

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise do Comportamento de Rochas Evaporíticas  
do Pré-Sal Utilizando o Método de Elementos Finitos**

Alexandre Guimarães Soares

Prof. Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

**Rio de Janeiro  
Novembro de 2016**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

# **Análise do Comportamento de Rochas Evaporíticas do Pré-Sal Utilizando o Método de Elementos Finitos**

Alexandre Guimarães Soares

Projeto final apresentado em cumprimento às  
normas do Departamento de Educação Superior  
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

**Rio de Janeiro  
Novembro de 2016**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S676 Soares, Alexandre Guimarães  
Análise do comportamento de rochas evaporíticas do pré-sal  
utilizando o método de elementos finitos / Alexandre Guimarães  
Soares.—2016.  
xiii, 76f. + apêndices : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2016.  
Bibliografia : f. 74-76  
Orientador : Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

1. Engenharia mecânica. 2. Petróleo – Prospecção – Brasil. 3.  
Reservas de petróleo – Brasil. 4. Evaporito. 5. Método dos  
elementos finitos. I. Pacheco, Pedro Manuel Calas Lopes (Orient.).  
II. Título.

CDD 621

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família por sempre priorizarem e incentivarem minha educação, permitindo que pudesse chegar ao final da faculdade. Em especial ao meu pai, Antonio Claudio, não apenas pelos incentivos mas também pela ajuda com seus vastos conhecimentos técnicos da área.

Aos meus amigos e à minha namorada, Ivy Vinces pelo carinho e apoio.

Ao Luiz Palermo pelo envio de referências bibliográficas sobre geologia das rochas evaporíticas.

Ao professor orientador, Pedro Manuel, por sempre conseguir um espaço em sua agenda para me ajudar em nossas inúmeras reuniões.

Aos professores e funcionários do CEFET/RJ que contribuíram enormemente para minha formação pessoal e profissional.

## **RESUMO**

As rochas evaporíticas possuem grande importância no processo de contenção e armazenamento de hidrocarbonetos. A descoberta de grandes quantidades de óleo na costa brasileira em regiões subsalíferas tornou fundamental o estudo do comportamento mecânico das rochas evaporíticas a fim de determinar a trajetória ótima de perfuração de poços. Em função de seu comportamento complexo, a análise das camadas de sal que se depositaram ao longo dos anos geológicos envolve a utilização de modelos numéricos como os baseados no método de elementos finitos. Este trabalho apresenta uma descrição dos principais aspectos do comportamento termomecânico e dos modelos existentes para as camadas de sal além de apresentar um critério de falha que pode ser utilizado para evaporitos no regime linear elástico. O método de elementos finitos é empregado considerando um modelo linear e isotrópico para analisar comportamento das tensões em camadas salíferas sob diversas condições.

Palavras-chave: Rochas evaporíticas, Comportamento Mecânico, Método de elementos finitos.

## **ABSTRACT**

Evaporite rocks has great importance in the process of contention and storage of hydrocarbons. The discovery of huge amount of oil under layers of salt in Brazilian coast has made essential the study of its mechanical behavior to determine the best trajectory of wells. As a function of its complex behavior, the analysis of salt layers that had deposited over the geological ages involves the use of numerical models as those based on the finite element method. This work shows a description of the main aspects of the thermomechanical behavior and the existing models for simulating salt layers in addition to present a failure criteria that may be used on evaporates at the linear elastic regime. The finite element method is employed considering a linear and isotropic model to analyze the behavior of stress in salt layers over several conditions.

**Key-words:** Evaporite rocks, Mechanical behavior, Finite element method.

## SUMÁRIO

Capítulo 1 .....	1
Introdução .....	1
1.1) Motivação .....	1
1.2) Justificativa .....	2
1.3) Objetivos .....	2
1.4) Metodologia e trabalho realizado .....	2
1.5) Organização do trabalho .....	3
Capítulo 2 .....	4
Formação da camada salífera .....	4
2.1) Origem do petróleo .....	4
2.2) Formação dos evaporitos .....	6
2.3) Tectônica de sal .....	9
2.4) Formação das bacias brasileiras .....	11
2.5) Aquisição de dados por sísmica .....	14
Capítulo 3 .....	16
Propriedades dos evaporitos .....	16
3.1) Propriedades químicas dos evaporitos .....	16
3.2) Propriedades físicas dos evaporitos .....	18
3.2.1) Massa específica .....	19
3.2.2) Viscosidade .....	19
3.2.3) Condutividade térmica .....	20
3.2.4) Ponto de fusão .....	20
Capítulo 4 .....	21
Comportamento mecânico dos evaporitos .....	21
4.1) Fluência .....	21
4.1.1) Modelos empíricos .....	23
4.1.2) Modelos físicos .....	24
4.1.3) Modelos reológicos .....	24
4.2) Propriedades mecânicas no comportamento elástico do sal .....	28
4.3) Critérios de falha .....	31
4.3.1) Critério de Mohr-Coulomb .....	32
4.3.2) Critério de Hoek-Brown generalizado .....	33
Capítulo 5 .....	35
Ensaio mecânicos .....	35
5.1) Ensaio brasileiro .....	35

5.2) Ensaio triaxial .....	37
5.2.1) Critério de falha de Mohr-Coulomb em rochas evaporíticas.....	41
5.3) Ensaio de velocidades elásticas .....	43
Capítulo 6 .....	44
Análises numéricas .....	44
6.1) Estudos de caso.....	44
6.2) Metodologia de avaliação dos casos .....	46
6.3) Caso 1: Bloco de sal tensionado.....	47
6.3.1) Solução analítica .....	47
6.3.2) Solução por elementos finitos .....	48
6.4) Caso 2: Poço perfurado através da camada de sal .....	50
6.4.1) Malha .....	51
6.4.2) Resultados numéricos.....	56
6.5) Caso 3: Poço interrompido .....	63
6.5.1) Malha .....	64
6.5.2) Resultados numéricos.....	66
Capítulo 4 .....	72
Conclusões.....	72
Referências bibliográficas .....	73
APÊNDICE A: Algoritmo do Critério de Falha de Mohr-Coulomb.....	76
APÊNDICE B: Linhas de comando do Caso 1 de simulação .....	78
APÊNDICE C: Linhas de comando para o Caso 2 em 3d de simulação.....	80
APÊNDICE D: Linhas de comando para o Caso 2 axissimétrico de simulação.....	84
APÊNDICE E: Linhas de comando para o Caso 3 de simulação.....	86

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Relações espaciais entre rochas geradoras, reservatórios e selantes .....	6
FIGURA 2: Distribuição mundial dos grandes depósitos evaporíticos e formação geológica. .	8
FIGURA 3: Tensões in situ. ....	9
FIGURA 4: Movimentação da camada de sal devido a sobrecargas. ....	10
FIGURA 5: Crescimento de almofadas salíferas. ....	11
FIGURA 6: Ilustração de como os diápiros tensionam camadas posteriormente depositadas.	11
FIGURA 7: Localização das bacias brasileiras com reservatórios do pré-sal.....	12
FIGURA 8: Reconstrução da Gondwana na fase pós-rifte.....	13
FIGURA 9: Ilustração de operação para levantamento sísmico marinho. ....	14
FIGURA 10: Seção transversal sísmica da Bacia de Campos.....	15
FIGURA 11: O sódio tende a perder um elétron na ligação com o cloro para que ambos obtenham oito elétrons em suas camadas mais externas. ....	17
FIGURA 12: Reticulado cristalino do cloreto de sódio. ....	17
FIGURA 13: Cristal de halita.....	18
FIGURA 14: Curva típica de fluência. ....	22
FIGURA 15: Curva típica de fluência com comportamento para súbitas diminuições de tensão durante fases de fluência.....	23
FIGURA 16: Modelo de Maxwell (a) e representação de suas curvas típicas (b) e (c) .....	25
FIGURA 17: Modelo de Kelvin e curvas típicas .....	27
FIGURA 18: Modelo de Burgers. ....	28
FIGURA 19: Curva deformação-tempo, do modelo de Burger. ....	28
FIGURA 20: Relação dos parâmetros elásticos do sal com temperatura.....	30
FIGURA 21: Prisão da coluna de perfuração. ....	31
FIGURA 22: Esquema para definição do critério de Mohr-Coulomb. ....	32
FIGURA 23: Critério de ruptura de Mohr-Coulomb no espaço $\sigma_1$ x $\sigma_3$ .....	33
FIGURA 24: Ensaio brasileiro (A) e corpo de prova a ser utilizado (B). ....	35
FIGURA 25: Resultado do ensaio brasileiro exposto graficamente. ....	37
FIGURA 26: Corpos de prova após ensaio brasileiro realizado em diversas temperaturas.....	37
FIGURA 27: Ilustração esquemática de um ensaio triaxial. ....	38
FIGURA 28: Curvas tensão x deformação de ensaios triaxiais no arenito. ....	38

FIGURA 29: Resultados obtidos por Sriapai <i>et al.</i> (2012) representados no espaço $\sigma_3 \times \sigma_1$ . .....	39
FIGURA 30: Máquina para realização do ensaio triaxial. ....	40
FIGURA 31: Ensaio triaxial para obter curva de fluência. ....	41
FIGURA 32: Círculos de Mohr e reta envoltória para temperatura de 274 K. ....	42
FIGURA 33: Reta envoltória e dados experimentais a 274 K no espaço $\sigma_3 \times \sigma_1$ . ....	42
FIGURA 34: Esquema de seção de sal simulada no caso real. ....	45
FIGURA 35: Tensão vertical máxima e tensão horizontal mínima representam o estado de tensão crítico para o sal. ....	46
FIGURA 36: Esquematisação do primeiro caso de simulação. ....	47
FIGURA 37: Malha tridimensional utilizada no modelo do primeiro caso. ....	48
FIGURA 38: Solução do Ansys para $\sigma_x$ .....	49
FIGURA 39: Tensões equivalentes de <i>von Mises</i> para o Caso 1. ....	50
FIGURA 40: Vista superior do Caso 2. As linhas em cinza indicam a região modelada associada a 1/4 da geometria. ....	51
FIGURA 41: Vista superior dos elementos da malha em três dimensões do Caso 2. Modelo 3D. ....	52
FIGURA 42: Vista isométrica da malha do Caso 2. Modelo 3D. ....	53
FIGURA 43: Gráfico da análise de convergência da malha tridimensional para o Caso 2. Modelo 3D. ....	54
FIGURA 44: Malha, condições de contorno e carregamento para o Caso 2. Modelo axissimétrico (2D). ....	55
FIGURA 45: Gráfico de convergência para a malha axissimétrica. Modelo 2D .....	56
FIGURA 46: Resultados numéricos e a reta envoltória do critério de Mohr-Coulomb. Modelo 3D. ....	57
FIGURA 47: Resultado das tensões de Von Mises para a malha em três dimensões .....	58
FIGURA 48: Resultados de tensão normal na direção x do Caso 2. Modelo 3D. ....	59
FIGURA 49: Detalhe na região do poço dos resultados de tensão normal na direção x do Caso 2. Modelo 3D. ....	59
FIGURA 50: Resultados de tensão normal na direção y do Caso 2. Modelo 3D. ....	60
FIGURA 51: Detalhe na região do poço dos resultados de tensão normal na direção y do Caso 2. Modelo 3D. ....	60

FIGURA 52: Resultados numéricos para a distribuição de tensões na direção z do Caso 2. Modelo 3D.....	61
FIGURA 53: Resultado numérico do caso real com reta envoltória do critério de falha. Modelo 3D.....	62
FIGURA 54: Análise de falha para poços com diversos diâmetros.....	63
FIGURA 55: Condições de contorno do Caso 3. Modelo 2D axissimétrico.....	64
FIGURA 56: Malha triangular do Caso 3. Modelo 2D axissimétrico.....	64
FIGURA 57: Análise de convergência para o Caso 3. Modelo 2D.....	65
FIGURA 58: Distribuição das tensões equivalentes de <i>von Mises</i> para o terceiro caso de simulação. Modelo 2D.....	66
FIGURA 59: Detalhe de distribuição das tensões equivalentes de <i>von Mises</i> do Caso 3 na região do poço. Modelo 2D axissimétrico.....	67
FIGURA 60: Distribuição de tensão horizontal na direção x no Caso 3. Modelo 2D axissimétrico.....	68
FIGURA 61: Detalhamento das tensões horizontais na direção x na região perfurada do Caso 3. Modelo 2D axissimétrico.....	68
FIGURA 62: Distribuição de tensão horizontal na direção z no Caso 3. Modelo 2D axissimétrico.....	69
FIGURA 63: Detalhamento das tensões horizontais na direção z na região perfurada do Caso 3. Modelo 2D axissimétrico.....	69
FIGURA 64: Distribuição de tensão vertical no Caso 3. Modelo 2D axissimétrico.....	70
FIGURA 65: Análise do terceiro caso de simulação pelo critério de Mohr-Coulomb. ....	71

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Tabela geológica com acontecimentos históricos.....	8
TABELA 2: Propriedades físicas da halita.....	19
TABELA 3: Parâmetros elásticos do sal. ....	29
TABELA 4: Ensaio brasileiro com amostras de sal sob diversas temperaturas.....	36
TABELA 5: Resultados de ensaios triaxiais realizados a uma progressão de $\sigma_1$ de 1 MPa/s. .....	39
TABELA 6: Resultado de velocidade elásticas para halita. ....	43
TABELA 7: Pesos específicos de materiais das camadas. ....	45
TABELA 8: Parâmetros elásticos do sal utilizados.....	45
TABELA 9: Análise de convergência de malha. Modelo 3D. ....	53
TABELA 10 : Análise de convergência para a malha axissimétrica. Modeo 2D. ....	55
TABELA 11: Resultados numéricos de $\sigma_h$ mínimos obtidos através das tensões verticais experimentais.....	57
TABELA 12: Resultados de tensões máximas equivalentes e tensões confinantes obtidas. ...	62
TABELA 13: Resultados de tensões equivalentes para diversos níveis de refinamento de malha. ....	65

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A, a, b, c, Z$  - constantes

$\varepsilon$  - deformação

$\varepsilon_f$  - deformação acumulada de fluência

$\dot{\varepsilon}_f$  - taxa de deformação por fluência

$\sigma_1$  - tensão principal máxima

$\sigma_3$  - tensão principal mínima

$n$  - gradiente obtido no diagrama  $\ln(\varepsilon)$  versus  $\ln(\sigma_1 - \sigma_3)$

$Q$  - energia de ativação associada a um determinado mecanismo

$R$  - constante universal dos gases

$T$  - temperatura absoluta

$G$  - módulo de cisalhamento

$\dot{\varepsilon}$  - taxa de deformação

$\dot{\sigma}$  - taxa de tensão

$E$  - módulo de elasticidade

$\mu$  - viscosidade do material

$t_M$  - tempo de relação

$t$  - tempo

$k$  - constante elástica

$\sigma^m$  - tensão normal média

$\tau$  - tensão de cisalhamento

$\nu$  - coeficiente de Poisson

$K$  - módulo de compressibilidade

$S_o$  - coesão da rocha

$\phi$  - ângulo de atrito interno

$\sigma_{ci}$  - resistência a compressão uniaxial

$D$  - fator de grau de perturbação da massa rochosa

$I_{IGS}$  - parâmetro de formato geométrico rochoso

$\sigma_b$  - resistência a tração no ensaio brasileiro

$P$  - carregamento no momento de falha

$d$  - diâmetro do corpo de prova

$e$  - espessura do corpo de prova

$\rho$  - massa específica

$V_p$  - velocidade da onda compressional

$V_s$  - velocidade da onda cisalhante

$\sigma_x$  - tensão normal na direção do eixo x

$\sigma_y$  - tensão normal na direção do eixo y

$\sigma_z$  - tensão normal na direção do eixo z

$\sigma_h$  - tensão normal horizontal

$\sigma_v$  - tensão normal vertical

# Capítulo 1

## Introdução

Em novembro de 2007 foi anunciado pela Petrobras a descoberta de grandes acumulações de óleo e gás natural na então denominada camada “pré-sal”. De acordo com Papaterra (2010), as rochas do pré-sal são reservatórios localizados no litoral brasileiro situados abaixo de uma camada de evaporitos que pode chegar a 2 mil metros de profundidade, estando ainda sob lâmina d’água de 1.500 a 3.000 metros.

A descoberta dos reservatórios levou o país a uma nova perspectiva exploratória, podendo elevar o Brasil ao patamar de um dos principais países exploradores de petróleo. Somadas as reservas provadas de óleo e gás com o volume potencial recuperável, o país alcança 27,4 bilhões de barris de óleo equivalente. Deste total, 15,7 bilhões são de óleo e gás descobertos no pré-sal, o que representa 57 % da reserva brasileira (PETROBRAS, 2011).

Apesar do otimismo em relação as descobertas, a prospecção do petróleo é apenas a primeira etapa no processo de produção. A grande profundidade das rochas-reservatório, além própria camada de sal, representam um enorme desafio tecnológico para a exploração e produção de hidrocarbonetos através de poços perfurados na camada salífera.

### 1.1) Motivação

A exploração de hidrocarbonetos é realizada através de poços de petróleo. O projeto de um poço é iniciado pelo estudo da área a ser perfurada. Esta é uma etapa crítica pois a maior quantidade de informações disponíveis implicam em menores riscos e na maior possibilidade de sucesso exploratório (ROCHA e AZEVEDO, 2009).

A localização dos reservatórios do pré-sal torna o custo de perfuração dos poços desta região muito maior do que outros reservatórios situados em localidades mais acessíveis. O sucesso geológico, isto é, a descoberta dos reservatórios, não garante o sucesso econômico do mesmo. Quando o custo de exploração é muito elevado, o reservatório não é suficientemente atrativo para justificar novos investimentos exploratórios.

Nesse sentido, o conhecimento das propriedades mecânicas e das geopressões existentes na camada salífera podem prover informações valiosas, tanto para a fase de perfuração quanto

para otimização do projeto de poço. Isso pode garantir a competitividade e, assim, a viabilidade econômica da operação de produção de reservatórios ultraprofundos.

## **1.2) Justificativa**

Devido ao fato das rochas evaporíticas apresentarem um comportamento não-linear complexo envolvendo grandes deformações, seu comportamento tem sido tratado de maneira complexa.

Simulações numéricas utilizando elementos finitos, modelando evaporitos como sólidos, utilizando método ALI (Aproximação Linear Incremental) para resolução das não linearidades são capazes de reproduzir a formação dos domos salinos sem perder a convergência, sendo seu resultado final comparável aos resultados obtidos por sísmica com pequenas divergências (LIU *et al.*, 2011).

Apesar da boa convergência dos resultados do método ALI com os dados sísmicos, a operação de perfuração de poços de petróleo, promove altas taxas de carregamento nas camadas geológicas, fazendo com que o sal apresente um comportamento no regime linear-elástico e, dessa forma, possa ser modelado numericamente de maneira mais simples para prever os valores de tensão que ocorrem durante o procedimento.

## **1.3) Objetivos**

Este trabalho possui por objetivo apresentar uma descrição dos principais comportamentos termomecânicos da camada de sal e analisar o comportamento mecânico do material através do método de elementos finitos, o qual é utilizado em conjunto com ensaios mecânicos realizados com amostras de halita, o componente mais abundante na camada salífera.

## **1.4) Metodologia e trabalho realizado**

A fim de analisar o comportamento das tensões existentes nas camadas salíferas e como estas podem afetar fisicamente as rochas foi, primeiramente, desenvolvido, uma rotina numérica capaz de criar a reta envoltória do critério de falha de Mohr-Coulomb através de dados obtidos por ensaios triaxiais. Desta forma é possível descrever um critério de ruptura para qualquer tensão confinante que se deseja trabalhar.

O critério de falha, obtido através de dados experimentais, foi utilizado em conjunto com simulações em elementos finitos de camadas salíferas, consideradas isotrópicas e em regime linear, sob diversas condições de perfurações para avaliar quais situações são mais críticas para rochas evaporíticas e quais delas podem levar as rochas à fratura.

## **1.5) Organização do trabalho**

Este trabalho está organizado de maneira que o leitor possa entender a importância do sal e seu estudo, mesmo sem conhecimentos prévios do assunto.

Os primeiros três capítulos possuem caráter de revisão bibliográfica, buscando explicitar parâmetros importantes no estudo de rochas evaporíticas e as características que tornam as camadas de sal tão peculiares. Inicialmente busca-se compreender a importância da halita na indústria petrolífera, entender o processo de formação das camadas salíferas e suas propriedades físico-químicas.

O Capítulo 4 retrata o comportamento mecânico dos evaporitos e as modelagens típicas do comportamento salífero enquanto que no Capítulo 5 são mostrados os ensaios mecânicos utilizados para obtenção das propriedades do sal, além de expor os resultados disponíveis na literatura.

O Capítulo 6 apresenta os diversos modelos utilizados para solução das tensões nas camadas sob diversas condições. As malhas de elementos finitos, as análises de convergência, as condições de contorno utilizadas são descritas. Por fim os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

## Capítulo 2

### Formação da camada salífera

O estudo do processo de formação das camadas salíferas é fundamental para a indústria de petróleo. As camadas de sal, ou evaporíticas, possuem uma relação estreita com o processo de contenção e armazenamento de petróleo. Entender os mecanismos de formação geológica pode representar maiores oportunidades de prospecção de petróleo em áreas onde anteriormente não houvessem suspeitas de ocorrência de hidrocarbonetos.

Um fator importante para a definição da trajetória de poços perfurados através do sal é o estudo das geopressões existentes na camada. A grande mobilidade salífera ao longo de milhões de anos resultou em grandes deformações que, além de favorecer o selamento dos hidrocarbonetos, resultou no acúmulo de tensões nas camadas (MOHRIAK e SZATMARI, 2008). Está claro que todo o processo geológico foi o grande responsável pela forma das camadas evaporíticas observadas atualmente por sísmica.

Por fim, os modelos numéricos que buscam representar o sal computacionalmente são desenvolvidos de acordo com dados das camadas estratigráficas obtidas por sísmica. Esses modelos são utilizados não apenas para prever a deposição do sal ao longo dos anos, mas também para prever o comportamento do mesmo no caso de desequilíbrios causados pela perfuração de poços.

#### 2.1) Origem do petróleo

O petróleo, além de servir de matéria prima para uma série de produtos utilizados no cotidiano, é a principal fonte de energia do mundo moderno. Para melhor compreensão da importância das camadas evaporíticas no processo de formação do petróleo, será apresentada uma descrição das etapas de formação dos hidrocarbonetos, segundo Thomas *et al.* (2001).

O depósito de matéria orgânica junto a rochas sedimentares é o que dá origem ao petróleo. Condições muito específicas devem acontecer para a geração dos hidrocarbonetos como, por exemplo, a não oxidação do processo. Pela necessidade de não haver oxidação, geralmente o processo de formação se dá em oceanos, sendo as algas e microorganismos os formadores da matéria orgânica marinha, também chamada de fitoplâncton. As rochas

sedimentares devem possuir baixa permeabilidade para que a água circundante não interfira em seu interior.

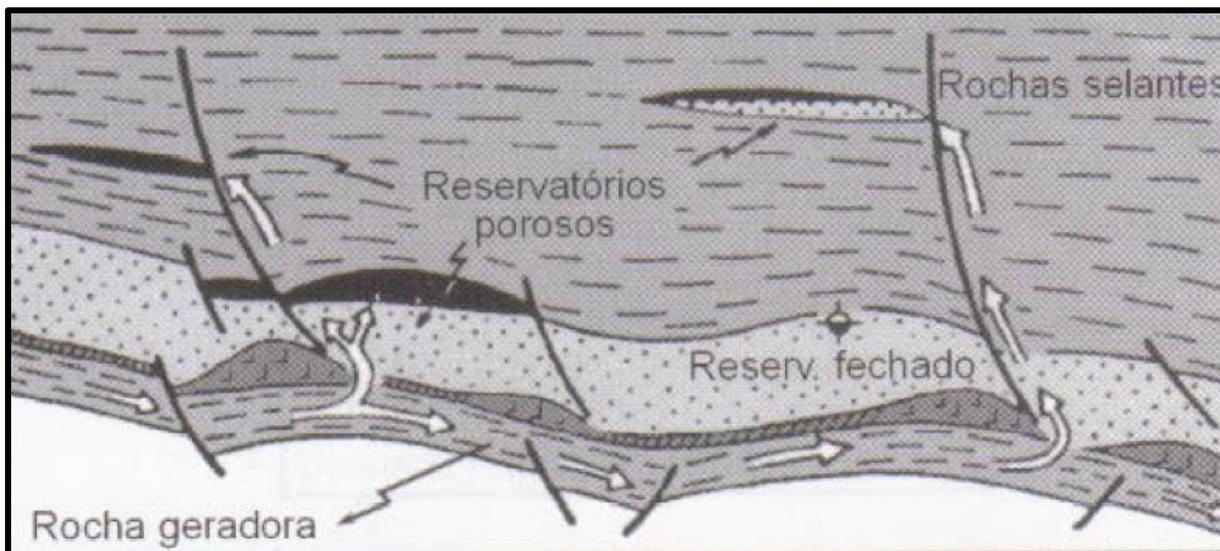
Existindo um ambiente propício para incorporação da matéria orgânica ao sedimento, ocorre gradativamente aumento de temperatura e pressão oriundos de cargas sedimentares posteriores. Portanto, em uma visão macroscópica, a geração de petróleo é resultado da captação de energia solar, por fotossíntese, e transformação da matéria orgânica com auxílio do calor oriundo do interior da Terra e a pressão das cargas sedimentares.

Após o processo de geração é necessário a ocorrência de migração dos hidrocarbonetos da rocha geradora para outra rocha, chamada reservatório, a fim de haver acumulação de petróleo. Uma explicação para esse fenômeno estaria no microfraturamento das rochas geradoras, havendo então um fluxo através de um meio de baixíssima permeabilidade, como as rochas evaporíticas. As rochas reservatório podem possuir qualquer origem ou natureza, mas devem possuir poros, que são cavidades em seu interior, interconectados, garantindo assim a característica de permeabilidade.

Atendidas as condições de geração, migração e reservatório é necessário que alguma barreira interponha o caminho para haver a acumulação de petróleo. Esta barreira é constituída pela rocha selante, que possui a baixa permeabilidade como principal característica. Além da impermeabilidade, a rocha selante deve possuir alta plasticidade, para que se mantenha selante mesmo após submetida a esforços e deformações. A eficiência selante de uma rocha é função não apenas da espessura, mas também de sua extensão.

Como será visto, as rochas evaporíticas possuem as características necessárias de uma rocha selante, sendo, de fato, um elemento ótimo selante. Assim, as camadas de sal possuem um relevante fator no processo de formação, sendo importantes tanto no processo de migração quanto no processo de aprisionamento do petróleo. Outra característica dos evaporitos está em sua boa condução térmica que permite aquecer camadas sobrepostas, o que pode possibilitar rochas geradoras atingirem temperaturas ideais de geração de hidrocarbonetos.

A Figura 1 mostra as relações espaciais entre rochas geradoras, reservatórios e selantes, ilustrando estratigraficamente as condições necessárias para acúmulo de hidrocarbonetos.



**Figura 1:** Relações espaciais entre rochas geradoras, reservatórios e selantes (THOMAS *et al.*, 2001)

## 2.2) Formação dos evaporitos

De acordo com Mohriak e Szatmari (2008) evaporitos são rochas e sedimentos oriundos da evaporação da água. Resultam em grande parte de mares desconectados do sistema de oceanos, que ficam expostos ao processo de evaporação de grandes volumes de água sem reposição da mesma, gerando as salmouras, que são altas concentrações de sal em um volume de água.

