



As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 3

Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)

Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)

As Engenharias frente a Sociedade, a
Economia e o Meio Ambiente 3

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Executiva: Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Natália Sandrini
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^a Dr^a Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^a Dr^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof^a Dr^a Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof^a Dr^a Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof.^a Dr.^a Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E57	As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente 3 [recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (As Engenharias Frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente; v. 3) Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-432-0 DOI 10.22533/at.ed.320192506 1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Série. CDD 658.5
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

As obras As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente Volume 1, 2, 3 e 4 abordam os mais diversos assuntos sobre métodos e ferramentas nas diversas áreas das engenharias a fim de melhorar a relação do homem com o meio ambiente e seus recursos.

O Volume 1 está disposto em 31 capítulos, com assuntos voltados a engenharia do meio ambiente, apresentando processos de recuperação e reaproveitamento de resíduos e uma melhor aplicação dos recursos disponíveis no ambiente, além do panorama sobre novos métodos de obtenção limpa da energia.

Já o Volume 2, está organizado em 32 capítulos e apresenta uma vertente ligada ao estudo dos solos e águas, com estudos de sua melhor utilização, visando uma menor degradação do ambiente; com aplicações voltadas a construção civil de baixo impacto.

O Volume 3 apresenta estudos de materiais para aplicação eficiente e econômica em projetos, bem como o desenvolvimento de projetos mecânico e eletroeletrônicos voltados a otimização industrial e a redução de impacto ambiental, sendo organizados na forma de 28 capítulos.

No último Volume, são apresentados capítulos com temas referentes a engenharia de alimentos, e a melhoria em processos e produtos.

Desta forma um compendio de temas e abordagens que facilitam as relações entre ensino-aprendizado são apresentados, a fim de se levantar dados e propostas para novas discussões em relação ao ensino nas engenharias, de maneira atual e com a aplicação das tecnologias hoje disponíveis.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CERÂMICOS DE ALUMINA-ZIRCÔNIA PARA APLICAÇÃO COMO FERRAMENTAS DE CORTE	
Miguel Adriano Inácio Maria do Carmo de Andrade Nono José Vitor Cândido de Souza Sergio Luiz Mineiro Daniel Alessandro Nono	
DOI 10.22533/at.ed.3201925061	
CAPÍTULO 2	10
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MODELO ELASTOPLÁSTICO EM ROCHA CARBONÁTICA CARSTIFICADA	
Rayane Conceição Ribeiro da Silveira Mattos Daniel Araújo Farias de Melo Marinésio Pinheiro de Lima Tiago de Freitas Viana Igor Fernandes Gomes Leonardo José do Nascimento Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.3201925062	
CAPÍTULO 3	26
A INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS COM APLICAÇÃO EM PRÓTESES ORTOPÉDICAS	
Glauber Rodrigues Cerqueira de Cerqueira Pedro Eliézer de Araújo Júnior	
DOI 10.22533/at.ed.3201925063	
CAPÍTULO 4	42
MICROPOROUS ACTIVATED CARBON FIBER FELT FROM BRAZILIAN TEXTILE PAN FIBER: PREPARATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION AS SUPERCAPACITOR ELECTRODE	
Jossano Saldanha Marcuzzo Aline Castilho Rodrigues Andres Cuña Nestor Tancredi Eduardo Mendez Heide Heloise Bernardi Mauricio Ribeiro Baldan	
DOI 10.22533/at.ed.3201925064	
CAPÍTULO 5	55
ANÁLISE COMPARADA DE UM AGREGADO DE ESCÓRIA DE ACIARIA COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LASTRO DE VIAS FÉRREAS DO TIPO <i>HEAVY HAUL</i> POR MEIO DE ENSAIOS TRIAXIAIS	
Bruno Guimarães Delgado Antônio Viana da Fonseca Eduardo Fortunato Daniela Raquel Ferreira Coelho	
DOI 10.22533/at.ed.3201925065	

CAPÍTULO 6	71
CARACTERIZAÇÃO EM FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA DE FIOS DE ARAME DE SOLDA	
Ingrid Ariani Belineli Barbosa	
Heide Heloise Bernardi	
William Marcos Muniz Menezes	
DOI 10.22533/at.ed.3201925066	
CAPÍTULO 7	80
ESTUDO DA MICROESTRUTURA NA ZONA TERMICAMENTE AFETADA COM A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM	
Luís Henrique Pires da Silva	
Alex Sander Chaves da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.3201925067	
CAPÍTULO 8	92
ESTUDO DA USINAGEM DA SUPERLIGA A BASE DE FERRO-NÍQUEL UTILIZANDO FERRAMENTA CERÂMICA	
Eduardo Pires Bonhin	
Sarah David Müzel	
Marcel Yuzo Kondo	
Lúcia de Almeida Ribeiro	
José Vitor Candido de Souza	
Marcos Valério Ribeiro	
DOI 10.22533/at.ed.3201925068	
CAPÍTULO 9	100
CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE NÉVOA SALINA ATENDENDO AOS REQUISITOS MÍNIMOS CONTIDOS NAS NORMAS ISO 9227 e ASTM B-117	
Leonardo de Souza Coutinho	
Alexandre Alvarenga Palmeira	
DOI 10.22533/at.ed.3201925069	
CAPÍTULO 10	111
MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA: COLHEITADEIRAS AXIAIS X RADIAIS	
Filipi José Arantes Lemos	
João Mario Mendes de Freitas	
DOI 10.22533/at.ed.32019250610	
CAPÍTULO 11	127
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA O PROJETO DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES	
Jamile Maria Araujo Tavares	
Rejane Martins Fernandes Canha	
DOI 10.22533/at.ed.32019250611	
CAPÍTULO 12	142
ESTUDO NUMÉRICO DE UM EQUIPAMENTO DE SECAGEM	
Eduardo Dal Piva Schuch	
Magaiver Gabriel Lamp	
Conrado Mendes Morais	
Ângela Beatrice Dewes Moura	
DOI 10.22533/at.ed.32019250612	

CAPÍTULO 13	153
SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA A COMBUSTÃO DE GASOLINA	
Felipe Michael Grein	
Jean Lucas Pereira	
Luiz Felipe Weck	
Olaf Graupmann	
DOI 10.22533/at.ed.32019250613	
CAPÍTULO 14	156
MODELAGEM DE PID PARA SISTEMA DE CONTROLE DE RAMPAS DE TEMPERATURA EM BRASSAGEM	
Gabriel Queiroz	
Marcelo Barros de Almeida	
Márcio Jose da Cunha	
DOI 10.22533/at.ed.32019250614	
CAPÍTULO 15	168
MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DINÂMICOS: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA	
Lucas Divino Alves	
Neylor Makalister Ribeiro Vieira	
Emerson Paulino dos Reis	
DOI 10.22533/at.ed.32019250615	
CAPÍTULO 16	183
APLICAÇÃO E ANÁLISE VIA MEC EM PROBLEMAS DE TERMOELASTICIDADE 2D	
Luis Vinicius Pereira Silva	
Gilberto Gomes	
João Carlos Barleta Uchôa	
DOI 10.22533/at.ed.32019250616	
CAPÍTULO 17	198
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INJEÇÃO DE ÁGUA EM RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO HETEROGÊNEO	
Raquel Oliveira Lima	
José Arthur Oliveira Santos	
Antônio Jorge Vasconcellos Garcia	
Felipe Barreiros Gomes	
DOI 10.22533/at.ed.32019250617	
CAPÍTULO 18	207
TANQUES FLASH: DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CUSTOS NO SOFTWARE DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO EMSO	
Erich Potrich	
Sérgio Correia da Silva	
Larissa Souza Amaral	
DOI 10.22533/at.ed.32019250618	

