

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de **P&D** em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ESTUDO TRI-DIMENSIONAL DO COMPORTAMENTO DE DANO À TRAÇÃO EM UM
CORPO DE PROVA DE HALITA NO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

AUTORES:

Maciel, B.M.C.M.¹, Silva, I.J.M. da.², Guimarães, L. J. do N.³

INSTITUIÇÃO:

UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil¹, IFPE, Recife, Pernambuco, Brasil², UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil³

ESTUDO TRI-DIMENSIONAL DO COMPORTAMENTO DE DANO À TRAÇÃO EM UM CORPO DE PROVA DE HALITA NO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

Abstract

This study aims to evaluate the simulation of the diametrical compression test comparing the results of the numerical simulation with the results measured in the laboratory, in a halite test specimen, extracted at the Taquari Vassouras mine, located in the northeastern region of Brazil. The salt rocks have a creep behavior that depends on both the constant tensions and temperature. The fluency model used is based on an empirical formulation that considers the stationary phase of fluency, being one of the most used, this model is known as a double deformation mechanism model or also called a simplified Norton model and also used a constitutive model of traction damage compatible with the CASD (Continuous Approach to Strong Discontinuities). A numerical model with three-dimensional geometry was adopted using the finite element code CODE-BRIGHT (COupled DEformation BRIne Gas and Heat Transport). The CODE_BRIGHT program was able to analyze problems of the diametrical compression test with the use of creep and damage model to represent the behavior of traction damage in salt rock. It should be emphasized that the studies presented are preliminary, thus requiring more in-depth analyzes for a better validation of the applied methodology.

1. Introdução

Quando da construção da avenida Presidente Vargas em 1943, o então Prefeito do Distrito Federal, Henrique Dodsworth, teve a ideia de deslocar a igreja de São Pedro dos Clérigos, uma pequena capela barroca do século XVII, de planta elíptica, para evitar sua demolição. O engenheiro Fernando Luiz Lobo Barboza Carneiro, especialista em concreto, foi designado pelo Diretor da Divisão de Indústria da Construção do Instituto Paulo Accioly de Sá, para fazer um projeto que viabilizasse a transferência. Na Europa já havia sido feito, com sucesso, o transporte de construções sobre rolos de aço. Mas, com a guerra, o aço estava escasso. A ideia foi substituir o aço por concreto, para deslocar a igreja. O plano não chegou a ser posto em prática, pois o laudo final admitia possibilidades de fissura no concreto. O risco, sobretudo político, pois em breve haveriam eleições municipais, intimidou o prefeito, que chegou a contratar técnicos europeus, porém eles também não garantiriam o sucesso da empreitada. Desistiu-se, então, de deslocar a igreja, que foi demolida. O episódio levou Lobo Carneiro a desenvolver um novo método para avaliar a resistência do concreto à tração e em 1947, o método foi levado à Reunião Internacional de Laboratórios de Ensaios, em Paris. Na França foi logo aprovado e usado, passando a ser conhecido como Essai Brésilien ou Teste Brasileiro. Bem mais tarde, em 1962, foi aceito pela American Society for Testing Materials, que reconheceu a autoria de Lobo Carneiro e fez com que, no mundo todo, o processo passasse a ser conhecido como Brazilian Test (Figura 1) (CALADO, 2005).

O objetivo desse trabalho é avaliar a simulação do ensaio de compressão diametral em um corpo de prova de halita. A halita é uma rocha sedimentar formada pela precipitação de sais presentes em soluções aquosas concentradas. Possuem baixa permeabilidade e porosidade, sendo considerado uma rocha selante de excelência em engenharia de petróleo.

Figura 1: Brazilian Test - Ensaio de compressão diametral de um rolo de concreto, realizado pela Divisão de Materiais de Construção, década de 1940 (CALADO, 2005).



2. Formulação matemática

2.1 Modelo constitutivo de creep

A maioria dos modelos de uso prático na engenharia descreve somente uma parte da curva típica de fluência. Alguns modelos representam o regime transiente, enquanto outros trabalham com o regime estacionário. Os modelos mais utilizados em aplicações práticas são baseados em formulações empíricas que consideram a fase estacionária de fluência, sendo um dos mais empregados o modelo de mecanismo duplo de deformação, apresentando bons resultados quando as análises envolvem longos períodos de tempo (COSTA *et al.*, 2005; MEDEIROS, 1999; BOTELHO, 2008; COSTA *et al.*, 2004).

