (2022).

A FIGURA 34 mostra as deformações de fluência equivalentes para 50 anos de análise e considerando todas as pressões internas apresentadas na Tabela 9. Observa-se que a região do ponto C apresentou o maior nível de deformação entre 5 pontos de controle.

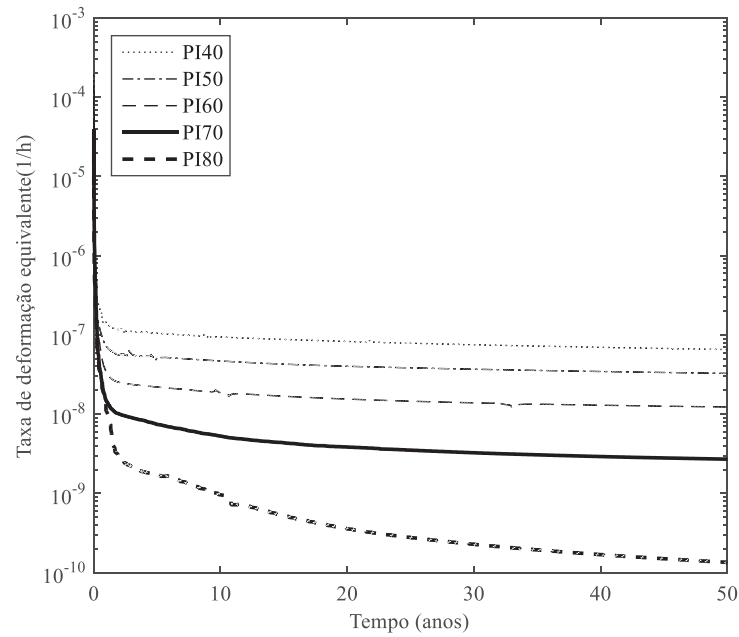
FIGURA 34 – DEFORMAÇÃO EQUIVALENTE POR FLUÊNCIA AO REDOR DA CAVERNA PARA OS DOES ESTUDADOS



FONTE: A autora (2022).

A FIGURA 35 mostra a taxa de deformação equivalente no ponto C para todas as pressões internas avaliadas ao longo do tempo total de análise. Arbitrou-se analisar o ponto C pois este ponto situa-se na região de maior deformação. Costa et al. (2015) indica uma taxa de fluência admissível em regime estacionário igual a $0,5 \times 10^{-6}$ por hora. Pode-se notar que as taxas de deformação (por hora) estão entre 10^{-7} e 10^{-10} ao final da análise. Inicialmente, a taxa de fluência é maior do que o valor limite. No entanto, em um pequeno período, a taxa de fluência torna-se menor do que o valor admissível. Em seguida, observa-se a fase de desaceleração da taxa de deformação até atingir o estado estacionário.

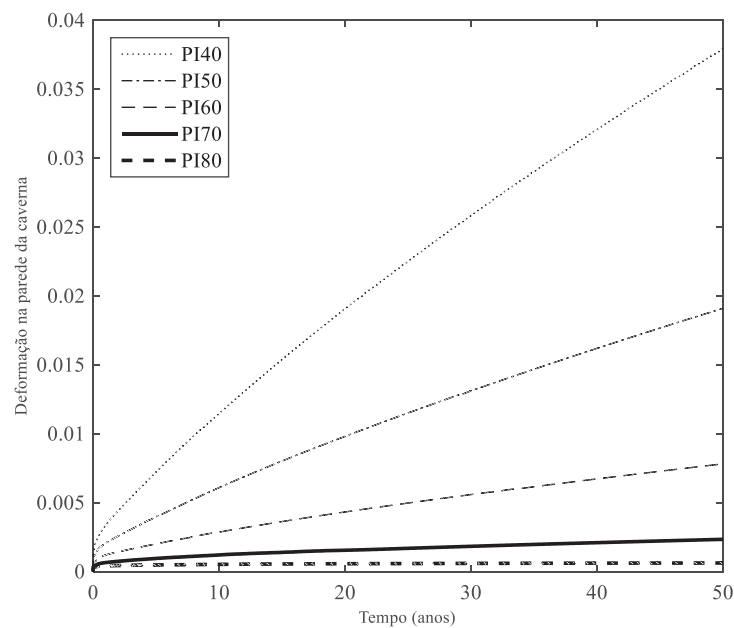
FIGURA 35 – TAXA DE DEFORMAÇÃO EQUIVALENTE NO PONTO C



FONTE: A autora (2022).

A FIGURA 36 mostra a deformação equivalente da parede da caverna no ponto C. Nas análises realizadas, a deformação máxima foi de 0,038 para IP40. As simulações não atingiram o valor máximo permitido que foi considerado igual a 0,100 (Costa et al., 2015).

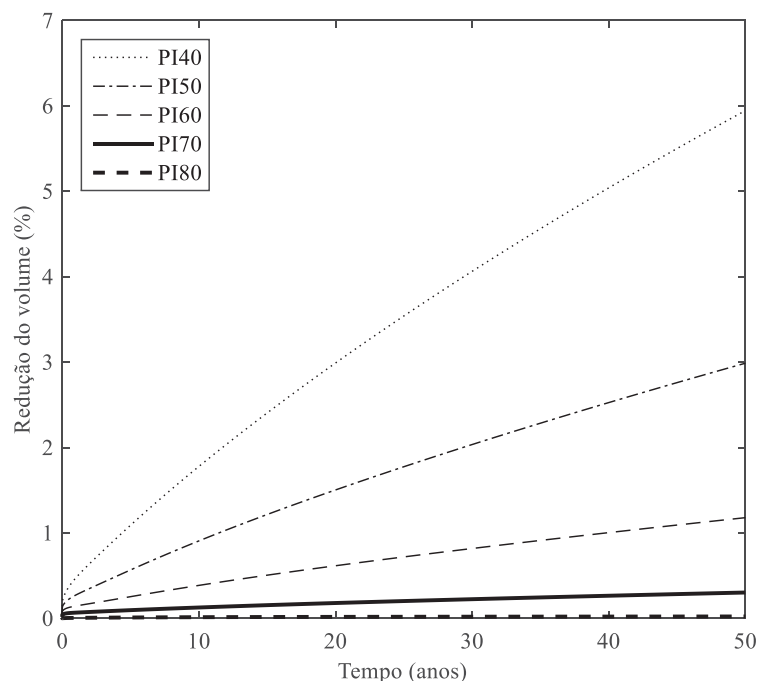
FIGURA 36 – DEFORMAÇÃO EQUIVALENTE NO PONTO C



FONTE: A AUTORA (2022).

A FIGURA 37 mostra a porcentagem de redução de volume ao longo do tempo. Nenhum dos experimentos numéricos atingiu o volume máximo de retração de 10% do volume inicial que é indicado como limite por Costa et al. (2015).

FIGURA 37 – PERCENTUAL DO REDUÇÃO DO VOLUME AO LONGO DO TEMPO

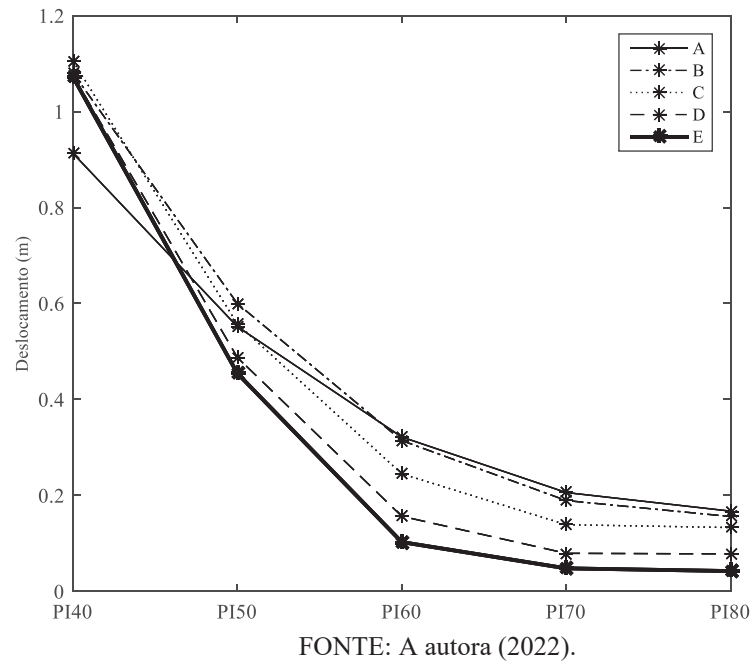


FONTE: A autora (2022).

Os resultados da deformação por fluência nos deslocamentos são mostrados na FIGURA 38. Observou-se que os deslocamentos têm um comportamento decrescente quando a pressão interna aumenta.

Um grande aumento de deslocamento foi observado quando a pressão interna foi reduzida de 80% para 70% da tensão vertical *in situ* no teto da mina. Bérest et al. (2020a) realizaram vários estudos relacionados à pressão interna de cavernas de sal. Eles indicam que a pressão adequada está entre 80 e 85% da tensão vertical *in situ* no teto da mina. No entanto, nem sempre é possível garantir essa pressurização, devido a diversos fatores como reativação de falhas geológicas, fissuras devido à baixa resistência à tração do material salino ou, ainda, por vazamento devido ao enchimento do poço.

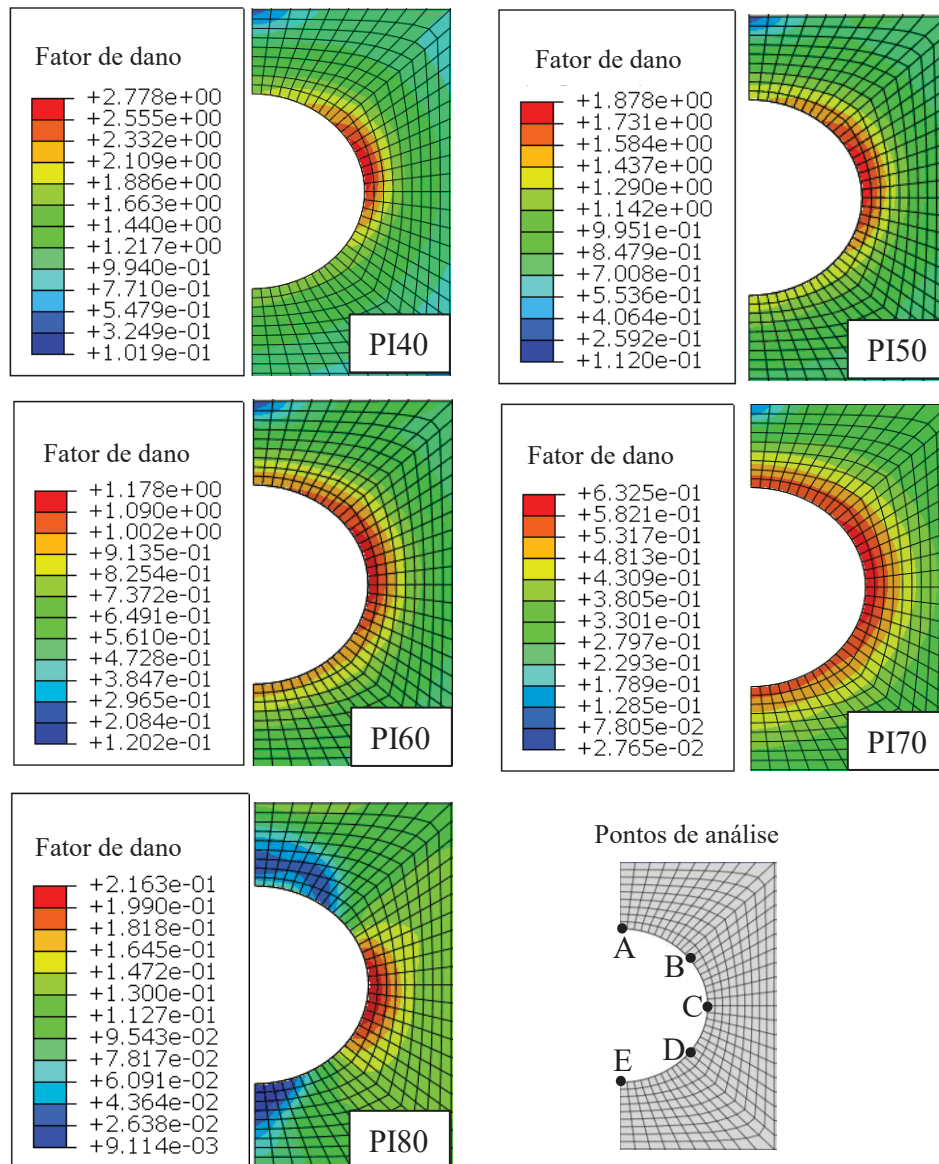
FIGURA 38 – MAGNITUDE DOS DESLOCAMENTOS DOS PONTOS ANALISADOS.



5.6.2 Critério de dano

A FIGURA 39 apresenta o fator de dano obtido para cada DOE considerado. Observa-se que as regiões próximas aos pontos B e C são as regiões mais críticas, onde há possibilidade de ocorrência de microfissuras.

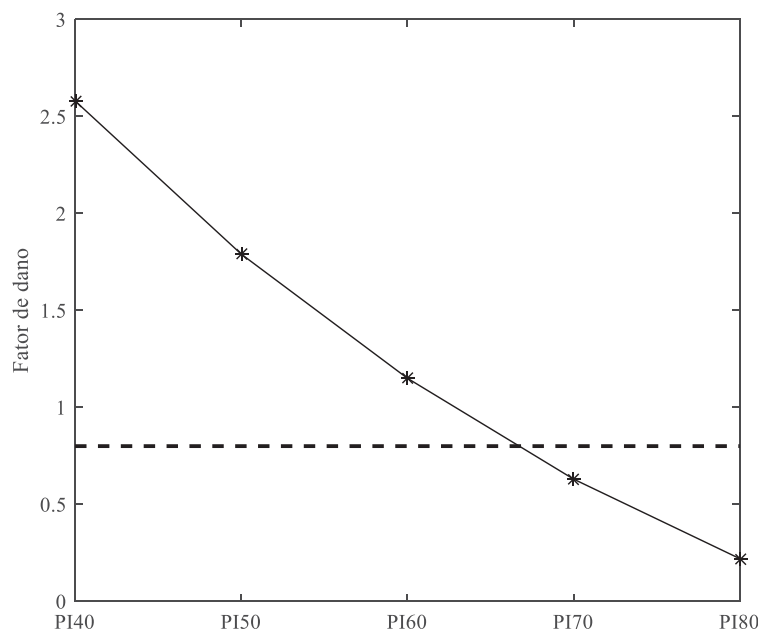
FIGURA 39 – FATOR DE DANO (D) AO REDOR DA CAVERNA PARA OS DOES ANALISADOS.



FONTE: A autora (2022).

Ao final dos 50 anos analisados na simulação por elementos finitos, a relação de microfissuras era aceitável apenas para a PI70 e PI80, onde o fator de dano é menor que 0,8. A FIGURA 40 mostra os valores da razão de microfissuras, considerando 50 anos de análise, para o ponto C para todas as DOEs simuladas.

FIGURA 40 – FATOR DE DANO (D) APÓS 50 ANOS DE ANÁLISE



FONTE: A autora (2022).

5.7 CONCLUSÕES

A alteração do estado de tensões *in situ* ocasionada pela construção de cavernas salinas, combinada com o comportamento de fluência e dilatância do sal submetido a tensões desviadoras, pode ocasionar instabilidades nas cavernas e deflagrar subsidências. Em regiões continentais estas subsidências ocasionam diversos tipos de risco à população. A utilização do modelo de MMD combinado com um fator de dano permite modelar e avaliar a fluência primária, a fluência em estado estacionário e a ocorrência de dano em uma caverna salina.

Apesar da ocorrência de deslocamentos de grande magnitude (superiores a 1 metro), a deformação por fluência para todas as pressões internas analisadas foi considerada aceitável, pois a deformação não atingiu a deformação limite estabelecida como critério de desempenho. Outro aspecto importante simulado foi em relação às microfissuras. Considerou-se um valor aceitável de 0,8 para o fator indicador de dano. Valores superiores a este indicam a ocorrência de microfissuras nas paredes da caverna. Os resultados indicaram que apenas os DOEs PI70 e PI80 forneceram resultados aceitáveis.

Diversas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de analisar o comportamento das cavernas de sal-gema, mas existem dificuldades em representar o comportamento desse material ao longo do tempo. Considera-se que uma combinação de um modelo que simula a fluência primária e secundária com um critério de dano, como foi feito nesta pesquisa, é uma

das formas mais completas de analisar o comportamento do sal-gema ao longo do tempo. Por fim, ressalta-se que a análise integrada entre fluência e comportamento dilatante é uma ferramenta importante para a análise de confiabilidade, pois permite uma análise mais abrangente do comportamento da rocha salina. Os capítulos seguintes têm como foco principal analisar a variabilidade dos parâmetros geotécnicos para fornecer uma abordagem probabilística.

6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE GLOBAL

Este capítulo apresenta a metodologia desenvolvida para a realização de análises de sensibilidade (AS) em cavernas salinas utilizando o modelo de fluência de Múltiplos Mecanismos de Deformação e o Critério de Dilatância de Ratigan. Uma análise de sensibilidade busca quantificar o impacto da incerteza de cada variável de entrada na variabilidade dos valores de saída do modelo. Saltelli et al. (2007) destaca que existem diversas finalidades para uma análise de sensibilidade, entre elas: descobrir erros nos modelos, identificar fatores de entrada críticos, simplificar modelos e estabelecer prioridades de pesquisa. Segundo Qian; Mahdi (2020) os dois principais objetivos de uma análise de sensibilidade são: a ordenação (*ranking*) dos parâmetros de entrada em termos de seu efeito na variabilidade da saída do modelo, onde aqueles classificados mais elevados tornam-se então o foco da estudo experimental ou numérico e a triagem para estabelecer quais entradas do modelo têm pouco ou nenhum efeito na variabilidade da saída do modo. Isso permite reduzir o modelo definindo essas entradas para valores fixos.

Existem dois grupos de métodos de análise de sensibilidade: os métodos locais, que examinam a sensibilidade das entradas do modelo em um ponto específico no espaço de entrada (só se analisa uma variável, as outras mantem-se fixas) e os métodos globais, que, por outro lado, tomam as sensibilidades em vários pontos no espaço de entrada (SALTELLI ET AL., 2007). Embora a simplicidade e o baixo custo computacional dos métodos locais garantam sua popularidade, muitos métodos globais também fornecem alguma indicação das interações de cada entrada com outras entradas podendo então fornecer informação mais completas sobre a sensibilidade do modelo.

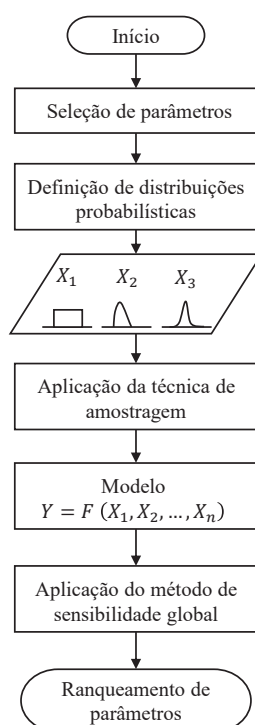
Conforme é apresentado por Saltelli et al. (2007) a análise de sensibilidade global pode ser realizada via método de Efeitos Elementares ou por métodos baseados em variância. O método dos Efeitos Elementares, foi proposto por Morris (1991), é um método em que é feita uma triagem do tipo *one-at-a-time (OAT)*, podendo traduzir como uma por vez, onde apenas um parâmetro é alterado por vez. Neste método, considerando um modelo em que se analisa k variáveis de entrada é necessário realizar $k + 1$ simulações. Além do trabalho que propôs este método, Campolongo et al. (2007) pode ser consultado para entender melhor o método dos Efeitos Elementares e como melhorar o espaço de amostras deste método.