CAPÍTULO 19	215
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DEPOSIÇÃO ORGÂNICA EM OPERAÇÕES DE MISTURA DE PETRÓLEOS NO TANQUE DE ESTOCAGEM EM REFINARIAS DE PETRÓLEO	
Rosberguer de Almeida Camargo	
Mauren Costa da Silva	
Rafael Beltrame	
Darci Alberto Gatto	
Antônio Carlos da Silva Ramos	
DOI 10.22533/at.ed.32019250619	
CAPÍTULO 20	223
AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MENSURAR A ILUMINÂNCIA EM UM AVIÁRIO EXPERIMENTAL	
Giovanni Polette Dalla Libera	
Victor Moreira Leão	
Vitor Augusto de Sousa	
Matheus Fernando Lima Zuccherelli de Souza	
Renata Lima Zuccherelli de Oliveira	
Marcelo Eduardo de Oliveira	
Adriano Rogério Bruno Tech	
DOI 10.22533/at.ed.32019250620	
CAPÍTULO 21	230
CONTROLADOR FUZZY SINTONIZADO POR ALGORITMO GENÉTICO EM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	
Lenon Diniz Seixas	
Diego Solak Castanho	
Hugo Valadares Siqueira	
Fernanda Cristina Corrêa	
DOI 10.22533/at.ed.32019250621	
CAPÍTULO 22	243
CONTROLADORES ROBUSTO APLICADO A CONVERSORES CC-CC	
Luiz Otávio Limurci dos Santos	
Luiz Antonio Maccari Junior	
DOI 10.22533/at.ed.32019250622	
CAPÍTULO 23	261
PROPOSTA DE PLATAFORMA PARA ESTUDO DE MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6	
Marcos José de Moraes Filho	
Luciano Coutinho Gomes	
Darizon Alves de Andrade	
Josemar Alves dos Santos Junior	
Wanberton Gabriel de Souza	
Cássio Alves de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.32019250623	

CAPÍTULO 24	275
ESTUDO COMPARATIVO DE MODELAGENS DE ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISES DE ESFORÇOS ELETROME CÂNICOS	
Pedro Henrique Aquino Barra Arnaldo José Pereira Rosentino Junior Antônio Carlos Delaiba	
DOI 10.22533/at.ed.32019250624	
CAPÍTULO 25	287
PROCEDIMENTO PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO LAÇO DE HISTERESE MAGNÉTICA	
Vitor Hörbe Pereira Da Costa Antônio Flavio Licarião Nogueira Leonardo José Amador Salas Maldonado	
DOI 10.22533/at.ed.32019250625	
CAPÍTULO 26	294
SIMULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO E CORRENTE ELÉTRICA EM TECIDOS BIOLÓGICOS	
Guilherme Brasil Pintarelli Afrânio de Castro Antonio Jr. Raul Guedert Sandra Cossul Daniela Ota Hisayasu Suzuki	
DOI 10.22533/at.ed.32019250626	
CAPÍTULO 27	307
SISTEMA DE PRESENÇA UTILIZANDO IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA	
Giovani Formaggio Mateus Ricardo Barroso Leite	
DOI 10.22533/at.ed.32019250627	
CAPÍTULO 28	322
SISTEMAS DEFASADORES EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO MICROFITA EM SUBSTRATO FR4	
Jobson De Araújo Nascimento José Moraes Gurgel Neto Alexsandro Aleixo Pereira da Silva Regina Maria de Lima Neta	
DOI 10.22533/at.ed.32019250628	
CAPÍTULO 29	333
ANÁLISES DA RUPTURA EM TRECHO DA BR-060 NO MUNICÍPIO DE ALEXÂNIA, GOIÁS, E CONDIÇÕES APÓS SEIS ANOS DA RECUPERAÇÃO	
Rideci Farias Tiago Matias Lino Haroldo da Silva Paranhos Itamar de Souza Bezerra Ranieri Araújo Farias Dias Alexsandra Maiberg Hausser	
DOI 10.22533/at.ed.32019250629	
SOBRE O ORGANIZADOR.....	346

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MODELO ELASTOPLÁSTICO EM ROCHA CARBONÁTICA CARSTIFICADA

Rayane Conceição Ribeiro da Silveira Mattos

Universidade Federal de Pernambuco
Recife - Pernambuco

Daniel Araújo Farias de Melo

Universidade Federal de Pernambuco
Recife - Brasil

Marinésio Pinheiro de Lima

Universidade Federal de Pernambuco
Recife - Brasil

Tiago de Freitas Viana

Universidade Federal de Pernambuco
Recife - Brasil

Igor Fernandes Gomes

Universidade Federal de Pernambuco
Recife - Brasil

Leonardo José do Nascimento Guimarães

Universidade Federal de Pernambuco
Recife - Brasil

RESUMO: Ao longo dos anos inúmeras pesquisas vêm sendo realizadas dentro do contexto da engenharia de petróleo com o intuito de realizar análises mais realistas de cenários de produção. No que se refere aos reservatórios carbonáticos, além das fraturas, um sistema cárstico pode desempenhar um papel importante no escoamento de fluidos no interior do reservatório. Portanto, o estudo da geração de carste e o mecanismo de colapso

associado é de grande importância para o entendimento da disposição e interação das feições cársticas no interior do reservatório. Desta forma, este trabalho tem como objetivo fazer uma simulação numérica do colapso de um depósito carbonático cárstico através do método dos elementos finitos. A proposta trata-se de um cenário carbonático fictício com carstes bem desenvolvidos e não preenchidos, sobreposto por quatro camadas rochosas de propriedades distintas, com uma sobrecarga de 13 MPa, representando o soterramento das camadas. Na simulação foi utilizado o programa *in house* de elementos finitos CODE_BRIGHT considerando para as camadas rochosas envolvidas o modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb com regularização viscosa de Perzyna. A formação do carste foi modelada empregando-se um algoritmo de escavação da região considerando, em uma abordagem mecânica e em deformação plana, a representação de um processo de dissolução da rocha carbonática. Observou-se os processos de plastificação no entorno das três cavidade devido a concentração de tensões. Também foi verificado o arqueamento das tensões na rocha e zonas potenciais de fraturamento por tração e cisalhamento, o que foi mais evidenciado com o emprego de um modelo de *softening*.

PALAVRAS-CHAVE: Carste, Colapso, Plasticidade, Simulação Numérica.

ABSTRACT: Over the years, lots of researches have been carried out within the context of petroleum engineering in order to come up with realistic analyzes of production numerical scenarios. Regarding carbonate reservoirs, in addition to fractures, a karst system can have great importance in the flow system into the reservoir. Therefore, the study of karst formation and its associated collapse mechanism is of indispensable to the understanding of the arrangement and interaction of karstic features within the reservoir. Following this context, this work aims to present a numerical simulation of the collapse of a karstic carbonate deposit through the finite element method. The proposal is a fictitious carbonate scenario, which has well developed and unfilled karst, with four rock layers of distinct properties, with an overload of 13 MPa, representing the rearrangement of layers. In the simulation, the in-house program of CODE_BRIGHT finite elements was used considering the rocky layers with the elasto-plastic model of Mohr-Coulomb with viscous Perzyna regularization. The formation of the karst was modeled using an algorithm of excavation of the region considering, in a mechanical approach and in plan deformation, which represents a process of dissolution of the carbonate rock. It was observed that the plastification processes in the surroundings of all three karsts due to the concentration of tensions. It was also noticed the arching of stress in the rock and potential areas of fracturing by traction and shear, which was more evidenced with the use of a softening model.