No modelo de mecanismo duplo de deformação, a taxa de deformação de fluência uniaxial é dada por:

$$\dot{\epsilon}_{sc} = \dot{\epsilon}_d \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{do}} \right)^n \quad (1)$$

onde:

$\dot{\epsilon}_{sc}$ = taxa de deformação por fluência no regime estacionário [-]; $\dot{\epsilon}_d$ = taxa de deformação por fluência estacionária corrigida (função da temperatura) [-]; σ_d = tensão desviadora aplicada [MPa]; σ_{do} = tensão desviadora de referência [MPa]; n = parâmetro função da tensão desviadora aplicada,

$$\text{sendo } n = \begin{cases} n_1 & , \quad \sigma_d \leq \sigma_{do} \\ n_2 & , \quad \sigma_d > \sigma_{do} \end{cases}$$

A taxa de deformação $\dot{\epsilon}_d$, por sua vez, é função da temperatura e pode ser calculada conforme (COSTA *et al.*, 2004):

$$\dot{\epsilon}_d = \dot{\epsilon}_{sco} \exp \left(\frac{Q}{R(T_0 + 273,15)} - \frac{Q}{R(T + 273,15)} \right) \quad (2)$$

Onde $\dot{\epsilon}_{sco}$ = taxa de deformação de referência (constante para cada rocha salina) [t^{-1}]; Q = energia de ativação (12 kcal/mol para o sal, aqui adotado para todas as rochas) [12 kcal/mol]; R = constante universal dos gases [0,0019858 kcal/mol/K]; T = temperatura da rocha em subsuperfície [°C]; T_0 = temperatura de referência [°C].

O termo exponencial da Equação 2 é conhecido como fator de ativação térmica e pode ser considerado como um fator multiplicativo da velocidade de deformação de referência, ou seja, uma constante definida em função da temperatura. Esse termo é conhecido também como a Lei de Arrhenius (MOHRIAK *et al.*, 2008).

Este modelo (COSTA *et al.*, 2005; MEDEIROS, 1999; BOTELHO, 2008) encontra-se implementado no programa CODE_BRIGHT (*COupled DEformation BRIne Gas and Heat Transport*) (GUIMARÃES, 2002; GUIMARÃES *et al.*, 2007; SILVA, 2010; SILVA, 2015; SILVA *et al.* 2015; SILVA & GUIMARÃES, 2017). Para o estado multiaxial de tensões conforme a equação abaixo:

$$\dot{\epsilon}_{sc}(\sigma) = \frac{3}{2} \left[\dot{\epsilon}_{sco} e^{\left(\frac{Q}{R \cdot T_0} - \frac{Q}{R \cdot T} \right)} \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{do}} \right)^n \right] \mathbf{M} \sigma \frac{1}{\sigma_d} \quad (3)$$

onde $\dot{\epsilon}_{sc}(\sigma)$ = vetor da taxa de deformação da fluência estacionária [1/ano], $\dot{\epsilon}_{sco}$ = Taxa de deformação de fluência estacionária de referência [1/ano], σ_d = Tensão desviadora de von Mises [MPa], σ_{do} = Tensão desviadora de referência de von Mises [MPa], T_0 = Temperatura de referência [K], T = Temperatura [K], Q = Energia de ativação térmica (depende da rocha salina) [kcal/mol], R = constante universal dos gases [kcal/mol/K], n = expoente que varia de acordo com a tensão desviadora ($n = n_1$, se $\sigma_d \leq \sigma_{do}$ e $n = n_2$, se $\sigma_d > \sigma_{do}$) [-], $\mathbf{M}$ = operador desviador [-], σ = tensor de tensões [MPa]. Os parâmetros $\dot{\epsilon}_{sco}$, σ_{do} , n_1 e n_2 são obtidos através de ensaios de laboratório de fluência sob condições controladas de temperatura e tensão desviadora (MOHRIAK *et al.*, 2008).