Por outro lado, existem os métodos baseados em variância, como o FAST (*Fourier Amplitude Sensitivity Test*), o RBD (*Balance Design*) e o método introduzido por Sobol' (1990), o qual propôs a técnica conhecida como análise de sensibilidade global Sobol'. O método

Sobol' é um método *Many-at-a-time* (MAT), ou seja, opera alterando duas ou mais entradas simultaneamente. De acordo com Qian; Mahdi (2020), o método Sobol' é um dos métodos de análise de sensibilidade mais completos, pois fornece informações sobre as interações entre as variáveis, é adequado para modelos não-lineares, fornece ranqueamento e triagem dos parâmetros, contudo tem um alto custo computacional devido ao número de simulações ou experimentações necessário. A abordagem adotada neste trabalho refere-se ao método de Sobol' com a extensão proposta por Saltelli (2002), podendo assim, ser denominado de método Sobol'/Saltelli de análise de sensibilidade. Adotou-se um método baseado em variância devido à sua capacidade de capturar a influência de toda a amplitude de variação de cada fator de entrada e pela possibilidade de analisar os efeitos de interação entre estes fatores. Outra vantagem do método de análise de sensibilidade global de Sobol'/Saltelli é capaz de calcular medidas de sensibilidade para grupos arbitrários de fatores.

A FIGURA 41 apresenta um fluxograma da metodologia de análise de sensibilidade Sobol'/Saltelli. Em suma, a técnica consiste em selecionar os parâmetros a serem analisados, definir suas distribuições de probabilidade de ocorrência, aplicar uma técnica de amostragem destes parâmetros, realizar um número suficiente de simulações para que haja convergência dos índices de sensibilidade, aplicar a técnica Sobol'/Saltelli e ranquear a ordem de importância dos fatores analisados.

FIGURA 41 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE GLOBAL SOBOL'/SALTELLI.



FONTE: A autora (2022).

O método de Sobol'/Saltelli parte de um modelo dado por

$$Y = g(\mathbf{X}) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (51)$$

onde $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ é o vetor de variáveis de entrada aleatórias e independentes, g é um modelo determinístico e Y é um escalar de saída aleatório.

A fim de determinar a importância de cada valor de entrada, a variância da expectativa condicional ($E(Y|X_i)$) deve ser considerada. Com o método de Sobol'/Saltelli calculam-se dois índices de sensibilidade: o índice primário e o índice total. O índice de sensibilidade primário (S_i) de uma variável X_i representa numericamente a contribuição do efeito dessa variável para a variância do resultado do modelo e é calculado pela razão entre a variância de sua expectativa condicional pela variância incondicional, como

$$S_i = \frac{V[E(Y|X_i)]}{V(Y)} \quad (52)$$

Por sua vez, o índice de sensibilidade total (S_T) leva em conta a contribuição combinada do efeito primário de uma variável com todos os efeitos de ordem superior. Os efeitos de ordem superior relacionam interações de uma dada variável com as demais variáveis. Assim, considerando um modelo com três variáveis de entrada, o índice de sensibilidade total da variável número 1 é dado por

$$S_{T1} = S_1 + S_{12} + S_{13} + S_{123} \quad (53)$$

em que $S_{12} + S_{13} + S_{123}$ são índices de sensibilidade das interações entre as variáveis.

Desta forma o índice de sensibilidade total de um variável i é calculado por

$$S_{Ti} = 1 - \frac{V[E(Y/X_{-i})]}{V(Y)}. \quad (54)$$

6.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DE SOBOL'/SALTELLI

O procedimento numérico baseado em Monte-Carlo para computar o conjunto completo de índices de primeira ordem e de efeito total para um modelo de k fatores de entrada (parâmetros) descrito neste item foi implementado no software MATLAB seguindo o método de Saltelli (2002). As seguintes etapas foram implementadas para compor o algoritmo:

1. Gerar uma matriz $(N, 2k)$ de números aleatórios, onde N é o número de simulações realizadas e é denominado de amostra base. Para dar uma ordem de grandeza, N pode variar de algumas centenas a alguns milhares. Estes valores devem ser alocados em duas matrizes (A e B), cada uma delas com N linhas e k colunas.
2. Definir uma matriz C_i formada por todas as colunas de B , exceto pela i -ésima coluna que deve ser preenchida com a respectiva coluna da matriz A . Desta forma a matriz C_i é uma matriz multidimensional (N, k, k) .
3. Realizar as simulações para os conjuntos de parâmetros organizados nas 3 matrizes, obtendo então os vetores de resposta

$$y_A = f(A) \quad (55)$$

$$y_B = f(B) \quad (56)$$

$$y_{C_i} = f(C_i) \quad (57)$$

Com o este método, proposto por Saltelli (2002), é possível obter os índices de sensibilidade de primeira ordem (S_i) e total (S_{Ti}) com $N(k + 2)$ avaliações do modelo, enquanto o método original requeria N^2 simulações.

Em posse dos vetores acima o índice de sensibilidade de primeira ordem é calculado por

$$S_i = \frac{(1/N) \sum_{j=1}^N y_A^{(j)} y_{C_i}^{(j)} - f_0^2}{(1/N) \sum_{j=1}^N \left(y_A^{(j)} \right)^2 - f_0^2} \quad (58)$$

onde

$$f_0^2 = \left((1/N) \sum_{j=1}^N y_A^{(j)} \right)^2 \quad (59)$$

De forma similar o índice de efeito total é calculado por

$$S_{Ti} = 1 - \frac{(1/N) \sum_{j=1}^N y_B^{(j)} y_{C_i}^{(j)} - f_0^2}{(1/N) \sum_{j=1}^N \left(y_A^{(j)} \right)^2 - f_0^2} \quad (60)$$

Os trabalhos de Rasmussen (2018) e Qian; Mahdi (2020) destacam as seguintes observações sobre a análise de sensibilidade global Sobol'/Saltelli:

- S_i é uma medida de quanto a variação da resposta do modelo pode ser reduzida com a fixação do valor de uma determinada variável de entrada, ou seja quanto maior o valor de S_i maior a redução da variação da resposta do modelo. Assim, este parâmetro é utilizado para a ordenação dos parâmetros do modelo.
- S_{Ti} próximo a zero significa que o parâmetro não influi na resposta do modelo, por isto este parâmetro é útil na triagem do modelo.
- A soma de todos S_{Ti} é igual a 1 para modelos aditivos e maior que 1 para modelos não aditivos (modelos aditivos são aqueles em que não há interações entre as variáveis de entrada analisadas).

6.2 METAMODELAGEM

O tempo de execução de um modelo numérico de uma caverna salina, dependendo de seu nível de detalhamento, é relativamente alto. Realizar análises de sensibilidade e análises probabilísticas, geralmente, requer milhares de avaliações do modelo de elementos finitos. Além disso, ao se utilizar o modelo geomecânico desenvolvido neste trabalho e apresentado no capítulo precedente (*CAPÍTULO 5*), os custos computacionais das análises podem se tornar demasiadamente onerosos ou até mesmo inviáveis. Um modelo equivalente ao apresentado no Capítulo 5 demoraria aproximadamente 30 dias para avaliar 10000 simulações em um computador i7 com 8GB de memória RAM. Uma solução para superar este problema é substituir o modelo numérico original utilizando modelos substitutos (*surrogate models*).

Existem diversas ferramentas estatísticas e probabilísticas que buscam determinar os valores de entradas que mais influenciam nas saídas de um modelo. Regressão polinomial, krigagem, redes neurais artificiais e método dos mínimos quadrados, são exemplos dessas ferramentas. Conforme Mahmoudi et al. (2017) explicam, algumas destas técnicas possibilitam a obtenção de um modelo que substitui a simulação original com acurácia e precisão suficientes para avaliar o comportamento de um sistema complexo multivariado, com menor custo computacional que o modelo numérico original, o que é denominado como metamodelagem.

Neste trabalho desenvolveu-se um metamodelo baseado em uma combinação entre a Decomposição Ortogonal Própria (*Proper Orthogonal Decomposition*) e a Função de Base Radial (*Radial Basis Function*). Essa associação pode ser chamada de POD-RBF, já foi aplicada em outras áreas da engenharia para diminuir custo computacional de processamento. Buljak (2010) aplicou essa combinação pela primeira vez para caracterizar um material. Buljak (2012) utilizou este método para desenvolver um metamodelo que informasse descolamentos em uma treliça e, mais recentemente Khaledi et al. (2014) apresentou um metamodelo baseado em POD-RBF para analisar o comportamento de um túnel.

A POD serve para reduzir a ordem do problema e treinar a RBF. Cunha; Mesquita (2021) explicam que a POD é um modelo de redução baseado em dados (*data-based*) resultantes de simulações numéricas ou experimentos laboratoriais que busca uma base ótima a partir desses dados. Essa base permite a representação simplificada do problema físico de interesse, como por exemplo, pressão e temperatura na mecânica dos fluidos ou tensão e deformação na análise estrutural. Na literatura essa técnica de decomposição é conhecida por diversos nomes: Transformada de Karhunen-Loève, Análise de Hotelling, Análise de Componentes Principais e Decomposição em Valores Singulares.

As Funções de Base Radial (RBF), por sua vez, são frequentemente utilizadas quando é necessário construir uma aproximação de uma determinada função multivariável por interpolação entre os dados existentes (BULJAK, 2012).

O item a seguir explica o algoritmo desenvolvido para substituir o modelo de elementos finitos na obtenção da deformação por fluência e critério de dano.

6.2.1 Algoritmo POD-RBF

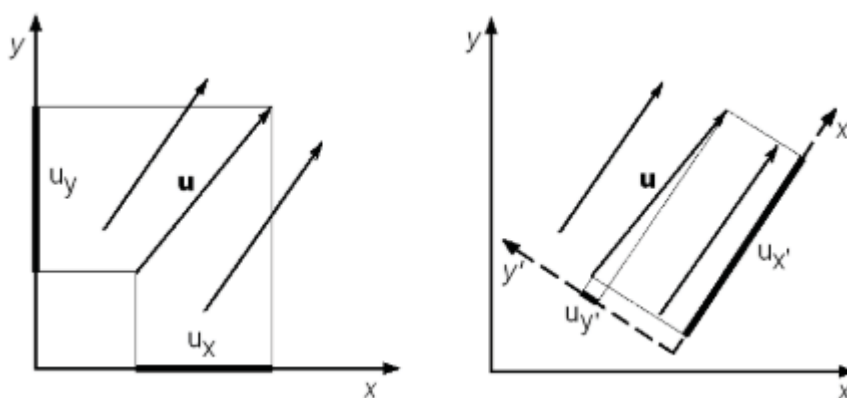
Buljak (2012) explica que o algoritmo consiste em duas partes principais: (1) a Decomposição Ortogonal Própria da matriz de *snapshot* ($\mathbf{U}$) e (2) a interpolação usando a Função de Base Radial. O conceito de *snapshot* é introduzido por Buljak (2010) e refere-se a

uma saída de um sistema que corresponde a uma determinada entrada. No contexto estrutural, o autor explica que, o sistema pode ser representado por um modelo numérico e os *snapshots* podem ser quaisquer campos discretos de interesse, como deslocamentos nodais, valores de tensão em pontos de integração, velocidades, temperaturas ou outras grandezas físicas de interesse. Os parâmetros dos quais o sistema (modelo numérico) depende são utilizados em análises inversas.

Um vetor de *snapshots* (M), gerado por vários conjuntos de parâmetros (N) devem ser armazenados em uma matriz retangular (U) que é chamada de matriz de *snapshot*, que é a matriz que descreve as saídas do sistema para diferentes parâmetros analisados.

Conforme citado anteriormente, a POD visa obter uma descrição aproximada de baixa dimensão para algum processo de alta dimensão. Tomando como exemplo um conjunto de vetores bidimensionais, pode-se construir uma aproximação de um conjunto de vetores quase paralelos (colineares), como pode ser visto na FIGURA 42. Obviamente, fazer isso no sistema de coordenadas original introduzirá um erro significativo, pois ambos os componentes têm a mesma ordem de grandeza. Por outro lado, é possível introduzir um novo sistema de coordenadas com eixos girados em aproximadamente 45° e realizar essa aproximação de um componente no novo sistema. Assim a aproximação é mais precisa, pois os componentes a serem desprezados são para todos os vetores muito menores que os anteriores (sistemas de coordenadas original). Finalmente, se escolhido o novo sistema de coordenadas de tal forma que o eixo x' tenha uma direção em relação à qual a soma das projeções de todos os vetores do conjunto dê o máximo, então pode-se afirmar que, nesta base, é obtida a melhor aproximação de um componente possível (a mais precisa) de um dado conjunto de vetores. Nesse caso, a nova base de coordenadas representa uma base POD para o conjunto de vetores.

FIGURA 42 – VETORES QUASE COLINEARES E SUAS PROJEÇÕES NO SISTEMA DE COORDENADAS ORIGINAL E NOVO SISTEMA DE COORDENADAS



FONTE: Buljak (2012).

Aplicando a mesma lógica apresentada anteriormente para vetores bidimensionais, a base POD para a matriz de *snapshot* $\mathbf{U}$ pode ser construída nos seguintes passos:

1. Encontrar a direção em relação à qual a soma das projeções de todos os *snapshots* atingem o máximo;
2. Encontrar a direção ortogonal à anterior. De todas as opções possíveis, escolher aquela que resulta na projeção máxima de todos os *snapshots*;
3. Encontrar a direção ortogonal a todas as encontradas anteriormente, tendo a mesma propriedade ótima (projeção máxima).
4. Repetir o passo anterior até encontrar a última direção.

Este processo de maximização está conectado com o problema de autovalor dentro de um processo chamado Análise de Componentes Principais. Para construir a base POD da matriz de *snapshots* com este processo, é necessário calcular os autovalores (λ_i) e autovetores ($\mathbf{v}^i$) da matriz de covariância $\mathbf{C} = \mathbf{U}^T \cdot \mathbf{U}$.

Após a solução do problema de autovalores-autovetores, a fórmula genérica para i -ésima direção POD é dada por

$$\boldsymbol{\varphi}^i = \mathbf{U} \cdot \mathbf{v}^i \lambda_i^{-\frac{1}{2}}. \quad (61)$$

Assim a base da POD representa uma matriz N por M, tal que

$$\boldsymbol{\Phi} = [\boldsymbol{\varphi}^i] \quad (62)$$

onde as direções POD calculadas anteriormente são classificadas em ordem decrescente de autovalores correspondentes. Agora, é possível expressar todos os *snapshots* na nova base por uma transformação linear

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\Phi} \cdot \mathbf{A} \quad (63)$$

onde $\mathbf{A}$ representa a matriz de “amplitude” que, tendo em mente a ortogonalidade da nova base, $\boldsymbol{\Phi}^T \cdot \boldsymbol{\Phi} = \mathbf{I}$, pode ser calculada diretamente de

$$\mathbf{A} = \Phi^T \cdot \mathbf{U} \quad (64)$$

Esta transformação fornece a matriz de *snapshots* na nova base de coordenadas. Nesta fase, nenhuma aproximação é introduzida, apenas a base é alterada. Tendo em mente a característica ótima da nova base, é construída uma aproximação de baixa ordem. Executando o truncamento com base em uma precisão desejada, mantendo as primeiras direções P , uma aproximação de baixa ordem da matriz de *snapshots* é dada por

$$\mathbf{U} \approx \bar{\Phi} \cdot \bar{\mathbf{A}} \quad (65)$$

onde os termos com a barra representam matrizes truncadas. Da mesma maneira, a aproximação de qualquer resposta única do sistema é dada pela multiplicação da base POD truncada pelo vetor correspondente de amplitudes, como

$$\mathbf{u}_i \approx \bar{\Phi} \cdot \bar{\mathbf{a}}_i. \quad (66)$$

A equação anterior gera uma resposta aproximada para um número finito de casos, para obter uma função contínua é necessário implementar uma modificação adicional. A abordagem do RBF busca uma função contínua definida sobre todo o domínio e que depende de todo o conjunto de dados, definido pelos conjuntos de dados e seus resultados da função. Portanto, a aproximação da função é escrita como uma combinação linear de algumas funções g_i que, no caso geral, podem ser funções não lineares, isto é,

$$\bar{\mathbf{a}}_k(\mathbf{z}) = \sum_{i=1}^M b_k^i \cdot g_i(\mathbf{z}). \quad (67)$$

Na forma vetorial, a Equação (67), pode ser escrita como

$$\hat{\mathbf{a}}(\mathbf{z}) = \mathbf{B} \cdot \mathbf{g}(\mathbf{z}), \quad (68)$$

em que $\mathbf{B}$ é a matriz que armazena todos os fatores de interpolação. A escolha do tipo de RBF é arbitrária, sendo que as mais frequentes são *spline* linear, *spline* cúbica, Gaussiana e quadrática.

Neste trabalho, a função que melhor se ajustou foi a função quadrática. Uma explicação detalhada sobre as RBFs pode ser consultada em Buhmann (2003).

Uma vez escolhido o tipo de RBF, resta apenas determinar os coeficientes de interpolação. Isso é feito aplicando a Equação (68) para todos os pares de parâmetros e respostas correspondentes expressas na nova base POD truncada e resolvendo para a matriz **B**.