KEYWORDS: Karst, Collapse, Plasticity, Numerical Simulation.

1 | INTRODUÇÃO

Durante o processo de extração do petróleo o reservatório sofre alterações no seu estado de tensões inicial devido à alteração do campo de pressão, temperatura e saturação, levando à alterações das propriedades permoporosas da rocha. Referindo-se a rochas carbonáticas, existe uma dificuldade de previsão da variação da porosidade e permeabilidade nesse tipo de reservatório. Além disso, a elevada sensibilidade química dos carbonatos é um fator importante neste modelo de depósito, porque esse fato resulta numa dinâmica de dissolução, reprecipitação e neomineralização por toda a extensão do reservatório. Portanto, em razão da natureza reativa dessas rochas aos fluidos circulantes e a sua alta tendência à formação de carste, existe um grande interesse da indústria do petróleo em estudar esses depósitos carsticos. O carste é produzido por um processo de dissolução da rocha, geralmente carbonática ou evaporítica, levando à formação de cavidades. O processo de carstificação se dá comumente pela ação da água da chuva que infiltra na formação (carste epigênico) como também pela ação de fluidos subterrâneos hidrotermais ascendentes (carste hipogênico). O evento acontece em escalas variadas, desde o poro até a ocorrência de cavernas (Drew, 1985). Segundo Martini (1979) e Klimchouk (2009), no processo de carstificação, a porosidade secundária, representada por planos de acamamento, juntas, falhas e outras discontinuidades é muito relevante no fenômeno. Vários acidentes, como confinamento de ferramentas e desabamento de intervalos de poços,

podem acontecer durante a produção.

Reservatórios carbonáticos com presença de feições carsticas podem, portanto, favorecer a produção do óleo devido ao aumento da porosidade global do reservatório com a carstificação da rocha bem como a permeabilidade associada também ao sistema de fraturas que os conectam. Porém, é de grande relevância o estudo do comportamento mecânico deste tipo de rocha uma vez que as deformações podem oferecer riscos ou benefícios à produção, especialmente no que se refere à compactação diferencial (heterogênea) promovida pela variação espacial das propriedades elásticas da rocha pelas zonas de carste (Nadeau & Ehrenberg, 2006; Gale & Gomes, 2007; Silva, 2011; Jeanne *et al.*, 2012).

O sistema cárstico em rochas carbonáticas geralmente leva à formação de uma região de colapso cuja geometria depende diretamente de fatores locais como o estado de tensões e suas direções, a existência e direções de falhas e fraturas e a extensão da camada carbonática onde o processo de carstificação ocorre, entre outros.

Loucks (1999) discute que reservatórios carbonáticos com presença de sistema de carste apresentam uma heterogeneidade maior que no caso de carste isolados, uma vez que as zonas de colapso são mais frequentes e levam a uma interconexão entre as cavernas (no caso de carste nessa ordem de escala).

Nos eventos de colapso, novas fraturas se desenvolvem não só no teto das cavidades como também nas zonas entre estas que podem evidenciar a sua comunicação. Portanto, o estudo do colapso de uma região com feições carsticas, e da interação entre diferentes cavidades, se mostra relevante para a predição da região influenciada por esse processo. Isto pode subsidiar a estimativa de zonas de porosidade e permeabilidade diferenciada dentro do reservatório carbonático.

Uma alternativa para este tipo de estudo, além das atividades de caracterização e modelagem geológica baseada em dados geofísicos, de testemunho e de afloramentos análogos, é a modelagem numérica ao se empregar modelos matemáticos adequados para uma simulação fisicamente aproximada do problema.

Em face do que foi exposto, e em virtude do crescimento das atividades produtoras de petróleo em depósitos carbonáticos, este trabalho tem como objetivo fazer uma simulação numérica de um modelo mecânico elastoplástico do colapso de um depósito carbonático cárstico através do Método dos Elementos Finitos (MEF), para melhor compreensão do fenômeno geotécnico que envolve este processo.

2 | METODOLOGIA

O cenário sintético criado representa um depósito carbonático com três cavidades bem desenvolvida e não preenchidas, sobreposta por quatro camadas rochosas de diferentes litologias. Para isso foi empregada uma malha de elementos finitos tipo triângulo linear, não estruturada, com 9639 nós e 19002 elementos (Figura 1). O

domínio é submetido a uma condição edométrica, ou seja, as faces laterais e base são restringidas quanto ao deslocamento na direção normal e na face superior é prescrita uma tensão vertical de 13 MPa representando o soterramento da camada. Foram criadas as geometrias das cavidades, com cerca de 10 metros da abertura lateral e 6 metros de altura dispostas de forma aleatória entre si.

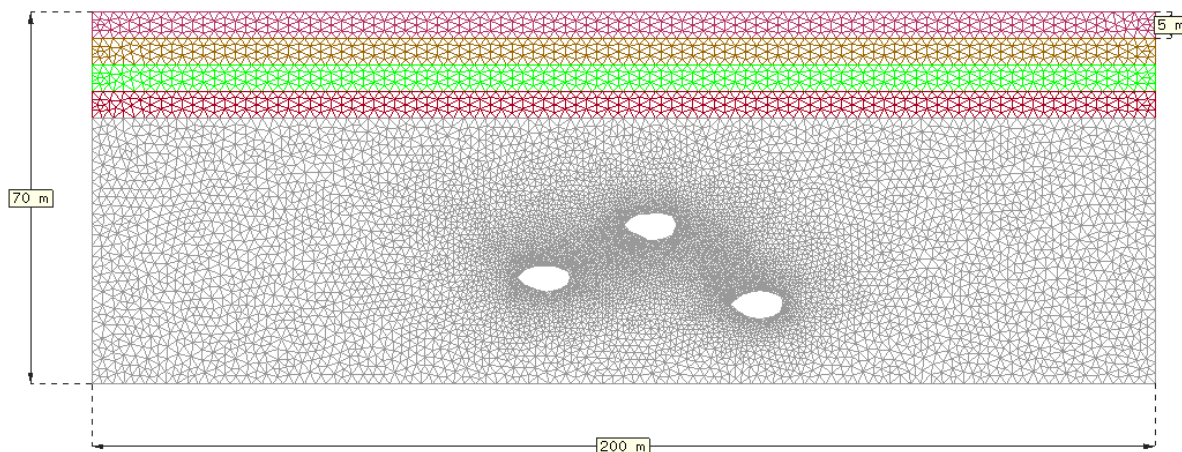


Figura 1 - Malha de elementos finitos.

Os parâmetros geomecânicos das rochas encontram-se listados na Tabela 1, as camadas foram enumeradas em ordem crescente de cima para baixo. O material do interior das cavidades é o mesmo da camada carbonática (Rocha 5).

Rocha	c (MPa)	φ (°)	E (GPa)	ν	η (%)
1	3,17	23	10,4	0,30	15
2	4	23	8,0	0,15	16
3	2	30	9,5	0,30	26
4	3.17	23	10,4	0,30	15
5	4	23	8,0	0,15	16

Tabela 1 - Parâmetros Geomecânicos das Rochas.

Onde c é a coesão, φ o ângulo de atrito, E o módulo de elasticidade, ν o coeficiente de Poisson e η a porosidade da rocha.