2.1 Modelo constitutivo de dano à tração

Os modelos constitutivos de dano são usados como um importante elemento na simulação da degradação mecânica de materiais *quasi-frágeis*, tais como concreto e rochas. Nesta seção, será apresentado o modelo constitutivo de dano à tração compatível com a ACDF (Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes) (SEIXAS, 2015; BESERRA, 2015; OLIVELLA *et al.*, 1994; OLIVER *et al.*, 2002; OLIVER *et al.*, 2004; Oller, 2001) usado neste trabalho para representar os fenômenos degradativos que precedem a formação de fraturas, na chamada zona de processo de fratura.

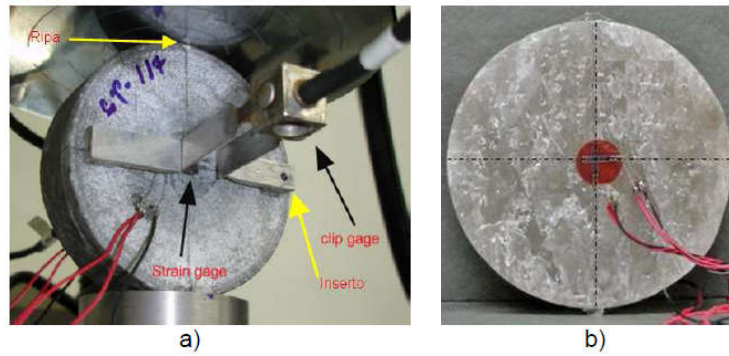
Portanto, o dano pode ser definido como uma grandeza física que avalia o nível de integridade de um corpo. Como no presente trabalho admite-se o modelo de dano isotrópico, segundo o qual o material se degrada igualmente em todas as direções.

A resistência à tração, que pode ser obtida pelo ensaio de compressão diametral (Figura 2), foi calculada através da Equação 4 (POIATE, 2012):

$$q_0 = \left(\frac{2 \cdot F_r}{\pi \cdot L \cdot D} \right) \quad (4)$$

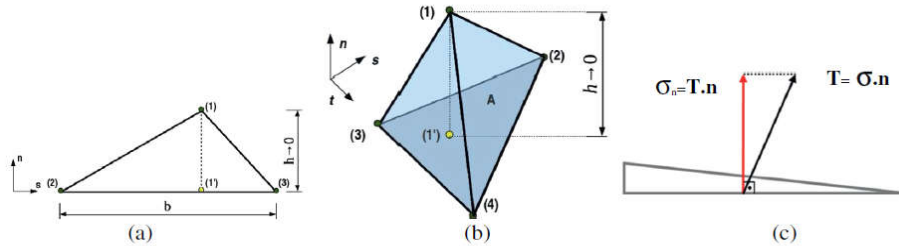
no qual: q_0 : resistência à tração (Nmm² ou MPa); F_r : força de ruptura do corpo de prova (N); L : espessura do corpo de prova (mm); D : diâmetro do CP (mm).

Figura 2: a) Corpo de prova de anidrita e b) halita instrumentados, preparados para ensaio de compressão diametral (Poiate, 2012).



Além do mais deve-se saber que no modelo de dano adotado nos estudos numéricos deste trabalho, o tensor de tensões é projetado na direção normal à superfície da fratura, resultando no vetor de tensões $\bar{\mathbf{T}}$ (traction), e a componente normal deste vetor, $\bar{\sigma}_n$, é utilizada na definição do critério de dano (ou critério de degradação). Na técnica de fragmentação, a direção normal é ortogonal à base do elemento de interface com elevada razão de aspecto (Figura 3).

Figura 3: Elementos finitos de interface com elevada razão de aspecto: (a) Elemento triangular; (b) elemento tetraédrico; e (c) Projeção do vetor de tensões na direção normal elemento de interface (Sánchez et al., 2014).



Uma vez alcançado o limite de dano, degradam-se todas as componentes do tensor de tensões efetivas. A lei constitutiva, na forma tensorial para este modelo, pode ser expressa como na equação 5:

$$\begin{aligned} \sigma &= (1 - d)\bar{\sigma}, \text{ se } \bar{\sigma}_n > 0 \\ \sigma &= \bar{\sigma}, \text{ se } \bar{\sigma}_n \leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