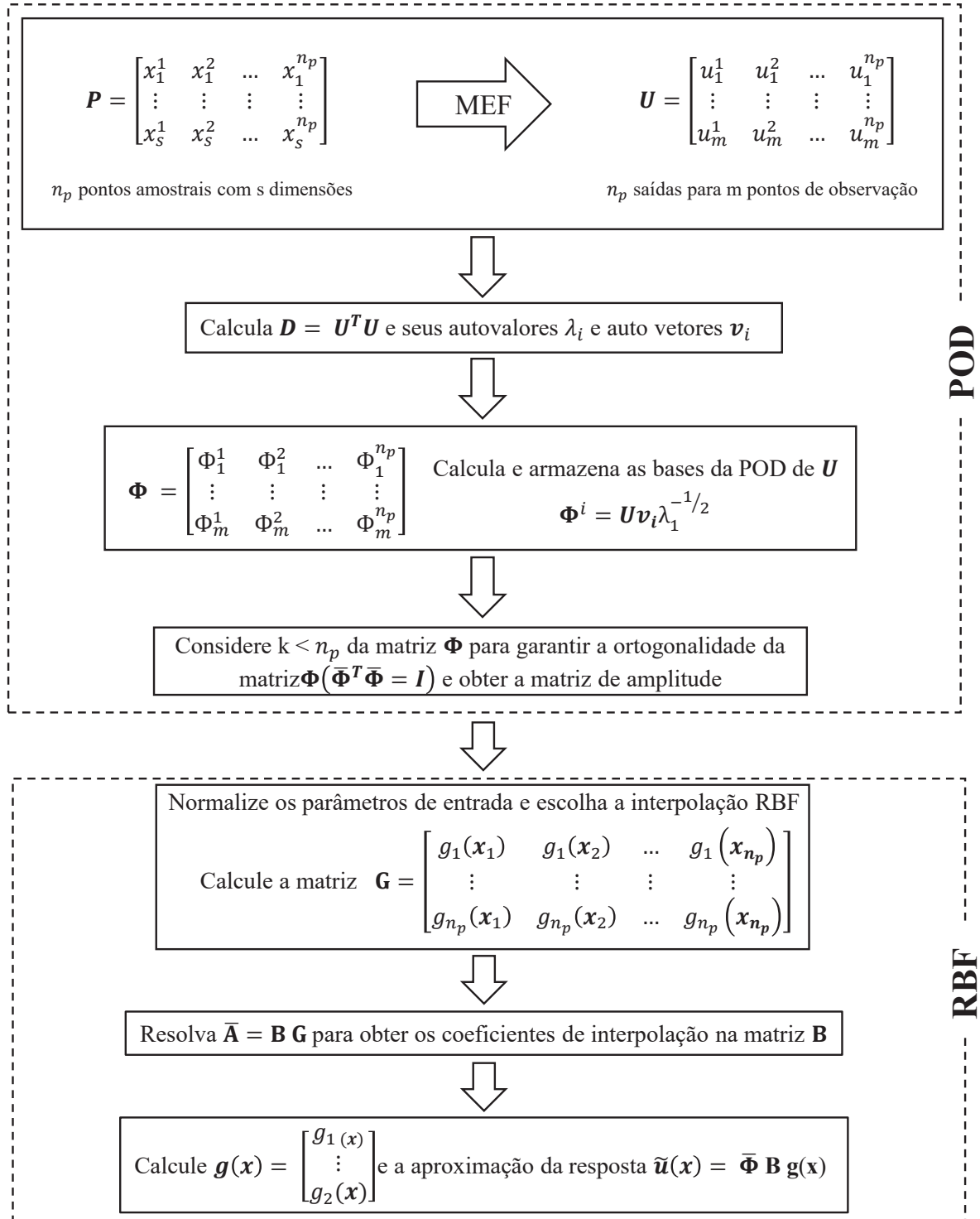
Os coeficientes de interpolação são determinados combinando (68) com (66), chegando à formulação que fornece diretamente a aproximação da resposta do sistema para qualquer combinação de parâmetros arbitrários, que lê

$$\mathbf{u}(\mathbf{z}) \approx \bar{\Phi} . \mathbf{B} . \mathbf{g}(\mathbf{z}) \quad (69)$$

Segundo Buljak (2010), esta formulação dá resultados com a mesma exatidão que aqueles calculados por simulações de elementos finitos. Obviamente, a determinação dos coeficientes envolve uma série de simulações que são demoradas, mas, uma vez feitas, obtém-se praticamente o mesmo resultado em cerca de 20.000 vezes menos tempo de computação, um fato claro, considerando que a última equação envolve uma simples multiplicação de matrizes.

O algoritmo POD-RBF também foi elaborado no software MATLAB, para isto a rotina principal `podrbf.m` foi elaborada. Esta rotina solicita outras duas funções: a função `podBmtx.m`, que gera a matriz de coeficientes de interpolação e a função `podGvec.m` que constrói o vetor **G**. Um fluxograma esquemático desta abordagem é apresentada na FIGURA 43.

FIGURA 43 – FLUXOGRAMA ESQUEMÁTICO DA ABORDAGEM POD-RBF.

 n_p = número de amostras

FONTE: A autora (2022).

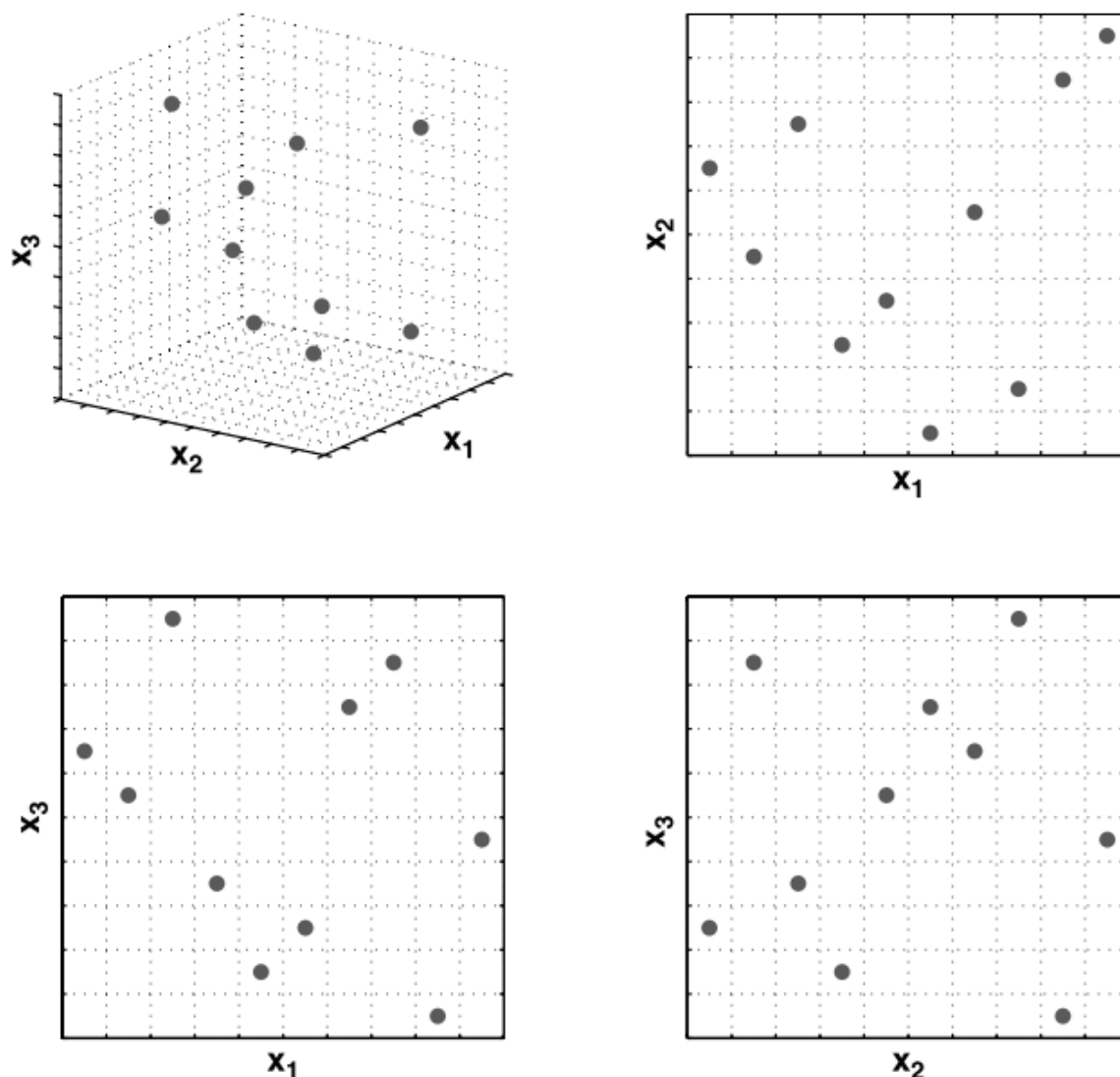
6.3 PROJETO DE EXPERIMENTOS

A acurácia de um metamodelo depende da distribuição de amostras dentro do espaço de projeto. Por esta razão, técnicas de amostragem são utilizadas para determinar a melhor distribuição de pontos amostrais para representação do domínio de projeto. Conforme Forrester et al. (2008) explicam, a escolha de uma técnica de amostragem apropriada é geralmente considerada crítica para o desempenho de qualquer abordagem de metamodelagem. A ideia geral de uma estratégia de amostragem é gerar uma série de pontos que podem ser uniformemente espalhados no espaço viável. Essa série de pontos amostrais necessária para construir um metamodelo depende da ordem de não linearidade e da dimensão da função desconhecida. Assim, definir o tamanho da amostra inicial é uma tarefa complexa a ser realizada. Uma forma de verificar se a quantidade de amostras é suficiente é verificando se o erro entre o modelo original e o metamodelo é aceitável.

Com a finalidade de gerar um espaço amostral totalmente preenchido (*space-filling*), uniformemente distribuído e que evite sobreposições, utiliza-se neste trabalho a técnica de Amostragem por Hipercubo Latino (AHL). Esta abordagem determina uma amostragem mais homogênea e com maior qualidade quando comparado a distribuições aleatórias ou dispostas diagonalmente ao longo do espaço de projeto (em relação a uma amostragem simples).

Um hipercubo latino (FIGURA 44) é construído dividindo o espaço de projeto em hipercubos de tamanhos iguais (caixas). Coloca-se um ponto amostral em cada caixa do espaço e se certifica que cada caixa ocupada pode cruzar o espaço de projeto ao longo de qualquer direção paralela a qualquer um dos eixos sem encontrar nenhum outro compartimento ocupado. Considerando um modelo com três variáveis de projeto, tem-se um cubo latino como o apresentado na FIGURA 32.

FIGURA 44 – HIPERCUBO LATINO COM 3 VARIÁVEIS DE ENTRADA E 10 PONTOS AMOSTRAIS VISTO EM TRÊS DIMENSÕES JUNTAMENTE COM SUAS PROJEÇÕES BIDIMENSIONAIS. TODOS OS DEZ PONTOS SÃO VISÍVEIS EM CADA UM DOS LADOS, MOSTRANDO QUE CADA LINHA E COLUNA DE CUBOS CONTÉM EXATAMENTE UM PONTO.



FONTE: Forrester et al. (2008).

Para atingir esta configuração é preciso considerar uma matriz $\mathbf{X}$ de dimensão n por k . O parâmetro n se refere ao número de pontos amostrais. Já o parâmetro k representa a dimensão de análise, onde $\mathbf{X}$ é preenchida com uma permutação aleatória. No entanto, para que o espaço seja preenchido de forma uniforme, utiliza-se a técnica *maxmin* onde a distância d entre dois pontos $\mathbf{x}^{(i_1)}$ e $\mathbf{x}^{(i_2)}$ é, geralmente, definida por

$$d(\mathbf{x}^{(i_1)} \mathbf{x}^{(i_2)}) = \left(\sum_{j=1}^{nd} |x_j^{(i_1)} - x_j^{(i_2)}|^k \right)^{1/k} \quad (68)$$

onde nd é a quantidade de componentes do vetor $\mathbf{x}$, ou seja, a dimensão do espaço amostrado e k é o tipo de norma da distância, sendo $k=1$ para norma retangular (*Manhattan*) e $k=2$ para norma Euclidiana.

Sabendo que $J_1, J_2, \dots, J_m$ é o número de pares de pontos em $\mathbf{X}$ separados pela distância d_j , busca-se maximizar o valor de d_m e minimizar o valor de J_m (o índice m é o valor meta), sendo que um único parâmetro pode computar este comportamento, tal que

$$\Phi_q(\mathbf{X}) = \left(\sum_{j=1}^m J_j d_j^{-q} \right)^{1/q} \quad (69)$$

Assim, através de métodos de otimização, obtém-se a melhor amostra para o projeto de experimentos.

6.4 INCERTEZAS DO MODELO GEOMECÂNICO

Abordagens baseadas em confiabilidade permitem a análise de incertezas complexas de forma sistemática e mais completa do que apenas análises determinísticas. A análise destas incertezas é realizada por meio de distribuições estatísticas definidas pelo seu tipo (normal, log-normal, Gumbel) e por parâmetros estatísticos, sendo os principais deles a média (μ), o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (CoV). As variáveis aleatórias de uma análise de confiabilidade podem ter diferentes distribuições. O JCSS (2006) indica que a distribuição de probabilidade normal é usual na análise de propriedades de solos. Fossum; Fredrich (2007) utilizaram distribuições normal e lognormal para os parâmetros do sal-gema em uma análise de fechamento de poço.

A avaliação da influência da variabilidade dos parâmetros de entrada se faz necessária devido à grande dispersão das propriedades dos geomateriais e a rotineira limitação de sondagens e ensaios de laboratório nas obras de engenharia geotécnica. Esta análise pode ser feita por meio de investigações hipotéticas descritas utilizando distribuições estatísticas.

Segundo Assis (2002), a partir de distribuições estatísticas é possível conduzir os projetos de estruturas geotécnicas com análises de confiabilidade.

Um primeiro esforço no sentido de aplicar uma distribuição de parâmetros probabilística a um modelo de fluência salina foi realizado por Fossum et al. (1994). Dando continuidade ao trabalho, Fossum; Munson (1996) realizam uma análise probabilística da fluência em estruturas subterrâneas.

Fossum; Fredrich (2007) explicam que as incertezas das variáveis de entrada são propagadas para as incertezas de variáveis de resposta podendo quantificar a variabilidade nas previsões. Desta forma, os mesmos autores explicam que, se um nível de confiabilidade é estabelecido, o projetista pode tentar obtê-lo reduzindo as dúvidas das variáveis de entrada. No entanto, como há escassez de parâmetros para a halita brasileira, neste trabalho optou-se por utilizar geodados adicionais permitindo a incorporação de conhecimento suplementar de diferentes fontes e seu erro associado. Desta forma, a incerteza de amostragem é contabilizada em ambos os casos (dados locais e dados suplementares). Michailidi et al. (2017) usaram esta técnica para lidar com a incerteza na probabilidade de galgamento em barragens de contenção de cheias.

A TABELA 10 apresenta os parâmetros analisados na análise de sensibilidade Sobol'/Saltelli, suas distribuições e seus parâmetros probabilísticos. Em relação ao sal optou-se por analisar os parâmetros elásticos, módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, sendo que, a densidade de probabilidade destes parâmetros é apresentada pela FIGURA 45. No que concerne aos parâmetros do modelo MMD, os parâmetros K_0 e A_2 foram selecionados, devido sua influência verificada por Fossum; Fredrich (2007), a densidade de probabilidade destes parâmetros é apresentada pela FIGURA 46. Visando analisar a interferência do material do *overburden*, os parâmetros elásticos do folhelho foram analisados, as distribuições dos valores destes parâmetros também são apresentadas na FIGURA 45. E o parâmetro de projeto Pressão Interna foi selecionado devido a sua grande influência verificada na literatura, a distribuição considerada é mostrada pela FIGURA 47.

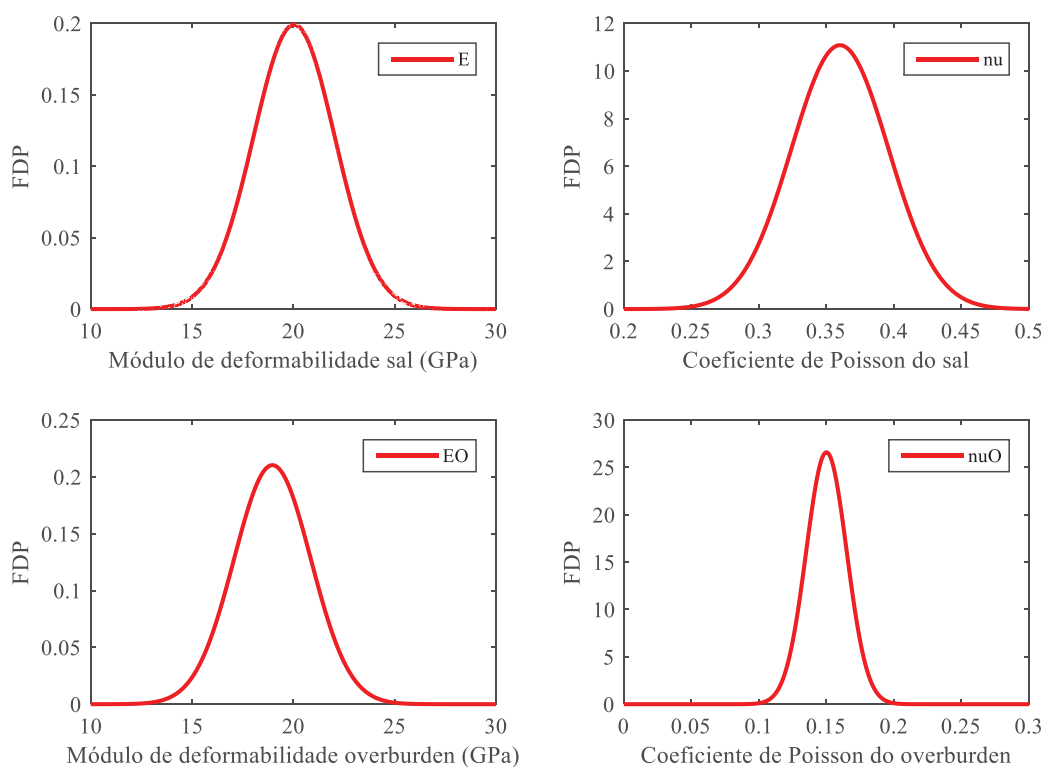
TABELA 10 – DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE DOS PARÂMETROS ANALISADOS.