A simulação numérica foi realizada utilizando o programa *in house* de elementos finitos CODE_BRIGHT (*COupled DEformation, BRine, Gas and Heat Transport*). O modelo elasto-plástico adotado foi o de Mohr-Coulomb com regularização viscosa de Perzyna. No primeiro momento foi gerado um estado de tensão inicial no modelo, posteriormente aplicou-se um algoritmo de escavação na região, em uma abordagem mecânica e em deformação plana, representando o processo de dissolução da rocha carbonática.

Foram empregados os modelos de plasticidade perfeita e de plasticidade com

softening e comparados os múltiplos efeitos da plastificação em cada caso.

3 | FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

3.1 Equações do Problema Mecânico

Para analisar o comportamento mecânico do meio em questão, é necessário observar suas condições de equilíbrio, cinemáticas e constitutivas. A equação do equilíbrio de tensões é dada pela Equação 1, onde $\boldsymbol{\sigma}$ representa o tensor de tensões e \mathbf{b} representa as forças de corpo do material.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0 \quad (1)$$

As Equações 2 e 3 representam as condições de contorno de Dirichlet e Neumann, respectivamente.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^* \text{ em } \Gamma_u \quad (2)$$

$$\mathbf{t} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_r = \mathbf{t}^* \text{ em } \Gamma_t \quad (3)$$

Onde \mathbf{n}_r é o vetor normal ao contorno Γ e \mathbf{u}^* e \mathbf{t}^* são os valores prescritos de deslocamentos e cargas nos contornos Γ_u e Γ_t , respectivamente.

As restrições cinemáticas relacionam os deslocamentos \mathbf{u} , ocorridos devido a variações no estado de tensões, com as deformações $\boldsymbol{\varepsilon}$, conforme Equação 4.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \quad (4)$$

A relação entre tensão e deformação consiste em um modelo constitutivo elastoplástico definido por função de fluência $F(\boldsymbol{\sigma}, k)$, obtida em função das tensão e dos parâmetros plásticos do material. O valor da função de fluência identifica o tipo do comportamento do material, como ilustra a Figura 2.

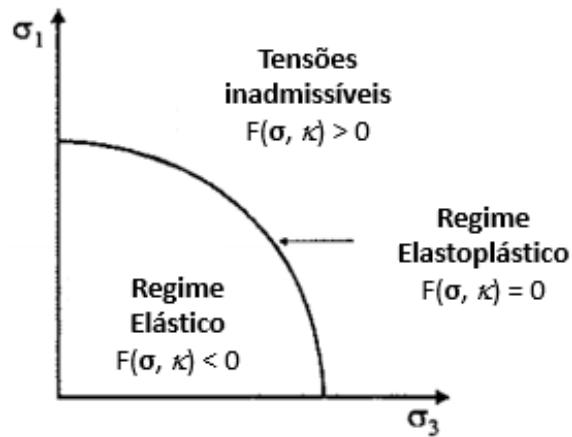


Figura 2 – Curva de função de fluência. Fonte: (Adaptado de Potts & Zdravkovic, 1999).

No regime elástico, tensões e deformações são relacionadas através do tensor elástico \mathbf{D}_e . No regime elastoplástico, \mathbf{D}_{ep} relaciona as tensões e deformações conforme a Equação 5. Segundo Abbo (1997) e Gomes *et al.* (2006), este tensor é determinado em função do tensor elástico e dos gradientes da função de fluência $F(\sigma, k)$ e do potencial plástico $P(\sigma, m)$, com relação ao estado de tensões, ao multiplicador $\Delta\lambda$ e ao gradiente da função de fluência com relação às variáveis de história k (apud Gomes *et al.*, 2009).

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{D}_{ep} \cdot \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (5)$$

Aqui é adotada a regularização viscosa da plasticidade por meio do modelo viscoplástico de Perzyna, pois, neste modelo, o estado de tensões pode assumir valores que ultrapassem a superfície de fluência. Sua regra de fluxo é dada pela Equação (6), resultado da adaptação da regra de fluxo utilizada na análise plástica por meio do multiplicador λ , representado na Equação (7), onde μ é o parâmetro de viscosidade (Gomes *et al.*, 2009).

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \lambda \cdot \frac{\partial P(\boldsymbol{\sigma}, q)}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\langle \phi(F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa)) \rangle}{\mu} \quad (7)$$

Onde $\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}$ é a parcela de deformação viscoplástica que é somada a uma parcela de deformação elástica para resultar na deformação total utilizada no modelo de Perzyna.

Análogo ao que acontece para plasticidade associada, quando consideramos a viscoplasticidade perfeita, a função potencial $P(\boldsymbol{\sigma}, q)$ iguala-se à função de fluência

$F(\sigma, q)$. O modelo de Perzyna considera a adoção de uma nova matriz tangente D'' em função do gradiente de deformação viscoplástica, seguindo pela aplicação na equação discretizada de equilíbrio de tensões.

O critério de Mohr-Coulomb (Equação 8) foi o adotado no modelo de plastificação. Esta equação resulta em uma superfície piramidal de base pentagonal irregular, como mostra a Figura 3, e envolve também os dados de resistência c e ϕ , coesão e ângulo de atrito, respectivamente (Abbo, 1997; Potts & Zdravkovic, 1999; Gomes *et al.*, 2009).

$$F(\sigma, \kappa) = J - \left(\frac{c}{\tan \phi} + p \right) g(\theta) = 0 \quad (8)$$

$$g(\theta) = \frac{\text{sen } \phi}{\cos \theta + \frac{\text{sen } \theta \cdot \cos \phi}{\sqrt{3}}} \quad (9)$$

Onde p , J e θ são os invariantes de tensão definidos como tensão média, desviadora e ângulo de Lode, respectivamente.

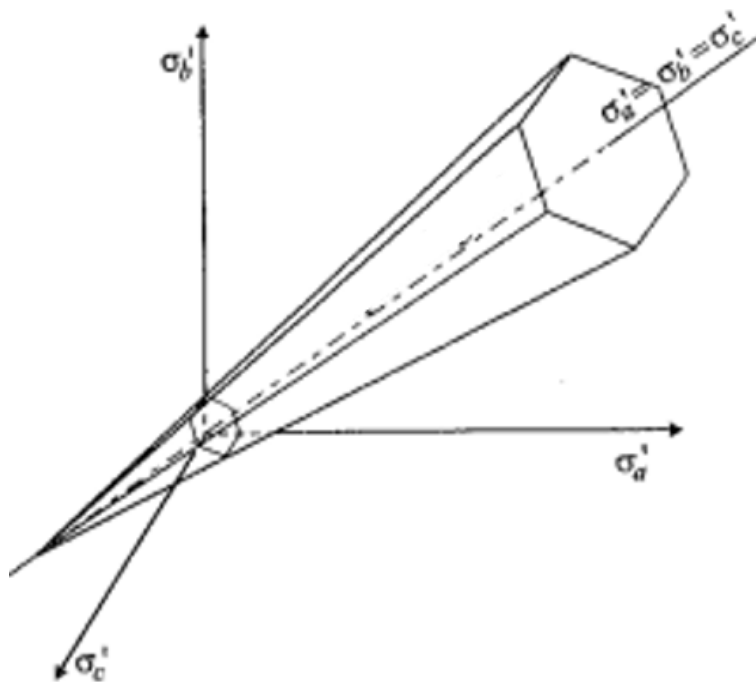


Figura 3 – Superfície de fluência de Mohr-Coulomb no espaço de tensões principais. Fonte: (Adaptado de Potts & Zdravkovic, 1999).