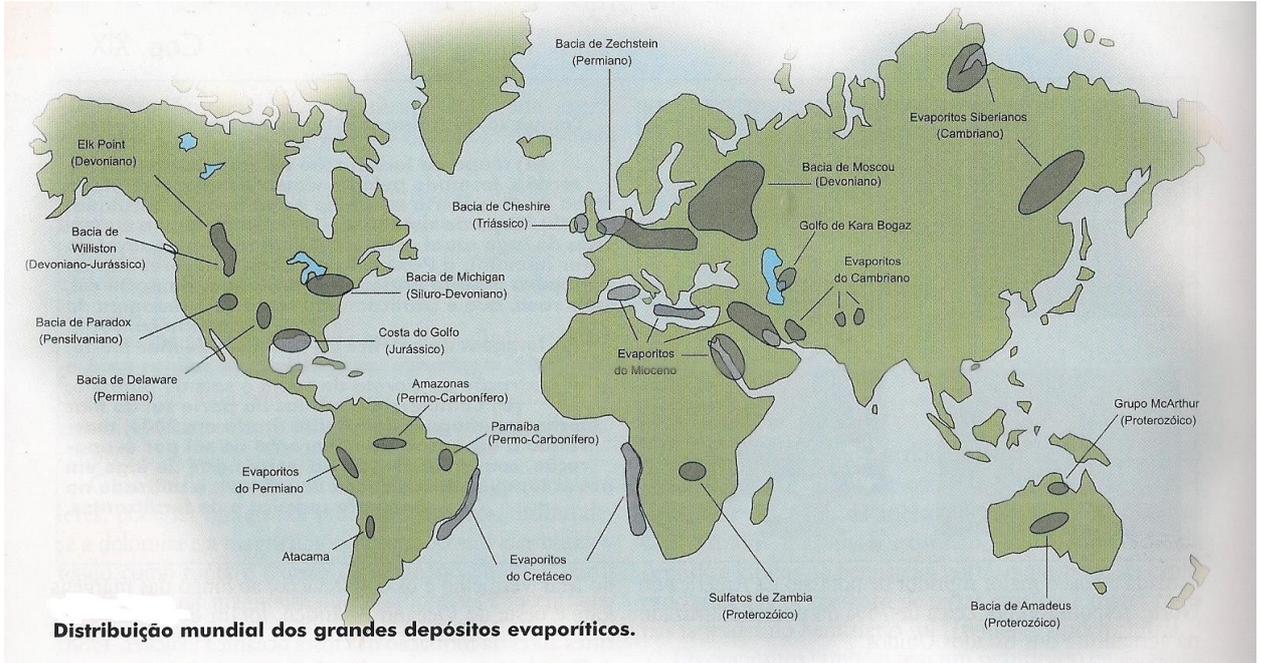
A Terra em sua origem era um planeta quente, com água em estado gasoso misturada à atmosfera. Com o resfriamento do planeta, a água começou a se acumular na superfície através das chuvas, sendo doce em um primeiro momento. A forma em que ocorreu salinização do mar primitivo pode ser explicada pelo vulcanismo. O cloro (Cl) é um gás agressivo proveniente de erupções vulcânicas, enquanto o sódio (Na) provém da decomposição de minerais de rochas ígneas e metamórficas. A ligação do cátion de sódio com o ânion de cloro forma a halita, ou sal de cozinha, que representa cerca de 97% dos sais existentes (MOHRIAK e SZATMARI, 2008).

Ainda de acordo com Mohriak e Szatmari (2008) para formação de um volume unitário de uma camada de sal é necessário a evaporação de um volume de água 60 vezes maior. Por exemplo, para acumulação de uma camada de espessura de 100 m, há a necessidade de uma coluna d'água de 6.000 m, valor inexistente nos oceanos atuais, com exceção de pequenas

regiões como as fossas submarinas. Isso explica a não ocorrência de espessas camadas de sal na superfície terrestre moderna.

Extensos registros geológicos indicam a presença de camadas de sal no planeta na era do Neoproterozoico (entre 1.000 e 542 milhões de anos atrás) nas regiões orientais do globo. Apesar da fácil dissolução do sal, camadas salíferas profundas foram mantidas preservadas por centenas de milhões de anos, sendo observáveis nos dias de hoje em seu formato peculiar através da sísmica.

Por exigirem condições muito específicas de deposição, camadas espessas de evaporitos têm ocorrência limitada no tempo geológico. No globo, essas camadas não foram formadas simultaneamente, porém independentemente da idade, muitas delas possuem formas e empilhamentos verticais semelhantes (JACKSON, 1997). A Figura 2 mostra as camadas evaporíticas conhecidas no planeta com a estimativa do período de formação enquanto que a Tabela 1 mostra os períodos geológicos para servir de legenda à Figura 2.



**Figura 2:** Distribuição mundial dos grandes depósitos evaporíticos e formação geológica (MOHRIAK e SZATMARI, 2008).

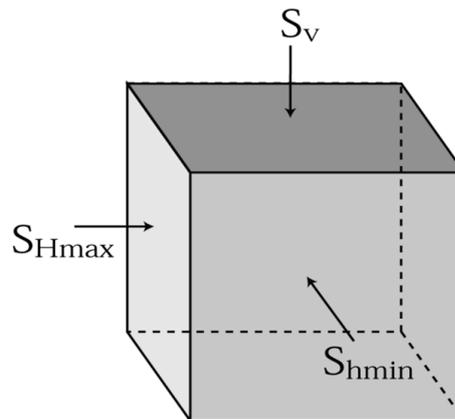
**Tabela 1:** Tabela geológica com acontecimentos históricos (PENA, 2016).

Éon	Era	Período	Época	Início (milhões de anos)	Acontecimentos
Fanerozoico	Cenozoica	Quaternário	Holoceno	0,01	- Formação das civilizações e constituição do tempo histórico;
			Pleistoceno	1,6	- Surgimento do homem;
		Terciário	Plioceno	5,2	- Primeiros hominídeos;
			Mioceno	23	- Avanços na formação dos atuais continentes;
			Oligoceno	36	- Surgimento dos campos e pradarias;
			Eoceno	57	- Primeiros roedores e baleias;
	Paleoceno	65	- Domínio dos mamíferos na Terra.		
	Mesozoica	Cretáceo		135	- Extinção dos dinossauros e outras formas de vida primitivas; - Surgimento dos mamíferos e das aves;
			Jurássico	205	- Início da fragmentação do Pangeia;
			Triássico	250	- Primeiros Dinossauros.
	Paleozoica	Permiano		290	- União entre Gondwana e Laurásia na formação do continente Pangeia;
			Carbonífero	355	- Surgimento e difusão dos répteis;
		Devoniano		410	- Formação das primeiras florestas; - Origem das Bacias Sedimentares;
Siluriano			438	- Primeiros animais terrestres;	
Ordoviciano			510	- Glaciações e surgimento dos peixes;	
Cambriano			570	- Primeiros animais invertebrados e algas marinhas.	
Pré-Cambriano	Proterozoica			2.500	- Primeiras formas de vida;
	Arqueozoica			4.500	- Formação da Terra; - Origem das rochas e primeiras formas de relevo.

### 2.3) Tectônica de sal

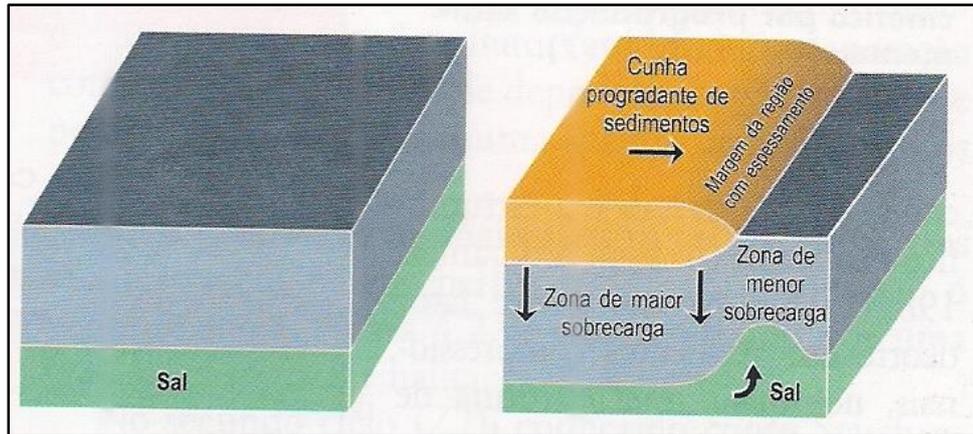
Ao contrário de outras rochas, o sal flui mesmo em baixas temperaturas e altas pressões. Essa característica faz com que as camadas de sal possuam alta mobilidade, fenômeno conhecido como halocinese. Segundo Mohriak e Szatmari (2008), a tectônica do sal refere-se aos mecanismos responsáveis pela deformação da camada-mãe de sal e à formação de estruturas diapíricas em escala regional.

A formação das estruturas halocinéticas se dá através dos regimes de esforços. Como mostram Rocha e Azevedo (2009), elementos de rocha em subsuperfície e equilíbrio ficam sujeitos a um estado de tensão compressivo, formado por três tensões, duas horizontais e uma vertical, denominadas tensões in situ, como mostra a Figura 3.



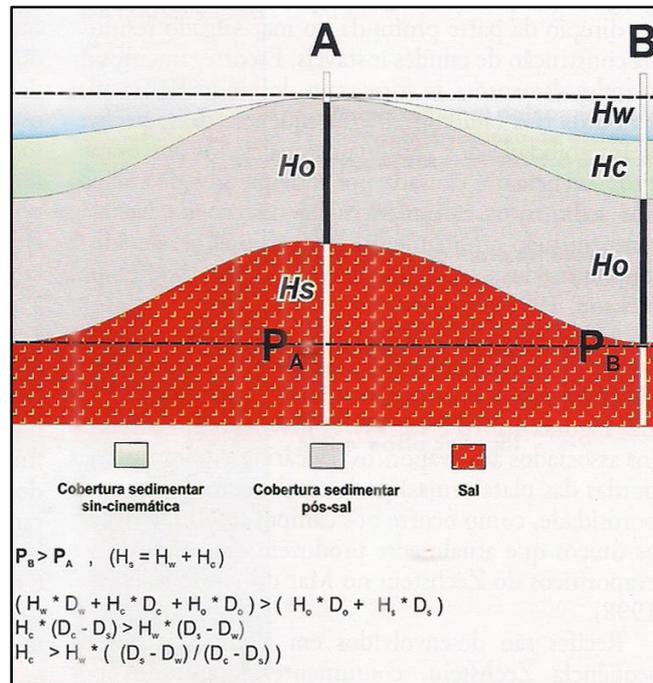
**Figura 3:** Tensões in situ (ROCHA e AZEVEDO, 2009).

Em larga escala, as deformações salíferas se dão de forma semelhante a fluidos (MOHRIAK; SZATMARI, 2008; JACKSON, 1997). As diferenças de pressão fazem com que os corpos de sal escoem de regiões de alta pressão para regiões de baixa pressão. A força gravitacional age de modo a desequilibrar a pressão na área do sal. A pressão resultante da sobrecarga sedimentar tende a mover o sal das regiões de alta para as de baixas pressões geostáticas (MOHRIAK e SZATMARI, 2008). A Figura 4 ilustra a movimentação da camada de sal em decorrência das zonas de sobrecarga.

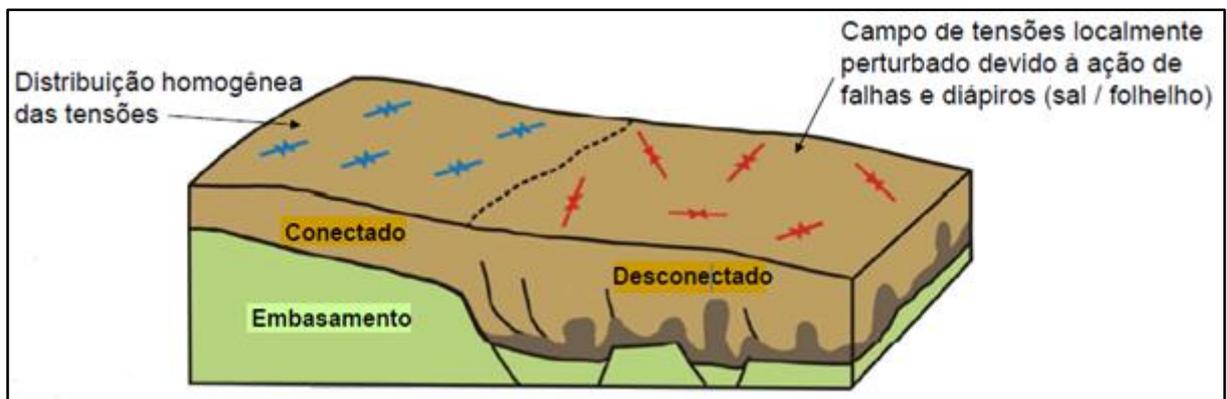


**Figura 4:** Movimentação da camada de sal devido a sobrecargas (MOHRIAK e SZATMARI, 2008).

A formação de almofadas e diápiros salíferos frequentemente acompanha o fluxo lateral de sal (MOHRIAK e SZATMARI, 2008). Diápiros são um tipo de intrusão geológica na qual um material com maior mobilidade e ductilidade é forçado contra as camadas sobrepostas. Para o crescimento de uma almofada de sal, a pressão nos flancos laterais devem ser maiores que no centro, como indicado na Figura 5. Falhas e intrusões ígneas anteriores a camada de sal também podem promover almofadas e diapirismo. Apesar das camadas sobrepostas ao sal promoverem tensionamentos no sal, o inverso também ocorre. Diápiros e almofadas também tensionam camadas superiores, como mostra o esquema da Figura 6.



**Figura 5:** Crescimento de almofadas salíferas (MOHRIAK e SZATMARI, 2008).



**Figura 6:** Ilustração de como os diápiros tensionam camadas posteriormente depositadas (TINGAY, 2008).

## 2.4) Formação das bacias brasileiras

As bacias sedimentares do pré-sal localizam-se na região costa-afora do Espírito Santo até Santa Catarina, como mostra a Figura 7. Essas bacias da Margem Leste Meridional brasileira foram formadas durante o Cretáceo Inferior (PAPATERRA, 2010). A origem das bacias e a sedimentação da camada evaporítica está associada à ruptura da Gondwana que culminou na

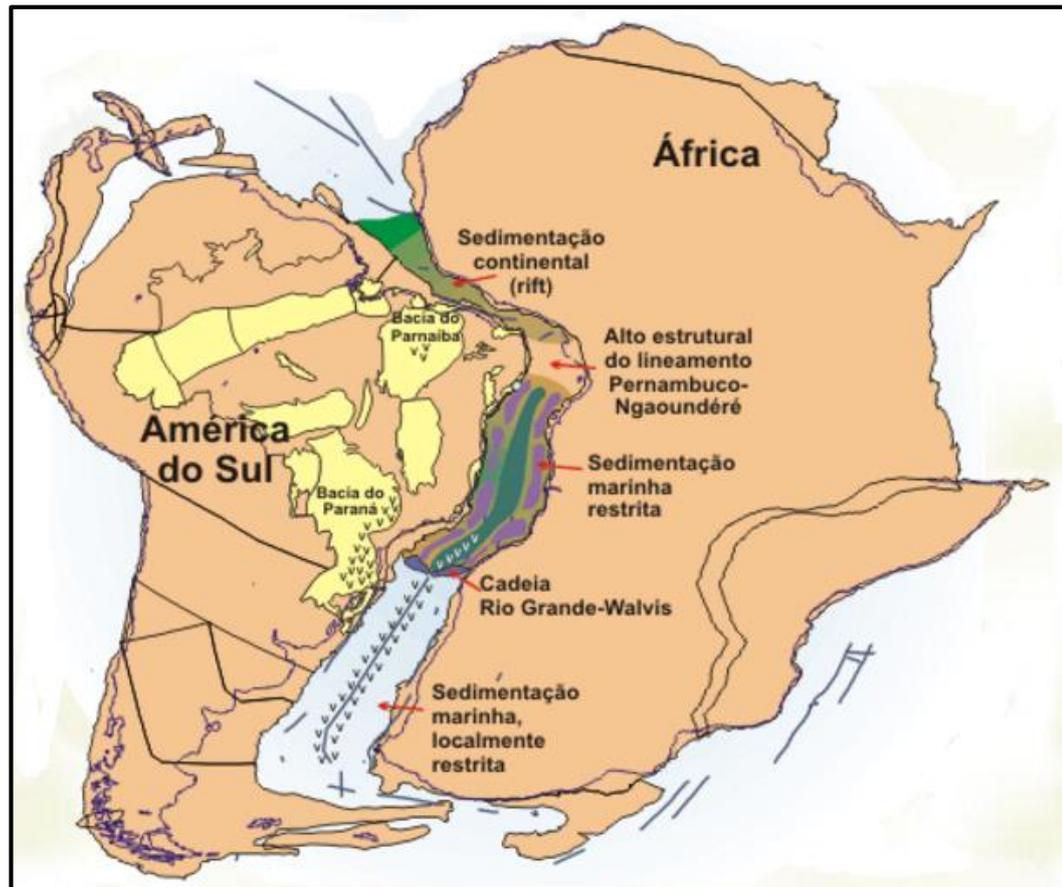
formação da crosta oceânica e separação dos continentes sul-americano e africano. A história geológica das bacias brasileiras pode ser dividida em três fases principais (MOHRIAK e SZATMARI, 2008).



**Figura 7:** Localização das bacias brasileiras com reservatórios do pré-sal (RICCOMINI *et al.*, 2012).

A primeira fase é denominada fase *rifte*, ou lago. Nessa fase, atividades de vulcanismos e movimentação de falhas formou bacias intracontinentais do tipo *rifte*, formando lagos que se distribuía entre o Brasil e África, ainda unidos. A paleotopografia dessa fase eram em blocos altos e baixos. Nas partes baixas foram depositados sedimentos, como folhelhos (rochas com granulação finas) ricos em matéria orgânica. Sobre os blocos elevados ocorreu a deposição de rochas carbonáticas.

O progresso da separação das placas sul-americana e africana formou um mar ao sul e permitiu a entrada intermitente de água marinha no golfo moldado durante a fase *rifte*. O cenário paleotopográfico do pós-*rifte* assemelhava-se a um golfo estreito e alongado, semelhante ao atual Mar Vermelho. A Figura 8 ilustra a disposição das placas nessa época.



**Figura 8:** Reconstrução da Gondwana na fase pós-rifte (LIMA e JÚNIOR, 2003).

O influxo de água no estágio pós-rifte esteve controlado por uma feição estrutural conhecida como Rio Grande-Walvis (LIMA e JÚNIOR, 2003), que pode ser observado na Figura 8. Esse alto estrutural controlando a entrada de água, o contínuo afundamento do assoalho da bacia e o clima quente então vigente na região, permitiram a formação do pacote de sal (MOHRIAK e SZATMARI, 2008; LIMA e JÚNIOR, 2003), uma espessa camada com até 2.000 metros de espessura, composta essencialmente de halita com intercalações de outros sais como anidrita, carnalita e taquidrita, depositados em um intervalo de 400 mil a 600 mil anos (MOHRIAK e SZATMARI, 2008).

Com o avanço da separação entre as placas, a cadeia de Rio Grande-Walvis teve seu papel progressivamente reduzido no controle do influxo de água (LIMA e JÚNIOR, 2003). Iniciou-se então o estágio de deriva continental, que ocorreu por volta de 111 milhões de anos e perdura até hoje. Sobre os evaporitos foram depositados sedimentos marinhos. Inicialmente a deposição foi marcada por grandes plataformas carbonáticas. Entretanto o progresso de separação e as condições climáticas impediram esse tipo de deposição de modo que as

sequências sedimentares posteriores evoluíram para um sistema predominantemente siliciclástico, que persiste até hoje.

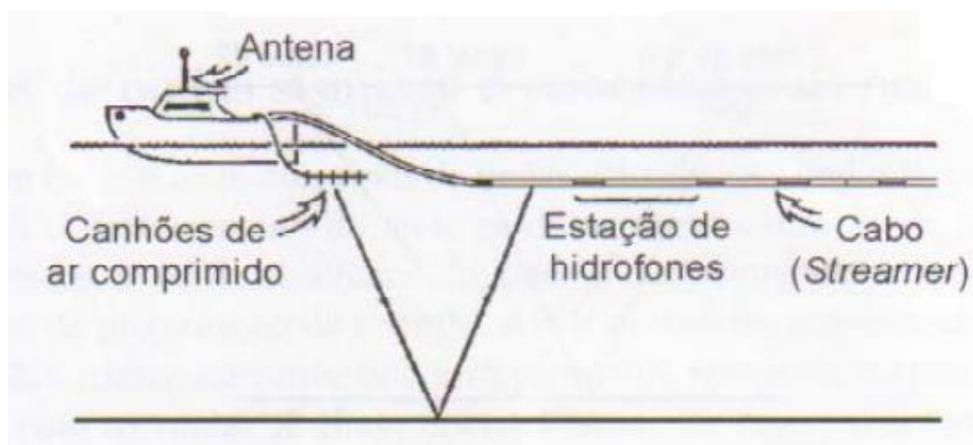
## 2.5) Aquisição de dados por sísmica

Antigamente os minerais evaporíticos eram apenas conhecidos quando afloravam à superfície. Entretanto, através do método sísmico de reflexão, camadas salíferas em subsuperfícies, abaixo de espessos sedimentos marinhos e até em regiões abissais foram descobertas (ROCHA e AZEVEDO, 2009).

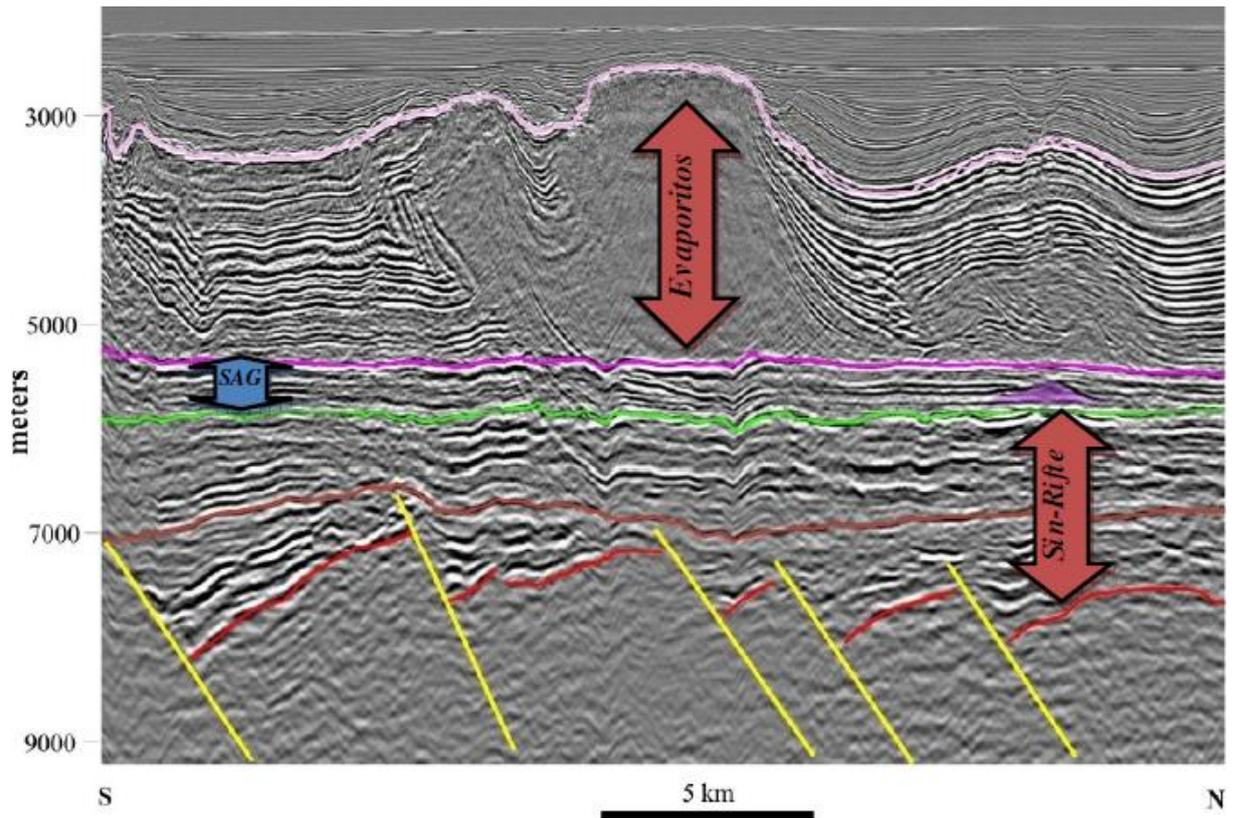
De acordo com Thomas *et al* (2001) o método sísmico é o mais utilizado na prospecção de petróleo pois permite a obtenção de perfis estratigráficos a um baixo custo. O método baseia-se na geração, reflexão e refração de ondas geradas artificialmente.

Thomas *et al.* (2001) explica que para realização do mapeamento sísmico em água são utilizados como fonte sísmica canhões de ar comprimido e receptores de pressão chamados hidrofones. A pressão produzida pelas ondas acústicas na água gera uma corrente elétrica nos cristais piezelétricos contidas nos hidrofones. Os receptores dos hidrofones devem reproduzir as vibrações mecânicas em oscilações elétricas, que são transmitidas até o sismógrafo e registradas.

A Figura 9 mostra um esquema ilustrativo de levantamento sísmico marinho, enquanto a Figura 10 mostra a seção transversal sísmica da Bacia de Campos.



**Figura 9:** Ilustração de operação para levantamento sísmico marinho (THOMAS *et al.*, 2001).



**Figura 10:** Seção transversal sísmica da Bacia de Campos (PAPATERRA, 2010).

A Figura 10 mostra que a camada de sal da Bacia de Campos possui as características descritas nesse capítulo: apresenta domos, diápiros e almofadas; todos resultantes da tectônica do sal.

## Capítulo 3

### Propriedades dos evaporitos

As propriedades físico-químicas do sal é que o fazem com que este elemento seja tão importante para a indústria petrolífera. Os evaporitos possuem características muito distintas de outras rochas pois comportam-se tanto quanto líquidos como quanto sólidos (MOHRIAK e SZATMARI, 2008). A formação de diápiros, por exemplo, é típica em fluidos com densidades diferentes, entretanto uma rocha de sal sob altas taxas de carregamento pode ser tão rígida quanto o concreto.

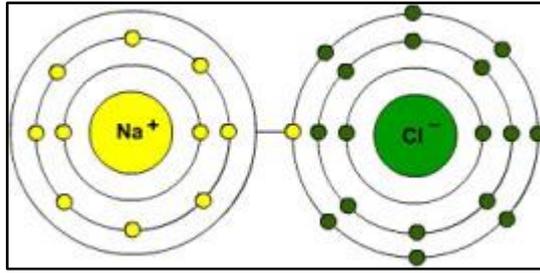
As propriedades de qualquer tipo de material são um reflexo dos tipos e arranjos atômicos. Para compreensão do comportamento macroscópico do sal é necessário analisar sua composição química além do comportamento dos íons em solução.

Além da importância do sal na formação de reservatórios de petróleo, o comportamento e as propriedades do sal também levantaram o interesse para serem utilizados em depósitos de resíduos nucleares e hidrocarbonetos. Grandes investimentos, sobretudo pelo governo norte americano, foram feitos para avaliação das propriedades mecânicas dos evaporitos sobre diversas condições de pressão e temperatura. Esses projetos deram grande contribuição para o estudo do comportamento mecânico das rochas evaporíticas.

As propriedades mecânicas dos evaporitos podem ser obtidas através de diversos ensaios mecânicos que serão melhor discutidos no Capítulo 4.