Parâmetro	Descrição	Unidade	Valor médio	Desvio padrão	Tipo de distribuição
E*	Módulo de elasticidade	GPa	20,40	2,04	Normal
ν^*	Coefficiente de Poisson	(-)	0,36	0,036	Normal
K_0^{**}	Fator limitante de fluência primária	(-)	7,75E+04	4,69E+04	Lognormal
A_2^{**}	Fator estrutural do sal relacionado ao mecanismo indefinido	(h ⁻¹)	6,93E+09	7,41E+09	Lognormal
EO	Módulo de elasticidade do <i>overburden</i>	GPa	18,97	1,897	Normal
νO^{**}	Coefficiente de Poisson do <i>overburden</i>	(-)	0,15	0,015	Normal
PI***	Pressão interna	MPa	16,08	1,608	Normal

* A partir do coeficiente de variação adotado por Fossum et al. (1991);

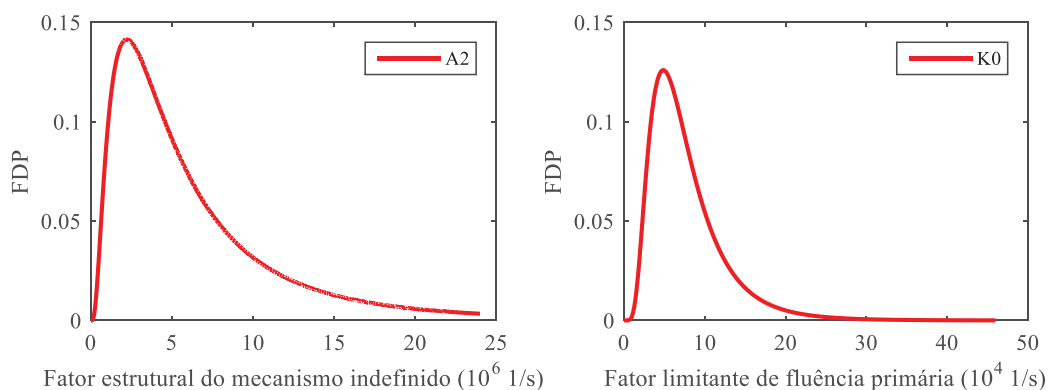
** A partir do coeficiente de variação adotado por Fossum & Fredrich (2007);

*** Com base nos valores de pressão interna seguros para fechamento de mina sugeridos por Bérest et al. (2020b).

FIGURA 45 – FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA DISTRIBUIÇÃO NORMAL DOS PARÂMETROS ELÁSTICOS DO SAL E DO *OVERBURDEN*

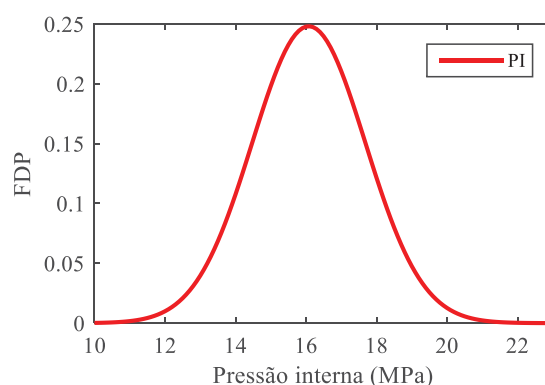
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 46 – FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA AS DISTRIBUIÇÕES LOGNORMAIS DOS PARÂMETROS DO MODELO DE MÚLTIPLOS MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 47 – FUNÇÃO DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA A DISTRIBUIÇÃO NORMAL DA PRESSÃO INTERNA DA CAVERNA SALINA



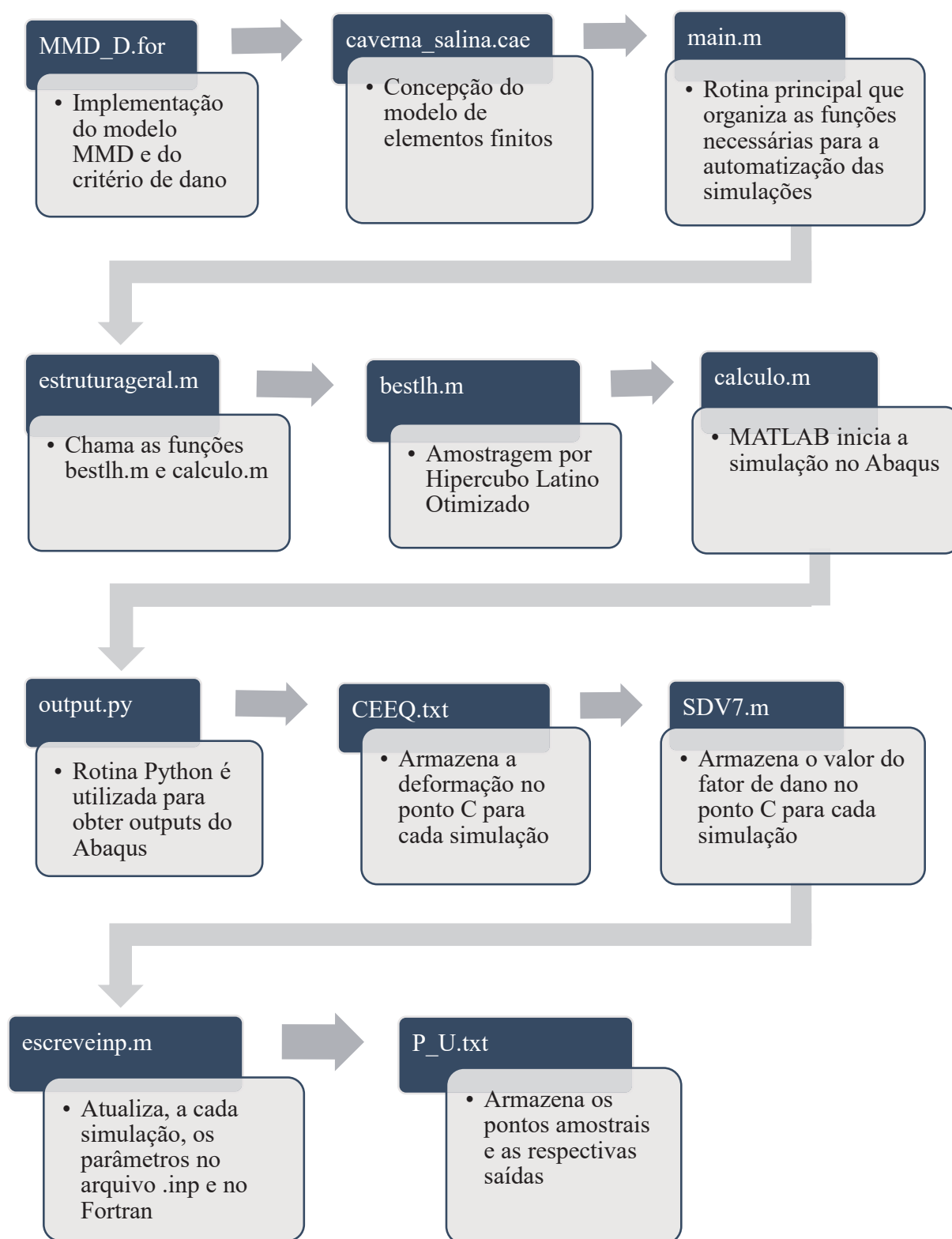
FONTE: A autora (2022).

A fim de desenvolver o metamodelo POD-RBF foram gerados 200 conjuntos de parâmetros pela técnica de amostragem hipercubo latino otimizado e realizadas as simulações de elementos finitos correspondentes a estes valores de entrada. Então foram geradas matrizes de valores de saída para estas simulações para que fosse construído o metamodelo. O nível de acurácia do metamodelo foi examinado a partir de 20 simulações de elementos finitos extras, onde o resultado do modelo de elementos finitos foi comparado com o resultado do metamodelo. Considerou-se duas medidas de erro, o R^2 e a raiz quadrada do erro normalizada (NRMSD), obtendo-se um valor de R^2 de 0,9972 e um valor de NRMSD de 0,0547. Destaca-se que a NRMSD é uma medida de erro utilizada para comparar conjuntos de dados com diferentes escalas.

6.5 INTERFACE ENTRE *SOFTWARES*

Para viabilizar as 200 simulações citadas no item anterior, foi necessário implementar uma Interface de Programação de Aplicação (*API - Application Programming Interface*) entre *softwares* para automatizar a atualização dos parâmetros a cada nova simulação. A FIGURA 48 mostra os principais arquivos utilizados para esta automatização. O processador é iniciado com o arquivo MMD_D.for que é a subrotina implementada em linguagem Fortran para descrever o comportamento de fluência da rocha salina e verificar se a condição de tensões propicia dano ao material. Este arquivo é utilizado pelo Abaqus no momento da execução da simulação do modelo numérico salvo como caverna_salina.cae. Uma rotina principal nomeada de main.m foi construída no MATLAB para reunir as diversas funções necessárias para a automatização, sendo que nesta rotina também deve ser informado o número de simulações requeridas. Esta rotina chama a função estruturageral.m, que, por sua vez solicita a função de amostragem pela técnica do Hipercupo Latino Otimizado (bestlh.m). A função estruturageral.m solicita ainda a função calculo.m que executa as simulações para cada conjunto de parâmetros obtidos pela função bestlh.m. Assim, a função escreveinp.m altera os parâmetros que devem ser modificados no arquivo de input do Abaqus e na subrotina FORTRAN para cada conjunto de parâmetros da matriz de pontos amostrais. No Abaqus são alterados os parâmetros elásticos das rochas e o valor da pressão interna da caverna e na subrotina FORTRAN são alterados os parâmetros do modelo MMD. Finalmente, a função calculo.m inicia as simulações numéricas para cada conjunto de parâmetros e utilizando interface de programação, com auxílio do *script* output.py (linguagem Python) realiza a leitura dos arquivos ODB do Abaqus e armazena as informações de interesse em um arquivo nos arquivos CEEQ.txt e SDV7.txt. A cada nova solicitação da função escreveinp.m uma nova linha de uma matriz com 9 colunas é escrita, onde as 7 primeiras colunas referem-se aos parâmetros de entrada e as 2 duas últimas as variáveis de saída calculadas, esta matriz é armazenada no arquivo P_U.txt que é utilizado pelo algoritmo POD-RBF para construir o metamodelo, ou seja, o output desta automação é o input da metamodelagem (primeiro item da FIGURA 43). Algumas outras funções secundárias também são necessárias para a execução dessa automação, toda via os arquivos na FIGURA 48 são os principais documentos deste processo.

FIGURA 48 – PRINCIPAIS ARQUIVOS UTILIZADOS NA AUTOMATIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS UTILIZADAS PARA TREINAR O METAMODELO



FONTE: A autora (2022).

6.6 RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE SOBOL'/SALTELLI

A análise de sensibilidade Sobol'/Saltelli foi realizada utilizando o metamodelo POD-RBF para simular o comportamento geomecânico da caverna salina em estudo. Foram realizadas 10000 simulações, que levaram aproximadamente 2 horas e 37 minutos para serem realizadas. Conforme citado anteriormente, no nível de detalhamento atual do modelo de elementos finitos, este número de simulações levaria aproximadamente 1 mês para ser concluído.

Na análise de sensibilidade foram considerados os sete parâmetros e suas respectivas distribuições para gerar as matrizes de resposta. Assim como no capítulo anterior, a deformação equivalente de fluência e o fator de dano são a resposta de interesse, e foram computados para o ponto C da caverna.

A FIGURA 49 apresenta o comportamento de convergência dos valores de índice de sensibilidade primário para o critério de simulação. Observa-se que a partir de 6000 ocorre uma estabilização dos valores. A FIGURA 50 mostra os valores do índice de sensibilidade total para o critério de deformação. O mesmo comportamento de convergência é observado.

Os índices de sensibilidade Sobol'/Saltelli primário e total para os parâmetros analisados são apresentados na FIGURA 51. A importância dos fatores é dada na seguinte ordem: Pressão interna da caverna, A_2 (fator estrutural do sal relacionado ao mecanismo indefinido), módulo de elasticidade do sal, módulo de elasticidade do *overburden*, coeficiente de Poisson do *overburden*, coeficiente de Poisson do sal e K_0 (Fator limitante de fluência primária).

FIGURA 49 – CONVERGÊNCIA DO ÍNDICE DE SENSIBILIDADE PRIMÁRIO PARA O CRITÉRIO DE DEFORMAÇÃO.

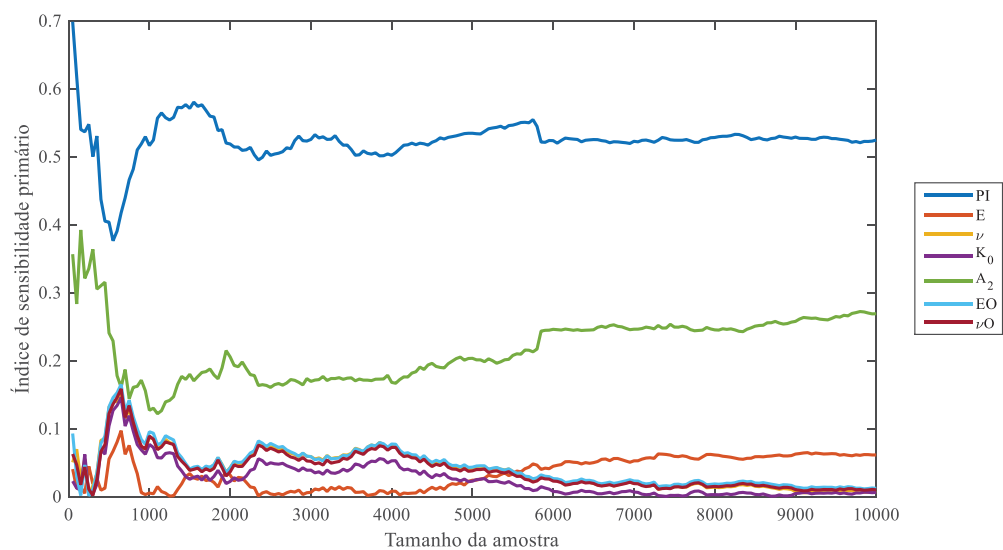


FIGURA 50 – CONVERGÊNCIA DO ÍNDICE DE SENSIBILIDADE TOTAL PARA O CRITÉRIO DE DEFORMAÇÃO.

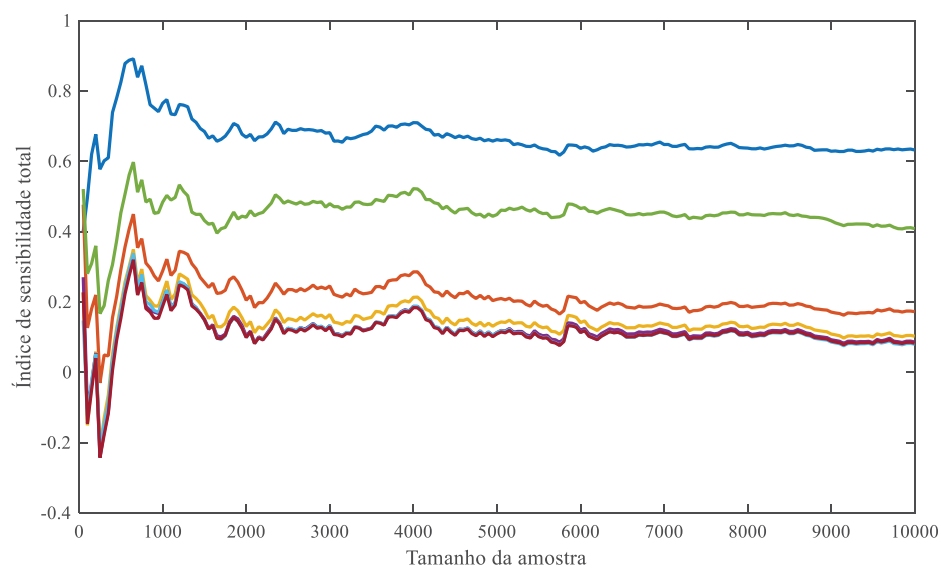
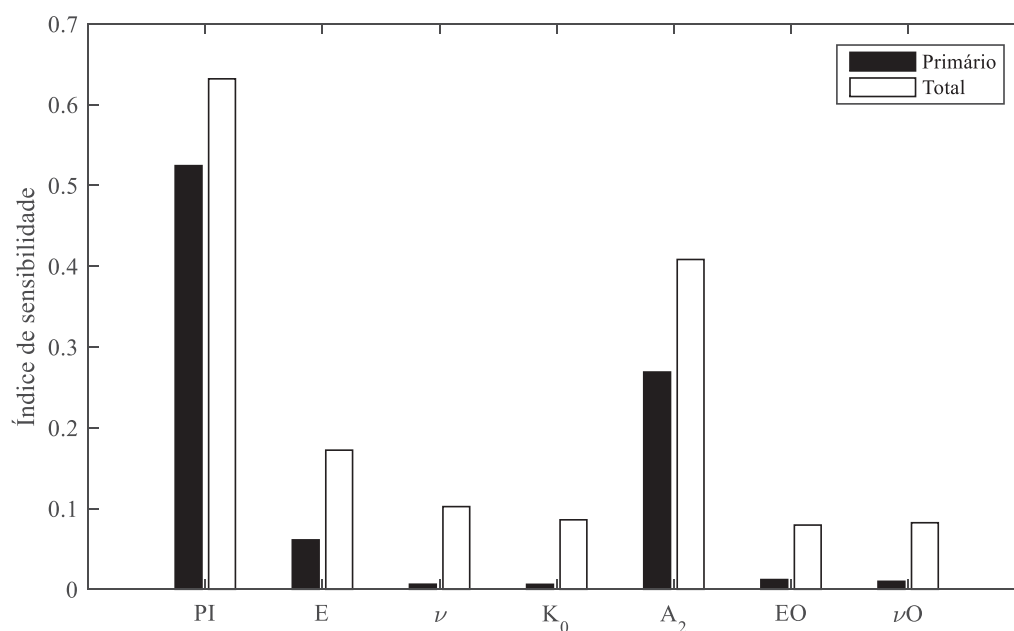


FIGURA 51 – ÍNDICES DE SENSIBILIDADE PRIMÁRIO E TOTAL DO CRITÉRIO DE DEFORMAÇÃO.



A FIGURA 52 e a FIGURA 53 apresentam, respectivamente, o índice de sensibilidade primário e o índice de sensibilidade total obtidos pela análise Sobol'/Saltelli para o critério de dano. Também, a partir de 6000 simulações observa-se um comportamento com tendência de convergência. A FIGURA 54 apresenta os índices de sensibilidade primário e total para o critério de dano, sendo que neste caso a sensibilidade da pressão interna da mina é ainda mais acentuada. Sendo que a sensibilidade dos parâmetros segue a seguinte ordem: Pressão interna da caverna, A_2 (Fator estrutural do sal relacionado ao mecanismo indefinido), coeficiente de Poisson do sal, coeficiente de Poisson do *overburden*, módulo de elasticidade do sal, módulo de elasticidade do *overburden*, e K_0 (Fator limitante de fluência primária).

FIGURA 52 – CONVERGÊNCIA DO ÍNDICE DE SENSIBILIDADE PRIMÁRIO PARA O CRITÉRIO DE DANO.

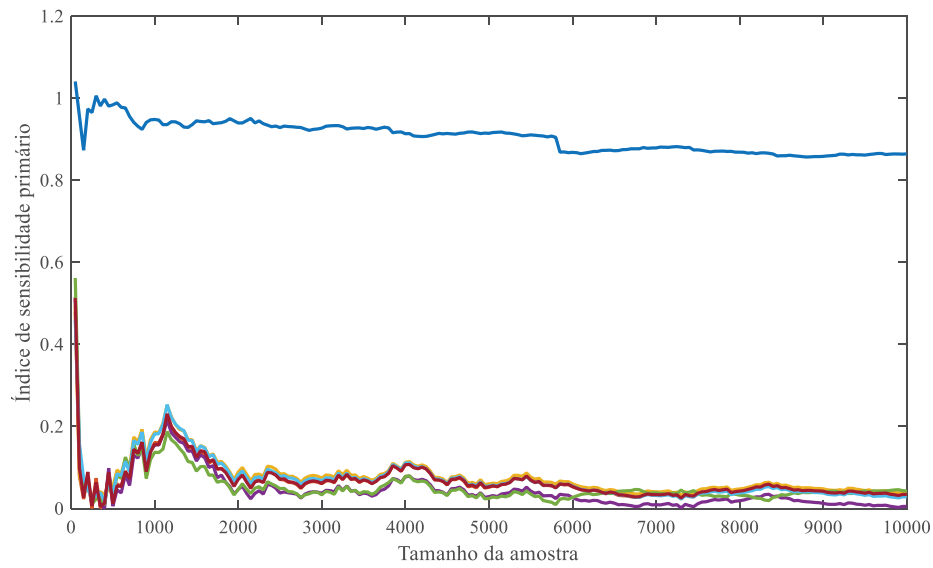


FIGURA 53 – CONVERGENCIA DO ÍNDICE DE SENSIBILIDADE TOTAL PARA O CRITÉRIO DE DANO.