3.2 Plasticidade com *Softening*

O modelo de *softening* pode ser descrito por uma diminuição na superfície de fluência com o aumento da deformação plástica (Figura 4), que por sua vez é relacionada ao parâmetro k (Fjaer *et al.*, 2008). Seguindo o carregamento mostrado na Figura 4.b, para o modelo de *softening* e de plasticidade perfeita, a superfície de fluência inicial

é atingida no ponto b. Uma vez atingida essa superfície de fluência iniciam-se as deformações plásticas e a superfície diminui. Se, durante as deformações plásticas, o material for descarregado, o mesmo se comportará elasticamente, conforme a trajetória c-d da Figura 4.b. Se carregado novamente, o seguimento de descarregamento c-d será retrçado até a rocha encontrar a nova superfície de fluência, no ponto c. Como se percebe na Figura 4.a, a superfície de fluência será, portanto, menor do que a inicial.

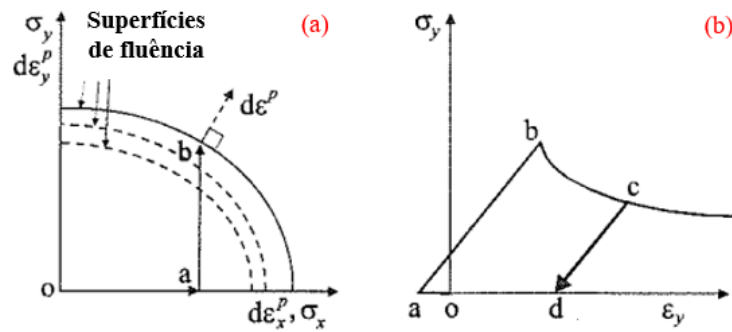


Figura 4 – Comportamento de um material elastoplástico com *softening*. (a) Comportamento da superfície de fluência e (b) Comportamento da tensão *versus* deformação. Fonte: (Adaptado de Potts & Zdravkovic, 1999).

Segundo Potts & Zdravkovic (1999), no modelo de Mohr-Coulomb, os parâmetros de resistência, coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) variam linearmente com as deformações plásticas desviadoras acumuladas. Esta relação é mostrada na Figura 5.

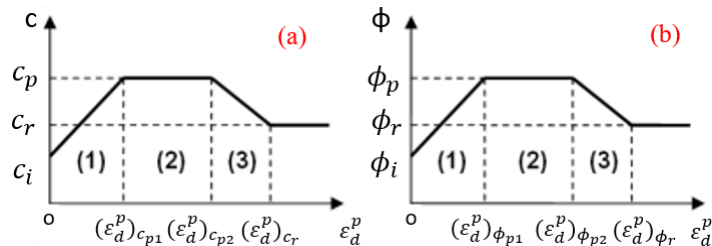


Figura 5 – Lei de hardening/softening para (a) coesão e (b) ângulo de atrito. Fonte: (Adaptado de Potts & Zdravkovic, 1999).

Como se vê na Figura 5, existem três tipos de comportamento. Na zona 1, os parâmetros de resistência aumentam linearmente dos valores iniciais para os valores de pico, registrando, portanto, um comportamento de *hardening*. Na zona 2, esses parâmetros permanecem constantes e igual aos valores de pico, ilustrando a plasticidade perfeita. Já na zona 3, adotada neste trabalho, a coesão e o ângulo de atrito diminuem linearmente dos valores de pico para os valores residuais, caracterizando o comportamento de *softening*.

4 | RESULTADOS

Os resultados foram obtidos para os modelos de plasticidade perfeita e plasticidade com *softening*. Para alguns resultados foram analisados os resultados nos pontos 1 e 2, identificados na Figura 6, em ambos os modelos.

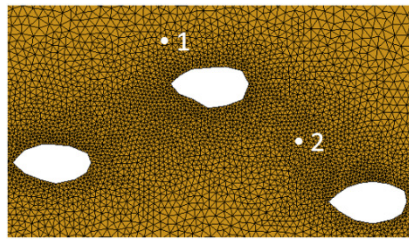


Figura 6 – Identificação dos pontos analisados.

4.1 Tensões

Nas Figuras 7 e 8, encontram-se os valores das tensões cisalhantes resultantes dos processos de plastificação dos modelos de softening e plasticidade perfeita, a convenção de sinais adotada é de positivo para tração e negativo para compressão. Ambos os modelos apresentam zonas de cisalhamento com considerável nível de tensão cisalhante, equivalente entre eles, porém o modelo com *softening* caracteriza melhor essas zonas, inclusive dando uma melhor indicação de propagação destas zonas para as camadas acima da rocha carbonática bem como para a interação entre as cavidades.

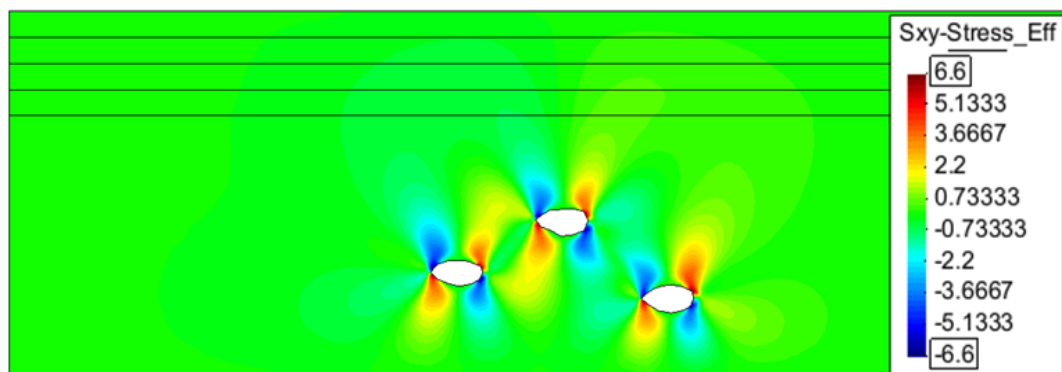


Figura 7 – Tensão de cisalhamento com Plasticidade Perfeita (tempo = 2×10^7 s).

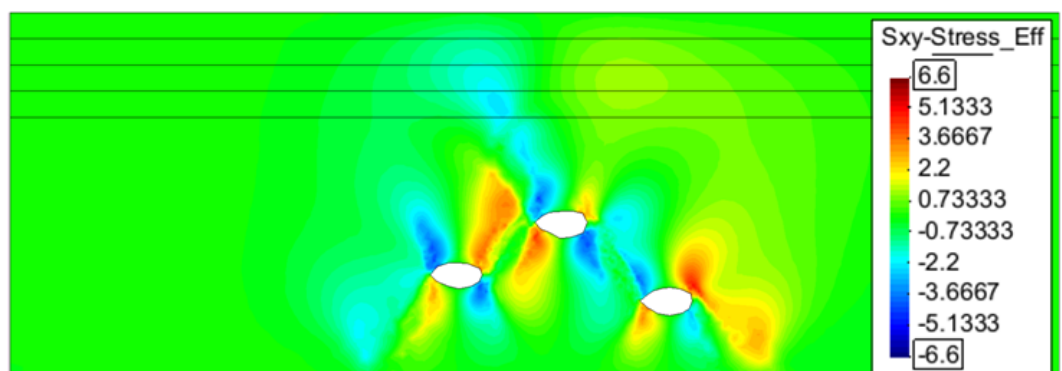


Figura 8 – Tensão de cisalhamento com *softening* (tempo = 2×10^7 s).