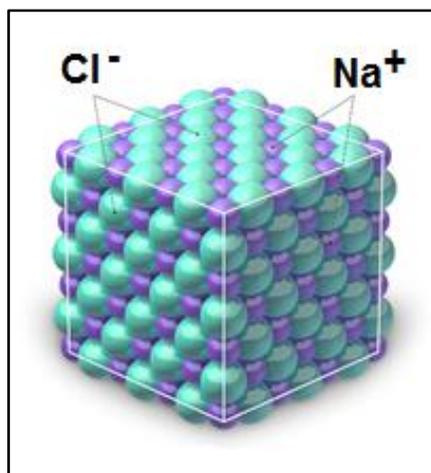
#### 3.1) Propriedades químicas dos evaporitos

Os principais elementos que compõe os sais são os íons  $\text{Na}^+$  de sódio e os íons  $\text{Cl}^-$  de cloro. Juntos, eles formam uma ligação não muito estável (MOHRIAK e SZATMARI, 2008). Em química, a regra do octeto estabelece que os átomos tendem a combinarem-se para que existam oito elétrons em suas camadas de valência. Como o átomo de sódio possui um elétron em sua última camada e o átomo de cloro sete elétrons, a ligação química entre ambos ocorre a fim de estabilizá-los. Esse processo é chamado de ligação iônica, onde os dois átomos transformam-se em íons e, unidos, formam a halita. A Figura 11 mostra a formação da ligação química da halita.



**Figura 11:** O sódio tende a perder um elétron na ligação com o cloro para que ambos obtenham oito elétrons em suas camadas mais externas (KURTUS, 2015).

Devido ao fato da ligação ser iônica, os polos negativos e positivos acabam atraindo outros íons (CLUGSTON e FLEMMING, 2000). Na halita, cada íon é cercado por outros seis, de carga oposta. A estrutura cristalina formada é um padrão regular tridimensional de íons de sódio alternados com íons de cloro. As faces do cristal se distribuem formando um ângulo reto entre si. Os íons de cloro e sódio formam uma célula unitária, em que o centro de cada face é tomado por um dos íons (CLUGSTON e FLEMMING, 2000). Essa estrutura molecular reflete na forma cúbica macroscópica em que a halita é encontrada na natureza (MOHRIAK e SZATMARI, 2008). Na Figura 12 observa-se a estrutura de reticulado cristalino que forma os cristais de halita na forma em que é encontrado na natureza, mostrado na Figura 13.



**Figura 12:** Reticulado cristalino do cloreto de sódio (CLUGSTON e FLEMMING, 2000).



**Figura 13:** Cristal de halita (MOHRIAK e SZATMARI, 2008).

Uma característica química importante dos evaporitos está em seu potencial iônico (MOHRIAK e SZATMARI, 2008). Este potencial pode ser definido como a energia necessária para se retirar um elétron da última camada e está relacionado com a força da ligação atômica (CLUGSTON e FLEMMING, 2000). Os íons que formam os evaporitos possuem um grande raio atômico e pequena carga elétrica, possuindo, assim, um potencial iônico baixo.

O baixo potencial iônico é o que torna a halita facilmente solúvel em água. A água ao entrar em contato com a halita desprende facilmente as ligações entre os íons de cloro e de sódio. Outra propriedade que deriva do baixo potencial iônico é a alta mobilidade do sal. Devido à força que mantém os íons juntos ser pequena, qualquer esforço é capaz de deslocar os íons, que posteriormente formam novas ligações com íons adjacentes. É essa propriedade que torna a halita um composto intermediário entre um sólido e um líquido.

### **3.2) Propriedades físicas dos evaporitos**

As propriedades físicas do sal são decorrentes de seus componentes atômicos e de seu arranjo molecular. O estudo das propriedades é fundamental tanto para a tectônica de sal quanto para a perfuração de poços por camadas salíferas.

A halita, quando pura possui coloração branca ou incolor (Figura 13) e normalmente se apresenta com estrutura cristalina cúbica e baixo índice de refração. A Tabela 2 mostra algumas propriedades físicas da halita que serão posteriormente comentadas.

**Tabela 2:** Propriedades físicas da halita (MOHRIAK e SZATMARI, 2008).

Propriedade	Valor típico	Variação
Massa específica	2,2 g/cm <sup>3</sup>	2,11 - 2,22 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidade	10 <sup>14</sup> Pa.s	10 <sup>14</sup> Pa.s - 10 <sup>17</sup>
Condutividade termal	4,5 W/m/°C	-
Ponto de fusão	804 °C	-
Velocidade sísmica	4.500 m/s	4.200-5.000 m/s
Suscetibilidade magnética	0 cgs	-

### 3.2.1) Massa específica

A massa específica de 2,2 g/cm<sup>3</sup> é um valor médio do sal halita, variando de acordo com a mistura de outros sedimentos (MOHRIAK e SZATMARI, 2008). Segundo Poiate (2012), devido ao fato do sal ser praticamente incompressível, ao contrário de outras rochas, o sal consegue manter sua massa específica em uma larga faixa de variação de temperatura e pressão.

A manutenção da baixa massa específica mesmo a grandes profundidades contribui para a mobilidade das camadas evaporíticas soterradas, fazendo que cedam facilmente a esforços tectônicos, formando diápiros e trapas estruturais que propiciam a acumulação de hidrocarbonetos.

### 3.2.2) Viscosidade

A viscosidade é a resistência que um fluido possui de escoar. O sal possui uma viscosidade que atinge 1,016 Pa.s, o que o faz possuir um comportamento muito plástico. Ao longo de anos geológicos, o sal comporta-se de maneira muito semelhante a um fluido (MOHRIAK e SZATMARI, 2008). O comportamento viscoso do sal será melhor discutido no Capítulo 4.

### **3.2.3) Condutividade térmica**

A condutividade térmica da halita possui uma relação especial com o processo de geração de petróleo. Os corpos de sal podem servir de transporte de calor e afetar a temperatura das camadas sedimentares acima, adjacente ou abaixo dos diápiros ou camada de sal (MOHRIAK e SZATMARI, 2008). Como a temperatura é um dos fatores cruciais para a geração de hidrocarbonetos, as camadas de sal possuem essa importante contribuição.

De acordo com Poiate (2012), comparada a outras rochas, a condutividade térmica de halita é aproximadamente de duas a três vezes maior.

### **3.2.4) Ponto de fusão**

Em comparação com outras rochas, o ponto de fusão da halita é baixo. Camadas de sal que sobrepõe intrusões ígneas e extrusões vulcânicas muitas vezes passam para o estado líquido (MOHRIAK e SZATMARI, 2008), estado em que a camada se torna menos viscosa, aumentando ainda mais sua fluidez e mobilidade.

## Capítulo 4

### Comportamento mecânico dos evaporitos

As propriedades mecânicas dos evaporitos são fundamentais nas diversas aplicações existentes para as camadas de sal. Bradshaw e McClain (1971) relatam que a resistência à compressão dos evaporitos foi um dos fatores levados em consideração para deposição de detritos radioativos em formações salíferas. Na indústria petrolífera as propriedades mecânicas são importantes tanto para determinação do projeto de poço quanto para projetos que preveem armazenamento de hidrocarbonetos em cavernas salíferas (POIATE, 2012; SRIAPAI *et al.*, 2012).

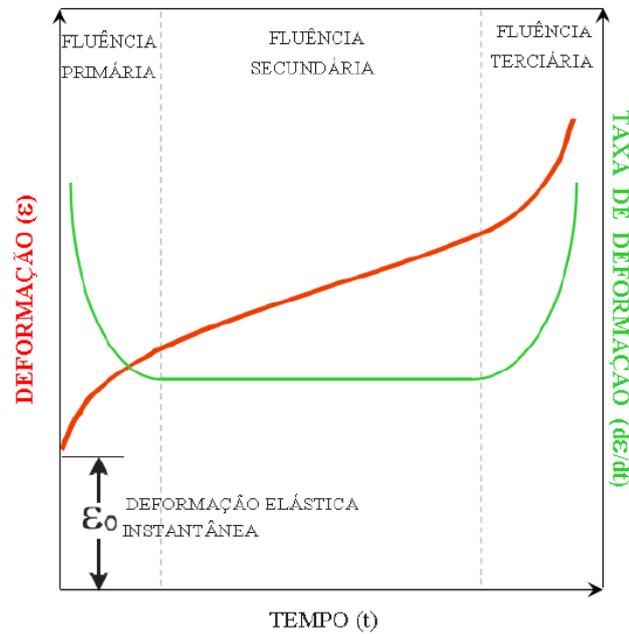
Através de ensaios mecânicos verifica-se que as rochas de sal apresentam comportamento viscoelástico. Em função do carregamento, temperatura e pressão de confinamento obtém-se um comportamento elástico ou viscoso. Para carregamentos em tempo curto o sal apresenta-se tão rígido quanto o concreto (MOHRIAK e SZATMAN, 2012).

O surgimento de deformações elásticas se dá através da variação no carregamento, enquanto que no comportamento viscoso obtém-se deformações mesmo sem alteração de carregamento, o que configura a fluência.

#### 4.1) Fluência

De acordo com Fjaer *et al.* (2008), a fluência é uma deformação dependente do tempo que ocorre no material sob tensão constante. O fenômeno de fluência está presente em todos os materiais e é responsável pelas deformações residuais mesmo sob ausência de alteração no estado de tensões submetidos ao material, segundo Costa e Poiate (2008). Poiate (2012) afirma que a fluência no sal pode afetar a determinação de propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

Tipicamente existem três estágios em uma curva de fluência, que podem ser identificados em uma curva deformação-tempo de materiais submetidos a um estado de tensões desviatório e temperatura constante no tempo (PLUIJM e MARSHAK, 2004; POIATE, 2012). A Figura 14 mostra uma típica curva de fluência.

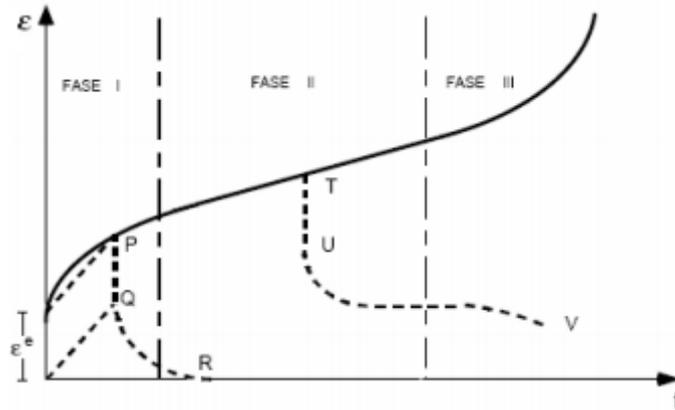


**Figura 14:** Curva típica de fluência (POIATE, 2012).

Analisando-se a Figura 14, nota-se o desenvolvimento de uma deformação quase instantânea no começo da aplicação de tensão. Essa reta quase vertical está associada ao desenvolvimento de deformações elásticas. A partir da deformação elástica, inicia-se o estágio primário de fluência, caracterizado por uma taxa de deformação decrescente. Segundo Costa e Poiate (2008) esse fenômeno está associado à redistribuição de tensão na rede cristalina após a deformação elástica. O primeiro estágio de fluência é também chamado de fluência transiente e, de acordo com Fjaer *et al.* (2008), se a tensão for reduzida a zero durante essa etapa, a deformação eventualmente será também reduzida a zero. Esse comportamento pode ser visto na Figura 15 onde a linha tracejada abaixo da curva representa o comportamento do material após súbita redução no nível de tensão.

O segundo estágio, conhecido como estágio secundário ou fluência estacionária, é caracterizado por uma constante taxa de deformação do material. Se a tensão for cessada durante esse estágio a deformação não irá desaparecer por completo. Essa fase de fluência implica em deformações permanentes no material (FJAER *et al.*, 2008).

Por fim, há a fase terciária de fluência que pode aparecer nos materiais. É caracterizada pelo aumento da taxa de deformação com o tempo e precede a ruptura do material.



**Figura 15:** Curva típica de fluência com comportamento para súbitas diminuições de tensão durante fases de fluência (BOTELHO, 2008).

De acordo com Costa e Poiate (2008), os modelos utilizados para descrever a fluência das rochas incluem as leis empíricas, leis físicas e leis fundamentadas em estruturas reológicas. Botelho (2008) afirma que os modelos muitas vezes descrevem apenas uma parte da curva típica de fluência.

#### 4.1.1) Modelos empíricos

Segundo Botelho (2008), os modelos empíricos buscam representar o fenômeno de fluência através de ajustes entre os resultados experimentais observados e a curva típica de fluência.

Costa (1984) afirma que a lei empírica mais utilizada na engenharia para descrever o comportamento de fluência de evaporitos foi apresentada por Lomenick (1971) e se dá por:

$$\dot{\epsilon}_f = Z \cdot \sigma^c \cdot T^b \cdot t^a \quad (4.1)$$

em que  $\dot{\epsilon}_f$  é a taxa de deformação acumulada de fluência,  $\sigma$  a tensão desviatória,  $T$  a temperatura absoluta,  $t$  o tempo e  $Z$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  são parâmetros obtidos em ensaios de fluência.

### 4.1.2) Modelos físicos

Costa e Poiate (2012) afirmam que modelos físicos buscam determinar a deformação por fluência através dos aspectos microestruturais que atuam a nível dos cristais e agregados granulares. Os efeitos de temperatura e o diferencial máximo de tensões ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) estão inclusos na formulação que é dada por:

$$\dot{\varepsilon}_f = A \cdot \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_0} \right)^n \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (4.2)$$

Na qual:

$\dot{\varepsilon}_f$  - taxa de deformação por fluência;

$A$  - constante empírica;

$\sigma_1$  - tensão principal máxima;

$\sigma_3$  - tensão principal mínima;

$n$  - gradiente obtido no diagrama  $\ln(\dot{\varepsilon})$  versus  $\ln(\sigma_1 - \sigma_3)$ ;

$Q$  - energia de ativação associada a um determinado mecanismo;

$R$  - constante universal dos gases;

$T$  - Temperatura absoluta;

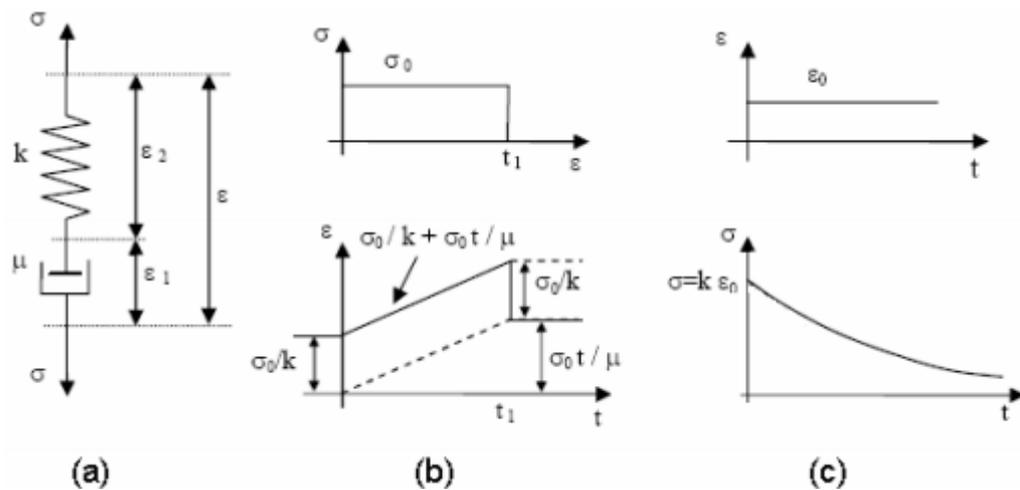
$\sigma_0$  - Módulo de cisalhamento transversal (G)

### 4.1.3) Modelos reológicos

Modelos reológicos são construídos para representar como a deformação varia em função do tempo. Podem ser simplificados através da descrição com elementos tais como molas e amortecedores, sendo capazes de simular tensões e deformações de materiais viscoelásticos sob carregamento uniaxial (BOTELHO, 2008).

### 4.1.3.1) Modelo de Maxwell

O comportamento viscoelástico pode ser caracterizado através de elementos representando uma mola e um amortecedor ligados em série, como mostrado na Figura 16. No modelo reológico conhecido como modelo de Maxwell, a tensão é elástica em um primeiro momento, mas logo torna-se viscosa. Quando a tensão é retirada, a parte elástica da deformação retorna ao seu valor original, enquanto a componente viscosa, representada pelo amortecedor, mantém-se.



**Figura 16:** Modelo de Maxwell (a) e representação de suas curvas típicas (b) e (c)  
(BOTELHO, 2008)

Segundo Pluijm e Marshak (2004), a equação constituinte do modelo de Maxwell é dada por:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\sigma} / E + \sigma / \mu \quad (4.3)$$

Na qual:

$\dot{\epsilon}$  - taxa de deformação

$\dot{\sigma}$  - taxa de tensão

$E$  - módulo de elasticidade

$\mu$  - viscosidade do material

Uma maneira efetiva para se determinar se os efeitos de viscosidade predominam sobre os efeitos elásticos é determinando o tempo de relação,  $t_M$ , obtido pela divisão da viscosidade pelo módulo de cisalhamento do material.

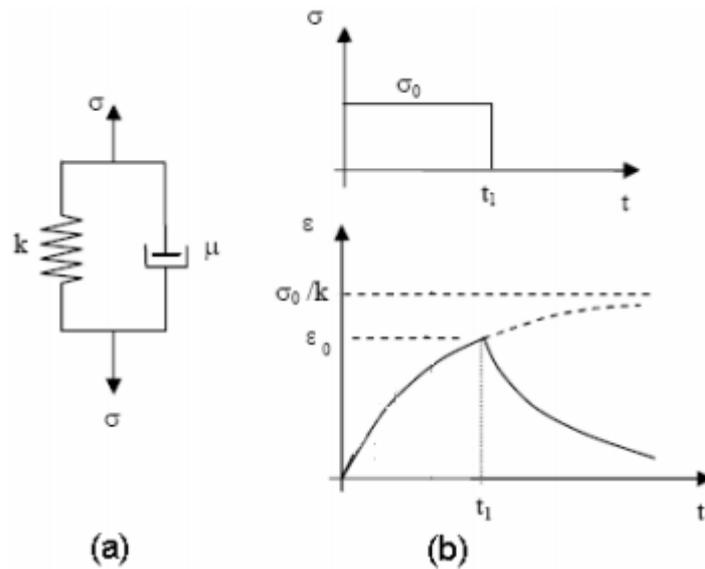
$$t_M = \frac{\mu}{G} \quad (4.4)$$

Casos em que  $t_M$  é maior que o módulo de elasticidade indicam dominância dos efeitos viscosos sobre a elasticidade.

#### 4.1.3.2) Modelo de Kelvin

Outro modelo reológico importante para comportamentos viscosos é o modelo de Kelvin, que pode ser visualizado na Figura 17. Nele os elementos mola e amortecedor estão ligados em paralelo de forma que, quando se aplica um carregamento de tensão ao material, sua deformação será lenta devido ao elemento de amortecimento. De mesma forma, ao ser cessada a tensão, o retorno elástico se dará de maneira gradual e lenta, também devido ao amortecedor. Esse tipo de modelo pode ser visualizado na Figura 17. Pluijm e Marshak (2004) mostram que a equação constitutiva desse modelo reológico é dada por:

$$\sigma = E.e + \mu.\dot{e} \quad (4.5)$$



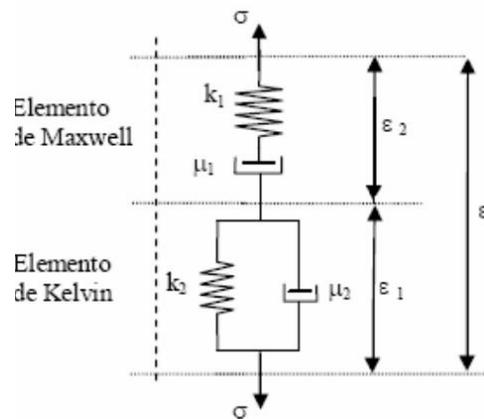
**Figura 17:** Modelo de Kelvin e curvas típicas (BOTELHO, 2008)

#### 4.1.3.3) Modelo de Burgers

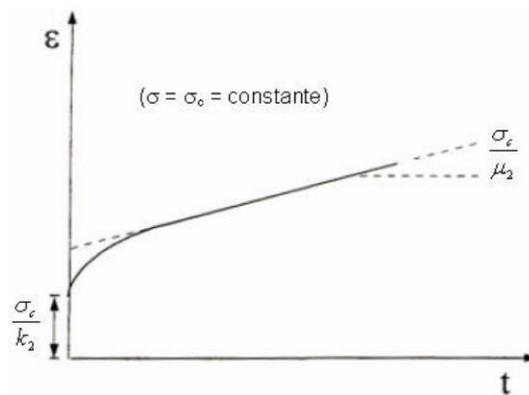
A fim de minimizar as inconsistências dos modelos anteriores, foi proposto um modelo reológico combinando ambos modelos anteriores. Esse modelo, conhecido como modelo de Burgers apresenta os elementos de Maxwell ligados em série com os elementos de Maxwell, como mostra a Figura 18.

Analisando a curva deformação-tempo da Figura 19 percebe-se que este modelo é o mais se assemelha ao comportamento de materiais que apresentam fluência, como o caso dos evaporitos. Sua equação constitutiva é dada por Botelho (2008):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{k_2} + \frac{\sigma}{k_1} \left( 1 - e^{-\frac{k_1 t}{\eta_1}} \right) + \frac{\sigma}{\eta_2} t \quad (4.6)$$



**Figura 18:** Modelo de Burgers (BOTELHO, 2008).



**Figura 19:** Curva deformação-tempo, do modelo de Burgers (BOTELHO, 2008).

#### 4.2) Propriedades mecânicas no comportamento elástico do sal

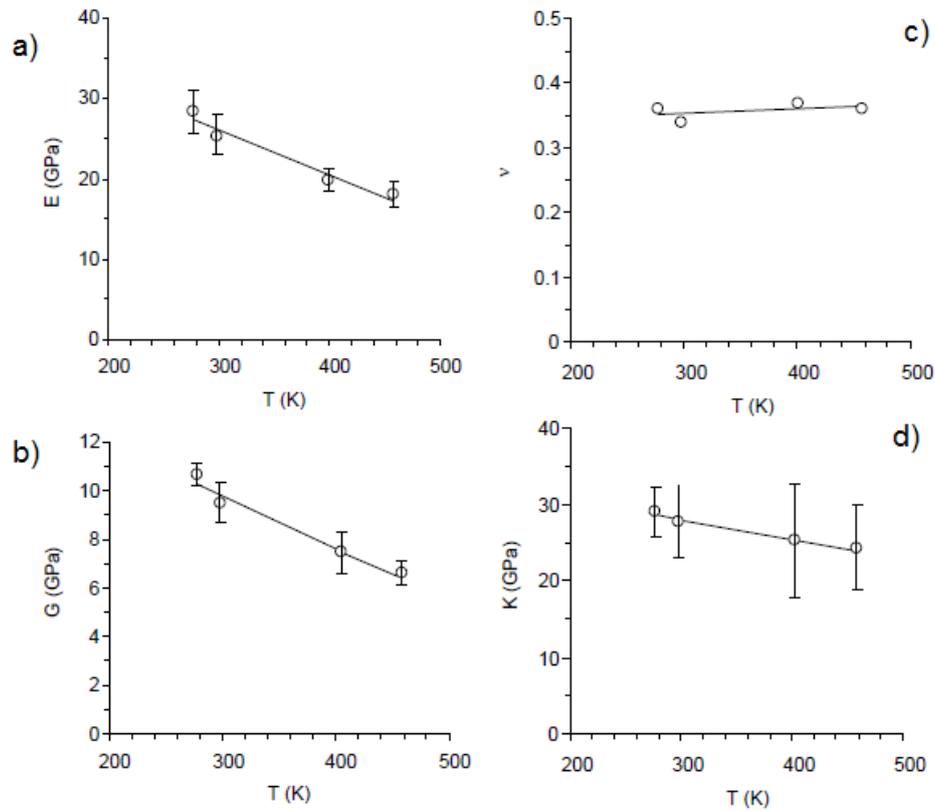
A fim de analisar a estrutura de cavernas salíferas para deposição de gás natural, Sriapai *et al.* (2012) realizaram diversos ensaios para estudo dos efeitos da temperatura e pressão de confinamento da ruptura do sal. Os ensaios foram realizados a uma taxa de 1 MPa/s. Pelas tensões de ruptura observadas, verifica-se que os ensaios levaram no máximo 2 minutos. Essa taxa foi usada para evitar o comportamento viscoso do sal, obtendo parâmetros de ruptura em função do confinamento (maior confinamento, maior resistência) e temperatura (maior temperatura, menor resistência). Os resultados dos módulo de elasticidade  $E$ , coeficiente de Poisson  $\nu$ , módulo de cisalhamento  $G$ , e módulo de compressibilidade  $K$ , podem ser observados em função da tensão normal média  $\sigma^m$ , e tensão cisalhante  $\tau$ , na Tabela 3.

**Tabela 3:** Parâmetros elásticos do sal (SRIAPAI *et al.*, 2012).

T (K)	$\sigma^m$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	E (GPa)	$\nu$	G (GPa)	K (GPa)
274	23,2	28,6	27,1	0,38	9,8	37,6
	29,3	34,4	29,1	0,42	10,2	60,6
	38,9	40,8	28,7	0,32	10,9	26,6
	46,5	44,5	29,1	0,34	10,9	30,3
	52,9	46,5	27,1	0,37	9,9	34,7
	65,0	49,5	29,5	0,35	10,9	32,8
	Média $\pm$ DP		28,4 $\pm$ 0,9	0,36 $\pm$ 0,04	10,4 $\pm$ 0,4	37,1 $\pm$ 3,2
298	17,4	22,3	21,0	-	-	-
	22,3	27,3	27,0	0,35	10,0	30,0
	28,9	33,8	26,8	0,36	9,9	31,9
	37,7	39,1	27,5	0,31	10,5	24,1
	45,0	42,4	24,0	0,34	9,0	24,2
	51,1	44,0	21,5	0,34	8,0	22,4
	62,8	46,4	26,4	0,37	9,6	33,8
Média $\pm$ DP		25,5 $\pm$ 2,1	0,34 $\pm$ 0,02	9,5 $\pm$ 0,8	27,8 $\pm$ 4,8	
404	16,4	20,9	18,7	-	-	-
	19,5	23,3	20,1	0,36	7,4	23,9
	25,2	28,6	22,3	0,42	8,1	31,0
	33,5	33,3	19,8	0,41	7,0	36,7
	39,6	34,8	17,5	0,30	6,6	17,2
	45,3	35,8	20,9	0,32	7,9	19,4
	57,0	38,2	21,1	0,35	7,8	23,4
Média $\pm$ DP		20,0 $\pm$ 1,5	0,37 $\pm$ 0,05	7,5 $\pm$ 0,5	25,3 $\pm$ 7,3	
467	20,0	21,2	17,5	0,36	6,4	20,8
	29,1	27,1	16,2	0,34	6,0	16,9
	35,7	29,3	18,5	0,40	6,6	30,8
	41,3	30,1	20,0	0,36	7,4	23,8
	52,4	31,6	17,3	0,34	6,5	18,0
	Média $\pm$ DP		18,1 $\pm$ 1,4	0,36 $\pm$ 0,02	6,6 $\pm$ 0,5	22,1 $\pm$ 5,6

Falar em módulo de elasticidade constante, ou rigidez, só faz sentido para o sal quando este se encontra rígido como, por exemplo, sob cargas em curto período de tempo. Em função do seu comportamento viscoso o sal tende a fluir e, justamente por isso, observa-se um comportamento de mobilidade similar a um líquido das camadas salíferas ao longo dos anos geológicos.