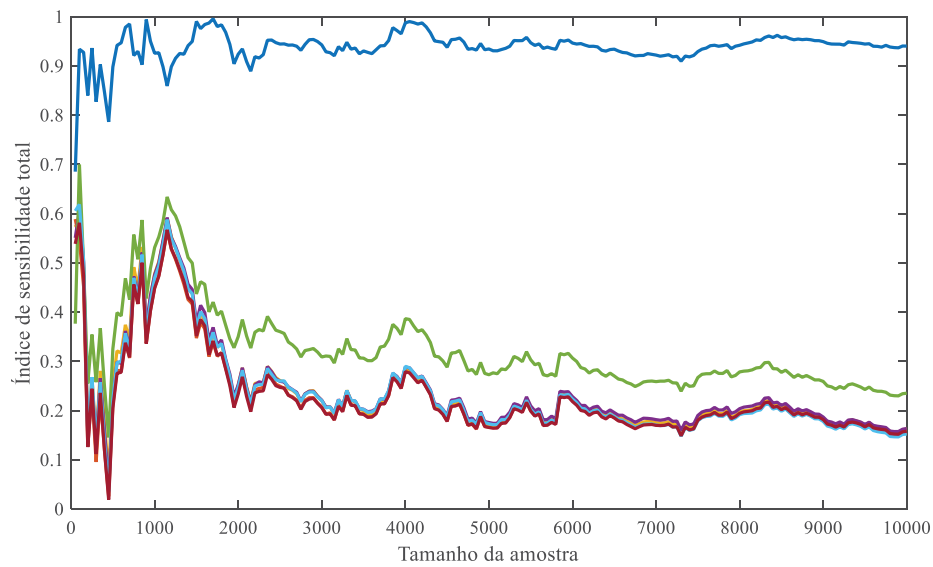
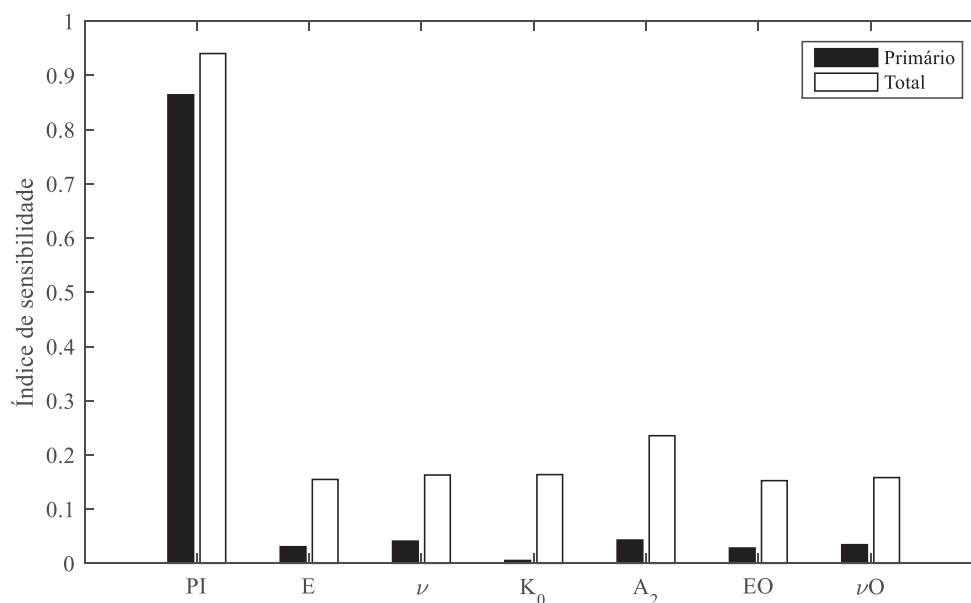


FIGURA 54 – ÍNDICES DE SENSIBILIDADE PRIMÁRIO E TOTAL DO CRITÉRIO DE DANO.



6.7 CONCLUSÕES

Neste capítulo, primeiramente, verificou-se a eficiência da aplicação do metamodelo POD-RBF para substituir o modelo axissimétrico de elementos finitos da caverna salina apresentado no capítulo anterior, possibilitando assim a execução de análises de sensibilidade e confiabilidade.

Durante a execução deste trabalho observou-se alguns pontos que devem ser levados em consideração para gerar um metamodelo com acurácia, quais sejam:

- Definir intervalos de confiança que abranjam valores críticos dos parâmetros localizados nas caudas das distribuições;
- Utilizar técnicas de amostragem experimental para abranger todo o espaço amostral e assim, reduzir o número de simulações de elementos finitos necessário para construir o metamodelo. Neste trabalho foi utilizada a técnica amostral Hipercubo Latino Otimizado;
- Verificar se o metamodelo selecionado é adequado para a dimensão do modelo. Este trabalho compõe uma problema de alta dimensão, onde 7 parâmetros são analisados, desta forma algumas técnicas de modelagem não seriam adequadas.

A partir da análise de sensibilidade global Sobol'/Saltelli, ficou evidente que o comportamento do modelo é dirigido, principalmente, pela incerteza da pressão interna.

Certamente se este parâmetro fosse fixado e apenas os demais analisados outros parâmetros se destacariam em relação a sensibilidade do modelo, no entanto sabe-se que, na prática, há uma dificuldade de assegurar a constância da pressão interna de uma caverna, então certo nível de incerteza deve ser considerado. A classificação da pressão interna como parâmetro mais sensível é relevante para conduzir as análises probabilísticas, assim o próximo capítulo enfatiza análise deste parâmetro.

7 ANÁLISES PROBABILÍSTICAS

Análises de confiabilidade são métodos probabilísticos cada vez mais usuais em obras de engenharia geotécnica, devido ao grande impacto que o não atendimento do desempenho desejado pode ocasionar. Quando uma obra geotécnica falha, podendo ser a fundação de um edifício, uma barragem, uma estrutura de contenção ou um túnel, pode-se ter como prejuízo a perda de vidas humanas, degradação ambiental e/ou perdas econômicas.

No final da década de 1970, Cornell (1969) já utilizava métodos probabilísticos aplicados à engenharia. No entanto, a primeira estruturação de maneira consistente de regras, regulamentos e explicações necessários para o projeto de novas estruturas ou avaliação daquelas existentes, de um ponto de vista probabilístico, foi realizada pelo *Joint Committee on Structural Safety* (JCSS, 2000). Baecher; Christian (2003), Phoon (2008) e Fenton; Griffith (2008) apresentam, detalhadamente, exemplos de métodos probabilísticos aplicados à engenharia geotécnica.

A norma estadunidense, que aborda os conceitos gerais de confiabilidade (*E3159 – 18 - Standard Guide for General Reliability*), elaborada pela ASTM (2018), define confiabilidade como a probabilidade de um componente, dispositivo, produto, processo ou sistema, após um período de tempo especificado e uso em condições especificadas, funcionar ou atender às necessidades solicitadas.

No Brasil, este conjunto de características e capacidades de comportamento e rendimento é denominado desempenho. Neste sentido, a confiabilidade seria a probabilidade de se atingir o desempenho de uma obra geotécnica. Para que este desempenho seja atingido devem ser estabelecidos critérios de aceitabilidade e tolerabilidade, os quais são abordados mais detalhadamente no decorrer deste capítulo.

A probabilidade de não atendimento à condição de desempenho associada a suas consequências indica o risco de um projeto. A norma NBR – ISO 31000 Gestão de riscos – Diretrizes, traduzida pela ABNT (2018), define risco como a probabilidade e gravidade dessas consequências à vida e à saúde humana, a bens materiais e ao meio ambiente.

Lacasse et al. (2019) afirmam que nem sempre são necessários projetos baseados em análises de confiabilidade. Porém, essa abordagem deve ser usada sempre que houver incertezas que possam influenciar na tomada de decisões. Os autores ressaltam a mudança cultural recente nas práticas de engenharia civil, onde o profissional deixa de ser um tomador de decisões baseado exclusivamente na ciência e torna-se um gerenciador de riscos que leva em conta suas consequências. Os autores ressaltam, também, a importância da atuação de uma equipe

multidisciplinar. Desta forma, o profissional deixa de tomar decisões para a comunidade e passa a tomar decisões com a comunidade a partir do “risco informado”.

7.1 FUNÇÕES DE ESTADO LIMITE

As funções de estado limite último e estado limite de serviço são essenciais para determinar a região de falha e, conseqüentemente, estimar a probabilidade de falha de uma estrutura. Nesta seção, estas funções são definidas e os critérios de estabilidade adotados neste trabalho são apresentados.

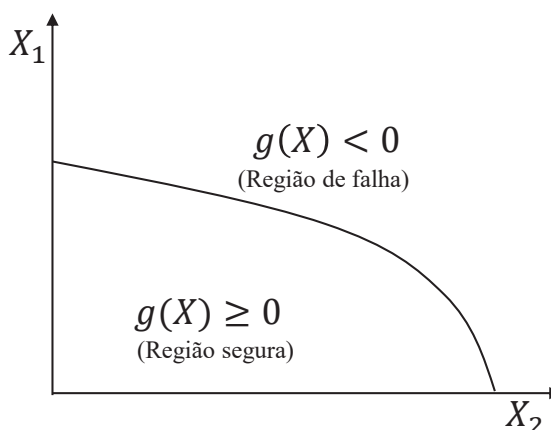
Segundo Morales (2013), a função de estado limite último ou função de falha pode ser definida pela variável solicitante (S) e pela variável de resistência (R). A função de falha geralmente é definida na forma

$$g(\mathbf{X}) = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = R - S \quad (70)$$

em que $\mathbf{X}$ é o vetor de entrada das variáveis aleatórias, X_1, X_2, X_3 são as variáveis aleatórias. Observa-se que, como função de estado limite último, $g(\mathbf{X})$, é dependente das variáveis aleatórias, esta também é uma variável aleatória.

A função $g(\mathbf{X})$ é capaz de indicar se $\mathbf{X}$ pertence a uma região segura ou não segura. Se $g(\mathbf{X}) > 0$ a função encontra-se em uma região segura, se $g(\mathbf{X}) < 0$ a função encontra-se em uma região não segura e se $g(\mathbf{X}) = 0$ a situação de projeto encontra-se na iminência da falha. A FIGURA 55 mostra as regiões desta função em um espaço bidimensional. A ISO 2394 (2015) elenca como exemplos de estado limite último a perda de equilíbrio da estrutura, rupturas ou deformações excessivas e falhas por fratura repentina ou fadiga.

FIGURA 55 – FUNÇÃO DE FALHA



FONTE: A Autora (2020).

A função de estado limite de serviço, que também pode ser chamada de função de desempenho ou performance, está relacionada aos parâmetros de entrada. Essa função tem como meta avaliar a performance do sistema correlacionada com estes parâmetros.

A norma ISO 2394 (2015) cita como exemplo de estado limite de serviço deformações inaceitáveis que atrapalhem o uso eficiente ou a aparência de elementos estruturais ou não estruturais, vibrações excessiva, danos locais que podem interferir na eficácia de uma estrutura, entre outros. Usualmente, em obras geotécnicas o valor da função de estado limite de serviço está relacionado à tensão ou deformação (FOSSUM; FREDRICH, 2007).

Comumente, a função performance é denominada função Z e também é definida em função das variáveis aleatórias $\mathbf{X}$, na forma

$$Z(\mathbf{X}) = Z(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n), \quad (71)$$

em que $\mathbf{X}$ é o vetor de entrada das variáveis aleatórias, X_1, X_2, X_3 são as variáveis aleatórias.

Neste trabalho, as funções de desempenho são baseadas nos critérios apresentados nos itens 5.5.1 e 5.5.2, compondo uma análise com múltiplos modos de falha. A primeira função de desempenho (g_1) considerada é definida em relação à deformação limite máxima de 10% no ponto C. Assim, tem-se que

$$g_1 = \bar{\epsilon}_c^{crep} - 0,1. \quad (72)$$

Ademais, a segunda função de desempenho (g_2) está relacionada ao limite de dilatação máximo para a ocorrência de microfissuras na rocha salina. Ou seja, a diferença entre o fator de dano (também avaliado no ponto C) e seu valor limite que é de 0,8 para o início de geração de microfissuras na rocha salina, conforme explicado no Capítulo 5 deste trabalho. Assim, a segunda função de desempenho é dada na forma

$$g_2 = D - 0,8. \quad (73)$$

Portanto, para cada configuração do sistema, torna-se necessária a definição de uma função de falha que considere estes dois critérios. Dessa forma, inicialmente, identifica-se o valor mínimo entre todas as funções de falha, denotado g_{min} ,

$$g_{\min} = \min (g_1, g_2). \quad (74)$$

Por fim, verifica-se se $g_{\min}$ é igual ou menor que 0. Se a afirmação for verdadeira, considera-se que ocorreu a falha do sistema.

7.2 PROBABILIDADE DE FALHA E ÍNDICE DE CONFIABILIDADE

Phoon (2008) explica que o objetivo básico de um projeto baseado em confiabilidade é garantir que a probabilidade de falha (P_f) não exceda um nível limite aceitável. Este objetivo pode ser atingido respeitando a condição de que

$$P_f = \text{Prob}(P < 0) \leq P_t \quad (75)$$

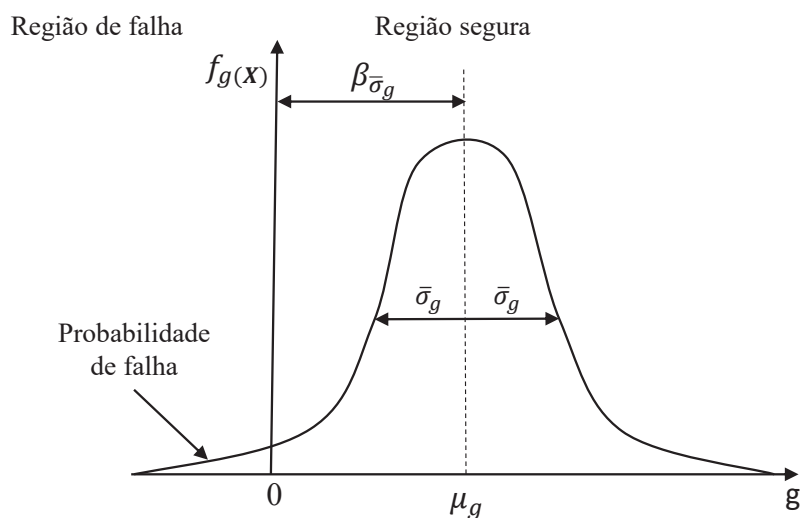
em que $\text{Prob}(\cdot)$ é a probabilidade de ocorrência de um dado evento e P_t é o nível aceitável de probabilidade de falha. Phoon (2008) apresenta, também, a possibilidade de definir a probabilidade de falha por meio do índice de confiabilidade (β), definido como

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f). \quad (76)$$

onde $\Phi^{-1}(\cdot)$ é uma função de distribuição cumulativa normal inversa. Existem diversas formas de obtenção do valor do índice de confiabilidade, como por exemplo os métodos de FORM (Método de Confiabilidade de Primeira Ordem, do inglês *First Order Reliability Method*) e SORM (Método de Confiabilidade de Segunda Ordem, do inglês *Second Order Reliability Method*).

A FIGURA 56 apresenta graficamente o índice de confiabilidade de uma função densidade de probabilidade (PDF, do inglês *Probability Density Function*) normal de $g(\mathbf{X})$, onde μ_g é a média e σ_g é o desvio padrão de g . Pela FIGURA 56 se pode entender que o índice de confiabilidade é a diferença entre a média e o estado limite $g(\mathbf{X}) = 0$.

FIGURA 56 – FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE



FONTE: A Autora (2020).

A TABELA 11, apresentada por USACE (1999), demonstra a relação entre o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha e ainda relaciona com o nível de desempenho esperado para cada índice de confiabilidade.

TABELA 11 – RELAÇÃO DO ÍNDICE DE CONFIABILIDADE E A PROBABILIDADE DE FALHA

Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de falha (P_f)	Nível de desempenho esperado
1.0	0,16	Perigoso
1.5	0,067	Insatisfatório
2.0	0,023	Pobre
2.5	0,006	Abaixo da média
3.0	0,001	Acima da média
4.0	0,00003	Boa
5.5	0,0000003	Alta

FONTE: USACE (1999).

7.3 SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO

A Simulação de Monte Carlo (SMC), também conhecida como Método de Monte Carlo ou simulação de probabilidade múltipla, é o método mais utilizado dentre os métodos probabilísticos aplicados à engenharia. Isto se deve à sua simplicidade conceitual. Baecher; Christian (2003), explicam que nesta abordagem, o projetista cria um grande número de conjuntos de valores (denotado por N), todos gerados aleatoriamente para os parâmetros incertos, e calcula a função de desempenho para cada conjunto.

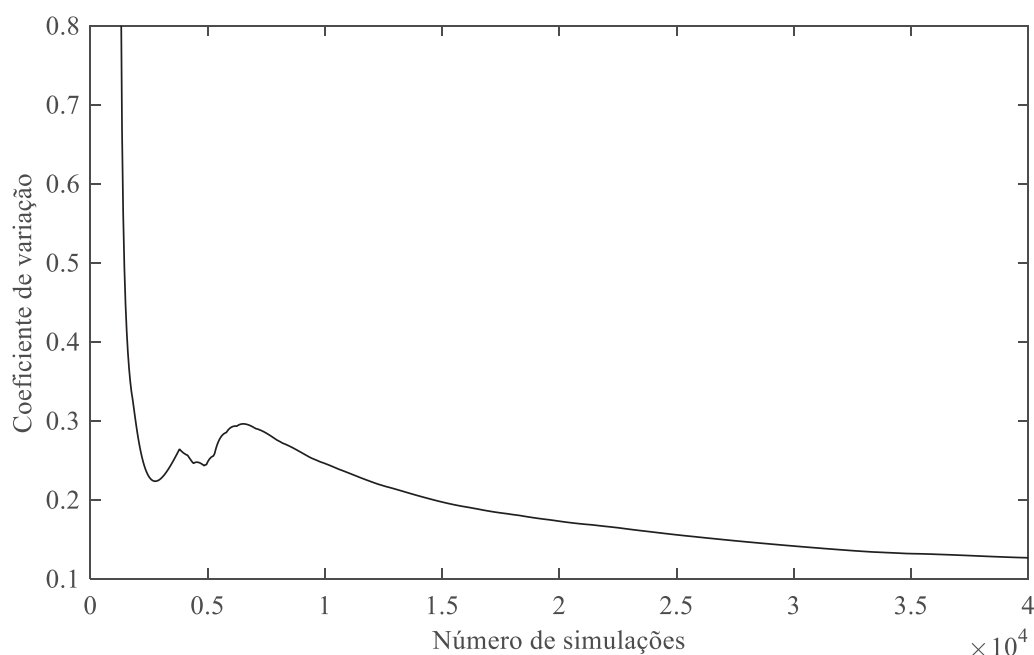
Utilizando este método, a probabilidade de falha poderá ser calculada pela razão entre o número de conjuntos que não atingiram o critério de desempenho e o número total de avaliações. Desta forma, a probabilidade de falha pode ser definida por

$$P_f = \frac{n(g(\mathbf{X}) \leq 0)}{N}, \quad (77)$$

onde $n(g(\mathbf{X}) \leq 0)$ representa a quantidade de vezes que a função de falha situa-se na região de falha para uma quantidade total de N de avaliações. Assim, um problema determinístico é resolvido muitas vezes permitindo acumular uma distribuição estatística. Levando isto em conta, compreende-se que quanto maior o número de simulações maior a precisão do procedimento. O método tem a vantagem da simplicidade conceitual, mas pode exigir um grande conjunto de valores da função de desempenho para obter uma precisão adequada.

É preciso realizar um número de simulações tal que haja uma convergência no valor da probabilidade de falha do sistema. A FIGURA 57 apresenta o coeficiente de variação da probabilidade de falha para até 40000 simulações considerando as distriuições apresentadas na TABELA 10. É possível observar que houve uma convergência do valor da probabilidade de falha com este número de simulações. Com isso, as próximas análises consideram também 40000 análises da função de desempenho.