3. Simulação do ensaio de compressão diametral

Adotou-se no presente estudo a geometria tridimensional para análise onde compara-se os resultados de simulação numérica, realizadas no CODE BRIGHT com os resultados medidos em laboratório, descritos em Poiate (2012), num corpo de prova de halita, extraído na mina Taquari Vassouras, com diâmetro (D) de 0,089 m (3,5") e comprimento (L) de 0,031m, submetido ao ensaio compressão diametral sob taxa de carregamento de 0,70 MPa/s e resistência à tração de 2,21 Mpa. Já os parâmetros de creep utilizados foram 0,0016 /ano ($\dot{\epsilon}_{sco}$), 10 Mpa (σ_{do}), 3 (n_1) e 5,8 (n_2) (MOHRIAK *et al.*, 2008). Na Figura 4 (A) apresenta-se um esquema ilustrativo para a simulação do ensaio compressão diametral, onde se utilizou uma malha com elementos tetraédricos de quatro nós, com um total de 9410 elementos e 4543 nós e na Figura 4 (B) os resultados da distribuição do dano com a malha

deformada simulado no CODE BRIGHT. Já na figura 5 pode-se observar aproximação que a simulação obteve com a curva experimental capturada de Poiate (2012).

Figura 4: (A) Geometria e malha de elementos finitos adotada na análise e (B) Distribuição do dano com malha deformada.

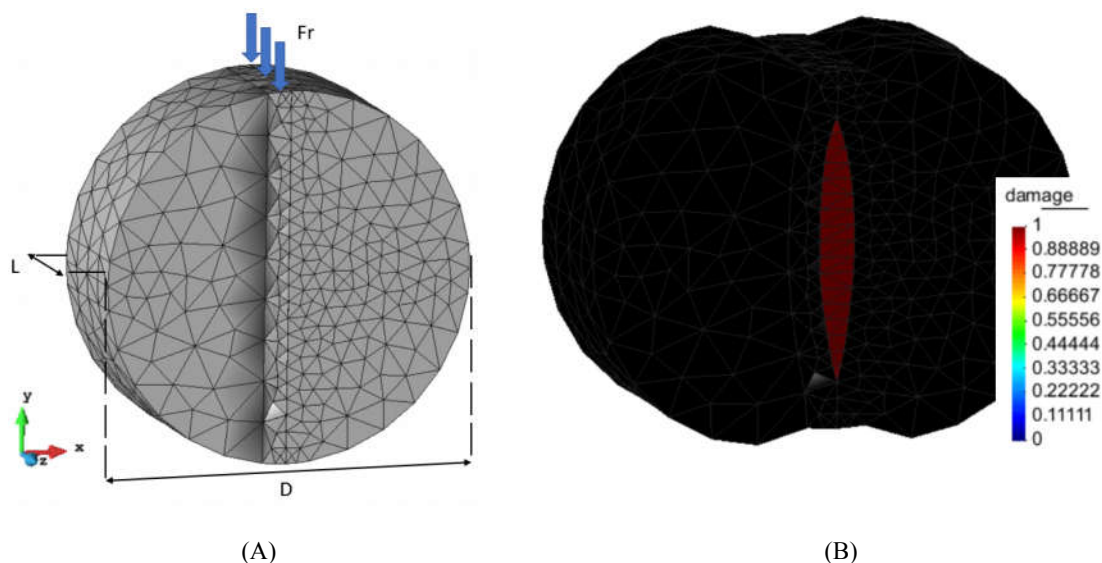
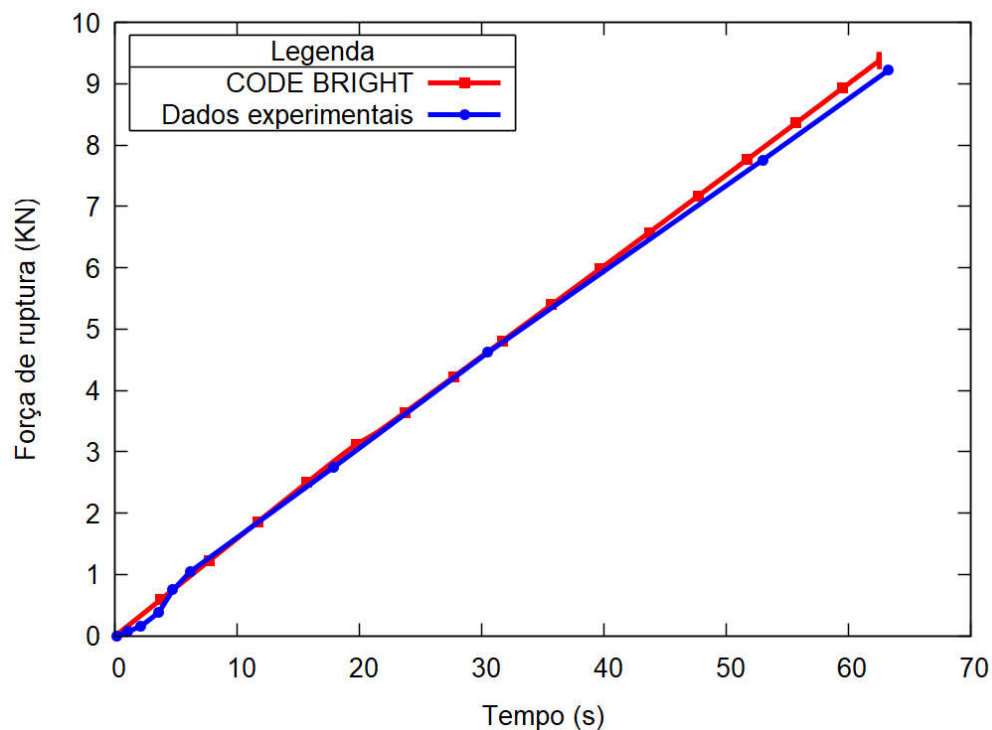