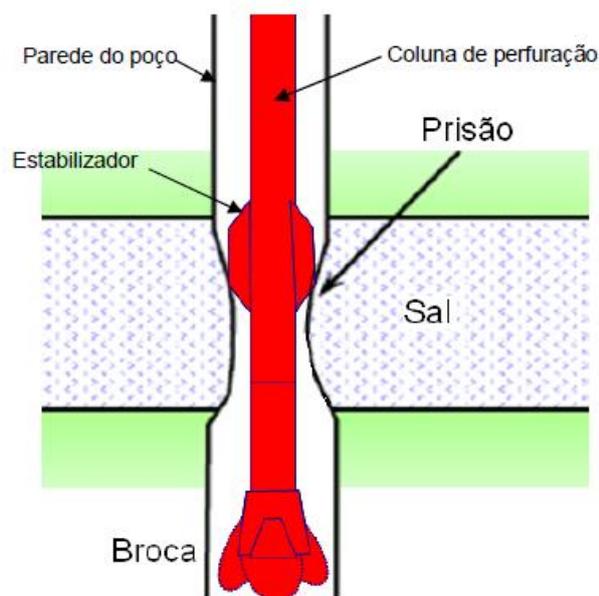
As propriedades mecânicas a serem utilizadas devem ser analisadas de acordo com a necessidade de operação, sendo a temperatura um parâmetro importante a ser considerado para este material. A Figura 20 mostra propriedades mecânicas do sal em seu comportamento elástico e como são afetadas pela temperatura.



**Figura 20:** Relação dos parâmetros elásticos do sal com temperatura (SRIAPAI *et al.*, 2012).

Analisando os gráficos dos resultados de Sriapai *et al.* (2012) percebe-se um decaimento linear das propriedades mecânicas com o aumento da temperatura, com exceção do coeficiente de Poisson, que apesar de mostrar uma menor dependência da temperatura apresenta um comportamento contrário, aumentando o seu valor com a temperatura.

O conhecimento do comportamento elástico do sal é fundamental em operações como as de perfuração de poços e injeções de resíduos, onde é necessário desenvolver análises que permitam prever o estado de tensão da camada de sal durante estas operações. Já o estudo do comportamento viscoso de evaporitos é necessário, por exemplo, na análise de integridade do poço ao longo do tempo. De acordo com Poiate (2012), a deformação na camada salífera tende a ovalizar e até mesmo obstruir a perfuração, como ilustra a Figura 21.



**Figura 21:** Prisão da coluna de perfuração (POIATE, 2012).

### 4.3) Critérios de falha

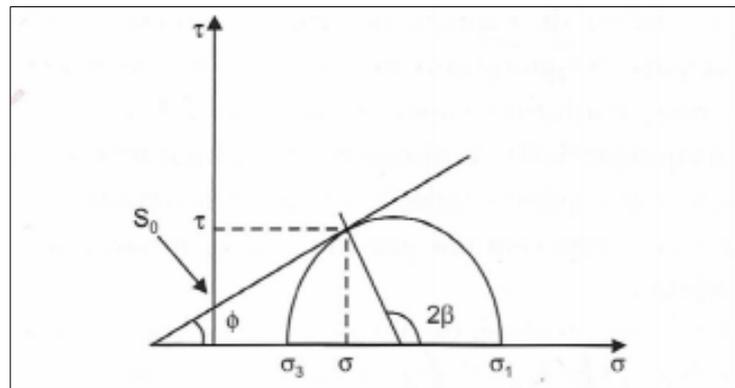
Segundo Fjaer *et al.* (2008), quando uma rocha é submetida a tensões suficientemente grandes, algum tipo de falha ocorrerá. Isso significa que haverá mudanças permanentes em seu formato ou mesmo ocorrer falhas por ruptura. A falha nas rochas provoca significativas perdas na capacidade de suportar carregamentos, isto é, influencia diretamente em suas propriedades mecânicas.

Ainda de acordo com Fjaer *et al.* (2008), a causa mais comum de falhas em rochas se deve a falha por cisalhamento, causada por excessiva tensão de cisalhamento. Outro tipo de falha bastante observado é devido ao excesso de tensão normal. Por fim, é observado em rochas porosas um tipo de falha denominado colapso de poros, que não ocorrem em rochas evaporíticas pela ausência de poros.

A falha de um material pode ser prevista através de critérios de falha que podem estar relacionados a falhas associadas à deformação permanente ou à ruptura do mesmo. Rocha e Azevedo (2009) citam que um dos critérios de ruptura por cisalhamento devido à compressão mais utilizados na indústria de petróleo é o critério de Mohr-Coulomb, sendo este normalmente escolhido por sua simplicidade.

### 4.3.1) Critério de Mohr-Coulomb

O critério de Mohr-Coulomb baseia-se na construção de círculos de Mohr que descrevam estados de tensão onde a ruptura da rocha tenha ocorrido (ROCHA e AZEVEDO, 2009). O critério é definido pela reta tangente que toca todos os círculos de Mohr de forma que se um estado de tensões atuante na rocha atingir essa reta, diz-se que a rocha irá falhar. A Figura 22 ilustra uma Círculo de Mohr com uma reta tangente, chamada de envoltória.



**Figura 22:** Esquema para definição do critério de Mohr-Coulomb (ROCHA e AZEVEDO, 2009).

Pode-se estabelecer a equação da reta que define o critério de falha de Mohr-Coulomb em termos da tensão normal e cisalhante:

$$\tau = S_0 + \tan(\phi) \cdot \sigma \quad (4.7)$$

onde o ângulo  $\phi$ , chamado de ângulo de atrito interno, descreve a taxa de incremento da tensão cisalhante com a tensão normal, enquanto que a constante  $S_0$ , chamada de coesão da rocha, é o ponto em que a envoltória corta o eixo y.

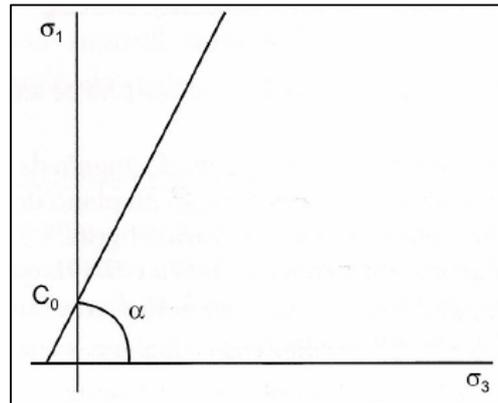
De acordo com Rocha e Azevedo (2009), pode-se plotar o critério de Mohr-Coulomb no espaço  $\sigma_1 \times \sigma_3$ , obtendo-se uma reta dada por:

$$\sigma_1 = C_0 + \sigma_3 \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad (4.8)$$

Em que:

$$C_0 = 2S_0 \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4.9)$$

A Figura 23 ilustra a reta do critério de Mohr-Coulomb em um espaço  $\sigma_1 \times \sigma_3$ , onde a grande vantagem é que o estado de tensão em termos das tensões principais passam a ser representado por um ponto ao invés de um círculo.



**Figura 23:** Critério de ruptura de Mohr-Coulomb no espaço  $\sigma_1 \times \sigma_3$  (ROCHA e AZEVEDO, 2009).

#### 4.3.2) Critério de Hoek-Brown generalizado

Ma *et al* (2012) avaliaram cinco critérios de falha, comparando-os com dados da resistência de rochas evaporíticas obtidos por ensaios mecânicos sob diversas tensões, a fim de descobrir qual critério descrevia melhor o comportamento mecânico das rochas salíferas. O critério que apresentou melhor resultado nesse estudo foi o critério de Hoek-Brown generalizado.

De acordo com Ma *et al* (2012), o critério pode ser expressado como:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4.10)$$

no qual,  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  são as tensões principais máxima e mínima,  $\sigma_{ci}$  é a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, e  $m_b$  é o valor reduzido da constante do material  $m_i$ , onde:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{I_{GS} - 100}{28 - 14D}\right) \quad (4.11)$$

sendo que,  $s$  e  $l$  são constantes que dependem das características da massa rochosa:

$$s = \exp\left(\frac{I_{GS} - 100}{9 - 3D}\right) \quad (4.12)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-I_{GS}/15} - e^{-20/3}) \quad (4.13)$$

onde  $D$  é o fator que confere o grau de perturbação da massa rochosa, variando de 0 a 1. O índice de força geológica,  $I_{GS}$ , é um parâmetro que leva em conta o formato geométrico e condições de articulação entre faces.

## Capítulo 5

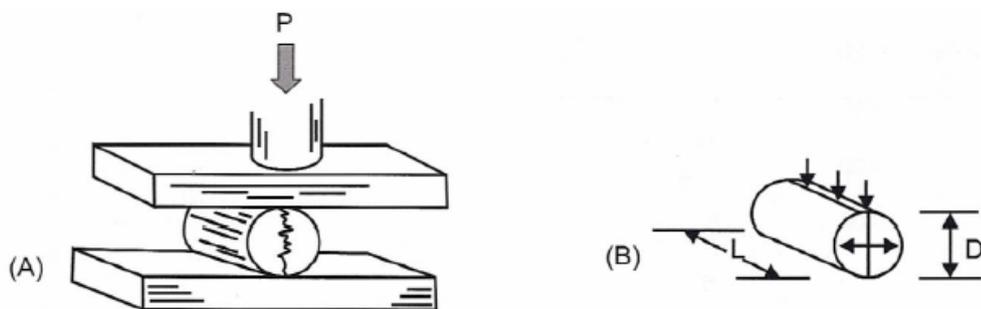
### Ensaio mecânicos

Ensaio mecânicos são necessários para a obtenção das propriedades mecânicas dos evaporitos. Neste capítulo apresentam-se os principais tipos de ensaio mecânicos utilizados para determinação de diversos parâmetros do sal além de resultados disponíveis na literatura.

#### 5.1) Ensaio brasileiro

Para se determinar a resistência a compressão de evaporitos utiliza-se o ensaio brasileiro, também conhecido como ensaio de compressão diametral ou de tração indireta. Este ensaio é assim conhecido pois foi proposto pelo engenheiro brasileiro Fernando Luiz Lobo Carneiro (GUERRA, 2013).

Rocha e Azevedo (2009) explicam que neste tipo de ensaio aplica-se uma carga de compressão no corpo de prova, tracionando-o no plano contendo o eixo do cilindro e as cargas de compressão, até haver ruptura. A resistência a tração é estimada no pico do carregamento a compressão. Segundo Li e Wong (2012) a compressão provoca tensões trativas normais à linha vertical central na região do centro do corpo de provas. A Figura 24 ilustra um típico ensaio brasileiro, que apresentam uma excelente alternativa a ensaios uniaxiais em amostras geológicas, uma vez que estes últimos apresentam diversas dificuldades operacionais.



**Figura 24:** Ensaio brasileiro (A) e corpo de prova a ser utilizado (B) (ROCHA e AZEVEDO, 2009).

De acordo com Li e Wong (2012), a resistência à tração indireta é calculada baseada na premissa de que a falha ocorre no ponto com valor máximo de tensão trativa, ou seja, no centro do disco. A fórmula sugerida para cálculo da resistência a tração neste tipo de ensaio é dada, de acordo com Li e Wong (2012), por:

$$\sigma_b = \frac{2P}{\pi.d.e} = 0,636 \frac{P}{d.e} \quad (5.1)$$

onde  $P$  é o carregamento no momento de falha,  $d$  é o diâmetro do corpo de prova e  $e$  é a espessura do corpo de prova medida em seu centro.

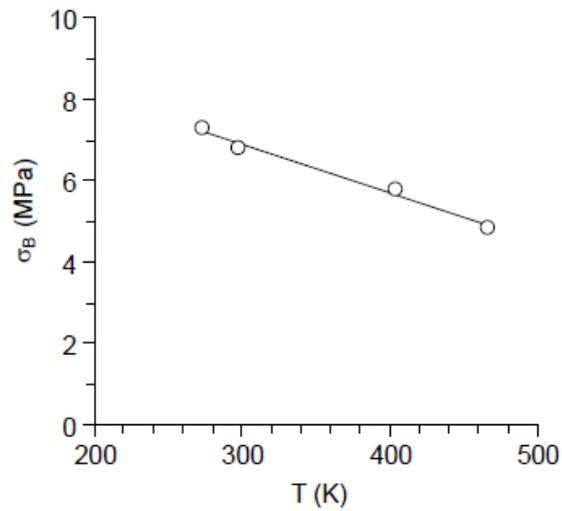
Ainda segundo Li e Wong (2012), é pressuposto para fins de cálculos da resistência à tração indireta que a tensão principal intermediária,  $\sigma_2$ , não possua influência na fratura do disco. É pressuposto também que o material seja considerado homogêneo, isotrópico e linearmente elástico até o momento da fratura, que deve iniciar-se no centro do corpo de prova.

Li e Wong (2012) mostram ainda uma solução analítica completa de tensões ao longo do diâmetro carregado para o caso de carregamento sobre arcos finitos.

Sriapai *et al.* (2012) realizaram diversos ensaios brasileiros sob diferentes temperaturas, cujo resultados podem ser vistos na Tabela 4 e são apresentados graficamente na Figura 25.

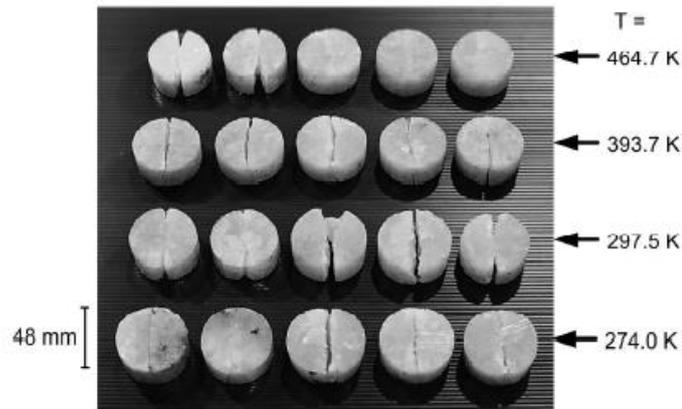
**Tabela 4:** Ensaio brasileiro com amostras de sal sob diversas temperaturas (SRIAPAI *et al.*, 2012).

Ensaio	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	T (K)	$\sigma_B$ (MPa)
BZ 1-10	2,12 ± 0,01	274,0 ± 3,1	7,3 ± 0,51
BZ 11-20	2,10 ± 0,05	297,5 ± 0,8	6,0 ± 0,60
BZ 21-30	2,21 ± 0,04	393,7 ± 5,1	5,8 ± 0,84
BZ 31-40	2,09 ± 0,04	464,7 ± 4,5	4,8 ± 0,42



**Figura 25:** Resultado do ensaio brasileiro exposto graficamente (SRIAPAI *et al.*, 2012).

Analisando a Figura 25 pode-se notar que a resistência do sal no ensaio brasileiro decai linearmente com o aumento da temperatura. O aspecto final dos evaporitos ensaiados podem ser vistos na Figura 26.

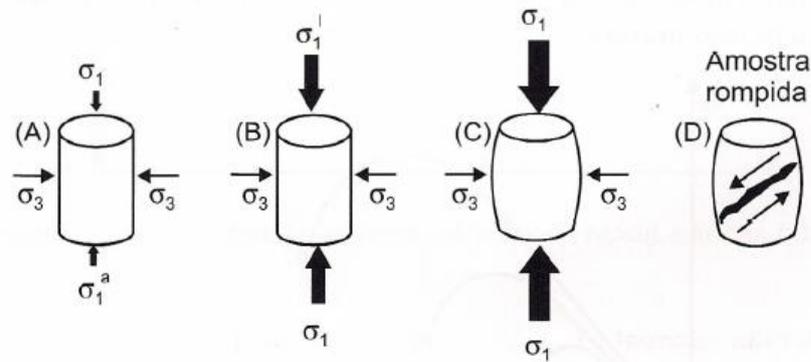


**Figura 26:** Corpos de prova após ensaio brasileiro realizado em diversas temperaturas (SRIAPAI *et al.*, 2012).

## 5.2) Ensaio triaxial

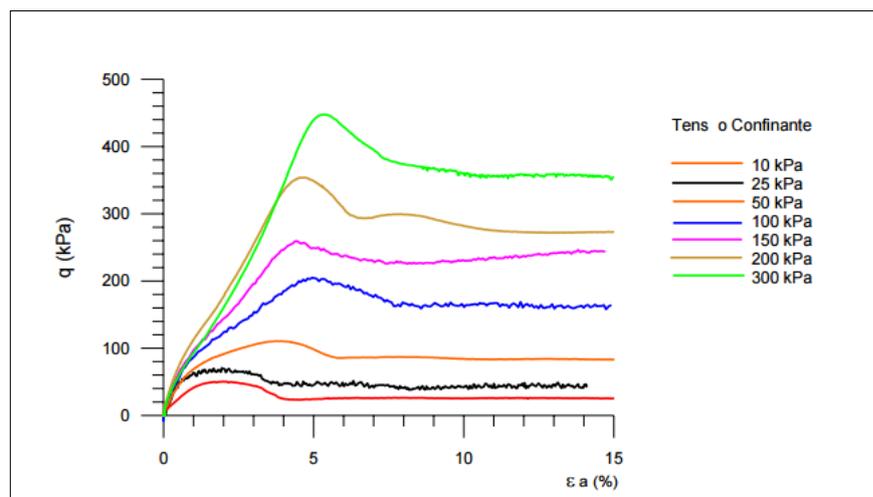
Nos ensaios triaxiais, o corpo de prova fica submetido a tensões nas três direções ortogonais. A Figura 27 ilustra sequencialmente um ensaio triaxial, mostrando que a tensão

normal,  $\sigma_1$ , é aumentada progressivamente até à ruptura do material enquanto as tensões confinantes,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ , que possuem o mesmo valor, são mantidas constante durante o ensaio.



**Figura 27:** Ilustração esquemática de um ensaio triaxial (ROCHA e AZEVEDO, 2009).

As tensões necessárias para rompimento de um corpo de prova são maiores em ensaios triaxiais do que em ensaios uniaxiais. Isso indica que a resistência dos materiais aumenta quando há presença de tensões de confinamento. Este tipo de ensaio é útil pois materiais geológicos, como rochas evaporíticas, estão sempre sob tensões confinantes devido às camadas adjacentes. Ferreira (2008) mostra em seus estudos curvas tensão x deformação para o arenito, onde também se observa o aumento da resistência para tensões confinantes mais altas. As curvas podem ser visualizadas na Figura 28.



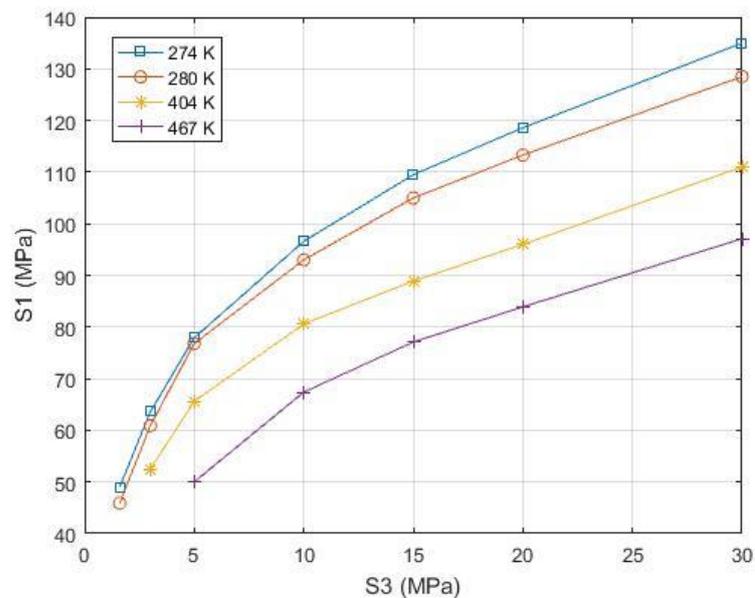
**Figura 28:** Curvas tensão x deformação de ensaios triaxiais no arenito (FERREIRA, 2008).

Os resultados de ensaios triaxiais realizados por Sriapai *et al.* (2012) podem ser vistos na Tabela 5. Este ensaio foi realizado sob alta taxa de carregamento (1 MPa/s) a fim de evitar-

se o comportamento de fluência do sal. O resultado de  $\sigma_1$  observado na tabela representa o valor da tensão vertical aplicada no momento em que ocorre a falha, sob determinada tensão confinante  $\sigma_3$ . Por exemplo, a uma temperatura de 274 K e uma tensão confinante de 1,6 MPa a tensão  $\sigma_1$  que levou o material a fratura foi de 49 MPa. Pela taxa de compressão, verifica-se que este ensaio levou apenas 49 s. Na Figura 29 é possível observar os diversos resultados obtidos do ensaio triaxial para os quais  $\sigma_1$  é representada em função de  $\sigma_3$ .

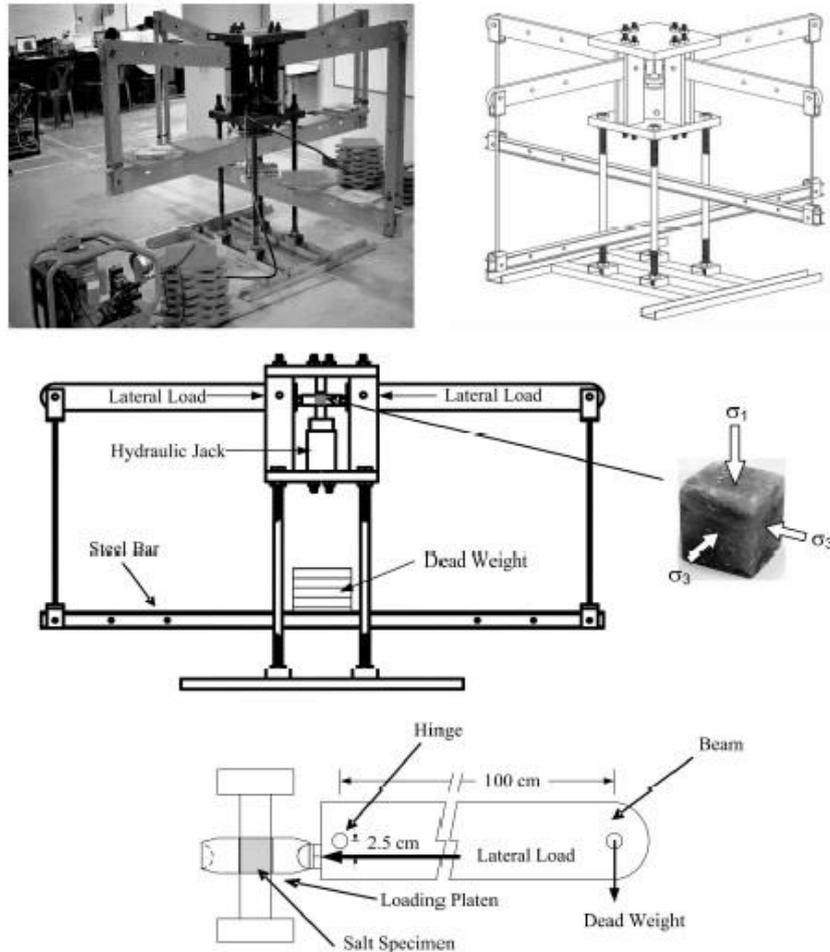
**Tabela 5:** Resultados de ensaios triaxiais realizados a uma progressão de  $\sigma_1$  de 1 MPa/s (SRIAPAI *et al.*, 2012).

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)			
	274 K	280 K	404 K	467 K
1,6	49,0	45,9	-	-
3	63,6	60,9	52,5	-
5	77,9	76,8	65,6	50,0
10	96,6	93,0	80,6	67,4
15	109,5	105,0	88,9	77,1
20	118,6	113,3	96,0	83,9
30	135,0	128,5	111,0	97,1



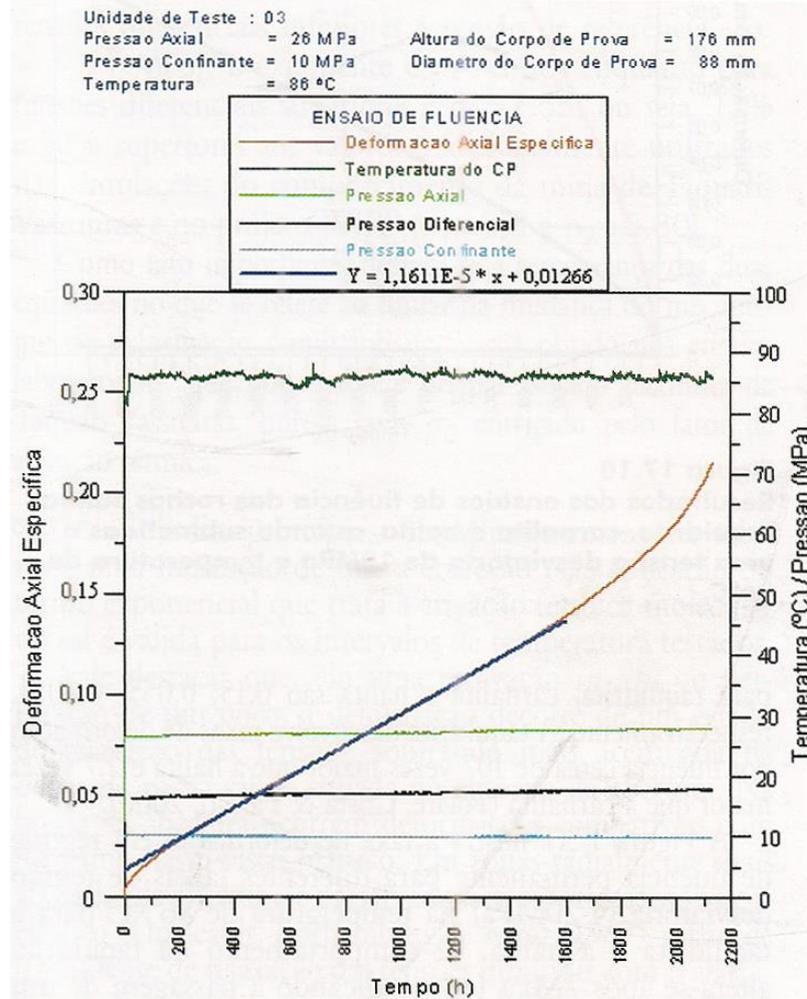
**Figura 29:** Resultados obtidos por Sriapai *et al.* (2012) representados no espaço  $\sigma_3 \times \sigma_1$ .

Para realização deste ensaio, Sriapai *et al.* (2012) desenvolveram uma máquina de carregamento multiaxial que pode ser vista na Figura 30. Duas vigas engastadas são utilizadas para aplicação das forças laterais. As extremidades dessas vigas são puxadas para baixo através da ação do peso morto, fazendo com que a flexão imprima uma força de compressão no corpo de prova. A força vertical é aplicada por um macaco hidráulico.



**Figura 30:** Máquina para realização do ensaio triaxial (SRIAPAI *et al.*, 2012).

Segundo Costa e Poiate (2008) ensaios triaxiais de longa duração podem servir para determinação de propriedades viscosas dos evaporitos. A Figura 31 apresenta a curva deformação x tempo para um ensaio triaxial de longa duração. Nessa curva pode-se observar o primeiro estágio de fluência, após 200 h, e o terceiro estágio, após 1700 h de ensaio.