FIGURA 57 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA PROBABILIDADE DE FALHA VERSUS O NÚMERO DE AMOSTRAS



Os capítulos anteriores apresentam o modelo constitutivo que governa o comportamento mecânico da rocha salina e, também, análises de sensibilidades relativas aos parâmetros de elasticidade e viscoplasticidade deste modelo, bem como aos parâmetros elásticos do modelo considerado para representar o *overburden* e da pressão interna da caverna, a qual também é um campo aleatório. Para isso, foram considerados valores de desvios padrão correntemente utilizados na literatura. A análise da variabilidade geoespacial de rochas salinas geralmente não convém, pois, os domos salinos geralmente possuem uma quantidade muito pequena de impurezas e, portanto, podem ser consideradas homogêneas. No entanto, uma vez que não há informações suficientes disponíveis sobre a variabilidade dos parâmetros constitutivos, três diferentes cenários probabilísticos, otimista, neutro e pessimista, são definidos para representar diferentes circunstâncias possíveis. Estes cenários podem ser assumidos de acordo com o nível de conhecimento (plano de amostragem) do perfil rochoso. A Tabela 12 apresenta os coeficientes de variação (CoV) considerados para cada cenário. Assim, além do desvio padrão apresentado pela literatura (cenário neutro), considera-se ainda um cenário mais conservador e outro mais arrojado. Foram adotadas variações no CoV de 1,5 vezes o valor do cenário neutro, para o cenário pessimista e 0,5 vezes o CoV o valor do cenário neutro, para o cenário otimista.

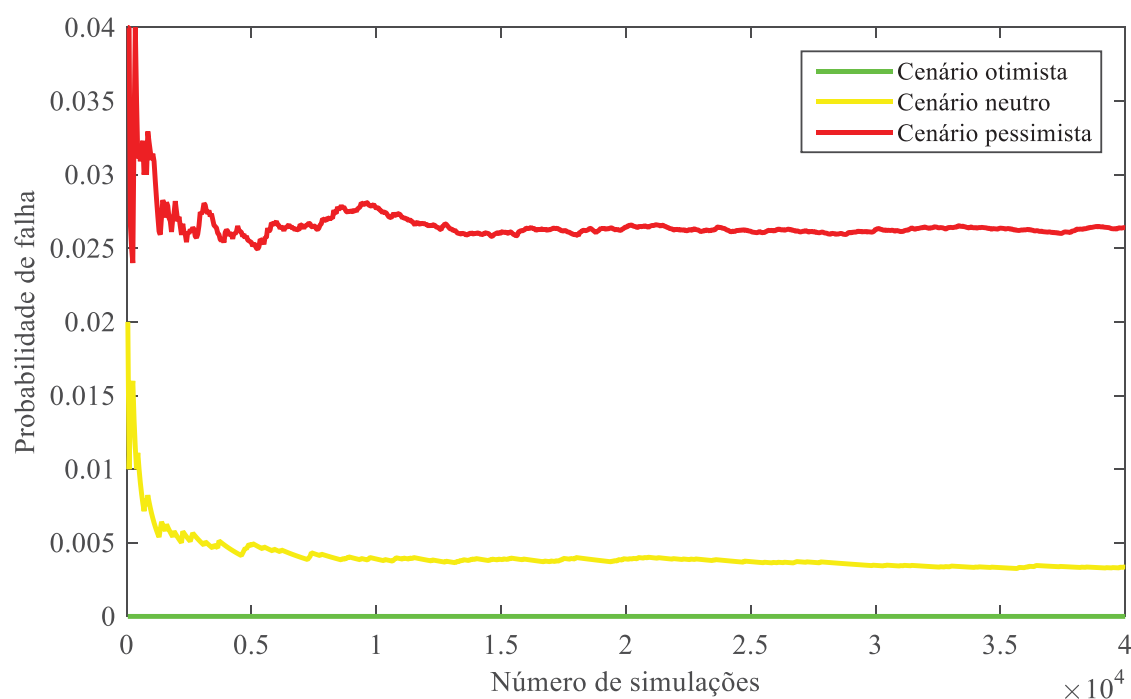
TABELA 12 – REPRESENTAÇÃO DA INCENTEZA NOS PARÂMETROS DE ENTRADA

Parâmetro	Descrição	Unidade	CoV (%)		
			Pessimista	Neutro	Otimista
E	Módulo de elasticidade	GPa	15	10	5
ν	Coefficiente de Poisson	(-)	15	10	5
K_0	Fator limitante de fluência primária	(-)	90	60	30
A_2	Fator estrutural do sal relacionado ao mecanismo indefinido	(h ⁻¹)	150	100	50
EO	Módulo de elasticidade do <i>overburden</i>	GPa	15	10	5
ν_O	Coefficiente de Poisson do <i>overburden</i>	(-)	15	10	5
PI	Pressão interna	MPa	15	10	5

A FIGURA 58 apresenta a probabilidade de falha para os três cenários considerando diversos números de simulações. Apesar de visualmente o cenário neutro parecer estabilizado desde 15000 simulações, a FIGURA 57 mostra que a convergência ainda não ocorreu neste

ponto. Por isso optou-se por analisar 40000 simulações. Conforme visto na FIGURA 58, no cenário otimista não ocorrem falhas. Já para o cenário neutro, a probabilidade de falha é de 0,0034 e para o cenário pessimista é de 0,0264. Assim, o cenário pessimista tem uma probabilidade de falha 7,76 vezes superior cenário neutro, evidenciando a sensibilidade da variação das incertezas no modelo.

FIGURA 58 – PROBABILIDADE DE FALHA PARA OS CENÁRIOS CONSIDERADOS



A Tabela 13 apresenta as probabilidades de falha e os respectivos índices de confiabilidade para os três cenários de incertezas considerando 40000 conjuntos de parâmetros randômicos para cada cenário. Na prática da engenharia civil, consideram-se satisfatórios índices de confiabilidade entre 3 e 4. Seguindo a classificação apresentada na Tabela 11, este intervalo compreenderia uma condição “acima da media” até “boa”.

TABELA 13 – PROBABILIDADE DE FALHA E INDICES DE CONFIABILIDADE DOS CENÁRIOS.

Cenário	P_f	β
Otimista	Menor que 0,000025	-
Neutro	0,0034	2.71
Pessimista	0,0264	1.93

Os valores de probabilidade de falha obtidos são relativamente baixos. Isto poderia ser diferente se outro modelo, que considerasse as descontinuidades, fosse utilizado ao invés do modelo de Mohr-Coulomb, o qual considera o *overburden* como um material contínuo.

Durante as análises percebeu-se que, para a mina em análise, a falha sempre ocorre devido ao não atendimento do critério de dano. Ou seja, que as simulações atenderam o critério de deformação. Ressalta-se que foi considerado um critério de deformação utilizado para cavernas geralmente localizadas em regiões marítimas e que, para regiões continentais e, principalmente, em regiões urbanizadas, esse critério poderia ser mais restrito. Porém, buscando seguir um referencial teórico, optou-se por seguir o critério de Costa et al. (2015).

Conforme evidenciado pela análise de sensibilidade apresentada no capítulo anterior, a pressão interna da caverna tem uma grande influência sobre o comportamento de fluência da mesma. A FIGURA 59 apresenta a relação entre a pressão interna da caverna considerada e o fator de dano considerando 40000 simulações realizadas para cada cenário. É possível perceber uma clara tendência de redução do fator de dano (D) com o aumento da pressão, mesmo havendo a influência de outros parâmetros dos conjuntos randômicos de cada simulação.

Para evidenciar o pequeno percentual de situações de falhas, os valores de fator de dano (D) apresentados na FIGURA 59 são organizados em uma função de distribuição acumulada (FDA) na FIGURA 60. Valores de dano (D) inferiores a 0,8 indicam uma condição segura do material salino na região analisada. Valores entre 0,8 e 1,0 indicam uma zona potencialmente perturbada, onde podem ocorrer microfissuras. Por outro lado, valores de dano (D) maiores que 1,0 indicam que a região é uma zona que sofre dilatação. Devido ao grande número de simulações e ao número pequeno de valores maiores que 1,0, é difícil avaliar os pontos situados na zona dilatante.

FIGURA 59 – RELAÇÃO ENTRE O FATOR DE DANO E A PRESSÃO INTERNA PARA AS SIMULAÇÕES DOS TRÊS CENÁRIOS DE INCERTEZAS ANALISADOS

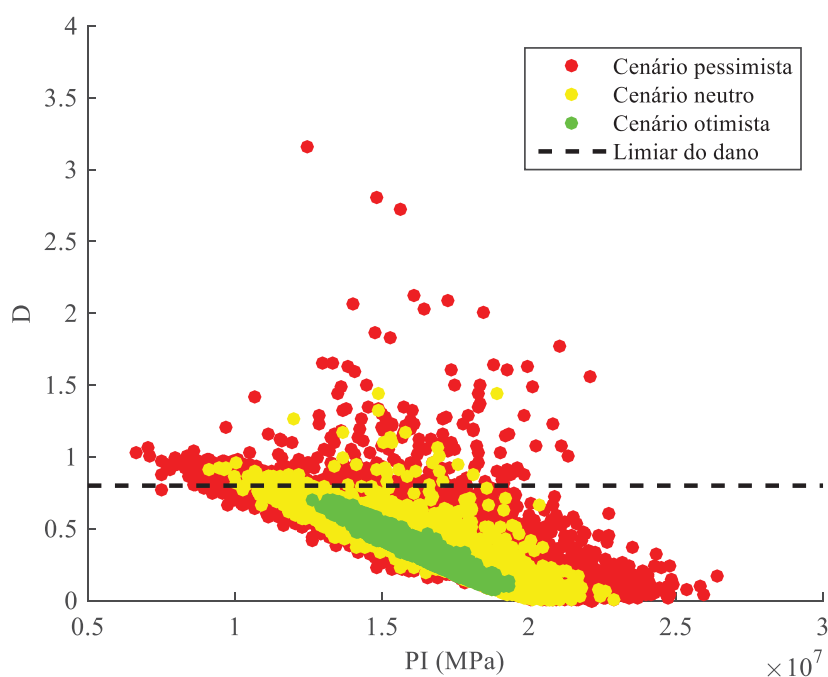
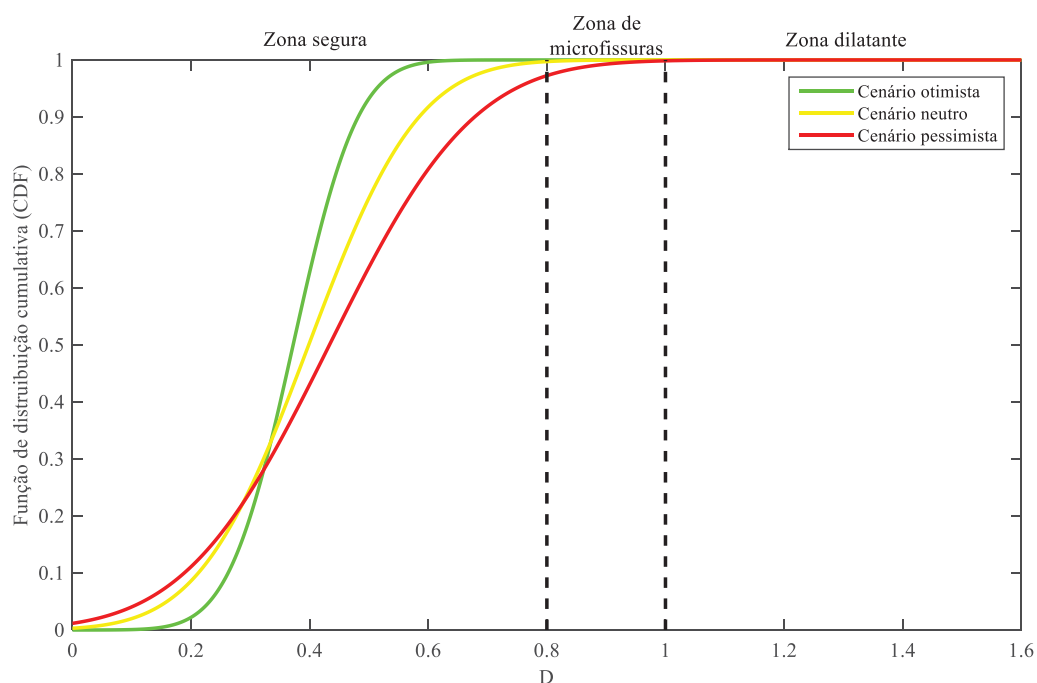


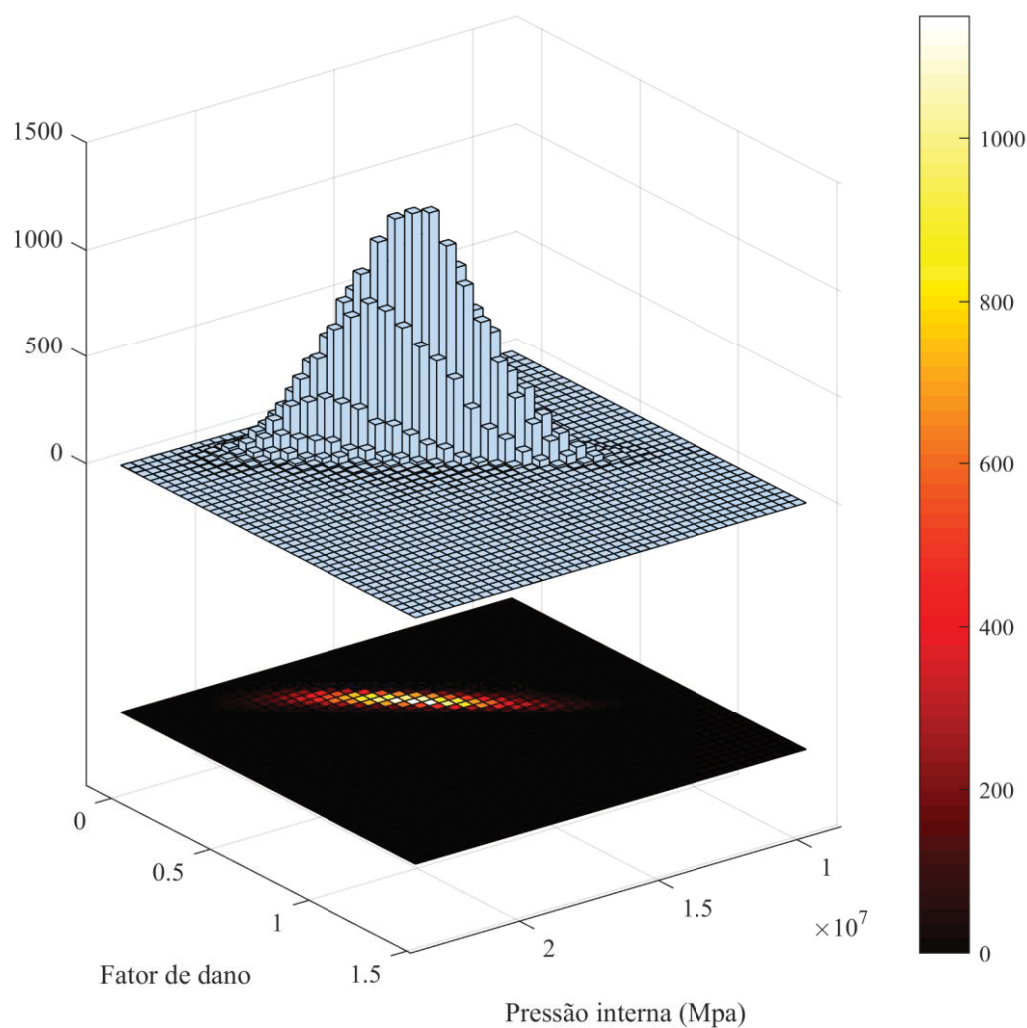
FIGURA 60 – FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA (FDA) DO FATOR DE DANO PARA OS CENÁRIOS.



Outra forma de avaliar uma correlação é a partir de histogramas bivariados. A FIGURA 61 mostra um histograma em que no eixo x é apresentada a pressão interna e no eixo y é apresentada o fator de dano (D). Abaixo do histograma um mapa de intensidade mostra uma

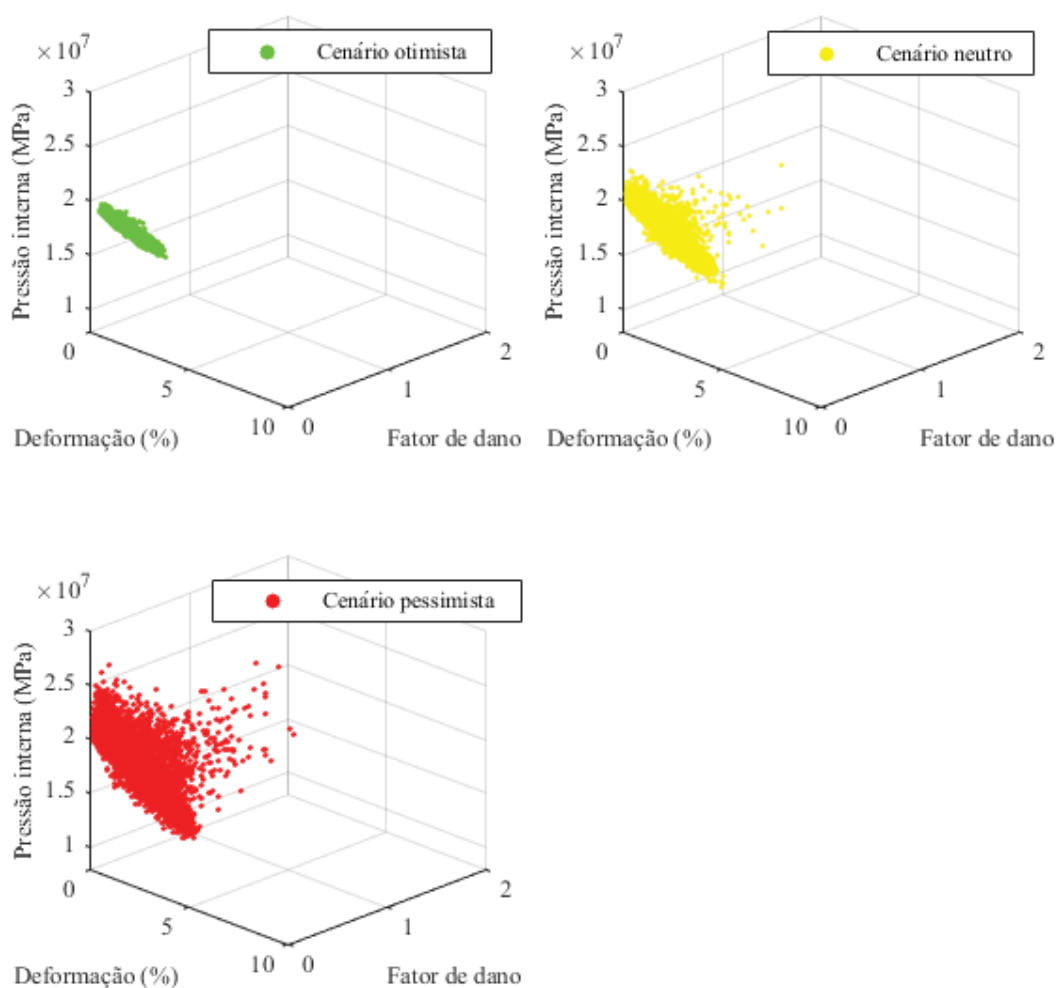
tendência claramente diagonal, este comportamento ocorre quando há dependência entre duas variáveis.