Nas Figuras 9 e 10, são ilustrados os valores das tensões verticais resultantes. Nota-se que para a região sobre e sob o teto e base das cavidades há a formação de uma zona de tração (dada por tensões positivas) enquanto que entre as cavidades há uma concentração de tensões verticais de compressão, com magnitude bastante superior às tensões de tração. Isto consiste no efeito do alívio de tensões e perda de suporte da região devido ao processo de carstificação representado pela simulação da escavação ao longo de tempo. É importante também verificar que em ambos os casos há uma concentração de tensões de compressão na região entre os carstes, representando de forma adequada a distribuição de tensões em um sistemas de câmaras e pilares.

No caso em que se considera o modelo de softening, observa-se uma maior projeção das tensões de tração nas camadas acima.

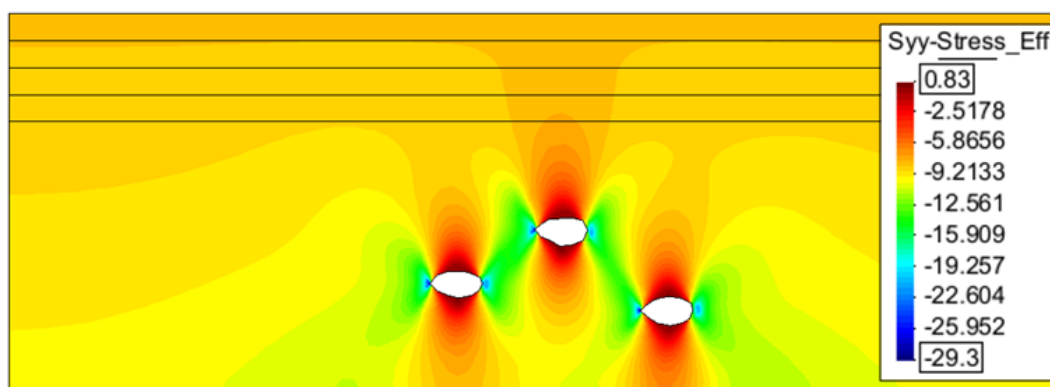


Figura 9 – Tensão Vertical com Plasticidade perfeita (tempo = 2×10^7 s).

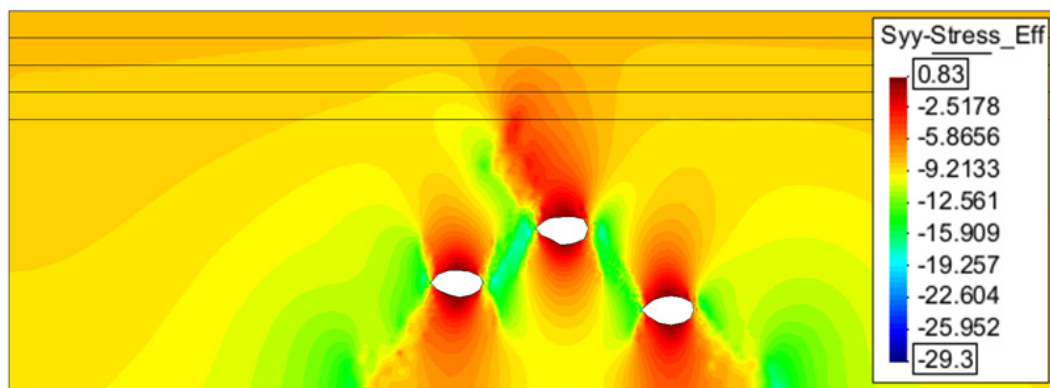


Figura 10 – Tensão Vertical com softening (tempo = 2×10^7 s).

Na Figura 11 também é possível ver os efeitos do modelo viscoplástico de Perzyna, onde as tensões assumem valores que excedem a superfície de fluência, tanto no modelo com plasticidade perfeita como no de *Softening*.

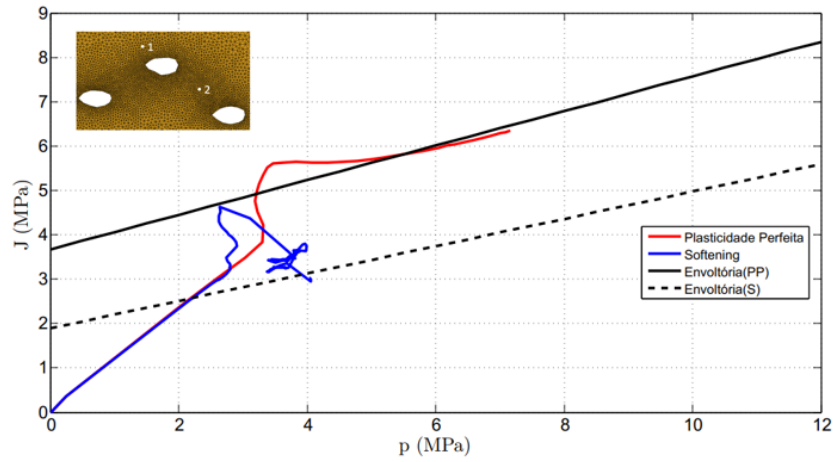


Figura 11 – Trajetória de tensões no ponto 2, com a envoltória de tensões máximas admissíveis.

4.2 Evolução das Deformações Plásticas e Porosidade

As deformações plásticas encontram-se ilustradas nas Figuras 12 e 13, observando-se uma zona de ruptura, através das deformações plásticas, melhor definida no modelo de *softening*. Verifica-se também a tendência de comunicação entre as cavidades (carste).

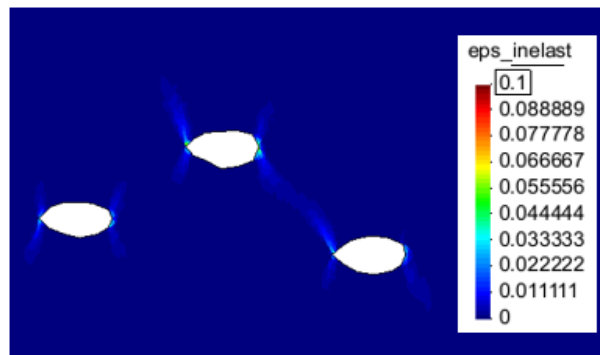


Figura 12 – Deformação plástica para modelo de plasticidade perfeita (tempo = 2.7×10^7 s).

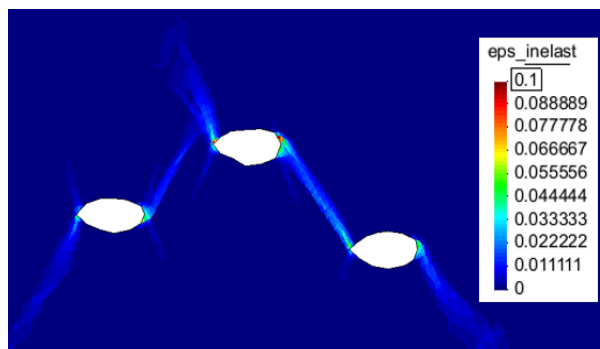


Figura 13 – Deformação plástica para modelo de plasticidade com *softening* (tempo = 2×10^7 s).

Nas Figuras 14 a 15 são ilustrados, para cada modelo, os valores das deformações plásticas e da porosidade ao longo do tempo, respectivamente, para o ponto 1.