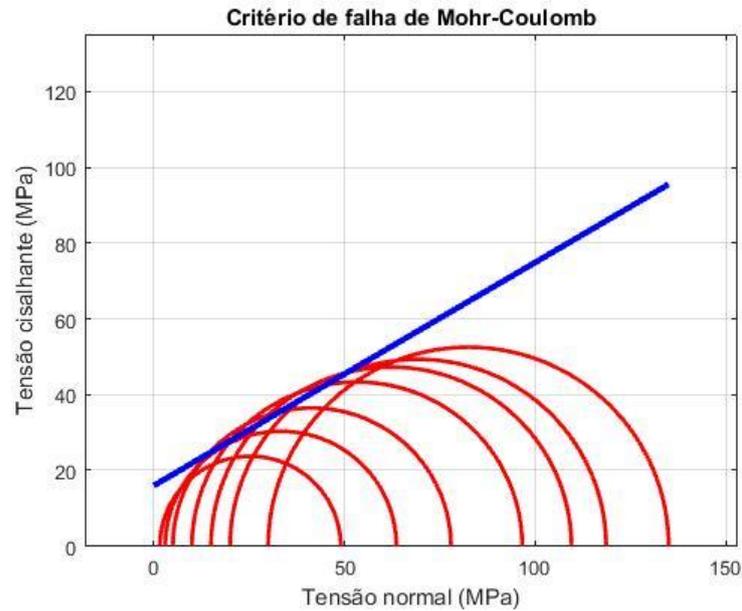
**Figura 31:** Ensaio triaxial para obter curva de fluência (MOHRIAK e SZATMARI, 2008).

### 5.2.1) Critério de falha de Mohr-Coulomb em rochas evaporíticas

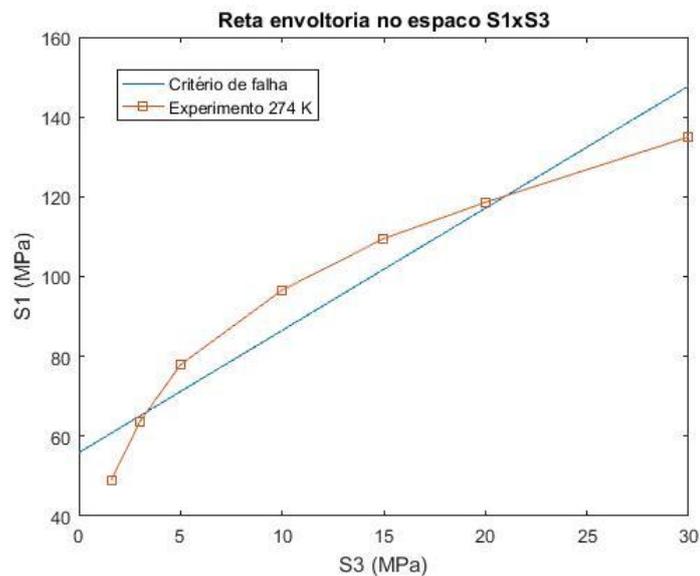
Com o objetivo de permitir aplicar o critério de Mohr-Coulomb a rochas evaporíticas foi elaborado uma rotina codificada em MATLAB. A rotina possui a função de plotar círculos de Mohr através de dados de um ensaio triaxial e traça a reta envoltória que melhor se adequa aos círculos de Mohr. O programa, que encontra-se no Apêndice A, é capaz de traçar a reta envoltória tanto no espaço  $\sigma \times \tau$  quanto no espaço  $\sigma_3 \times \sigma_1$ . Ele ainda identifica se pontos imputados pelo usuário representam uma situação de falha ou não pelo critério estabelecido.

Utilizando os dados obtidos experimentalmente por Sriapai *et al.* (2012), expostos na Tabela 5, obteve-se os círculos de Mohr e a reta envoltória do critério de falha de Mohr-Coulomb para rochas evaporíticas nas diversas temperaturas de ensaio realizadas. A Figura 32

mostra os círculos de Mohr e a reta envoltória para o ensaio triaxial a 274 K, enquanto a Figura 33 mostra a reta envoltória do critério de falha em comparação com os dados experimentais.



**Figura 32:** Círculos de Mohr e reta envoltória para temperatura de 274 K.



**Figura 33:** Reta envoltória e dados experimentais a 274 K no espaço  $\sigma_3 \times \sigma_1$ .

Analisando a Figura 33, apesar do critério de falha apresentar uma boa concordância com os dados experimentais, percebe-se que o critério de falha proposto é conservativo para tensões confinantes na faixa de 3 MPa a 20 MPa, mas para tensões acima e abaixo dessa faixa

prevê tensões de falha superiores às obtidas nos experimentos. Em função da pequena quantidade de dados experimentais seria interessante a realização de novos ensaios para uma melhor avaliação e para a calibração do critério.

### 5.3) Ensaio de velocidades elásticas

O ensaio de velocidades elásticas é um ensaio dinâmico que se destina obter o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do material. Por ser um ensaio não destrutivo, evita-se o comportamento viscoso do corpo de prova.

Este tipo de ensaio consiste em propagar ondas sísmicas, compressionais e cisalhantes e determinar a velocidade em que elas trafegam no material. Define-se  $V_p$  a velocidade da onda compressional e  $V_s$  da onda cisalhante.

Segundo Justen (2014), as propriedades mecânicas do material podem ser obtidas pelas equações abaixo:

Módulo de compressibilidade ( $K$ ):

$$K = \rho \cdot \left( V_p^2 - \left( \frac{4}{3} \right) V_s^2 \right) \quad (5.1)$$

Módulo de cisalhamento ( $G$ ):

$$G = \rho \cdot (V_s^2) \quad (5.2)$$

Razão de Poisson ( $RP$ ):

$$\nu = \frac{1}{2} \left( \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) \quad (5.3)$$

Módulo de Young ( $E$ ):

$$E = 3K \cdot (1 - 2\nu) \quad (5.4)$$

Resultados do ensaio realizado por Justen (2014) podem ser visualizados na Tabela 6.

**Tabela 6:** Resultado de velocidade elásticas para halita (JUSTEN, 2014).

$K$ (GPa)	$G$ (GPa)	$E$ (GPa)	$\nu$
24,83 ± 0,69	14,64 ± 0,47	36,69 ± 0,88	0,25 ± 0,01

## Capítulo 6

### Análises numéricas

As análises numéricas possuem fundamental importância em problemas complexos e podem servir de ferramenta para determinação de como as tensões se distribuem ao longo da camada salífera. Neste capítulo são apresentados modelos numéricos baseados no método de elementos finitos, desenvolvidos para prever o estado de tensões em evaporitos para algumas situações.

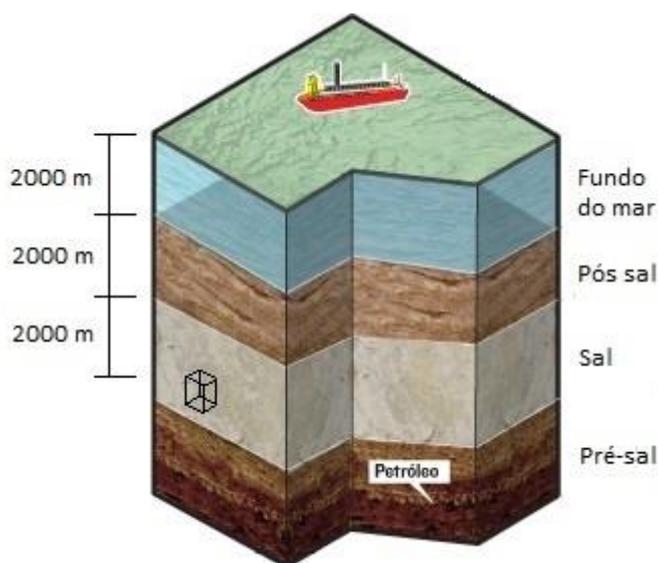
A análise em elementos finitos foi realizada com intuito de simular o comportamento do sal sob situações que serão aqui descritas. O pacote computacional empregado para realização das análises foi o Ansys Mechanical APDL 15.0. Os modelos foram desenvolvidos utilizando a linguagem APDL (Ansys Parametric Design Language) para permitir a parametrização dos modelos.

É importante ressaltar que todas as análises numéricas foram realizadas no regime linear elástico e, por esse motivo, os modelos preveem tensões maiores do que ocorreria na realidade, já que o sal pode se plastificar, como ocorre com os arenitos nas curvas observadas na Figura 28.

Todas as linhas de comando utilizadas nas simulações dos casos através da linguagem APDL estão disponíveis no Apêndice.

#### 6.1) Estudos de caso

Os estudos de caso foram desenvolvidos considerando os ensaios experimentais de Sriapai *et al.* (2012) e, como caso real, na estratigrafia típica da Bacia de Campos de acordo com Botelho (2008). Assim, a camada de sal objeto de estudo é considerada isotrópica e linear sob as condições de ensaio de Sriapai *et al.* (2012) e a uma profundidade total de 6.000 metros, sendo 2.000 sob profundidade do oceano, 2.000 sob camada de pós sal e ainda sob 2.000 sob a própria camada de sal no caso real. A Figura 34 ilustra o parâmetro básico de simulação para o caso real.



**Figura 34:** Esquema de seção de sal simulada no caso real.

A Tabela 7 mostra os pesos específicos dos componentes das camadas de acordo com Botelho (2008) enquanto que a Tabela 8 mostra os parâmetros elásticos do sal utilizados, considerando o sal a uma temperatura de 274 K.

**Tabela 7:** Pesos específicos de materiais das camadas (BOTELHO, 2008).

Tipo de material	Profundidade	Peso específico	Tensão $\sigma_z$
Lâmina de água	0 m a - 2000 m	1018,52 kg/m <sup>3</sup>	19,98 MPa
Outros estratos	-2000 m a -4000 m	2306,66 kg/m <sup>3</sup>	45,24 MPa
Estratos de sal	-4000 m a - 6000 m	2160 kg/m <sup>3</sup>	42,36 MPa
Total de $\sigma_z$ na profundidade de estudo			107,58 MPa

**Tabela 8:** Parâmetros elásticos do sal utilizados

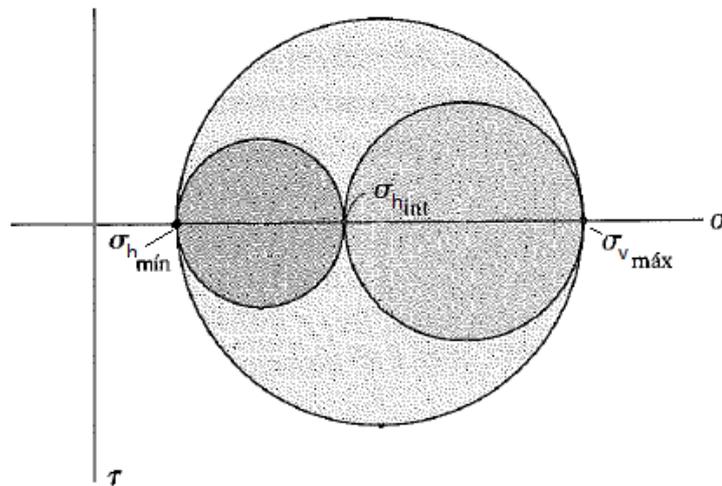
Propriedade	Valor
Módulo de elasticidade	28,4 GPa
Coefficiente de Poisson	0,36

As simulações foram feitas utilizando modelos tridimensionais e bidimensionais, estes últimos com recurso de axissimetria com objetivo de reduzir os esforços de processamento computacionais. O caso mais complexo de estudo foi analisar a região salina ao ser perfurado, inicialmente, por um poço de 0,31 m de diâmetro. Foram analisadas, a princípio, regiões com uma área transversal de lado vinte vezes o diâmetro do poço, com objetivo de reduzir os efeitos de borda.

## 6.2) Metodologia de avaliação dos casos

A metodologia aplicada na avaliação dos casos simulados baseia-se nos valores máximos e mínimos de tensões obtidas numericamente. Em todos os casos a tensão vertical é conhecida, advindas de ensaios experimentais ou do peso das camadas superiores, enquanto que as tensões horizontais são os objetos de análise.

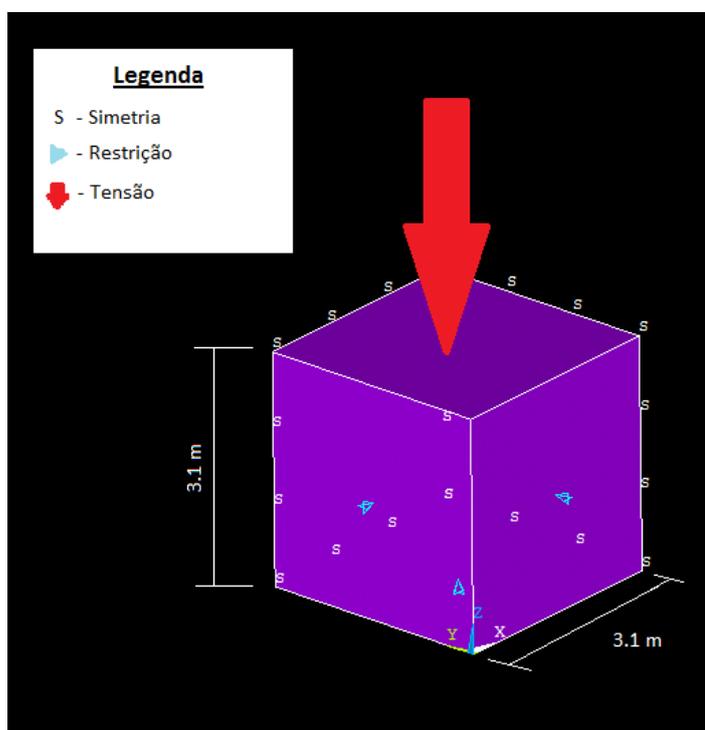
Como visto nos ensaios triaxiais, sob tensões confinantes menores, o sal possui menor resistência à aplicação de tensões verticais. Portanto, tensões horizontais  $\sigma_h$  menores são regiões críticas. Para se obter uma análise conservadora foram utilizadas os valores numéricos de tensão vertical máxima combinada com o menor valor da tensão horizontal obtida, sendo este o pior caso possível para o material se romper. A Figura 35 mostra os círculos de Mohr para a condição crítica de análise.



**Figura 35:** Tensão vertical máxima e tensão horizontal mínima representam o estado de tensão crítico para o sal.

### 6.3) Caso 1: Bloco de sal tensionado

O primeiro caso simulado foi um caso simples de um bloco de sal tensionado verticalmente pelo peso das camadas superiores e engastado na base e nas laterais. A Figura 36 ilustra a simulação com suas condições de contorno. O símbolo “s” indica a prescrição de condições de simetria nas quatro áreas verticais e na área horizontal do fundo. Esta condição estabelece a prescrição de deslocamentos nulos na direção perpendicular à área. Na área horizontal superior é aplicada uma pressão, indicada pela seta vermelha.



**Figura 36:** Esquematização do primeiro caso de simulação.

Por ser bastante simples, e com fácil solução analítica esta simulação foi realizada com objetivo de testar o modelo para que posteriormente fosse possível introduzir detalhes como o furo do poço, o que torna a solução mais complexa.

#### 6.3.1) Solução analítica

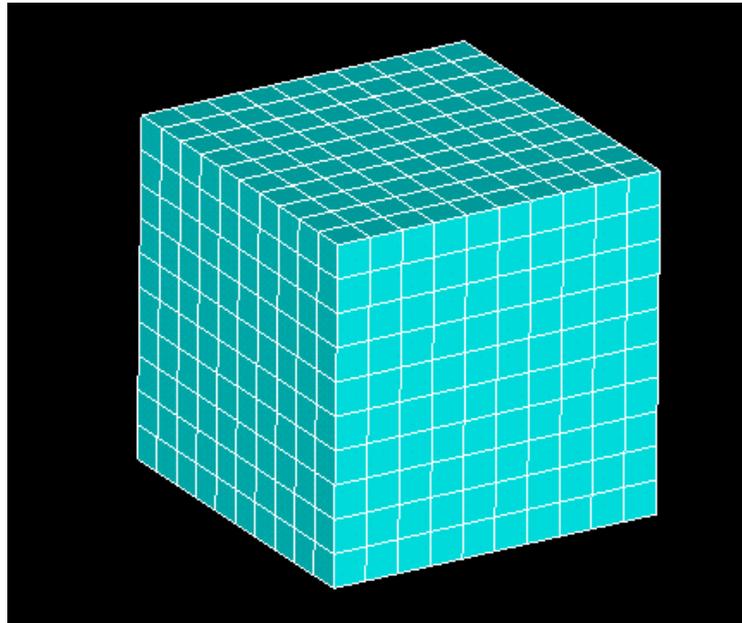
Pela Lei de Hooke generalizada (HIBBELER, 2010),

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{1}{E} \left[ \sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z) \right] \\
 \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \left[ \sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z) \right] \\
 \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \left[ \sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y) \right]
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

onde os valores de  $E$  e  $\nu$  são o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, sendo valores conhecidos. A restrição nas quatro áreas verticais associadas às condições de contorno aplicadas resultam em:  $\varepsilon_x = 0$  e  $\varepsilon_y = 0$ . Assim, obtém-se um sistema de três equações e três incógnitas. Prescrevendo-se uma pressão vertical  $\sigma_z = -107,58$  MPa e resolvendo o sistema obtém-se que  $\sigma_x = \sigma_y = -60,51$  MPa.

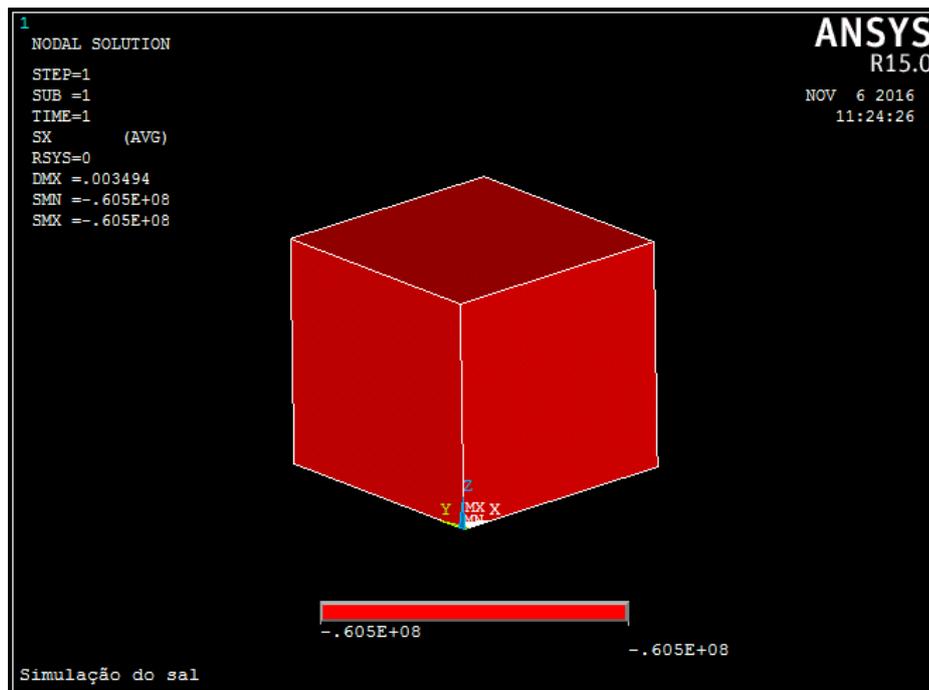
### 6.3.2) Solução por elementos finitos

Utilizando uma malha quadrada com 2541 nós e elementos do tipo SOLID 186 avaliou-se a solução através do método de elementos finitos. É possível observar a malha criada para esse caso na Figura 37.

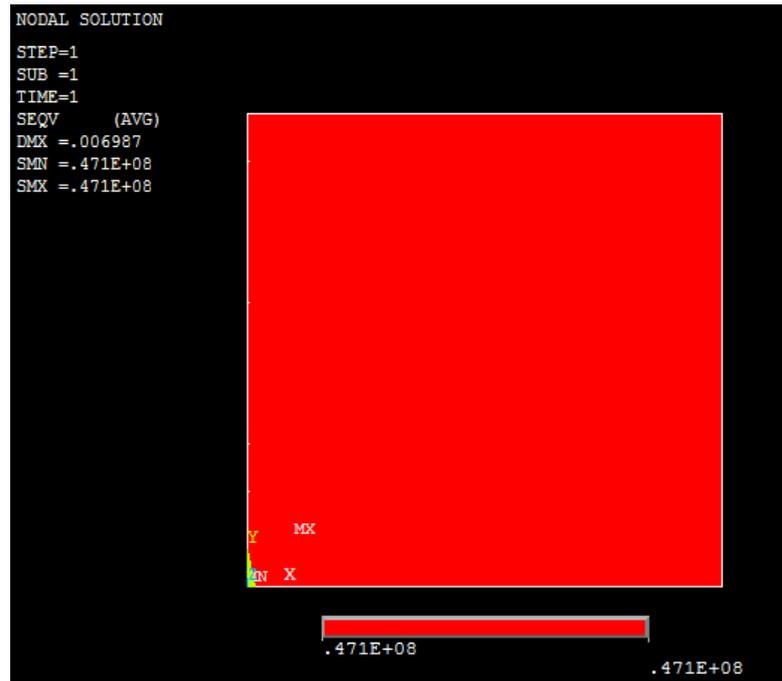


**Figura 37:** Malha tridimensional utilizada no modelo do primeiro caso.

Os resultados numéricos apresentaram valores de  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  iguais a - 60,5 MPa, mesmo valor encontrado na solução analítica. Esse resultado indicou que o modelo estava pronto para se tornar mais complexo. A Figura 38 mostra o resultado do modelo para  $\sigma_x$ , enquanto a Figura 39 mostra as tensões equivalentes de *von Mises*.



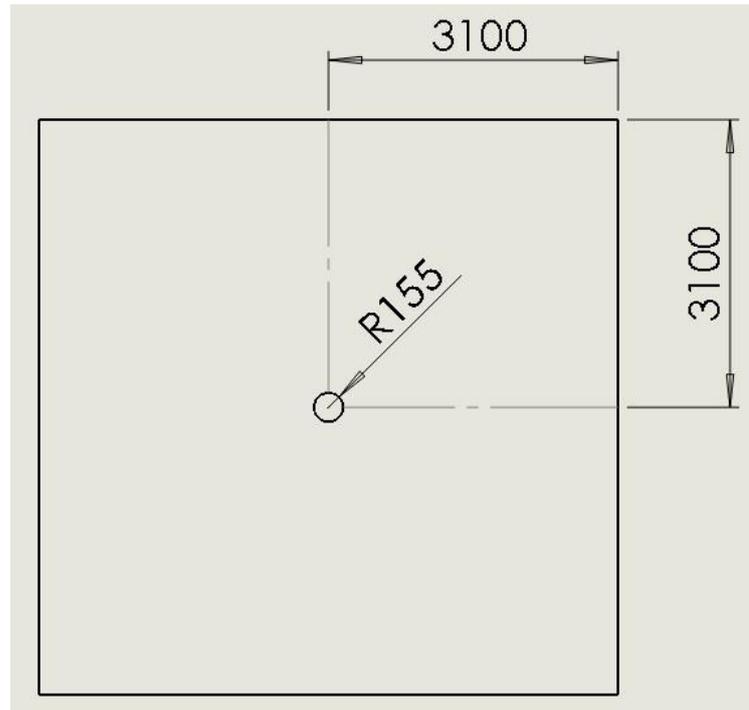
**Figura 38:** Solução do Ansys para  $\sigma_x$ .



**Figura 39:** Tensões equivalentes de *von Mises* para o Caso 1.

#### 6.4) Caso 2: Poço perfurado através da camada de sal

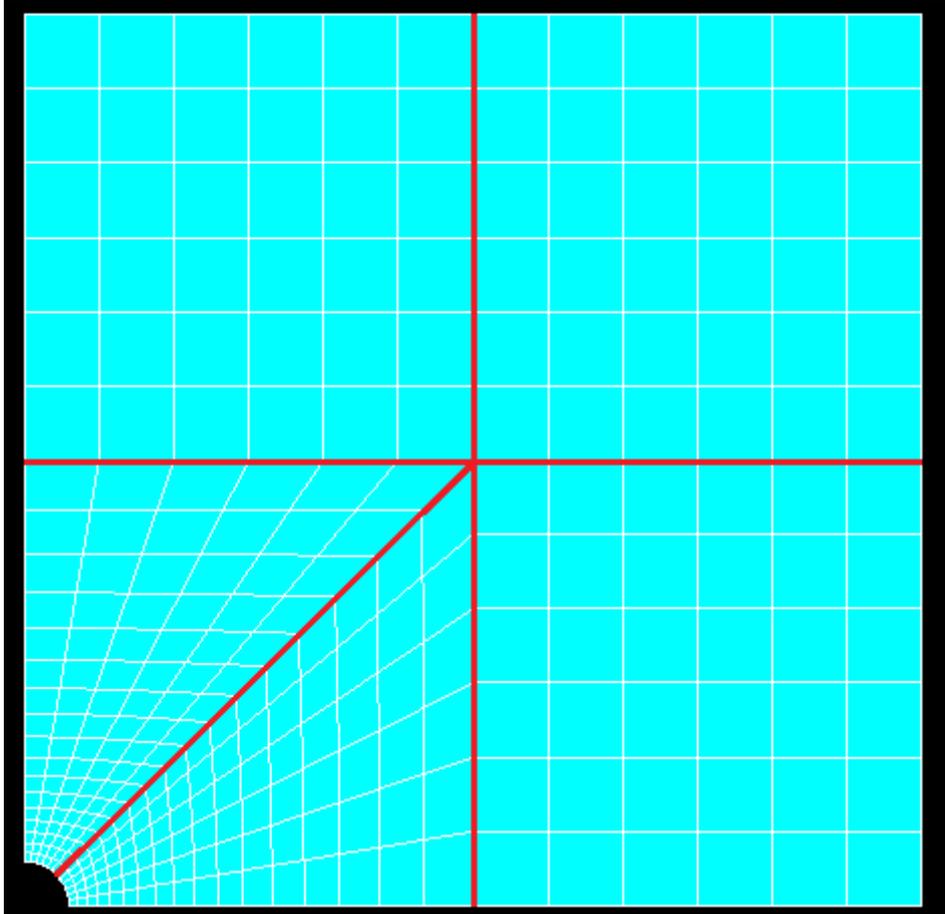
O segundo caso simulado considera a presença de um poço de 0,31 m de diâmetro na região central do modelo. A análise utiliza um modelo tridimensional (3D) e um modelo bidimensional axissimétrico (2D) que contam com a presença de um furo vertical que atravessa toda a região do modelo. É visto na Figura 40 um desenho esquemático da vista superior do segundo caso, associada a uma seção transversal do modelo. Para efeitos de economia de processamento utilizou-se uma geometria associada a  $\frac{1}{4}$  do modelo completo.



**Figura 40:** Vista superior do Caso 2. As linhas em cinza indicam a região modelada associada a 1/4 da geometria.

#### 6.4.1) Malha

O segundo caso de simulação possui um poço perfurando a camada de sal, o que representa uma região concentradora de tensão. Assim, houve maior preocupação na criação da malha, buscando maior refinamento na região em volta ao poço. A Figura 41 mostra a vista superior final da malha em três dimensões do Caso 2. Foram utilizados elementos do tipo SOLID 186.