FIGURA 61 – HISTOGRAMA BIVARIADO COM MAPA DE INTENSIDADE RELACIONANDO O FATOR DE DANO E A PRESSÃO INTERNA.



Por fim, a FIGURA 62 apresenta a dispersão dos valores de saída do modelo, para os três cenários, em relação à pressão interna. Assim como o valor do fator de dano, a deformação também diminui conforme o valor da pressão interna aumenta. É possível observar ainda que, mesmo para o cenário pessimista, o valor de deformação não se aproxima do valor limite.

FIGURA 62 – DIAGRAMA DE DISPERSÃO TRIDIMENSIONAL RELACIONANDO À PRESSÃO INTERNA DA CAVERNA, A DEFORMAÇÃO NO PONTO C E A O FATOR DE DANO NO PONTO C



7.4 CONCLUSÕES

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma análise probabilística da estabilidade e do desempenho da caverna simulada considerando um período de 50 anos e valor de pressão interna constante. Conforme apresentado no capítulo anterior, o modelo simulado é bastante sensível ao valor da pressão interna e neste capítulo, buscou-se relacionar seu valor ao valor do fator de dano, uma vez que as falhas sempre ocorreram por dano.

Ressalta-se que a caverna simulada tem uma profundidade pequena (em torno de 900 metros) comparada a outras cavidades apresentadas na literatura. Isso faz com que a tensão desviadora não atinja o valor mínimo para ativação do mecanismo DGL ($\sigma_0=20,57$ MPa). Isto justifica os pequenos valores de deformação.

8 CONCLUSÕES

Neste trabalho, o Modelo de Múltiplos Mecanismos de Deformação e o critério de dilatação de Ratigan foram acoplados para a simular o comportamento de uma caverna salina considerando parâmetros calibrados para a halita brasileira. Esta junção possibilita a análise das fluência primária e secundária, por meio do modelo MMD, e a detecção do início da fase terciária através do emprego do critério de dano. A partir do modelo implementado, foi possível atingir os objetivos específicos deste trabalho. Os itens abaixo concluem este trabalho a partir dos objetivos definidos no *CAPÍTULO 1*.

- *Objetivo específico 1:* Verificar, por meio de análises determinísticas, a relação entre a variação da pressão interna e o comportamento geomecânico de cavernas salinas;
 - Inicialmente, cabe ressaltar que a confiabilidade de qualquer modelo probabilístico está relacionado à precisão do modelo determinístico, a qual está relacionada com a utilização de um modelo constitutivo e parâmetros adequados, definição correta das condições de contorno e um refino adequado da malha.
 - A partir das análises determinísticas observou-se que é necessário manter uma pressão interna da caverna com um valor de pelo menos 70% do valor da tensão vertical no teto da caverna, com vistas a assegurar uma condição de estabilidade.
- *Objetivo específico 2:* Elaborar uma interface de programação de aplicação (API) que permita que o *software* de elementos finitos utilize o modelo constitutivo implementado em linguagem FORTRAN e que obtenha os *outputs* requeridos para todos os conjuntos de dados utilizados para desenvolver o metamodelo de forma automatizada;
 - A FIGURA 48 mostra os principais arquivos utilizados na automatização das simulações numéricas utilizadas para treinar o metamodelo. A concepção desta interface foi bastante complexa, pois envolve arquivos do Abaqus, arquivos de linguagem Python, arquivos de linguagem FORTRAN e códigos do MATLAB. A complexidade também está relacionada à necessidade de modificar parâmetros de entrada alocados no Abaqus (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e pressão interna da caverna) e na subrotina FORTRAN (A_2 e k_0). No entanto, esta interface é capaz de gerar pontos amostrais bem distribuídos no espaço de projeto a partir do emprego da técnica de amostragem do Hipercubo Latino Otimizado, o que

gera uma significativa redução no número de simulações necessárias para treinamento do metamodelo.

- Esta automação permite que o profissional que está coordenando as análises defina apenas o número de simulações desejadas. Com isso, o algoritmo da técnica amostral irá definir um conjunto de parâmetros de entrada otimizado e a automação irá alterar todos os arquivos necessários e executar sequencialmente as simulações e armazenar os *outputs* definidos para análise. Realizar a alteração dos arquivos, o *start* das simulações, a exclusão dos arquivos gerados pelo Abaqus e não utilizados e o arquivamento das informações de interesse de forma automática diminuem o tempo de trabalho.
 - Estruturas como essas são uma tendência em análises de engenharia, pois otimizam o trabalho do profissional.
 - É interessante mencionar que, com uma estrutura como esta montada, é possível alterar facilmente a técnica amostral e também desenvolver outros metamodelos.
- *Objetivo específico 3:* Desenvolver um metamodelo que seja capaz de substituir o modelo de elementos finitos nas análises probabilísticas afim de reduzir o custo computacional para realizar tais análises;
 - Conforme foi apresentado anteriormente, mesmo com 7 parâmetros de entrada e 2 *outputs*, o metamodelo foi capaz de substituir o modelo de elementos finitos. Foram consideradas duas medidas de erro, o R^2 e a raiz quadrada do erro normalizado (NRMSD), obtendo-se um valor de R^2 de 0,9972 e um valor de NRMSD de 0,0547, os quais atestam a precisão do metamodelo.
 - Acerca do custo computacional, o metamodelo permite realizar 10000 simulações, em 2 horas e 37 minutos. Estima-se que o modelo de elementos finitos, utilizando o mesmo computador, levaria cerca de 30 dias para realizar tais simulações.
 - *Objetivo específico 4:* Avaliar a sensibilidade do modelo aos parâmetros analisados, em relação à deformação da rocha salina e ao valor do fator de dano, possibilitando ranquear as influências dos parâmetros;
 - Conforme apresentado no *CAPÍTULO 6*, foi implementado o modelo de análise de sensibilidade global Sobol'/Saltelli, que permitiu esta análise. Devido à grande sensibilidade do modelo à pressão interna, alguns parâmetros apresentaram pouca sensibilidade. Isso possibilita uma redução das variáveis aleatórias em futuras

análises, caso se analise os mesmos parâmetros e as mesmas faixas de variações dos parâmetros.

- Ao invés de utilizar o modelo de elementos finitos, utilizou-se o metamodelo para realizar a análise de sensibilidade. Esse método também pode ser utilizado em outras obras geotécnicas, como por exemplo, em túneis, estruturas de contenção e barragens.
- *Objetivo específico 5:* Realizar uma análise probabilística para as cavernas em estudo aplicando o método de Monte Carlo e utilizando o metamodelo de desenvolvido;
 - Há algumas décadas existe um esforço, por parte da comunidade geotécnica, em adotar abordagens probabilísticas em projetos. Esta é uma forma de apresentar o risco de determinado empreendimento aos investidores, à comunidade e até mesmo aos órgãos governamentais. No entanto, devido ao custo computacional de alguns modelos, nem sempre é possível adotar abordagens probabilísticas. Neste sentido a aplicação de metamodelos é uma alternativa bastante interessante.
 - O problema em análise nesta tese é composto por um modelo não linear, com dois materiais e com análise de um longo período (50 anos). Este é um exemplo de modelo que não possibilitaria uma análise probabilística se um metamodelo não fosse utilizado.

Certamente, a contribuição deste trabalho está no incentivo à utilização de metamodelos, sejam eles baseados em regressões polinomiais, método dos mínimos quadrados, inteligência artificial ou similares ao empregado neste trabalho. Projetos de geotecnia caracteristicamente são complexos e podem se beneficiar de técnicas de metamodelagem.

O item a seguir apresenta algumas sugestões para futuros trabalhos e cavernas salinas.

8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas questões não fazem parte do escopo deste trabalho, mas, certamente, são relevantes para o estudo do comportamento de cavernas salinas. Estas questões foram identificadas ao longo do trabalho e são deixadas como sugestão para futuros trabalhos na área. Os itens abaixo apontam estas sugestões:

- Neste trabalho utilizou-se o modelo de Mohr-Coulomb para representar as rochas do *overburden*. No entanto sabe-se que este não é o modelo mais adequado para representar um maciço rochoso devido à possibilidade de existência de descontinuidades. Assim, sugere-se que estudos futuros considerem modelos constitutivos mais adequados.
- Este trabalho limitou-se a analisar o comportamento da caverna, sem interpretar a influência do comportamento da caverna na ocorrência de subsidências. Diante disto, indica-se estudar este efeito. Ressalta-se que, para uma simulação adequada, os materiais do *overburden* devem ser caracterizados e, conforme citado no item anterior, um modelo constitutivo apropriado deve ser utilizado.
- A estrutura geológica também é relevante no estudo do comportamento de cavernas salinas. Desse modo, sugere-se abordar a influência de falhas geológicas nas instabilidades em cavernas salinas.

REFERÊNCIAS

ABNT. **ISO 31000 - Gestão de riscos - Diretrizes**. Rio de Janeiro, 2018.

ARNDT, S. Forecasting Seismicity, Stability and Stress in Underground Mining. Simulia Community Conference. **Anais...** . p.1–14, 2013.

ASSIS, A. P. **A method for evaluating the transient creep of potash**, 1990. Tese (Doutorado). Universidade de Alberta.

ASSIS, A. P. **Métodos estatísticos e probabilísticos em geotecnia**. 2002. Notas de aula (apostila). Brasília: Universidade de Brasília.

ASTM. D7070-16 - Standard Test Methods for Creep of Rock Core Under Constant Stress and Temperature. , 2016. West Conshohocken. Disponível em: <www.astm.org>. .

ASTM. E3159 – 18 General Reliability. , 2018. West Conshohocken.

AUTIN, W. J. Landscape evolution of the Five Islands of south Louisiana: scientific policy and salt dome utilization and management. **Geomorphology**, v. 47, n. 2, p. 227–244, 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X02000867>>. .

BAECHER, G. B.; CHRISTIAN, J. T. **Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering**. West Sussex: John Wiley & Sons Inc., 2003.

BAILEY, R. W. The Utilization of Creep Test Data in Engineering Design. , p. 209–284, 1935. Institution of Mechanical Engineers. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=NQfvSgAACAAJ>>. .

BAUER, S. J.; EHGARTNER, B. L.; NEAL, J. T. Geotechnical studies associated with decommissioning the strategic petroleum reserve facility at Weeks Island, Louisiana: A case history. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 34, n. 3, p. 25.e1-25.e15, 1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160997001020>>. .

BÉREST, P.; BERGUES, J.; BROUARD, B.; DURUP, J. G.; GUERBER, B. A salt cavern abandonment test. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 38, n. 3, p. 357–368, 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160901000041>>. .

BÉREST, P.; BROUARD, B.; KARIMI-JAFARI, M.; RÉVEILLÈRE, A. Maximum admissible pressure in salt caverns used for brine production and hydrocarbon storage. **Oil and Gas Science and Technology**, v. 75, n. 6, p. 1–15, 2020a.

BRASKEN. A Braskem em Alagoas. Disponível em: <<https://www.braskem.com.br/linha-do-tempo-alagoas>>. Acesso em: 14/5/2020.

BRUNO, M. S.; DUSSEAU, M. B. Geomechanical Analysis of Pressure Limits for Thin Bedded Salt Caverns by. Spring 2002 Meeting. **Anais...** . p.25, 2002. Alberta: Solution

Mining Research Institute.

BUHMANN, M. D. **Radial Basis Functions**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

BULJAK, V. Proper orthogonal decomposition and radial basis functions algorithm for diagnostic procedure based on inverse analysis. **FME Transactions**, v. 38, n. 3, p. 129–136, 2010.

BULJAK, V. **Inverse Analyses with Model Reduction: Proper Orthogonal Decomposition in Structural Mechanics**. London: Springer 2012.

CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; SALTELLI, A. An effective screening design for sensitivity analysis of large models. **Environmental Modelling and Software**, v. 22, n. 10, p. 1509–1518, 2007.

CAMPOS NETO, O. P. DE A.; LIMA, W. S.; CRUZ, F. E. G. Bacia de Sergipe-Alagoas. **Boletim de Geociencias - Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 405–415, 2007. Rio de Janeiro.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2º ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

CONTRUCCI, I.; KLEIN, E.; CAO, N.; et al. Multiparameter monitoring of a solution mining cavern collapse : First insight of precursors. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 343, n. January, p. 1–10, 2011. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071310002713>>. .

COOPER, A. H. Halite karst geohazards (natural and man-made) in the United Kingdom. **Environmental Geology**, v. 42, n. 5, p. 505–512, 2002. Disponível em:
<<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0036705365&doi=10.1007%2Fs00254-001-0512-9&partnerID=40&md5=4c67b979331dbf740c0b9c242b6b3a42>>. .

CORNELL, C. A. A Probability-Based Structural Code. **ACI Journal Proceedings**, v. 66, n. 12, 1969.

COSTA, A. M. Hybrid Subsea CCS System-CO₂ Storage in Offshore Ultra Deep-Water Salt Caverns. **Current Trends in Civil & Structural Engineering**, v. 1, n. 3, p. 1–22, 2019.

COSTA, A. M.; AMARAL, C. S.; POIATE, E.; et al. Underground storage of natural gas and CO₂ in salt caverns in deep and ultra-deep water offshore Brazil. **Harmonising Rock Engineering and the Environment - Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics**, p. 1659–1664, 2012.

COSTA, A. M.; AMARAL, C. S.; POIATE JR., E. Hydrocarbon production and storage using offshore underground salt caverns. In: Roberts; Mellegard; Hansen (Orgs.); **Mechanical Behaviour of Salt VIII**. p.211–220, 2015. CRC Press. Disponível em:
<<https://www.taylorfrancis.com/books/9781315678856/chapters/10.1201/b18393-28>>. .

COSTA, A. M. DA. **Uma aplicação de métodos computacionais e princípios de mecânica das rochas no projeto e análises de escavações destinadas à mineração**. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1984.

COSTA, A. M.; POIATE, E. J.; FALCÃO, J. L.; COELHO, L. F. M. Triaxial creep tests in

salt applied in drilling through thick salt layers in campos Basin-Brazil. **SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings**, p. 1009–1017, 2005.

COSTA, P. V. M. **Uso estratégico de espaço subterrâneo para estocagem de gás em cavernas abertas por dissolução de rocha salina**. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

COSTA, P. V. M. **Potencial de Estocagem Subterrânea de Gás Natural em Cavernas de Sal Abertas por Dissolução em Domo Salino Offshore no Brasil**, 2018. UFRJ/COPPE. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/doutorado/PVassalo.pdf>>. .

COSTA, P. V. M.; COSTA, A. M.; SZKLO, A.; et al. UGS in giant offshore salt caverns to substitute the actual Brazilian NG storage in LNG vessels. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 46, p. 451–476, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.06.035>>. .

COSTA, P. V. M.; ROEHL, D.; COSTA, A. M.; AMARAL, C. D. S.; POIATE, E. Underground salt caverns opened by solution mining for brine production and storage of natural gas. **ISRM Conference on Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure, SBMR 2014**, 2014.

CPRM. **Relatório síntese dos resultados Nº 1**. Relatório técnico. Brasília, 2019a.

CPRM. **J. Geofísica – Gravimetria**. Relatório técnico. Brasília, 2019b.

CRISTESCU, N. D. **A General Constitutive Equation for Transient and Stationary Creep of Rock Salt**. , v. 30, n. 2, p. 125–140, 1993.

CROTOGINO, F.; KEPPLINGER, J. **Cavern Well Abandonment Techniques Guidelines Manual**. n. 2006-3- SMRI, 2006.

CUNHA, D. A. DA; MESQUITA, C. A. A. S. **Descrição matemática da decomposição própria ortogonal** (proper orthogonal decomposition). , , n. Xl, p. 2–3, 2021.

CURI, A. **Lavra de minas**. São Paulo: Oficina de Textos. 2017.

DANA, J. D.; DANA, E. C. **Dana's new mineralogy**. 8 ed. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience .USA, 1997.

DEVRIES, K. L.; CALLAHAN, G. D.; MELLEGARD, K. D. **Numerical Simulations of Natural Gas Storage Caverns in Bedded Salt**. Symposium on Rock Mechanics (USRMS). **Anais...** , 2005. Anchorage.

DEVRIES, K. L.; MELLEGARD, K. D.; CALLAHAN, G. D.; GOODMAN, W. M. **CAVERN ROOF STABILITY FOR NATURAL GAS STORAGE IN BEDDED SALT**. Rapid City, 2005.

DUSSEAULT, M. B. Saltrock Behavior As an Analogue to the Behavior of Rock At Great Depth. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. **Anais...** . p.7, 1989. Pau.

DUSSEAULT, M. B.; ROTHENBURG, L.; MRAZ, D. Z. The Design of Openings in Salt

Rock Using a Multiple Mechanism Viscoplastic Law. US symposium on rock mechanics. **Anais...** . p.633–642, 1987. Tucson.

DUVALL, W. I. **Stress Analysis Applied to Underground Mining Problems, Part 2: Stress Analysis Applied to Multiple Openings and Pillars**. Washington, 1948.

EGE, J. R. **Surface Subsidence and Collapse in Relation to Extraction of Salt and Other Soluble Evaporites**. 1979.

FENTON, G. A.; GRIFFITH, D. V. **Risk Assessment in Geotechnical Engineering**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008.

FIRME, P. A. L. P. **Modelagem Constitutiva e Análise Probabilística Aplicadas a Poços em Zonas de Sal**. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013

FIRME, P. A. L. P.; BRANDAO, N. B.; ROEHL, D.; ROMANEL, C. Enhanced double-mechanism creep laws for salt rocks. **Acta Geotechnica**, v. 13, n. 6, p. 1329–1340, 2018. Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11440-018-0689-7>>. .

FIRME, P. A. L. P.; ROEHL, D.; ROMANE, C.; ROMANEL, C. Salt caverns history and geomechanics towards future natural gas strategic storage in Brazil. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 72, n. July, p. 103006, 2019. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.103006>>. .

FIRME, P. A. L. P.; ROEHL, D.; ROMANEL, C. An assessment of the creep behaviour of Brazilian salt rocks using the multi-mechanism deformation model. **Acta Geotechnica**, v. 11, n. 6, p. 1445–1463, 2016. Springer Berlin Heidelberg.

FIRME, P.; ROEHL, D.; ROMANEL, C. Salt caverns history and geomechanics towards future natural gas strategic storage in Brazil. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 72, n. July, p. 103006, 2019. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.103006>>. .

FLORENCIO, C. P. **Geologia dos evaporitos Paripueira na sub-bacia de Maceió, Alagoas, região Nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. 2001.

FOKKER, P. A. **The behaviour of salt and salt caverns**, 1995. Technische Universiteit Delft op. Disponível em: <<http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:6847f8e4-3b09-4787-be02-bcce9f0eed06>>. .

FORRESTER, A.; SOBESTER, A.; KEANE, A. **Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide**. London: Wiley. 2008.

FOSSUM, A. F.; FREDRICH, J. T. Probabilistic analysis of borehole closure for through-salt well design. **Acta Geotechnica**, v. 2, n. 1, p. 41–51, 2007.