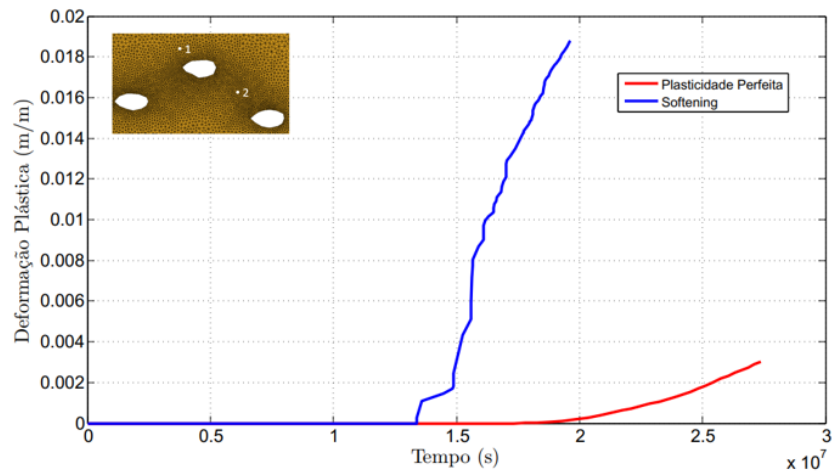


Figura 14 – Evolução das deformações plásticas no ponto 1 para os modelos de Plasticidade perfeita e *softening*.

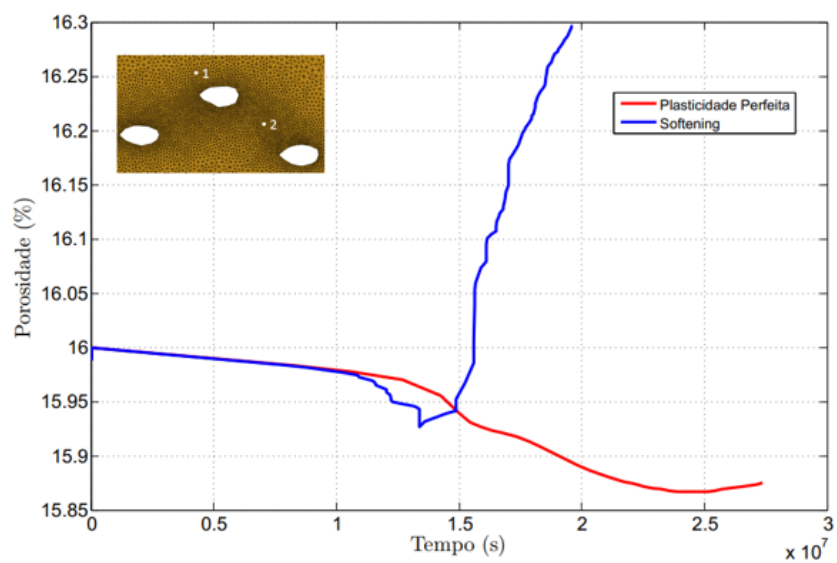


Figura 15 - Evolução das porosidades no ponto 1 para os modelos de Plasticidade perfeita e *softening*.

Nas Figuras 16 e 17 são ilustrados, para cada modelo, os valores da deformação plástica e porosidade ao longo do tempo, respectivamente, para o ponto 2.

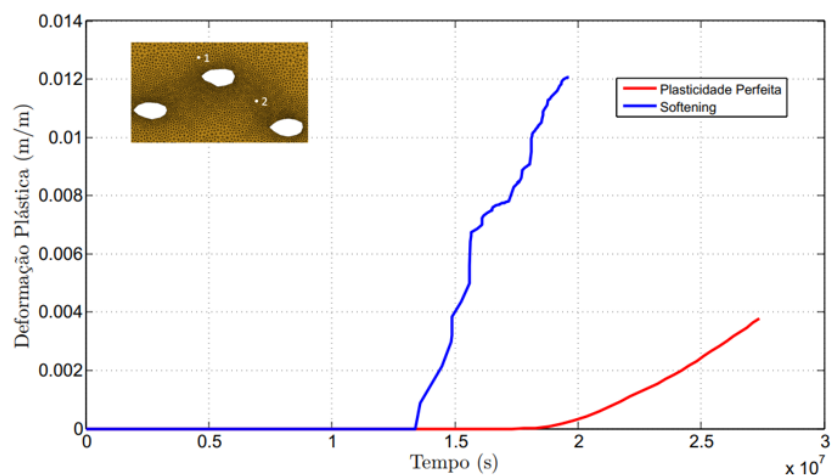


Figura 16 – Evolução das deformações plásticas no ponto 2 para os modelos de Plasticidade perfeita e *softening*.

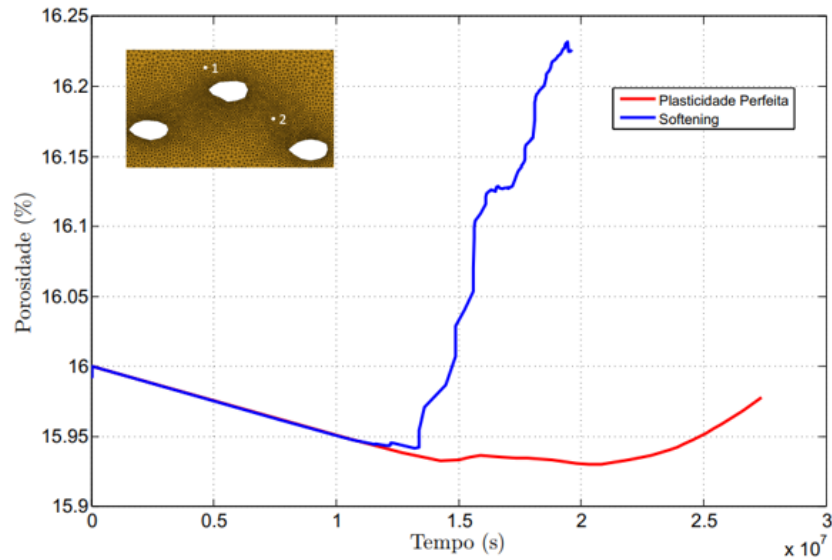


Figura 17 - Evolução das porosidades no ponto 2 para os modelos de Plasticidade perfeita e *softening*.

A partir das Figuras 14 e 16, verifica-se que para o modelo de plasticidade perfeita a rocha apresenta um comportamento elástico por um maior período. Nas Figuras 15 e 17 podemos observar um aumento na porosidade caracterizando o fenômeno de dilatância, ocorrido devido a concentração de tensões cisalhantes.

4.3 Deslocamentos e Subsidiência

Nas Figuras 18 e 19 observam-se os resultados dos deslocamentos verticais devido ao processo de formação dos carstes. Os deslocamentos observados no gráfico da Figura 20 correspondem a subsidiência ocorrida no topo da formação. Portanto, através destes perfis, pode-se ter uma estimativa do contorno da dolina formada pelo colapso deste sistema cárstico. Como ilustrado, no modelo de plasticidade com *softening* os efeitos do processo de plastificação e intercomunicação entre as cavidades são mais intensos.

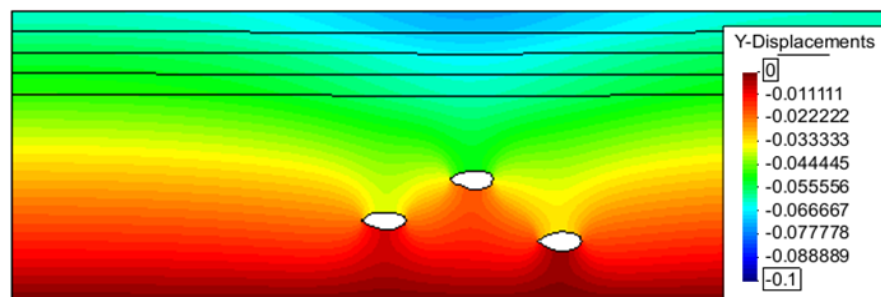


Figura 18 – Deslocamento Vertical com malha deformada (Fator 25) com Plasticidade Perfeita (tempo = 2×10^7 s).