Figura 5: Comparação entre a força de ruptura medida do ensaio de compressão diametral de uma halita, descritas por Poiate (2012) com resultado simulado pelo CODE BRIGHT.



4. Conclusões

Sabendo-se que a halita é uma rocha sedimentar formada pela precipitação de sais presentes em soluções aquosas concentradas e possui baixa permeabilidade e porosidade, sendo

considerada uma rocha selante de excelência na engenharia de petróleo. Rocha selante ou selo, em uma estrutura sedimentar é uma barreira que impede a migração de hidrocarbonetos das rochas-reservatório, favorecendo a sua acumulação. A ruptura de uma rocha selante poderá acarretar em danos ambientais e econômicos incalculáveis, devido a isso se faz necessário o estudo dessas rochas selantes, também, no aspecto de resistência a ruptura. Sabendo-se também que o ensaio de compressão diametral em concreto desenvolvido pelo engenheiro Fernando Luiz Lobo Barboza Carneiro no qual ficou mundialmente conhecido como Teste Brasileiro pode ser aplicado em rochas também. Esse teste resulta na obtenção da resistência à tração. Sendo assim o programa CODE BRIGHT mostrou-se capaz de simular problemas de dano em halita, simulando assim o ensaio de compressão diametral em um corpo de prova extraído na mina Taquari Vassouras.

Referências Bibliográficas

BESERRA, L. B. DE SÁ. 2015. ANÁLISE HIDRO MECÂNICA DO FRATURAMENTO HIDRÁULICO VIA ELEMENTOS FINITOS COM DESCONTINUIDADE FORTE INCORPORADA. TESE DE DOUTORAMENTO. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.

BOTELHO, F. V. C., 2008. ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DO SAL EM POÇOS DE PETRÓLEO. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, PUC - RIO.

CALADO, A.A. 2005. INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA, DESDE 1921 GERANDO TECNOLOGIA PARA O BRASIL.

COSTA, A. M., POIATE, E. JR., FALCÃO, J. L., 2005. TRIAXIAL CREEP TEST IN SALT – APPLIED IN DRILLING THROUGH THICK SALT LAYERS IN CAMPOS BASIN - BRAZIL. INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. NEWS JOURNAL, VOL. 9, PP. 14-24.

COSTA, A. M., MEDEIROS, F. A. S., FONSENCA, C. F., 2004. PERFURAÇÃO DE ESPESSAS CAMADAS DE SAL NA BACIA DE CAMPOS. RELATÓRIO PETROBRÁS.

GUIMARÃES, L. J. N., 2002. ANÁLISIS MULTI-COMPONENTE NO ISOTERMO EN MEDIO POROSO DEFORMABLE NO SATURADO. PHD THESIS, GEOTECHNICAL ENGINEERING DEPARTMENT, TECHNICAL UNIVERSITY OF CATALUNYA, SPAIN.