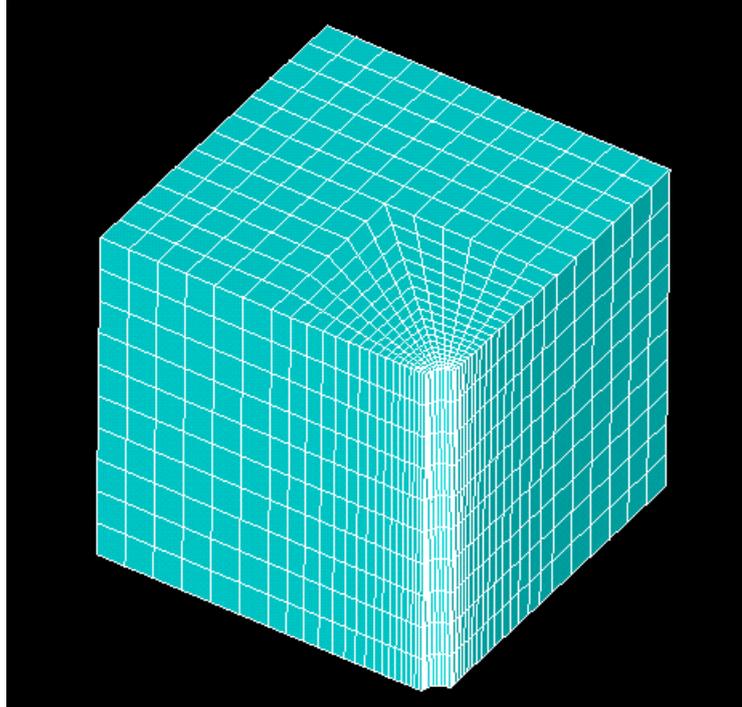
**Figura 41:** Vista superior dos elementos da malha em três dimensões do Caso 2. Modelo 3D.

Para confecção da malha houve a subdivisão da área da seção transversal em cinco seções, onde três são regiões afastadas do poço e possuem malha quadrada e as outras duas contém, cada uma, parte do poço. Essas seções podem ser visualizadas na Figura 41 com delimitações vermelhas. Esta seção transversal serve de base para a construção do modelo tridimensional através de uma operação de extrusão na direção normal à área.

Nas seções que contém a perfuração foi utilizado o recurso de mapeamento de malha em conjunto com espaçamentos regressivos na direção do poço. Analisando a malha percebe-se que as linhas apresentam um maior número de subdivisões nas regiões perto do poço, havendo assim maior refinamento na região próxima ao furo.

O número de subdivisões de cada linha foi colocado em função de uma variável chamada 'fator' para que fosse possível aumentar ou diminuir o nível de refinamento da malha alterando apenas um parâmetro pelo usuário, de modo a facilitar a análise de convergência da malha. Houve também preocupação em deixar os elementos das seções perto do poço com relação de aspecto entre os lados próxima a um.

Após a confecção da malha bidimensional na seção transversal descrita acima, é acionado um comando para realização da extrusão e tornar o modelo em três dimensões, como mostra a Figura 42.



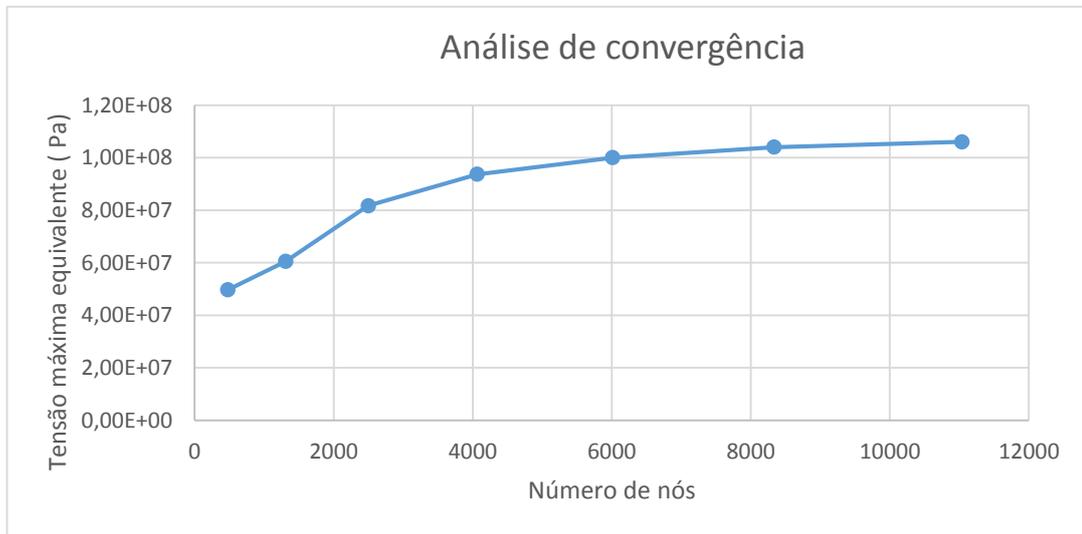
**Figura 42:** Vista isométrica da malha do Caso 2. Modelo 3D.

Para análise da convergência dessa malha foi realizado uma análise através do acompanhamento dos resultados do modelo para a tensão equivalente de *von Mises* máxima obtida sob diversos níveis de refinamento, com alterações do parâmetro ‘fator’. Na Tabela 9 encontram-se o fator utilizado para confecção da malha, o número de nós resultantes da escolha do fator e o valor da tensão equivalente de *von Mises* máxima obtido pelo programa.

**Tabela 9:** Análise de convergência de malha. Modelo 3D.

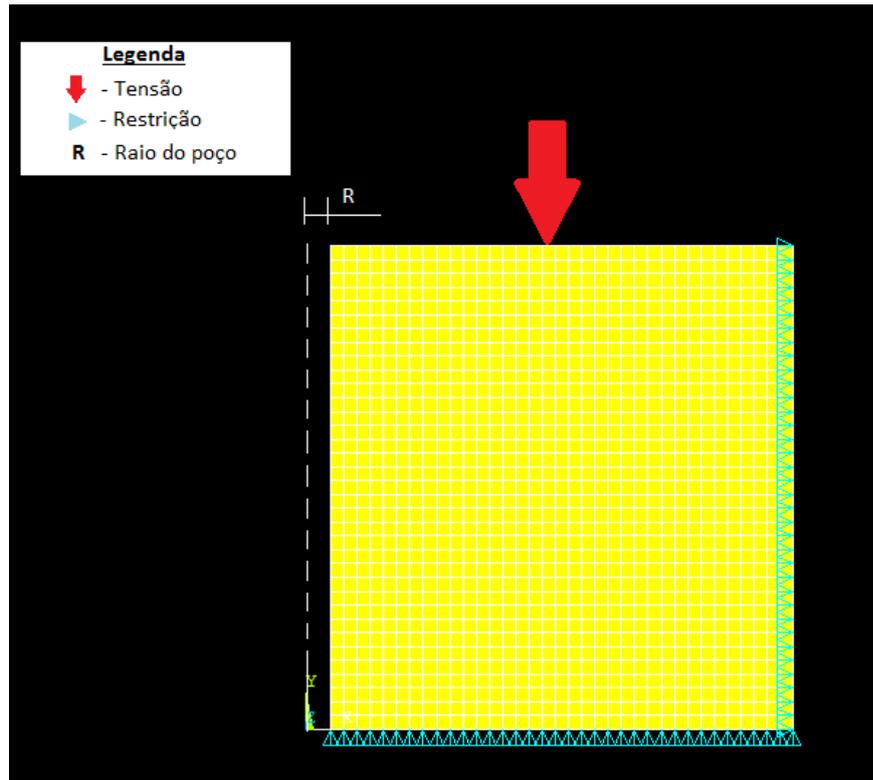
Fator	Número de nós	Tensão equivalente de <i>von Mises</i> máxima (Pa)	Variação percentual
0,05	474	4,97E+07	
0,15	1306	6,05E+07	21,73%
0,25	2496	8,17E+07	35,04%
0,35	4064	9,37E+07	14,69%
0,45	6010	1,00E+08	6,72%
0,55	8334	1,04E+08	4,00%
0,65	11036	1,06E+08	1,92%

Como visto na Tabela 9, a partir de um fator de 0,55 há uma variação menor do que 2% no resultado. Dessa forma, considera-se que houve convergência e este é o fator utilizado nas análises numéricas desenvolvidas para este modelo. A Figura 43 mostra o gráfico da análise de convergência.



**Figura 43:** Gráfico da análise de convergência da malha tridimensional para o Caso 2. Modelo 3D.

Alternativamente, um segundo modelo para este mesmo caso foi desenvolvido explorando a axissimetria vertical, utilizando geometria bidimensional (2D) e elementos do tipo PLANE 2D. A Figura 44 ilustra o modelo axissimétrico.

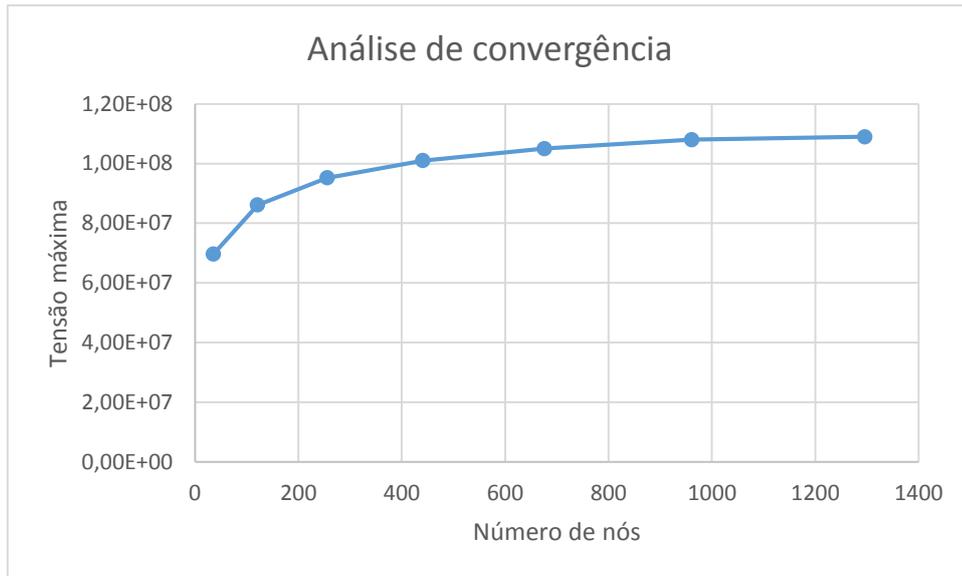


**Figura 44:** Malha, condições de contorno e carregamento para o Caso 2. Modelo axissimétrico (2D).

De forma análoga à malha em três dimensões, foi realizado a análise de convergência para a malha com o modelo axissimétrico que pode ser visualizada pelos dados da Tabela 10 e pela Figura 45.

**Tabela 10 :** Análise de convergência para a malha axissimétrica. Modeo 2D.

Fator	Nós	Tensão máxima	Varição percentual
0,5	36	6,97E+07	
1	121	8,61E+07	23,53%
1,5	256	9,52E+07	10,57%
2	441	1,01E+08	6,09%
2,5	676	1,05E+08	3,96%
3	961	1,08E+08	2,86%
3,5	1296	1,09E+08	0,93%



**Figura 45:** Gráfico de convergência para a malha axissimétrica. Modelo 2D

Pela Tabela 10 percebe-se uma variação menor que 2% no valor da tensão equivalente de *von Mises* máxima para fatores a partir de 3, considerando então que para este fator há convergência. Comparando os valores das tensões máximas da malha em 3D com a malha axissimétrica 2D após as análises de convergência nota-se uma variação percentual de 3,85% entre uma malha e outra.

## 6.4.2) Resultados numéricos

Para o Caso 2 foram realizadas as simulações que buscam analisar o comportamento das tensões da camada salífera com a presença de um poço. Verificou-se o comportamento das rochas evaporíticas sob os carregamentos da tensão principal máxima  $\sigma_1$  obtidos pelos ensaios triaxiais de Sriapai *et al.* (2012), o comportamento em um caso real com estratigrafia baseada na Bacia de Campos e como a variação do diâmetro do poço afeta as tensões da camada salífera.

### 6.4.2.1) Carregamento pelos dados experimentais do ensaio triaxial

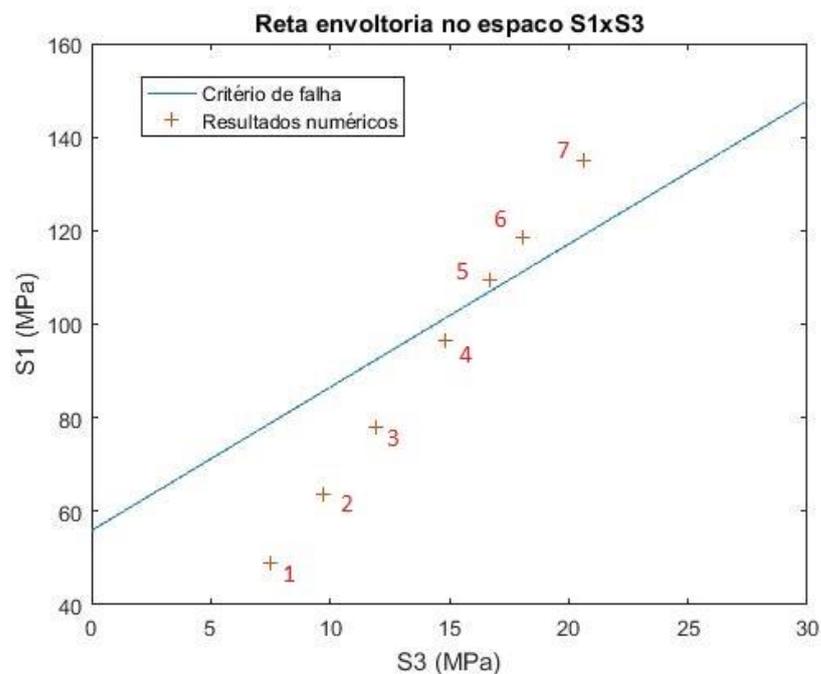
Utilizou-se os dados dos valores de tensão principal  $\sigma_1$  obtidos nos ensaios triaxiais de Sriapai *et al.* (2012) para realizar a tensão vertical no modelo numérico. Utilizando a malha do modelo 3D, os resultados numéricos das menores tensões horizontais mínimas obtidos podem ser visualizados na Tabela 11.

É importante ressaltar que as tensões horizontais  $\sigma_h$  menores resultantes da aplicação de uma carga vertical são as que apresentam maior risco de falha, sendo assim regiões críticas.

**Tabela 11:** Resultados numéricos de  $\sigma_h$  mínimos obtidos através das tensões verticais experimentais.

Experimento	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_h$ mínimo (MPa)
1	49	7,49
2	63,6	9,72
3	77,9	11,9
4	96,6	14,8
5	109,5	16,7
6	118,6	18,1
7	135	20,6

Através do critério de falha de Mohr-Coulomb para rochas evaporíticas definido na seção 5.2.1 é possível estimar em quais casos haveria ruptura da camada de sal. A Figura 46 mostra os resultados dos experimentos plotados junto a reta envoltória, a qual representa o critério de falha.



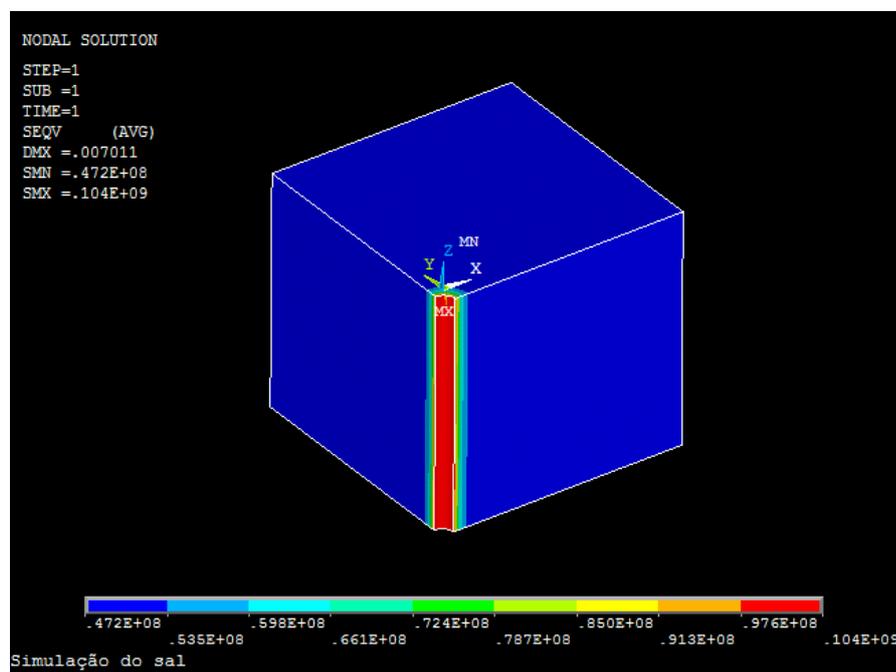
**Figura 46:** Resultados numéricos e a reta envoltória do critério de Mohr-Coulomb. Modelo 3D.

Percebe-se pela Figura 46 que haveria ruptura para os experimentos 5, 6 e 7 por estarem acima da reta envoltória, enquanto que para os experimentos 1, 2, 3, 4 e 5 a camada não falharia.

### 6.4.2.2) Análise de situação com estratigrafia da Bacia de Campos

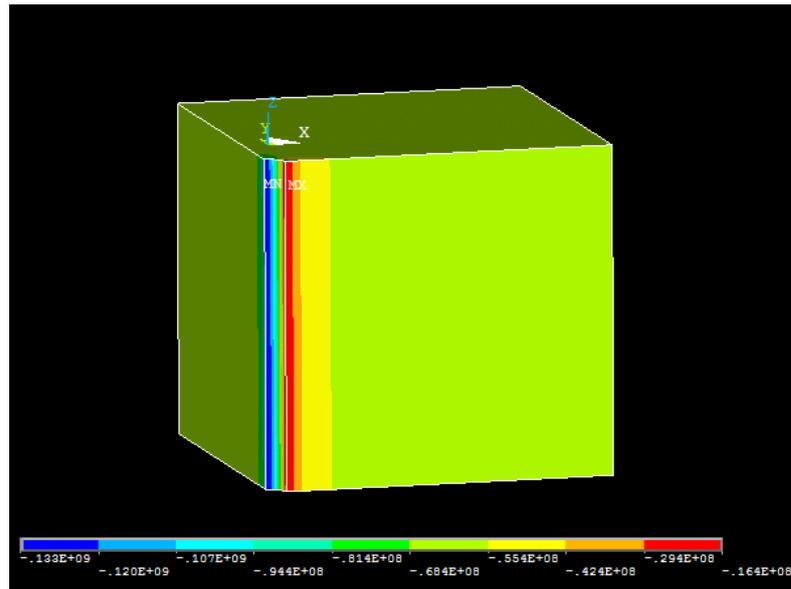
Essa situação simulada foi baseada na estratigrafia da Bacia de Campos definida por Botelho (2008). Nela há carregamento devido ao peso das camadas superiores igual a 107,58 MPa. A Figura 47 mostra as soluções das tensões de *von Mises* para a malha do modelo 3D.

Percebe-se pela Figura 47 que nas regiões afastadas do poço observam-se valores de tensão equivalente de *von Mises* para o Caso 1 de simulação. No entanto, nas regiões próximas à perfuração observa-se concentração de tensão, com valores 77,9 % maiores do que nas regiões afastadas.

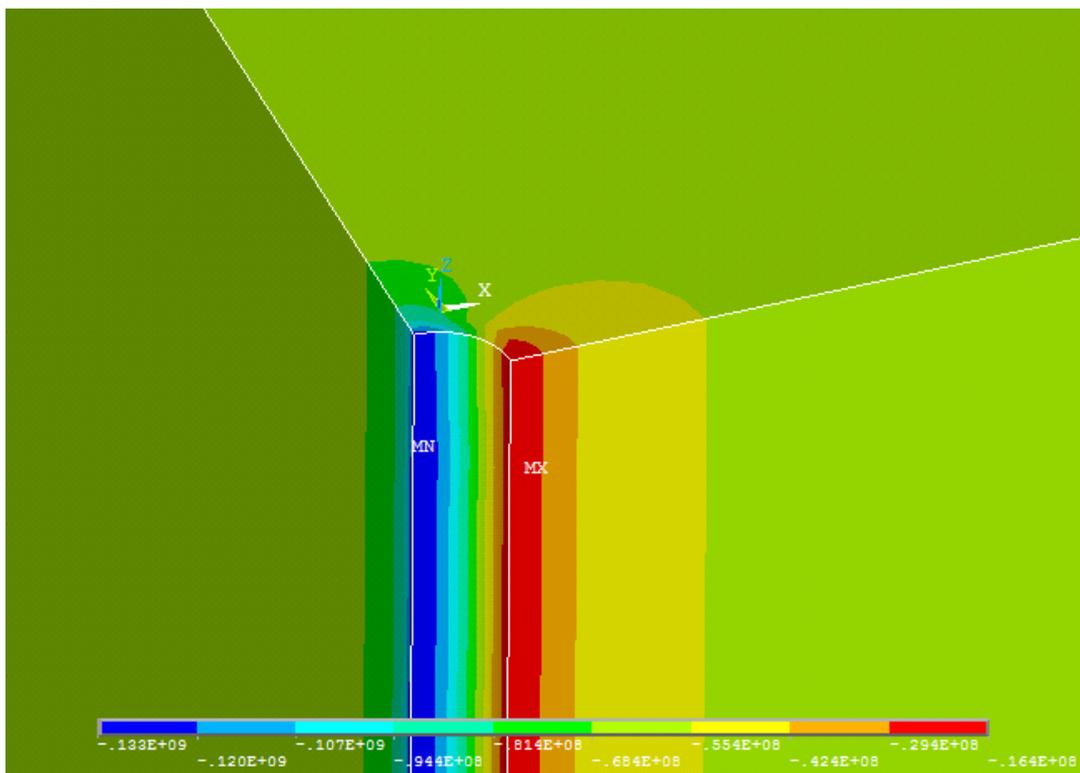


**Figura 47:** Resultado das tensões de *von Mises* para a malha em três dimensões.

Na Figura 48 é possível observar os resultados de tensão normal horizontal na direção x enquanto que a Figura 49 mostra em detalhes como os resultados da tensão na direção x se distribuem ao redor do poço.

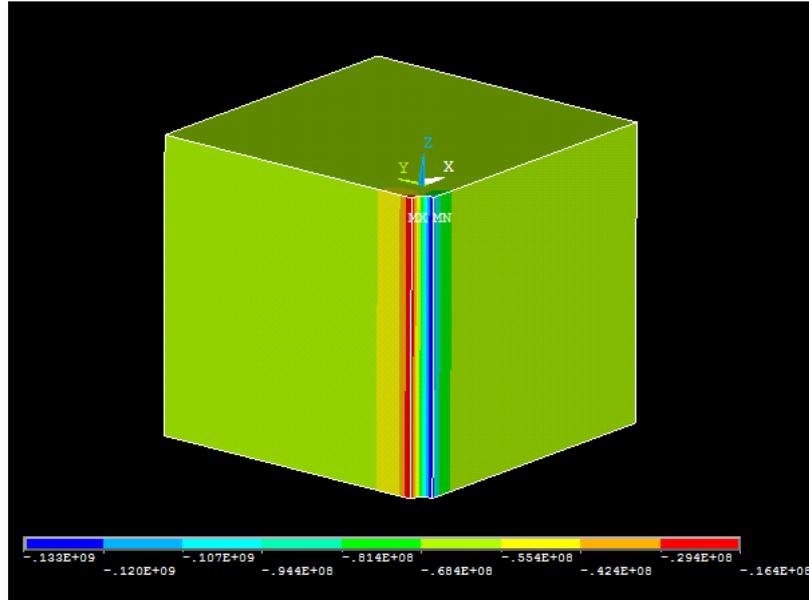


**Figura 48:** Resultados de tensão normal na direção x do Caso 2. Modelo 3D.

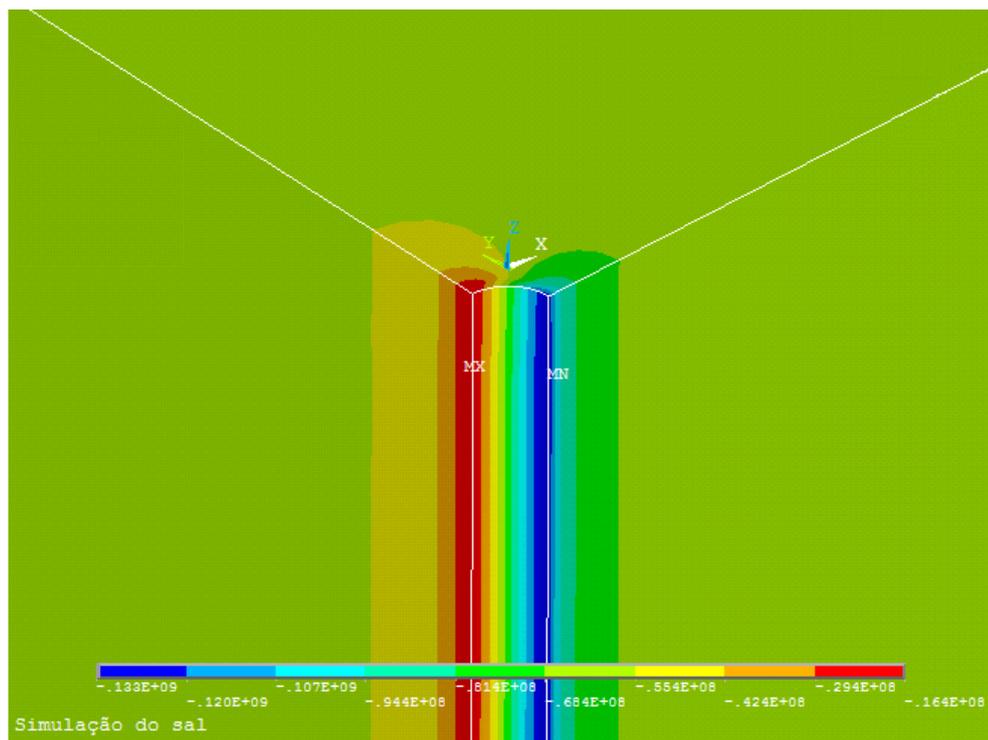


**Figura 49:** Detalhe na região do poço dos resultados de tensão normal na direção x do Caso 2. Modelo 3D.

Na Figura 50 é possível observar os resultados de tensão normal horizontal na direção y e enquanto que a Figura 51 mostra em detalhes como os resultados da tensão na direção y se distribuem ao redor do poço.