FOSSUM, A. F.; MUNSON, D. E. Probabilistic creep analysis of underground structures in salt. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 122, n. 3, p. 209–216, 1996.

FOSSUM, A. F.; PFEIFLE, T. W.; MELLEGARD, K. D.; MUNSON, D. E. **Probability distributions for parameters of the Munson-Dawson Salt Creep Model**. Albuquerque,

1994.

FREDRICH, J. T.; COBLENTZ, D.; FOSSUM, A. F.; THORNE, B. J.; LABORATORIES, S. N. Stress Perturbations Adjacent to Salt Bodies in the Deepwater Gulf of Mexico SPE 84554 Stress Perturbations Adjacent to Salt Bodies in the Deepwater Gulf of Mexico. , , n. October, 2003.

GEE, D.; SOWTER, A.; GREBBY, S.; et al. National geohazards mapping in Europe: Interferometric analysis of the Netherlands. **Engineering Geology**, v. 256, p. 1–22, 2019. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795218319732>>. .

GHASEMLOONIA, A.; BUTT, S. D. Feasibility study of underground salt caverns in Western Newfoundland: experimental and finite element investigation of creep-induced damage. **Journal of Mining & Environment**, v. 6, n. 2, p. 205–224, 2015. Disponível em: <http://jme.shahroodut.ac.ir/article_456_4f86a818f1d24e48a5337b5a95f6f37b.pdf>. .

GONÇALVES, G. DE G. **Estudo paramétrico da influência da temperatura na análise termomecânica durante a escavação em rochas salinas**, 2011. Universidade Federal de Alagoas.

GOODMAN, R. E. **Introduction to Rock Mechanics**. Second ed. Berkeley: Wiley, 1989.

HACIOSMANOĞLU, M. E. **Development of a subsidence model for çayirhan coal mine a**. Dissertação (Mestrado). Graduate School of Natural and Applied Sciences. 2004.

HANSEN, F. D. Micromechanics of Isochoric Salt Deformation. 48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. **Anais...**, 2014. American Rock Mechanics Association.

HEUSERMANN, S. Nonlinear finite-element analysis of solution mined storage caverns in rock salt using the LUBBY2 constitutive model. **Computers and Structures**, v. 81, p. 629–638, 2003.

HUDEC, M. R.; JACKSON, M. P. A. Terra infirma : Understanding salt tectonics. **Earth-Science Reviews**, v. 82, p. 1–28, 2007.

HUNSCHE, U. E. Failure behaviour of rock salt around underground cavities. Proceedings of the 7th Symposium on Salt. **Anais...** . v. 1, p.59–65, 1993.

INÁCIO, L.; ANTONIO, L.; ELIAS, R. **Rochas e minerais industriais: usos e especificações**. 2º ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

ISO 2394. **ISO 2394 - General principles on reliability for structures**. 2015.

JCSS. Part 1 - BASIS OF DESIGN. **PROBABILISTIC MODEL CODE**. p.65, 2000. Joint Committee on Structural Safety.

JCSS. SOIL PROPERTIES. **Probabilistic Model Code**. p.27, 2006.

JEREMIC, M. L. **Rock Mechanics In Salt Mining**. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers., 1994.

KALIA, A. C.; FREI, M.; LEGE, T. A Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 234–249, 2017. Elsevier Inc. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.015>>. .

KHALEDI, K.; MAHMOUDI, E.; DATCHEVA, M.; SCHANZ, T. Stability and serviceability of underground energy storage caverns in rock salt subjected to mechanical cyclic loading. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 86, n. July, p. 115–131, 2016. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.04.010>>. .

KHALEDI, K.; MIRO, S.; KÖNIG, M.; SCHANZ, T. Robust and reliable metamodells for mechanized tunnel simulations. **Computers and Geotechnics**, v. 61, p. 1–12, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.04.005>>. .

KIM, J.-W.; LU, Z. Association between localized geohazards in West Texas and human activities, recognized by Sentinel-1A/B satellite radar imagery. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 2018. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85044309923&doi=10.1038%2Fs41598-018-23143-6&partnerID=40&md5=2135889399b3cf11d7c84f068191b505>>. .

KIM, J.-W.; LU, Z.; KAUFMANN, J. Remote Sensing of Environment Evolution of sinkholes over Wink , Texas , observed by high-resolution optical and SAR imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 222, n. April 2018, p. 119–132, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.028>>. .

KROON, I. C.; ORLIC, B.; SCHEFFERS, B. **Abandonment of solution mined salt caverns in the Netherlands**. Utrecht, 2003.

LACASSE, S.; NADIM, F.; LIU, Z. Q.; EIDSVIG, U. K.; LIN, C. G. Risk assessment and dams – Recent developments and applications. Proceedings of the XVII ECSMGE-2019. **Anais...** . p.26, 2019. Reykjavik.

LAND, L. Geophysical records of anthropogenic sinkhole formation in the Delaware Basin region, Southeast New Mexico and West Texas, USA. **Carbonates and Evaporites**, v. 28, n. 1–2, p. 183–190, 2013. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84876411413&doi=10.1007%2Fs13146-013-0126-9&partnerID=40&md5=c646e3b4d636a40bf658471b14ae8ce8>>. .

LAUTENSCHLÄGER, C. E. R. **Efeitos do Desenvolvimento de Reservatórios Sobre a Integridade de Poços de Petróleo: Uma Análise Parcialmente Acoplada e Multi-Escala**. Tese(Doutorado). PUC-Rio. 2014.

LI, W.; HAN, Y.; WANG, T.; MA, J. Journal of Natural Gas Science and Engineering DEM micromechanical modeling and laboratory experiment on creep behavior of salt rock. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 46, p. 38–46, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.07.013>>. .

LOMENICK, T. F.; BRADSHAW, R. L. Deformation of Rock Salt in Openings Mined for the Disposal of Radioactive Wastes * By. , v. 30, p. 5–29, 1969.

MAHMOUDI, E.; KHALEDI, K.; MIRO, S.; KÖNIG, D.; SCHANZ, T. Probabilistic Analysis of a Rock Salt Cavern with Application to Energy Storage Systems. **Rock**

Mechanics and Rock Engineering, v. 50, n. 1, p. 139–157, 2017. Springer Vienna.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1997.

MANCINI, F.; STECCHI, F.; GABBIANELLI, G. GIS-based assessment of risk due to salt mining activities at Tuzla (Bosnia and Herzegovina). **Engineering Geology**, v. 109, n. 3–4, p. 170–182, 2009. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.06.018>>. .

MANCINI, F.; STECCHI, F.; ZANNI, M.; GABBIANELLI, G. Monitoring ground subsidence induced by salt mining in the city of Tuzla (Bosnia and Herzegovina). **Environmental Geology**, v. 58, n. 2, p. 381–389, 2009. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-70349849785&doi=10.1007%2Fs00254-008-1597-1&partnerID=40&md5=a4272c8ca9f5eb2ac5aaec58c04abd51>>. .

MANSOURI, H.; AJALLOEIAN, R. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Mechanical behavior of salt rock under uniaxial compression and creep tests. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 110, n. August, p. 19–27, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.07.006>>. .

MENEZES, S. DE O. **Rochas: Manual fácil de estudo e classificação**. 1º ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

MICHAILIDI, E. M.; BACCHI, B.; BRANZE, V. Dealing with uncertainty in the probability of overtopping of a flood mitigation dam. , , n. 2013, p. 2497–2507, 2017.

MOGHADAM, S. N.; MIRZABOZORG, H.; NOORZAD, A. Modeling time-dependent behavior of gas caverns in rock salt considering creep, dilatancy and failure. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 33, p. 171–185, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779812001605>>. .

MOGHADAM, S. N.; NAZOKKAR, K.; CHALATURNYK, R. J.; MIRZABOZORG, H. Parametric assessment of salt cavern performance using a creep model describing dilatancy and failure. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 79, p. 250–267, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160915300265>>. .

MORALES, M. S. T. **Análise de confiabilidade de taludes em condições saturadas- não saturadas via análise limite no espaço cônico quadrático**, 2013. PUC-Rio.

MORRIS, M. D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. **Technometrics**, v. 33, n. 2, p. 161–174, 1991.

MUNSON, D. E. **Preliminary deformation-mechanism map for salt (with application to WIPP)**. Albuquerque, 1979.

MUNSON, D. E. **Correlation of Creep Behavior of Domal Salts**. Relatório técnico NM 87185. Sandia National Laboratories, Albuquerque, United States, 1991.

MUNSON, D. E. Constitutive model of creep in rock salt applied to underground room closure. **International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts**, v. 34, n. 2, p. 233–247, 1997.

MUNSON, D. E. **Analysis of multistage and other creep data for domal salts**. Albuquerque, 1998.

MUNSON, D. E.; DAWSON, P. R. **Constitutive Model for the Low Temperature Creep of Salt (With Application to WIPP)**. Albuquerque: Sandia National Laboratories., 1979.

NEAL, J. T. Prediction of Subsidence Resulting from Creep Closure of Solutioned-Mined Caverns in Salt Domes. , , n. 200, 1991.

NEVES, B.; SÁ, B. B. DE; JAZIEL, M. DE; NILSON, A. A.; BOTELHO, N. F. A tafrogenese estateriana nos blocos paleoproterozóicos da América do Sul e processos subsequentes. **Geonomos**, v. 3, n. 2, p. 1–21, 1995.

NORTON, F. H. **The creep of steel at high temperatures**. McGraw-Hil ed. New York, 1929.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 2015.

PAPANICOLAOU, G. C.; ZAOOTSOS, S. P. Maxwell Model Viscoelastic constitutive modeling of creep and stress relaxation in polymers and polymer matrix composites. **Creep and Fatigue in Polymer Matrix Compos- ites (Second Edition)**. p.29, 2019.

PEREZ, J. White salt dome schematic illustration. Disponível em: <<https://www.geoart.com/schematic-industries/salt-dome/>>. Acesso em: 12/8/2019.

PERSKI, Z.; HANSSEN, R.; WOJCIK, A.; WOJCIECHOWSKI, T. InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland. **Engineering Geology**, v. 106, n. 1, p. 58–67, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795209000519>>. .

PHOON, K.-K. **Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering**. London: Taylor and Francis. 2008.

PIPIA, L.; FABREGAS, X.; AGUASCA, A.; et al. Polarimetric differential SAR interferometry: First results with ground-based measurements. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 6, n. 1, p. 167–171, 2009. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-58149496077&doi=10.1109%2FLGRS.2008.2009007&partnerID=40&md5=5877d53ce4d3c5638f86a92bbd640593>>. .

PIPIA, L.; FABREGAS, X.; AGUASCA, A.; LOPEZ-MARTINEZ, C. Polarimetric temporal analysis of urban environments with a ground-based SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 51, n. 4, p. 2343–2360, 2013. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84875732245&doi=10.1109%2FTGRS.2012.2211369&partnerID=40&md5=5c3ea433878c70ac81bf8ddc63702784>>. .

POIATE, E.; COSTA, A. M.; FALCAO, J. L. Well design for drilling through thick evaporite layers in Santos Basin - Brazil. **SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings**, , n. October 2017, p. 1081–1096, 2006.

POIATE JUNIOR, E. **Mecânica das rochas e mecânica computacional para projeto de poços de petróleo em zonas de sal**. Tese (Doutorado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2012.

POPP, T.; KERN, H.; SCHULZE, O. Evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 106, n. B3, p. 4061–4078, 2001. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0034957986&partnerID=40&md5=7e118081f19f3e6cd2271e4951cb7dd1>>. .

QIAN, G.; MAHDI, A. Sensitivity analysis methods in the biomedical sciences. **Mathematical Biosciences**, v. 323, 2020.

QUANG, V. C.; GOURDIER, S.; BAZARGAN-SABET, B. A Robust Model Coupling Subsidence with Salt Dissolution. **Mine Water and the Environment**, v. 38, n. 1, p. 166–177, 2018. Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85049573791&doi=10.1007%2Fs10230-018-0552-y&partnerID=40&md5=45d70431d3311fa7fe5f2cf758edad26>>. .

QUANG, V. C.; GOURDIER, S.; BAZARGAN-SABET, B.; et al. A Robust Model Coupling Subsidence with Salt Dissolution. **Mine Water and the Environment**, v. 38, n. 1, p. 166–177, 2019. Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85049573791&doi=10.1007%2Fs10230-018-0552-y&partnerID=40&md5=45d70431d3311fa7fe5f2cf758edad26>>. .

QUEVEDO, R.; FIRME, P.; ROEHL, D. Integration schemes with substepping algorithms for creep analysis in geomaterials. **Int J Numer Anal Methods Geomech.**, , n. January, p. 1467–1487, 2019.

RALSTON, R. H.; WOOD, F. O.; HILLS, J. M. Salt. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/salt>>. Acesso em: 2/4/2020.

RASMUSSEN, L. L. **MODELOS LATTICE NA ENGENHARIA DE ROCHAS**. Tese (doutorado). Universidade de Brasília. 2018.

RATIGAN, J. L.; SAMBEEK, L. L.; DEVRIES, K. L.; NIELAND, J. D. **The Influence of Seal Design on the Development of the Disturbed Rock Zone in the WIPP Alcove Seal Tests**. Albuquerque, 1991.

RAUCOULES, D.; MAISONS, C.; CARNEC, C.; et al. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France): Comparison with ground-based measurement. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, n. 4, p. 468–478, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425703002566>>. .

REEDLUNN, B. Joint Project III on the Comparison of Constitutive Models for the Mechanical Behavior of Rock Salt : Reinvestigation into Isothermal Room Closure

Predictions at the Waste Isolation Pilot Plant. *Salts Mech X. Anais...* . p.1–11, 2018.

ROUABHI, A.; LABAUNE, P.; TIJANI, M.; GATELIER, N.; HÉVIN, G. Phenomenological behavior of rock salt : On the influence of laboratory conditions on the dilatancy onset. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 11, n. 4, p. 723–738, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.12.011>>. .

RUIZ, YI. J. P. **Estudo Bidimensional de Cavernas em Rochas Salinas Para Armazenamento de Gás**. Dissertação (mestrado). Universidade de Brasília. 2015.

SALTELLI, A. Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. *Computer Physics Communications*, v. 145, n. 2, p. 280–297, 2002.

SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; et al. **Global Sensitivity Analysis. The Primer**. Hoboken: Wiley. 2007.

VAN SAMBEEK, L. L.; RATIGAN, J. L.; HANSEN, F. D. Dilatancy of rock salt in laboratory tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, v. 30, n. 7, p. 735–738, 1993.

SÁNCHEZ, L. E.; SILVA-SÁNCHEZ, S. S.; NERI, A. C. **Guia para planejamento do fechamento de mina**. 2013.

SHAHMORAD, Z.; SALARIRAD, H.; MOLLADAVOUDI, H. A study on the effect of utilizing different constitutive models in the stability analysis of an underground gas storage within a salt structure. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 33, p. 808–820, 2016. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.011>>. .

SHALLER, H. Revisão estratigráfica da bacia Sergipe/Alagoas. **Boletim técnico da Petrobrás**, v. 12, n. 1, p. 21–86, 1969. Rio de Janeiro.

SINGH, A.; KUMAR, C.; KANNAN, L. G.; RAO, K. S.; AYOTHIRAMAN, R. Engineering properties of rock salt and simplified closed-form deformation solution for circular opening in rock salt under the true triaxial stress state. *Engineering Geology*, v. 243, n. June, p. 218–230, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.008>>. .

SOBOL', I. M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. **Matematicheskoe Modelirovanie**, v. 2, p. 112–118, 1990.

VAN DER SPEK, A. J. F. The development of the tidal basins in the Dutch Wadden Sea until 2100: The impact of accelerated sea-level rise and subsidence on their sediment budget-a synthesis. *Geologie en Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences*, v. 97, n. 3, p. 71–78, 2018.

SPIERS, C. J.; PEACH, C. J.; BRZESOWSKY, R. H.; et al. **Long-term rheological and transport properties of dry and wet salt rocks**. Commission of the European Communities (CEC), 1988.

STECCHI, F.; ANTONELLINI, M.; GABBIANELLI, G. Curvature analysis as a tool for subsidence-related risk zones identification in the city of Tuzla (BiH). *Geomorphology*, v. 107, n. 3–4, p. 316–325, 2009a. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.12.013>>. .

STECCHI, F.; ANTONELLINI, M.; GABBIANELLI, G. Curvature analysis as a tool for subsidence-related risk zones identification in the city of Tuzla (BiH). **Geomorphology**, v. 107, n. 3, p. 316–325, 2009b. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X08005564>>. .

THORAVAL, A.; LAHAIE, F.; BROUARD, B.; BEREST, P. A generic model for predicting long-term behavior of storage salt caverns after their abandonment as an aid to risk assessment. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 77, p. 44–59, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.10.014>>. .

THORAVAL, A.; LAHAIE, F.; BROUARD, B.; BEREST, P. A generic model for predicting long-term behavior of storage salt caverns after their abandonment as an aid to risk assessment. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 77, p. 44–59, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160915000866>>. .

TRUSHEIM, F. Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands. **Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft**, v. 109, p. 111–158, 1957. Stuttgart, Germany: Schweizerbart Science Publishers. Disponível em: <http://www.schweizerbart.de/papers/zdgg_alt/detail/109/50402/Uber_Halokinese_und_ihre_Bedeutung_fur_die_strukturelle_Entwicklung_Norddeutschlands>. .

USACE. Risk-based analysis in geotechnical engineering for support of planning studies. , 1999. U.S. Army Corps of Engineers Document.

VALENTINO, B. R. **APPLICATION OF INSAR TO SALT MINE SUBSIDENCE**, 2016. Cornell University.

WANG, G.; ZHANG, L.; ZHANG, Y.; DING, G. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Experimental investigations of the creep – damage – rupture behaviour of rock salt. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 66, p. 181–187, 2014. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.12.013>>. .

WANG, T. T.; MA, H. L.; SHI, X. L.; et al. Salt cavern gas storage in an ultra-deep formation in Hubei, China. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 102, n. December 2017, p. 57–70, 2018.

XIA, K.; CHEN, C.; ZHENG, Y.; et al. Engineering geology and ground collapse mechanism in the Chengchao Iron-ore Mine in China. **Engineering Geology**, v. 249, p. 129–147, 2019. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001379521831500X>>. .

XIE, J.; TAO, G. Modeling and Analysis of Salt Creep Deformations in Drilling Applications. **SIMULIA Community Conference**, , n. May 2013, p. 12, 2013. Disponível em: <www.3ds.com/simulia>. .

YERRO, A.; COROMINAS, J.; MONELLS, D.; MALLORQUÍ, J. J. Analysis of the evolution of ground movements in a low densely urban area by means of DInSAR technique. **Engineering Geology**, v. 170, p. 52–65, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795213003499>>. .

ZHANG, N.; MA, L.; WANG, M.; et al. Comprehensive risk evaluation of underground energy storage caverns in bedded rock salt. **Journal of Loss Prevention in the Process**

Industries, v. 45, p. 264–276, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423016303102>>. .

ZIJL, W.; HENDRIKS, M.; HART, M. A velocity-based approach to visco-elastic flow of rock. **Mathematical Geology**, v. 37, n. 2, p. 141–162, 2005. Disponível em:
<<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-18344395516&doi=10.1007%2Fs11004-005-1306-5&partnerID=40&md5=94422a105157bed1b011af83d5580353>>. .

ZUQUETTE, L. V. **Riscos, desastres e eventos naturais perigosos**. 1º ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.