GUIMARÃES, L. J. N., GENS, A., AND OLIVELLA, S. 2007. COUPLED THERMO-HYDRO-MECHANICAL AND CHEMICAL ANALYSIS OF EXPANSIVE CLAY SUBJECTED TO HEATING AND HYDRATION. TRANSPORT IN POROUS MEDIA, 66:341–372.

MEDEIROS, F., A., S., 1999. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE COLUNAS DE REVESTIMENTO FRENTE À MOVIMENTAÇÃO DO SAL EM POÇOS DE PETRÓLEO. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, PUC-RIO.

MOHRIAK, W., SZATMAN, P., ANJOS, S. M. C., 2008. SAL: GEOLOGIA E TECTÔNICA (EXEMPLOS NAS BACIAS BRASILEIRAS). (1ª ED). BECA EDIÇÕES LTDA. PETROBRÁS, SÃO PAULO.

OLIVELLA, S., CARRERA, J., AND ALONSO, E. 1994. NONISOTHERMAL MULTIPHASE FLOW OF BRINE AND GAS THROUGH SALINE MEDIA. TRANSPORT IN POROUS MEDIA, 15:271–293.

OLIVER, J., HUESPE, A.E., SAMANIEGO, E., CHAVES, E.V.W. 2002. ON STRATEGIES FOR TRACKING STRONG DISCONTINUITIES IN COMPUTATIONAL FAILURE MECHANICS. IN PROCEEDINGS OF THE FIFTH WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS (WCCM V), VIENNA, AUSTRIA, MANG HA, RAMMERSDORFER FG, ERBERHARDSTEINER J (EDS).

OLIVER J, HUESPE AE, SAMANIEGO E, CHAVES EV OLIVER, J., HUESPE, A.E., SAMANIEGO, E., CHAVES, E.V.W W. 2004. CONTINUUM APPROACH TO THE NUMERICAL SIMULATION OF MATERIAL FAILURE IN CONCRETE. INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL AND ANALYTICAL METHODS IN GEOMECHANICS; 28(7–8):609–632.

OLLER S. 2001. FRACTURA MECÁNICA. UN ENFOQUE GLOBAL. CENTRO INTERNACIONAL DE MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA, BARCELONA, ESPANHA.

POIATE JR, E. 2012. MECÂNICA DAS ROCHAS E MECÂNICA COMPUTACIONAL PARA PROJETOS DE POÇOS DE PETRÓLEO EM ZONAS DE SAL. TESE DE DOUTORAMENTO. PUC-RIO.

SILVA, I.J.M. DA. 2010. IMPLEMENTAÇÃO VIA ALGORITMO IMPLÍCITO DE MODELOS DE FLUÊNCIA DE ROCHAS SALINAS EM PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, RECIFE, PE, 148 P.

SILVA, I. J. M. DA. 2015. ANÁLISE DE ESTABILIDADE E DEFORMAÇÃO DE CAVIDADES EM EVAPORITOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS. TESE DE DOUTORADO, UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, RECIFE, PE.

SILVA, I. J. M. DA, GUIMARÃES, L. J. N., GOMES, I.F. 2015. GEOMECHANICAL STUDIES OF ROCK SALT CAVES IN GAS STORAGE. CILAMCE 2015, PROCEEDINGS OF THE XXXVI IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING NEY AUGUSTO DUMONT (EDITOR), ABMEC, RIO DE JANEIRO, RJ, BRAZIL, NOVEMBER 22-25.

SILVA, I. J. M. DA, GUIMARÃES, L. J. N. 2017. CREEP MODELLING IN THE EXCAVATION OF SALT MINES CONSIDERING THE TRANSIENT AND STEADY-STATE CREEP. Presentation at the 51st US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium held in San Francisco, California, USA, 25-28 June 2017.

SÁNCHEZ, M., MANZOLI, O. L., GUIMARÃES, L. J. N.. 2014. MODELING 3-D DESICCATION SOIL CRACK NETWORKS USING A MESH FRAGMENTATION TECHNIQUE. COMPUTERS AND GEOTECHNICS, 62:27–39.

SEIXAS, M. G. 2015. MODELAGEM HIDRO-MECÂNICA DO FRATURAMENTO HIDRÁULICO DE ROCHAS VIA ELEMENTOS FINITOS COM ELEMENTOS ESPECIAIS DE INTERFACE. TESE DE DOUTORAMENTO, UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.