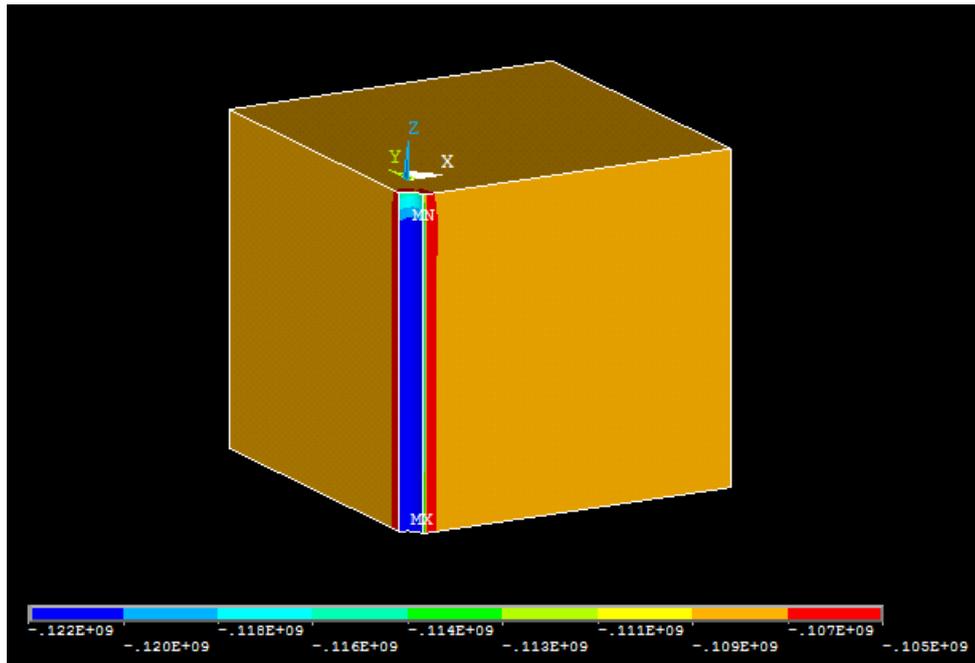


**Figura 50:** Resultados de tensão normal na direção y do Caso 2. Modelo 3D.



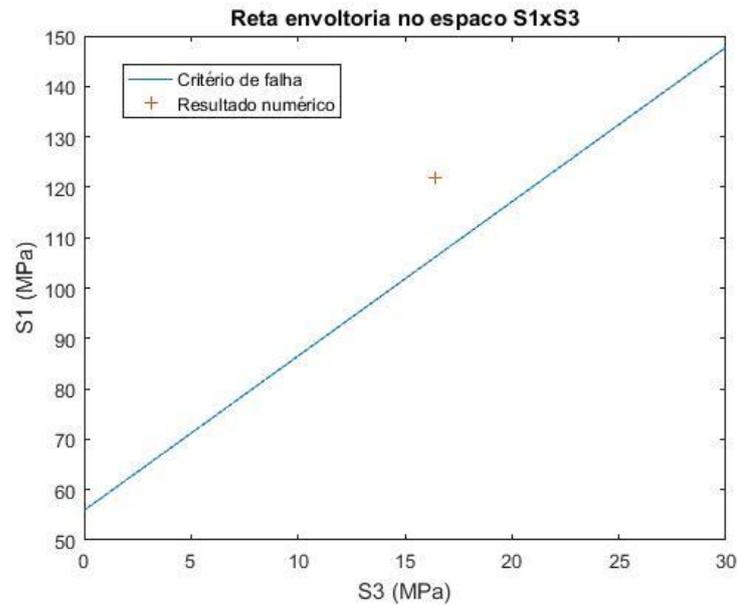
**Figura 51:** Detalhe na região do poço dos resultados de tensão normal na direção y do Caso 2. Modelo 3D.

A distribuição de tensão na direção z pode ser visualizada na Figura 52.



**Figura 52:** Resultados numéricos para a distribuição de tensões na direção z do Caso 2.  
Modelo 3D.

Através da Figura 48, Figura 50 e Figura 52 descreve-se o estado crítico de tensão para esta situação com valores de  $\sigma_v = 122$  MPa e  $\sigma_h = 16,4$  MPa . Este estado de tensão crítico foi analisado no algoritmo do critério de falha de Mohr-Coulomb para rochas evaporíticas, cujo resultado pode ser visto na Figura 53. Pelo resultado numérico estar acima da reta envoltória, esse caso apresenta uma situação de falha da camada.



**Figura 53:** Resultado numérico do caso real com reta envoltória do critério de falha. Modelo 3D.

#### 6.4.2.3) Variação de diâmetro do poço

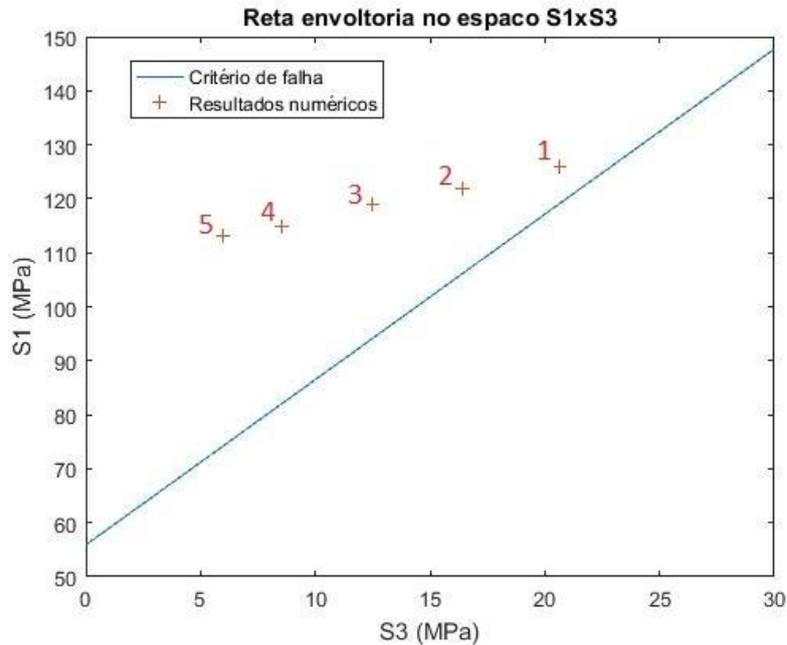
De acordo com Rocha e Azevedo (2009) um poço típico é composto pelas fases de 36'' (0,91 m), 26'' (0,66 m), 17 1/2'' (0,44 m), 12 1/4'' (0,31 m) e 8 1/2'' (0,22 m). Esses diâmetros foram utilizados na malha do modelo 3D e no estudo de caso da estratigrafia da Bacia de Campos para estudar o comportamento das tensões com a variação dos diâmetros de perfuração.

Os valores obtidos numericamente encontram-se na Tabela 12. Constatou-se que tanto os valores de tensão horizontal mínima quanto os valores de tensão vertical máxima diminuem com o aumento do diâmetro do poço.

**Tabela 12:** Resultados de tensões máximas equivalentes e tensões confinantes obtidas.

Poço	Diâmetro	Tensão equivalente de <i>von Mises</i> máxima (MPa)	$\sigma_v$ máxima (MPa)	$\sigma_h$ mínima (MPa)
1	8 1/2"	99,5	126	20,6
2	12 1/4"	104	122	16,4
3	17 1/2"	107	119	12,5
4	26"	109	115	8,54
5	36"	110	113	5,95

Utilizando o critério de falha de Mohr-Coulomb para rochas evaporíticas com os estados de tensão apresentados na Tabela 12 foi analisado em quais casos há fratura da rocha. O resultado pode ser visto na Figura 54.



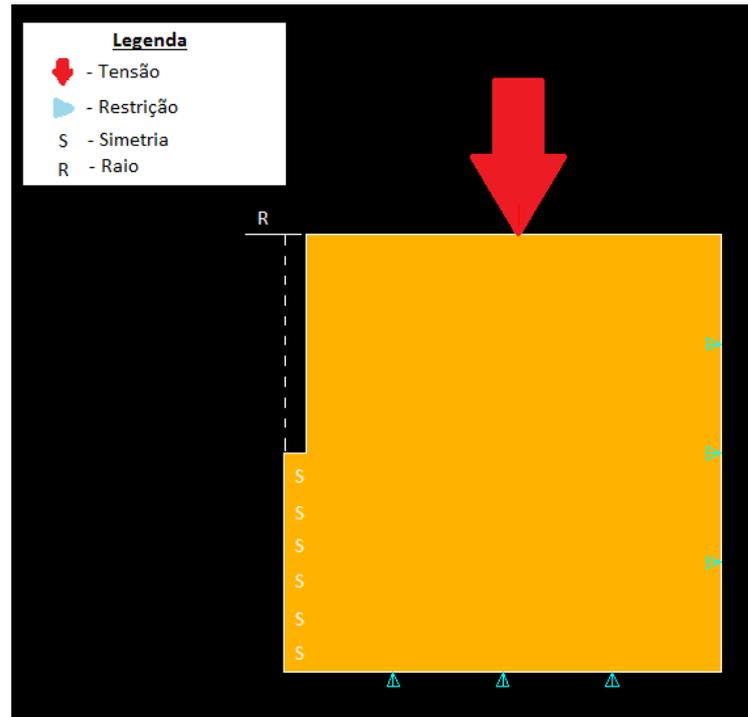
**Figura 54:** Análise de falha para poços com diversos diâmetros.

Pela Figura 54 podemos perceber que todas as situações apresentam situações de falhas, entretanto é possível observar que o aumento do diâmetro do poço faz com que o ponto representativo de seu estado de tensão afaste-se da reta envoltória do critério de falha, sendo assim casos mais críticos.

Esses resultados indicam que para se manter a estabilidade de um poço na estratigrafia da Bacia de Campos é necessário utilizar fluidos de perfuração.

### 6.5) Caso 3: Poço interrompido

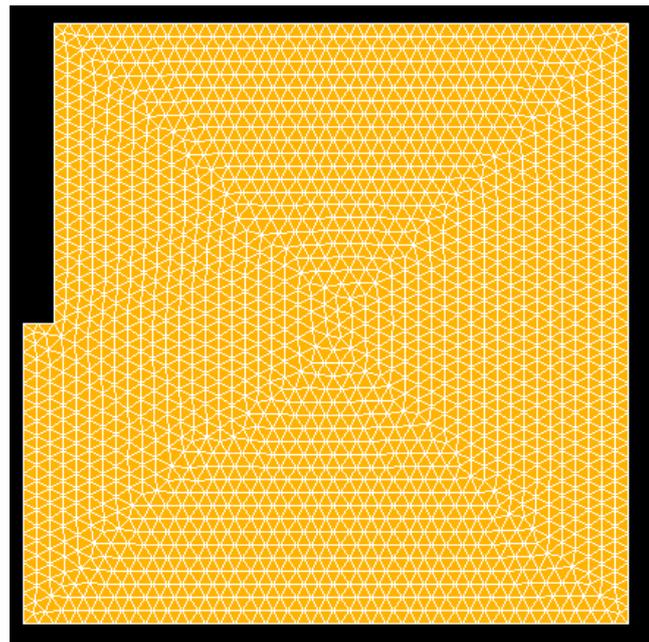
O terceiro caso de simulação buscou estudar o comportamento da camada de sal quando há um interrompimento da perfuração do poço. A Figura 55 ilustra o esquema modelado no terceiro caso. Para esta análise considera-se um modelo 2D axissimétrico.



**Figura 55:** Condições de contorno do Caso 3. Modelo 2D axissimétrico.

### 6.5.1) Malha

Para confecção da malha do Caso 3 foram utilizados elementos triangulares do tipo PLANE 2 para que melhor se adequasse à mudança de geometria no final do furo. A malha construída pode ser visualizada na Figura 56.

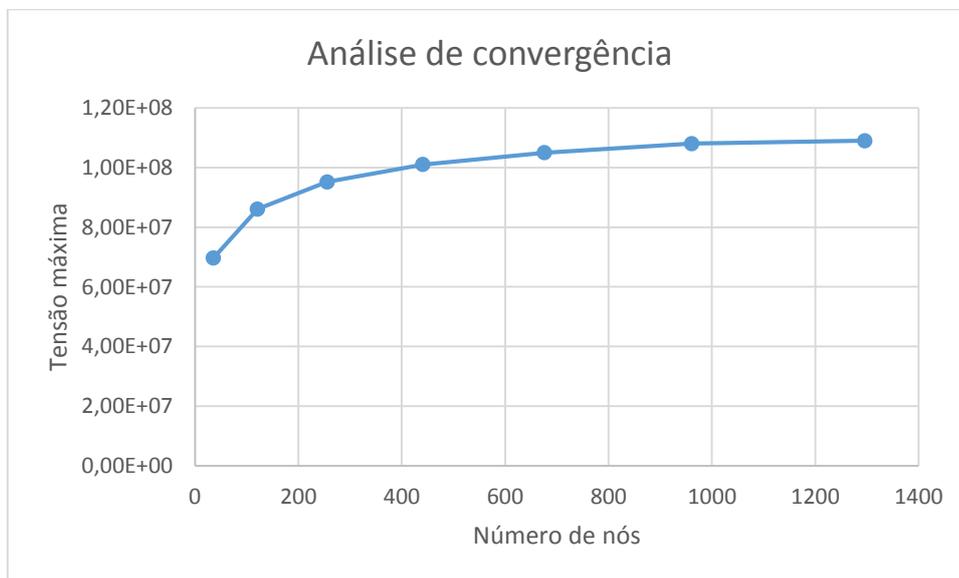


**Figura 56:** Malha triangular do Caso 3. Modelo 2D axissimétrico.

Para realizar a análise de convergência de malha utilizaram-se os valores das tensões equivalentes de *von Mises* máximas obtidos. De maneira análoga às malhas do segundo caso, um parâmetro chamado ‘fator’ foi utilizado para realizar o refinamento da malha. O modelo foi executado diversas vezes para diversos níveis de refinamento de malha. Os resultados podem ser vistos na Tabela 13 e visualizados na Figura 57.

**Tabela 13:** Resultados de tensões equivalentes para diversos níveis de refinamento de malha.

Fator	Número de nós	Tensão máxima equivalente de <i>von Mises</i> (Pa)	Varição percentual
0,5	36	6,97E+07	
1	121	8,61E+07	23,53%
1,5	256	9,52E+07	10,57%
2	441	1,01E+08	6,09%
2,5	676	1,05E+08	3,96%
3	961	1,08E+08	2,86%
3,5	1296	1,09E+08	0,93%

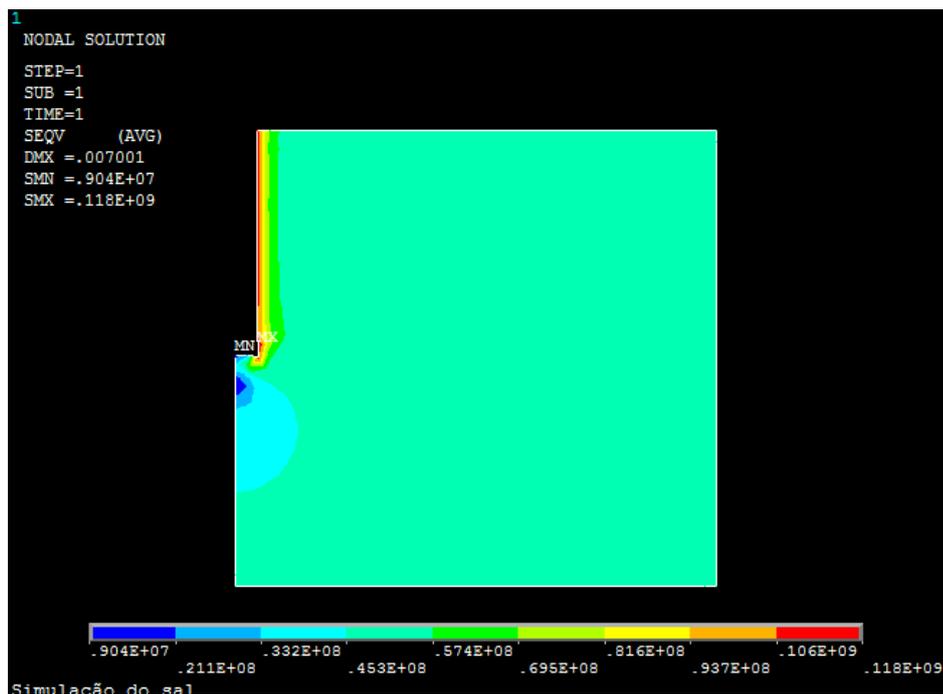


**Figura 57:** Análise de convergência para o Caso 3. Modelo 2D.

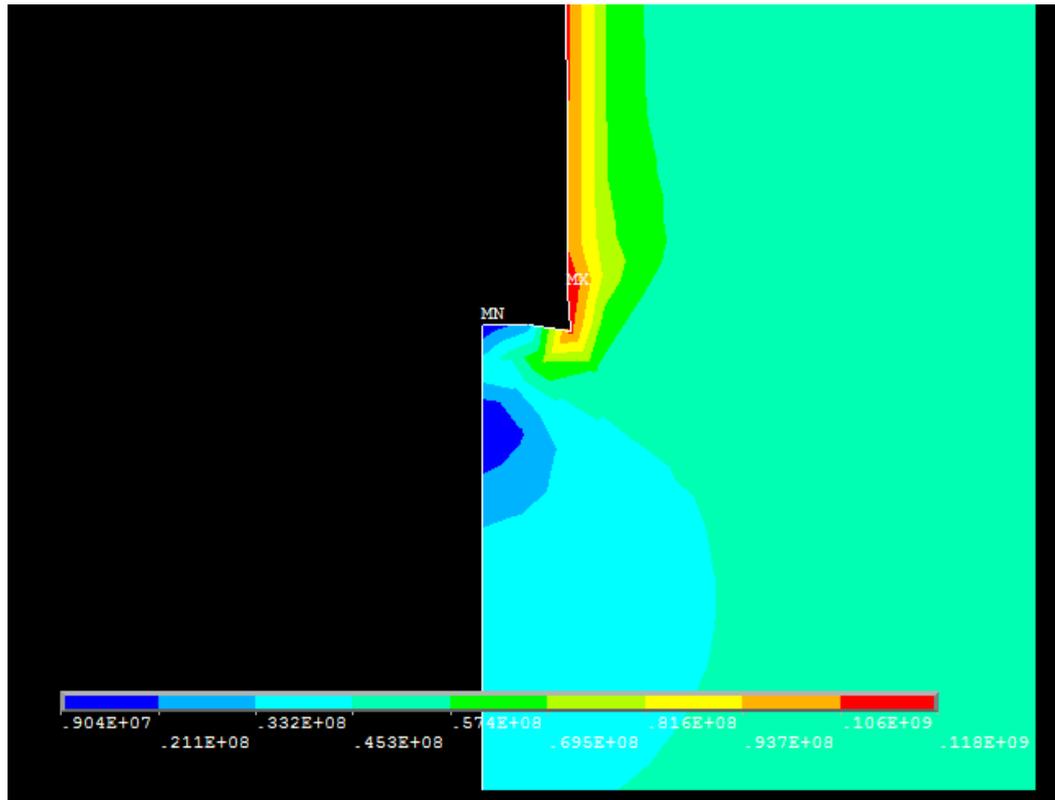
Como a partir de um fator igual a 3 a variação do resultado de tensão equivalente de *von Mises* máxima é menor do que 2%, considera-se neste ponto a malha refinada o suficiente.

### 6.5.2) Resultados numéricos

Aplicando as condições do estudo de caso da estratigrafia da Bacia de Campos, e com um poço de diâmetro de 12 ¼” pode-se verificar o comportamento das tensões quando há o interrompimento de um poço no meio da camada de evaporitos. A Figura 58 apresenta a distribuição das tensões de *von Mises* pelo modelo 2D, enquanto a Figura 59 mostra como essas tensões se distribuem na área em volta ao interrompimento do poço.

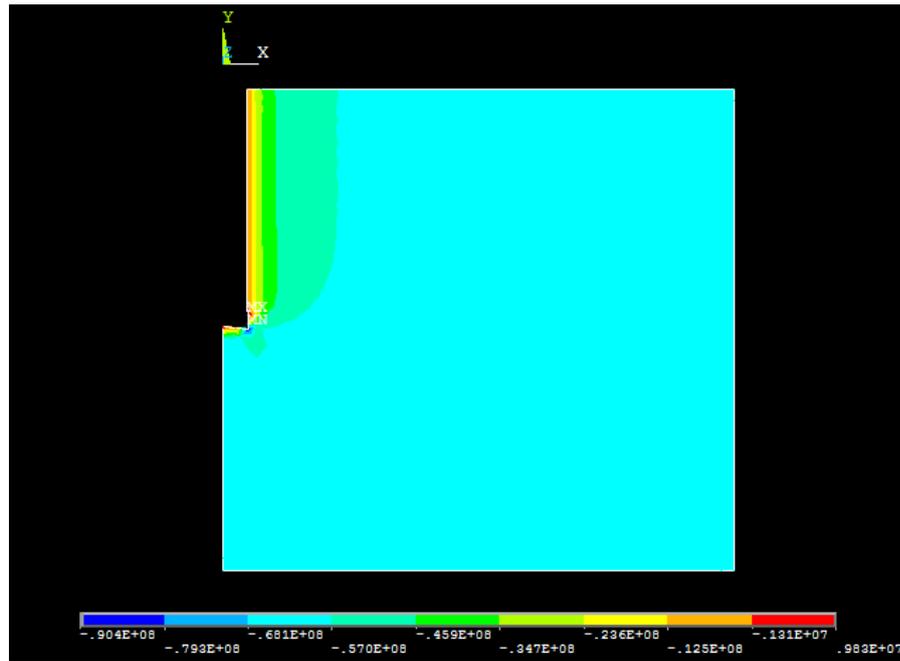


**Figura 58:** Distribuição das tensões equivalentes de *von Mises* para o terceiro caso de simulação. Modelo 2D.

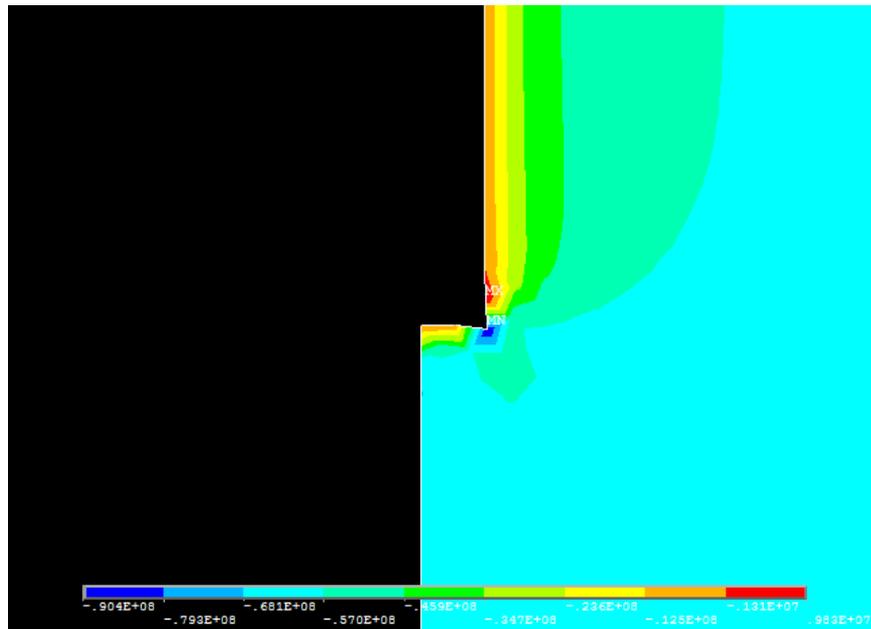


**Figura 59:** Detalhe de distribuição das tensões equivalentes de von Mises do Caso 3 na região do poço. Modelo 2D axissimétrico.

A Figura 60 apresenta as distribuições de tensão horizontal na direção x para o Caso 3. O detalhamento na região em volta ao furo interrompido pode ser visualizado na Figura 61. Nas regiões em volta ao furo, essas tensões são tensões radiais ao poço.

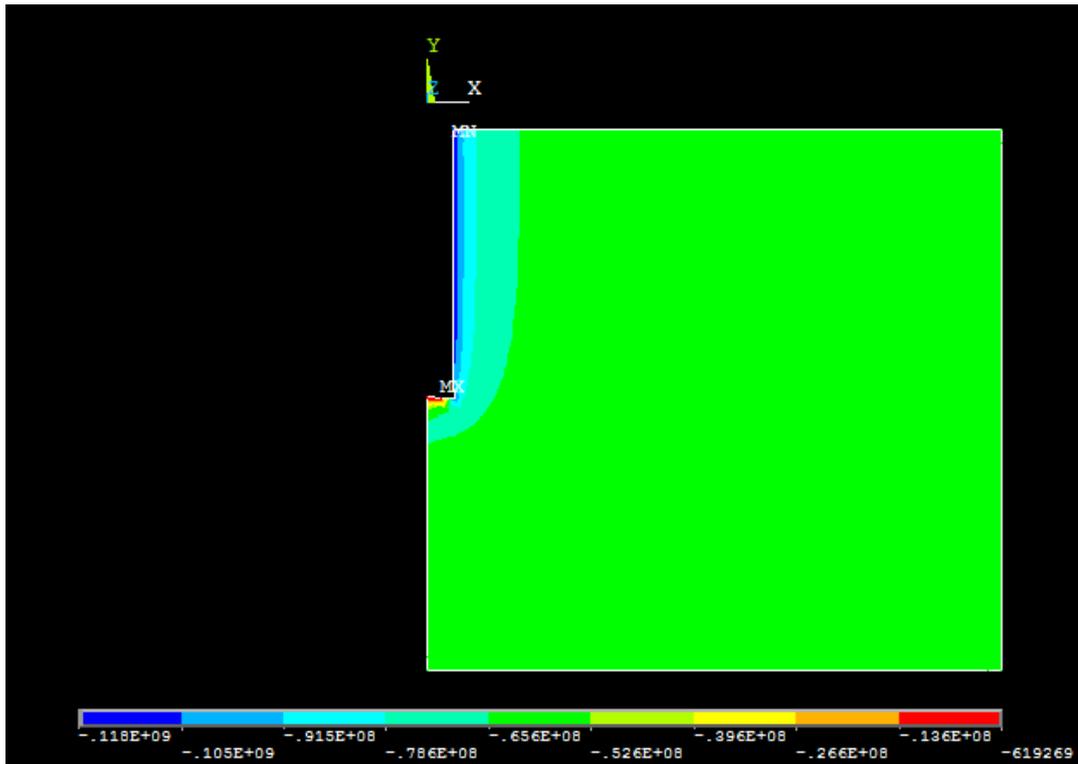


**Figura 60:** Distribuição de tensão horizontal na direção x no Caso 3. Modelo 2D axissimétrico.

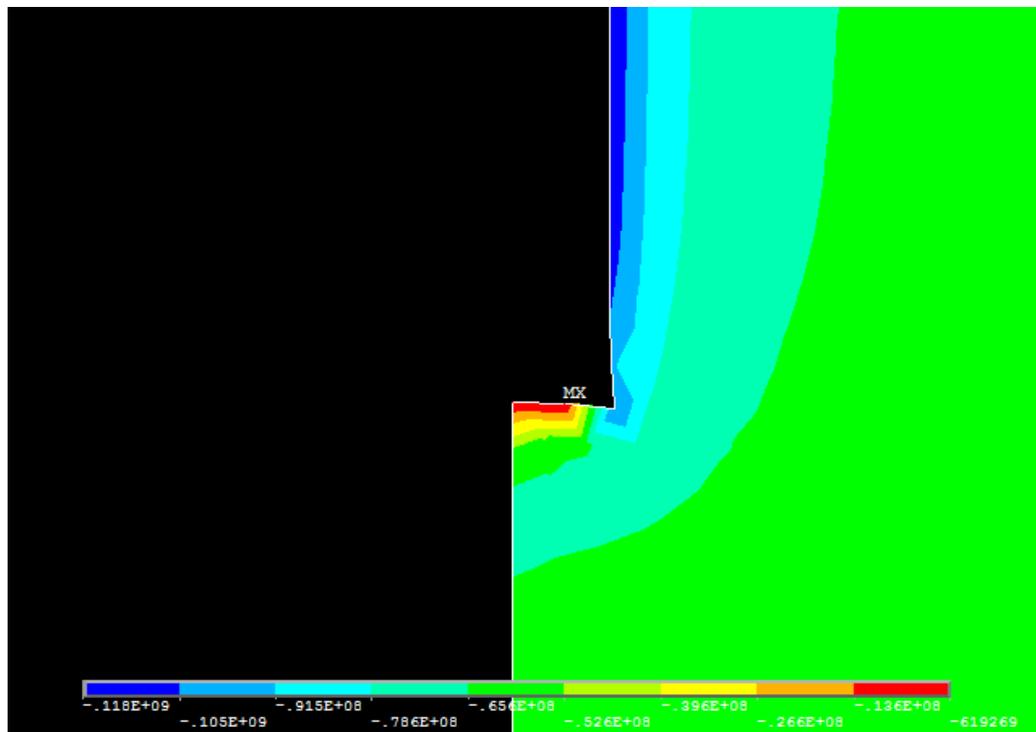


**Figura 61:** Detalhamento das tensões horizontais na direção x na região perfurada do Caso 3. Modelo 2D axissimétrico.

A Figura 62 apresenta as distribuições de tensão horizontal na direção z para o Caso 3. O detalhamento na região em volta ao furo interrompido pode ser visualizado na Figura 63. Nas regiões em volta ao furo, essas tensões são tangenciais ao poço.

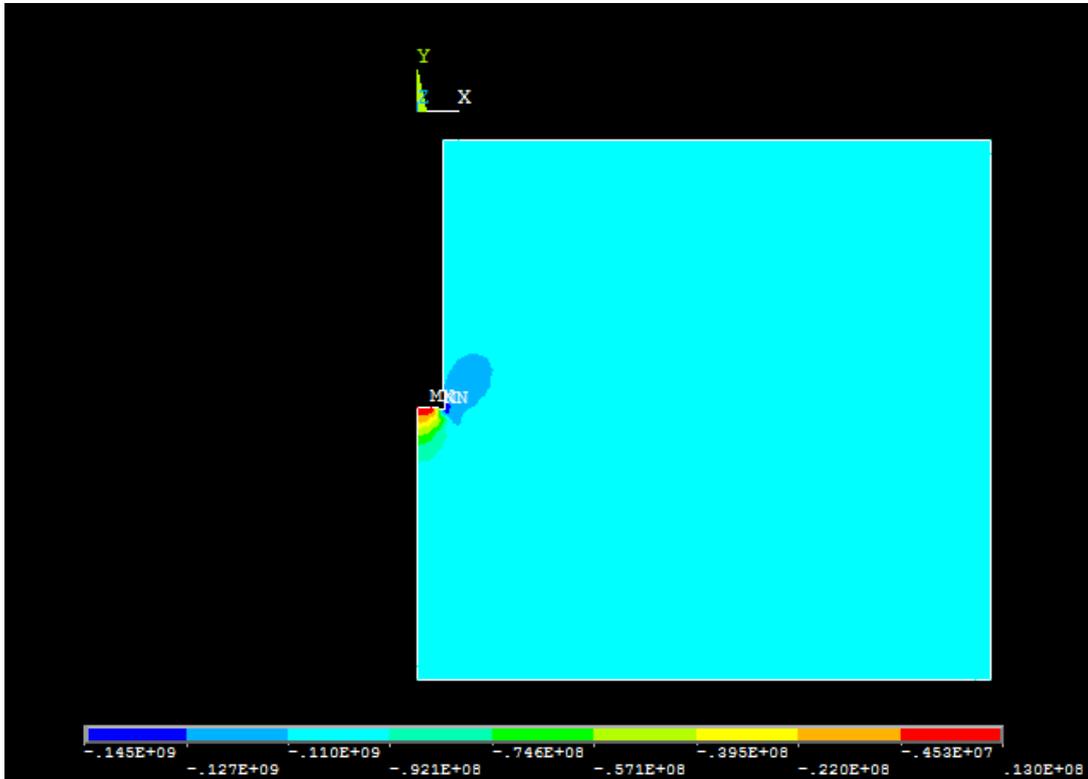


**Figura 62:** Distribuição de tensão horizontal na direção z no Caso 3. Modelo 2D axissimétrico.



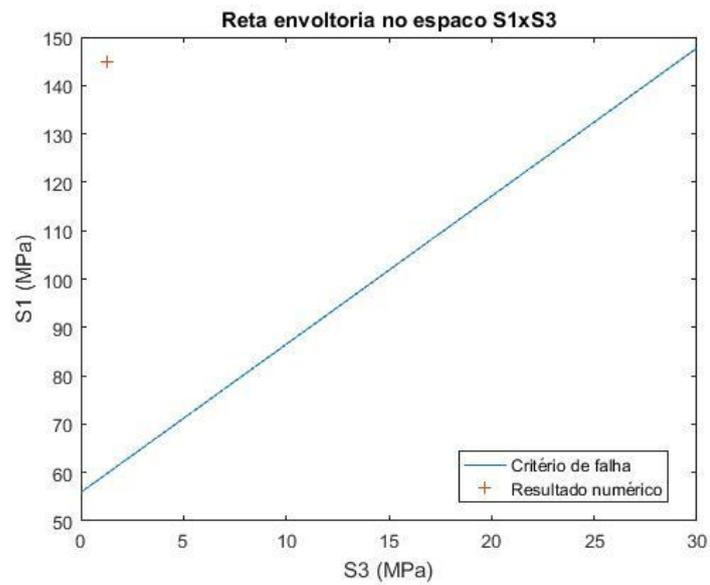
**Figura 63:** Detalhamento das tensões horizontais na direção z na região perfurada do Caso 3. Modelo 2D axissimétrico.

A Figura 64 apresenta os resultados numéricos obtidos para as tensões verticais no modelo do Caso 3.



**Figura 64:** Distribuição de tensão vertical no Caso 3. Modelo 2D axissimétrico.

Através da Figura 60, Figura 62 e Figura 64, avalia-se o caso crítico como sendo tensionado verticalmente por uma tensão  $\sigma_v = 145$  MPa e horizontalmente por uma tensão  $\sigma_h = 1,31$  MPa. Este estado crítico foi analisado pelo critério de falha de Mohr-Coulomb para verificar se o modelo apresenta previsão de falha. A análise é apresentada na Figura 65.



**Figura 65:** Análise do terceiro caso de simulação pelo critério de Mohr-Coulomb.

Pela Figura 65 é visto que a situação do Caso 3 apresenta uma situação de falha na camada salífera. Comparando-se os resultados apresentados na Figura 65 com os da Figura 53 observa-se que a situação do poço interrompido é mais crítica do que a situação da perfuração passante.

## Capítulo 4

### Conclusões

O sal é um material que possui propriedades mecânicas altamente dependentes de outros fatores como temperatura, confinamento e taxa de carregamento. Com isso em vista, a análise de tensões para prever o comportamento de regiões com sal é requerem o conhecimento de um conjunto de dados do problema a ser analisado, como profundidade, temperaturas de trabalho e velocidade de perfuração.

O critério de falha de Mohr-Coulomb mostrou uma boa concordância com os ensaios realizados a altas taxas de carregamento indicando, portanto, pode ser utilizado quando é esperado um comportamento elástico das rochas evaporíticas.

As análises em elementos finitos mostraram ser uma boa maneira de se visualizar o campo de tensões nas camadas de rochas evaporíticas. Nesse trabalho foi possível analisar como as tensões variam de acordo com o diâmetro do poço em uma camada confinada. Foi visto que para poços com diâmetros maiores encontra-se valores de tensão equivalente de *von Mises* mais elevados e valores menores de tensões confinantes. As análises mostraram que poços interrompidos na camada de sal apresentam condições mais críticas em termos de tensionamento do que poços passantes. Por permitir a análise dos valores de tensões presentes nas regiões perfuradas, a análise em elementos finitos pode ser bastante útil no momento de escolha do fluido de perfuração que melhor manterá a integridade do poço.

Para trabalhos futuros recomenda-se a realização de ensaios mecânicos sob diversas taxas de carregamento a uma temperatura constante para determinar a região em que as rochas evaporíticas deixam de ter um comportamento predominantemente elástico e passam a possuir um comportamento viscoso. Um estudo complementar poderia envolver a análise da integridade do poço através da presença de um fluido pressurizado no poço. A realização de análises em elementos finitos aplicando o critério de falha de Mohr-Coulomb por nós, ao invés da utilização dos tensionamentos críticos tornaria a análise menos conservativa e poderia mostrar os locais de falha no modelo, o que seria uma grande vantagem. Análises numéricas levando em considerações os parâmetros de fluência baseando-se nos modelos existentes, como os reológicos, também seriam contribuições para a área.

## Referências bibliográficas

BOTELHO, Fabrício Vieira Cunha. **Análise numérica do comportamento mecânico do sal em poços**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

BRADSHAW, R. L.; MCCLAIN, W. C. **Project Salt Vault: A demonstration of the disposal of high-activity solidified wastes in underground salt mines**. Virginia: Oak Ridge National Laboratory, 1971.

CLUGSTON, Michael; FLEMMING, Rosalind. **Advanced chemistry**. Oxford: Oxford University Press, 2000.

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

COSTA, A. M.; POIATE JUNIOR, E. **Sal: Geologia e tectônica**. Capítulo 17. 2. ed. São Paulo: BECA, 2008.

FERREIRA, P. M. V. **Estudo de um solo residual de arenito da rodovia RS 239 – ensaios triaxiais servo-controlados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

FJAER, E.; HOLT, R. M.; HORSRUD, P.; RAAEN, A. M.; RISNES, R. **Petroleum related rock mechanics**. 2. ed. Kidlington: Elsevier, 2008.

GUERRA, R. S. T. **A origem do brazilian test – Lobo Carneiro**. Clube do Concreto, 2013. Disponível em: <<http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/09/a-origem-do-brazilian-test.html>> Acessado em 21/06/2016.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

JACKSON, M. P. A. **Conceptual breakthroughs in salt tectonics: a historical review.** Texas: The University of Texas at Austin, 1997.

JUSTEN, Julio Cesar Ramos. **Análise da propriedades elásticas de rochas e minerais evaporíticos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

KURTUS, Ron. **Types of chemical bonding.** School for Champions, 2015. Disponível em: <[http://www.school-for-champions.com/chemistry/bonding\\_types.htm#.V2NyWrsrLIU](http://www.school-for-champions.com/chemistry/bonding_types.htm#.V2NyWrsrLIU)> Acessado em 15/06/2016.

LI, D.; WONG, L. N. Y. **The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights.** *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 46, n. 2, p. 269-287, maio, 2012.

LIMA, Wagner Souza; JUNIOR, Gilvan Pio Hamsi. **Bacias da margem continental.** Phoenix, 2003. Disponível em <[http://www.phoenix.org.br/Phoenix50\\_Fev03.html](http://www.phoenix.org.br/Phoenix50_Fev03.html)> Acessado em 15/06/2016.

LIU, I-S; Cipolatti, R.; RINCON, M. A.; PALERMO, L. A. **Numerical simulation of salt migration – Large deformation in viscoelastic solid bodies.** Rio de Janeiro, 2011, eprint arXiv:1108.2295

MA, L-J; LIU, X-Y; QUIN, F.; MA, S-N. **Statistical evaluation of five failure criteria for intact salt rock.** *Journal of Central South University of Technology*, Toronto v. 8, n. 3, p. 925-931, junho 2012.

MOHRIAK, W.; SZATMAN, P.; ANJOS, S. M. C. **Sal: Geologia e tectônica.** São Paulo: BECA, 2008.

PAPATERRA, Guilherme Eduardo Zerbinatti. **PRÉ-SAL: conceituação geológica sobre uma nova fronteira exploratória.** Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

PENA, R. F. A. **Eras geológicas**. Alunos online. Disponível em:

<<http://alunosonline.uol.com.br/geografia/eras-geologicas.html>> Acessado em 14/06/2016.

PETROBRAS. **Relatório de sustentabilidade**. Rio de Janeiro, 2011.

PLUIJM, B. A. V. D.; MARSHAK, S. **Earth Structure**. 2. ed. Nova Iorque: W. W. Norton & Company, 2004.

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

RICCOMINI, C.; SANTANNA L. G.; TASSINARI, C. C. G. **Pré-sal: Geologia e exploração**. São Paulo: Revista USP, 2012.

ROCHA, Luiz Alberto Santos; AZEVEDO, Cecília Toledo de. **Projetos de poços de petróleo: Geopressões e assentamento de colunas de revestimentos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

SRIAPAI, T.; WALSR, C.; FUENKAJORN, K. **Effect of temperature on compressive and tensile strenghts of salt**. *ScienceAsia*, Nakhon Ratchasima, v. 38, p. 166 – 174, junho 2012.

THOMAS, José Eduardo *et al.* **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro: Interciências, 2001.

TINGAY, Mark. **State and Origin of Present-Day Stress Fields in Sedimentary Basins**. Perth, 2008, doi: 10.1071/ASEG2009ab037

## APÊNDICE A: Algoritmo do Critério de Falha de Mohr-Coulomb

```

%Este programa tem o proposito de receber os resultados de um ensaio
%triaxial e determinar o criterio de falha de Mohr-Coulomb.
%Criado por Alexandre Guimarães Soares em 11/08/2016

clear

%Pede input do numero de dados do ensaio triaxial
qtd = input('Digite a quantidade de valores do ensaio triaxial: ');
S1 = zeros(1,qtd);
S3 = zeros(1,qtd);
n = numel(S1);

%Pede input dos valores de S3 e transforma em uma array
for i=1:qtd
    fprintf('Insira o valor %d de tensao confinante S3 utilizado no ensaio: ',i);
    S3(1,i)=input('');
end

%Pede input dos valores de S1 e transforma em uma array
for i=1:qtd
    fprintf('Insira o valor %d de tensao vertical S1 no momento de rompimento: ',i);
    S1(1,i)=input('');
end

P = (S1+S3)/2; %Centro das circunferencia
Q = (S1-S3)/2; %Raio das circunferencia

%Grafico P x Q
%plot (P,Q, '+');
%lsline; %Traça reta interpolada
%xlabel ('P')
%ylabel ('Q')
%figure;

%Coeficientes da reta interpolada
p1 = polyfit (P,Q,1);

%fprintf('A equação da reta interpolada e: y = %gx + (%g) \n', p1(1), p1(2));

%Reta envoltoria ao círculos
phi = (asin((p1(1)))));
s0 = p1(2)/cos(phi);
x1 = linspace (0, max(S1));
tau = tan(phi)*x1 + s0;

%Plota os círculos de Mohr
for j=1:n
    xCentro = P(j);
    yCentro = 0;
    theta = 0 : 0.01 : pi;
    raio = Q(j);
    x = raio * cos(theta) + xCentro;
    y = raio * sin(theta) + yCentro;
    plot(x, y, 'r', 'Linewidth', 2);
    axis ([ 0 max(S1) 0 max(S1)])
    axis equal

```

```

    grid on
    xlabel ('Tensão normal (MPa)')
    ylabel ('Tensão cisalhante (MPa)')
    title ('Critério de falha de Mohr-Coulomb')
    hold on
end

%Plota reta envoltoaria
plot (x1, tau, 'b', 'Linewidth',3 );
phi2 = rad2deg (phi);
figure;

fprintf ('A equacao da reta envoltoaria e: y = %gx + %g \n', phi, s0)
fprintf ('Coesão = %g \n', s0);
fprintf ('Angulo de atrito interno (graus) = %g \n', phi2)

%Reta envoltoaria no espaco S1 x S3
t3 = linspace (0, max(S3));
c0 = 2*s0 * (cos(phi)/(1-sin(phi)));
t1 = c0 + t3* tan(pi/4 + phi/2)*tan(pi/4 + phi/2);

plot (t3, t1);
xlabel ('S3 (MPa)');
ylabel ('S1 (MPa)');
title ('Reta envoltoaria no espaco S1xS3');
figure;

%verificar se par ordenado de tensoes principais causa falha
numT = input('Digite a quantidade de valores de tensao a serem verificados:
');

Ss1 = zeros(1,numT);
Ss3 = zeros(1,numT);

for i=1:numT
    fprintf('Insira o valor %d de S3: ',i);
    Ss3(1,i)=input('');
end

for i=1:numT
    fprintf('Insira o valor %d de S1: ',i);
    Ss1(1,i)=input('');
end

for k=1:numT
    tt1(k) = c0 + Ss3(k)* tan(pi/4 + phi/2)*tan(pi/4 + phi/2);
    if Ss1(k) > tt1(k)
        fprintf ('Falha \n');
    else
        fprintf ('Não Falha \n');
    end
    plot (t3,t1,Ss3, Ss1, '+');
    xlabel ('S3 (MPa)');
    ylabel ('S1 (MPa)');
    title ('Reta envoltoaria no espaco S1xS3')
end

```

## APÊNDICE B: Linhas de comando do Caso 1 de simulação

```

finish
/clear,nostart
/REP,FAST
/COLOR,PBAK,OFF
/REPLOT

/FILNAME,SimulacaoSal2,1

/PREP7

/TITLE,Simulação do sal

C*** ===== Parametros de Entrada =====

E_sal=28.4e9
v_sal=0.36

L=3.1 ! Lado da seção quadrada
extrusao = 3.1
tensao_peso=107.58E06

fator=1

C*** ===== Propriedades do Material =====
MP,EX,1,E_sal          ! Define modulo de elasticidade
MP,NUXY,1,v_sal       ! Define coeficiente de Poisson

C*** ===== Definicao dos Elementos =====
ET,1,PLANE42
ET,2,SOLID186

C*** ===== Geometria =====
x1=0          ! Placa
y1=0
x2=L
y2=0
x3=L
y3=L
x4=0
y4=L

k,1,x1,y1          ! Cria keypoints
k,2,x2,y2
k,3,x3,y3
k,4,x4,y4

!Linhas para áreas quadrada

L,1,2
L,2,3
L,3,4
L,4,1

```

```

AL,1,2,3,4          ! Cria área quadrada

C*** ===== Criação da malha =====

!Malha áreas quadradas

LESIZE,1,,,(10)*fator
LESIZE,2,,,(10)*fator
LESIZE,3,,,(10)*fator
LESIZE,4,,,(10)*fator

AMESH,1

TYPE,2              ! Escolhe o tipo do elemento
MAT,1              ! Escolhe o numero do material

!Criar volume extrudando áreas e malha

EXTOPT,ESIZE,10,0, ! ESIZE PODE SER 10*fator
EXTOPT,ACLEAR,0
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,1
REAL,0
ESYS,0
VOFFST,1,extrusao,,

ACLEAR,           1

C*** ===== Condições de Contorno e Carregamento =====

/SOLU

!Restrições de deslocamento

DA,1,UZ            ! Área base
DA,4,SYMM         ! Área lateral com simetria
DA,5,SYMM         ! Área lateral com simetria
DA,3,UY           ! Área lateral
DA,6,UX           ! Área lateral

SFA,2,,PRES,tensao_peso ! Área topo tensionada

C*** ===== Soluciona e plota solução nodal por von mises =====

/STATUS,SOLU
SOLVE

FINISH
/POST1
!*
/EFACET,1
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0

```

## APÊNCICE C: Linhas de comando para o Caso 2 em 3d de simulação

```

finish
/clear,nostart
/REP,FAST
/COLOR,PBAK,OFF
/REPLOT

/FILNAME,SimulacaoSa12,1

/PREP7

/TITLE,Simulação do sa1

C*** ===== Parametros de Entrada =====

E_sa1=28.4e9
v_sa1=0.36

L=3.1      ! Lado da seção quadrada
raio=0.155 ! Raio do poço
pi=3.1415
extrusao=3.1

tensao_peso=107.58E06

fator=0.55

C*** ===== Propriedades do Material =====

MP,EX,1,E_sa1      ! Define modulo de elasticidade
MP,NUXY,1,v_sa1   ! Define coeficiente de Poisson

C*** ===== Definicao dos Elementos =====

ET,1,PLANE42
ET,2,SOLID186

C*** ===== Geometria =====

x1=0          ! Placa
y1=0
x2=L
y2=0
x3=L
y3=L
x4=0
y4=L

x5=0          ! Poço
y5=raio
x6=raio
y6=0
x7=0
y7=L/2
x8=L/2
y8=0

```

```
x9=L/2
y9=L/2
x10=cos(pi/4)*raio
y10=sin(pi/4)*raio
```

```
x11=L/2
y11=L
```

```
x12=L
y12=L/2
```

```
k,1,x1,y1          ! Cria keypoints
k,2,x2,y2
k,3,x3,y3
k,4,x4,y4
k,5,x5,y5
k,6,x6,y6
```

```
k,7,x7,y7
k,8,x8,y8
k,9,x9,y9
k,10,x10,y10
k,11,x11,y11
k,12,x12,y12
```

```
!Linhas para áreas quadrada
```

```
L,7,4
L,4,11
L,11,3
L,3,12
L,12,2
L,2,8
L,8,9
L,9,7
L,11,9
L,9,12
```

```
!Linhas para áreas perto do poço (mapeamento)
```

```
L,5,7
L,6,8
L,7,9
L,9,8
LARC,5,10,1,raio
LARC,10,6,1,raio
L,10,9
```

```
AL,1,2,9,8          ! Cria área 1
AL,3,4,10,9         ! Cria área 2
AL,5,6,7,10         ! Cria área 3
AL,12,14,15,7       ! Cria área 4
AL,11,13,8,15       ! Cria área 5
```

```
C*** ===== Criação da malha =====
```

```
!Malha áreas quadradas
```

```
LESIZE,1,,,(10)*fator
LESIZE,2,,,(10)*fator
LESIZE,3,,,(10)*fator
LESIZE,4,,,(10)*fator
LESIZE,5,,,(10)*fator
LESIZE,6,,,(10)*fator
LESIZE,7,,,(10)*fator
```

```

LESIZE,8,,,(10)*fator
LESIZE,9,,,(10)*fator
LESIZE,10,,,(10)*fator
LESIZE,11,,,(30)*fator,(10)*fator
LESIZE,12,,,(30)*fator,(10)*fator
LESIZE,13,,,(10)*fator
LESIZE,14,,,(10)*fator
LESIZE,15,,,(30)*fator,(10)*fator

AMESH,1
AMESH,2
AMESH,3

!Malha mapeada

MSHKEY,1
AMESH,4
AMESH,5
MSHKEY,0

TYPE,2                ! Escolhe o tipo do elemento
MAT,1                 ! Escolhe o numero do material

!Criar volume extrudando áreas e malha

EXTOPT,ESIZE,10,0,    ! ESIZE PODE SER 10*fator
EXTOPT,ACLEAR,0
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,1
REAL,0
ESYS,0
VOFFST,1,extrusao,,
VOFFST,2,extrusao,,
VOFFST,3,extrusao,,
VOFFST,4,-extrusao,,
VOFFST,5,extrusao,,

NUMMRG,ALL           ! Une linhas, KP, areas e volumes duplicados

ACLEAR,1
ACLEAR,2
ACLEAR,3
ACLEAR,4
ACLEAR,5

C*** Condições de Contorno e Carregamento

/SOLU

!Restrições de deslocamento

DA,6,UZ                ! Área base plano xy
DA,11,UZ               ! Área base plano xy
DA,16,UZ               ! Área base plano xy
DA,21,UZ               ! Área base plano xy
DA,26,UZ               ! Área base plano xy

DA,13,UX
DA,17,UX

DA,8,UY
DA,12,UY

```

```
DA,22,SYMM      ! Área lateral com poço plano xz
DA,18,SYMM      ! Área lateral com poço plano yz

DA,7,SYMM       ! Área lateral com poço plano yz
DA,27,SYMM      ! Área lateral com poço plano yz
```

!Áreas tensionadas

```
SFA,1,,PRES,tensao_peso    ! Área topo plano xy
SFA,2,,PRES,tensao_peso    ! Área topo plano xy
SFA,3,,PRES,tensao_peso    ! Área topo plano xy
SFA,4,,PRES,tensao_peso    ! Área topo plano xy
SFA,5,,PRES,tensao_peso    ! Área topo plano xy
```

C\*\*\* soluciona e plota tensoes de von mises

```
/STATUS,SOLU
SOLVE
```

```
FINISH
/POST1
!*
/EFACET,1
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
```

## APÊNDICE D: Linhas de comando para o Caso 2 axissimétrico de simulação

```

finish
/clear,nostart
/REP,FAST
/COLOR,PBAK,OFF
/REPLOT

/FILNAME,SimulacaoSal2,1

/PREP7

/TITLE,Simulação do sal

C*** ===== Parametros de Entrada =====

E_sal=28.4e9
v_sal=0.36

L=3.1      ! Lado da seção quadrada
raio=0.155 ! Raio do poço
pi=3.1415
extrusao=3.1

tensao_peso=107.58E06

fator=3.5

C*** ===== Propriedades do Material =====

MP,EX,1,E_sal      ! Define modulo de elasticidade
MP,NUXY,1,v_sal    ! Define coeficiente de Poisson

C*** ===== Definicao dos Elementos =====

ET,1,PLANE42

KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,3,1
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0

C*** ===== Geometria =====

x1=raio
y1=0

x2=raio
y2=extrusao

x3=L
y3=extrusao

x4=L
y4=0

```

```

k,1,x1,y1          ! Cria keypoints
k,2,x2,y2
k,3,x3,y3
k,4,x4,y4

L,1,2              ! Cria Linhas
L,2,3
L,3,4
L,4,1

C*** ===== Criação da malha =====
LESIZE,1,,,(10)*fator      !Divisão das linhas
LESIZE,2,,,(10)*fator
LESIZE,3,,,(10)*fator
LESIZE,4,,,(10)*fator

AL,1,2,3,4
AMESH,1,4
NUMMRG,ALL
LCLEAR,2
C*** ===== Condições de Contorno e Carregamento =====

/SOLU

!Restrições de deslocamento
DL,4,,UY
DL,3,,UX

!Áreas tensionadas
SFL,2,PRES,tensao_peso

C*** ===== Soluciona e plota tensões de von mises =====
/STATUS,SOLU
SOLVE

FINISH
/POST1
!*
/EFACET,1
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0

```

## APÊNDICE E: Linhas de comando para o Caso 3 de simulação.

```

finish
/clear,nostart
/REP,FAST
/COLOR,PBAK,OFF
/REPLOT

/FILNAME,SimulacaoSal2,1

/PREP7

/TITLE,Simulação do sal

C*** ===== Parametros de Entrada =====

E_sal=28.4e9
v_sal=0.36

raio=0.155 ! Raio do poço
pi=3.1415
extrusao=3.1
extrusaopoco=1.55

tensao_peso=107.58E06

fator=4

C*** ===== Propriedades do Material =====

MP,EX,1,E_sal ! Define modulo de elasticidade
MP,NUXY,1,v_sal ! Define coeficiente de Poisson

C*** ===== Definicao dos Elementos =====

ET,1,PLANE2

KEYOPT,1,1,0 ! Define axisimetria
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,3,1
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0

C*** ===== Geometria =====

x1=raio
y1=0
x2=raio*20
y2=0
x3=raio*20
y3=-extrusao
x4=0
y4=-extrusao
x5=0
y5=-extrusaopoco
x6=raio
y6=-extrusaopoco

k,1,x1,y1 ! Cria keypoints

```

```

k,2,x2,y2
k,3,x3,y3
k,4,x4,y4
k,5,x5,y5
k,6,x6,y6

```

```

L,1,6          ! Cria Linhas
L,6,5
L,5,4
L,4,3
L,3,2
L,2,1

```

```
!/eof
```

```
C*** ===== Criação da malha =====
```

```
!Malha áreas quadradas
```

```

LESIZE,1,,, (5)*fator
LESIZE,2,,, (0.5)*fator
LESIZE,3,,, (5)*fator
LESIZE,4,,, (10)*fator
LESIZE,5,,, (10)*fator
LESIZE,6,,, (9.5)*fator

```

```
AL,1,6,5,4,3,2
```

```
AMESH,1
```

```
NUMMRG,ALL
```

```
C*** ===== Condições de Contorno e Carregamento =====
```

```
/SOLU
```

```
!Restrições de deslocamento
```

```
DL,4,,UY
```

```
DL,5,,UX
```

```
DL,3,,SYMM
```

```
SFL,6,PRES,tensao_peso          !Linhas tensionadas
```

```
C*** ===== Soluciona e plota tensões de von mises =====
```

```

/STATUS,SOLU
SOLVE

```

```
FINISH
```

```
/POST1
```

```
!*
```

```
/EFACET,1
```

```
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
```