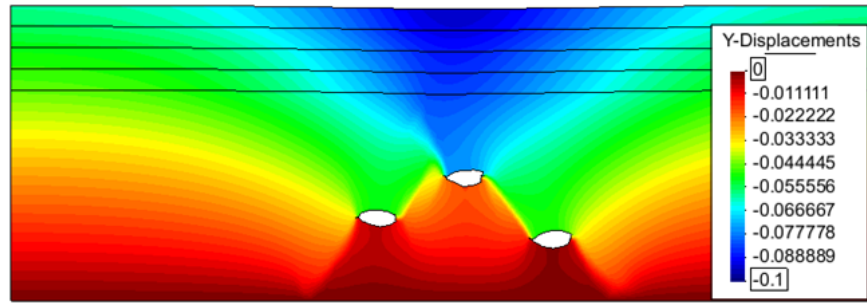


Figura 19 – Deslocamento Vertical com malha deformada (Fator 25) com *softening* (tempo = 2×10^7 s)

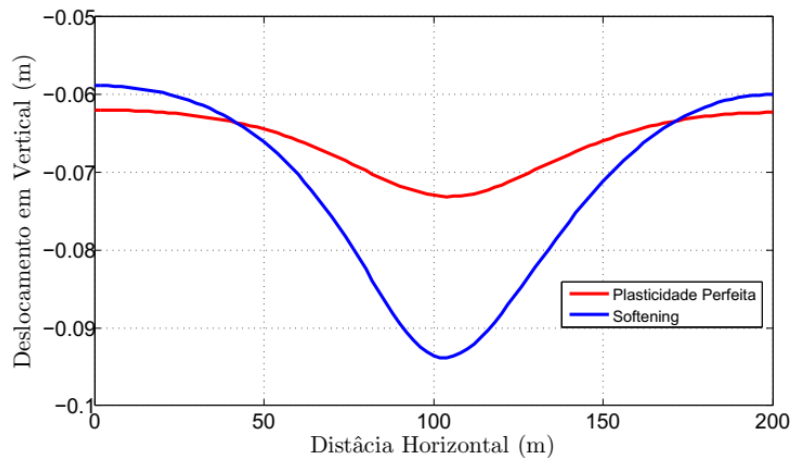


Figura 20 – Deslocamentos verticais no topo da formação (tempo = 2×10^7 s).

4.4 Evolução dos Parâmetros de Resistência: coesão e ângulo de atrito

De acordo com modelo de *softening*, os valores dos parâmetros de resistência da rocha, coesão e ângulo de atrito, variam com o aumento das deformações plásticas. Essa variação, para cada ponto especificado, pode ser observada nas Figuras 21 e 22, dado que a diminuição nos valores desses parâmetros ocorre no mesmo tempo em que se iniciam as deformações plásticas, conforme Figuras 14 e 16. Esse comportamento se mostrou coerente com o apresentado na Figura 5.

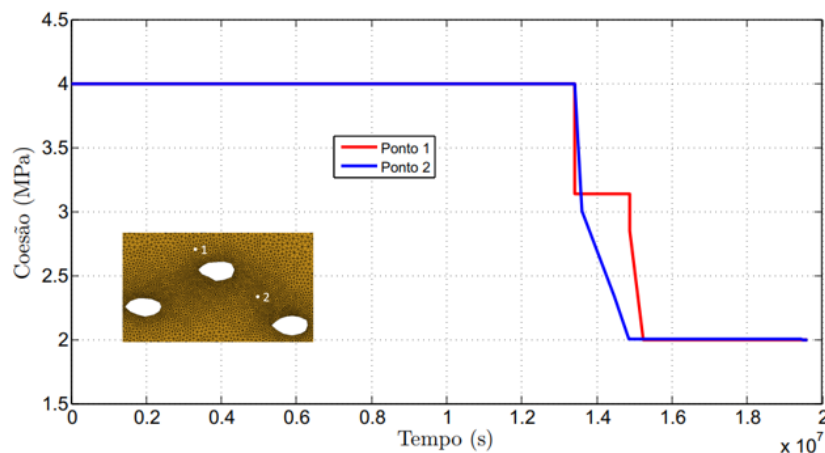


Figura 21 – Evolução da coesão com o tempo.

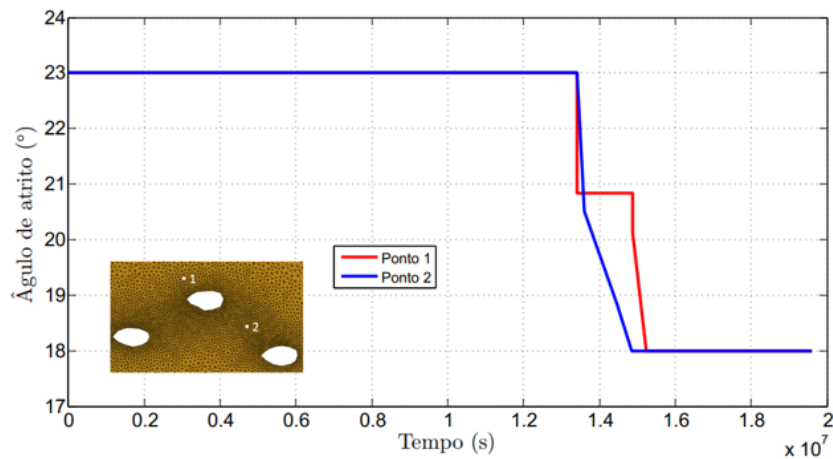


Figura 22 – Evolução do ângulo de atrito com o tempo.

Na figura 23, encontram-se ilustrados os valores de coesão para as diferentes camadas do cenário. As deformações plásticas, na camada 5, são caracterizadas por uma região de menor coesão devido ao fenômeno de *softening*. Novamente se observa a tendência de comunicação entre os carstes, justificada pela concentração de tensões nessa região, como apresentado em 4.1.

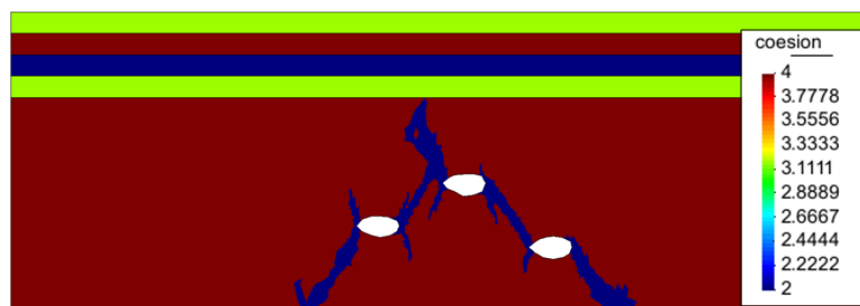


Figura 23 – Valores de coesão para o modelo de plasticidade com *softening*.

5 | CONCLUSÕES

Foi possível perceber nos modelos de plasticidade perfeita e plasticidade com *softening* regiões de plastificação no entorno dos carstes, evidenciadas nas Figuras 12 e 13, e comprovado através dos gráficos de evolução da deformação plástica (Figuras 14 e 16).

Observou-se uma tendência de comunicação pela ruptura por cisalhamento entre as cavidades, representada pela zona de deformação plástica e de tensões cisalhantes e evidenciada pelo aumento da porosidade e redução da coesão e ângulo de atrito. Ao se considerar o modelo elastoplástico de Mohr Coulomb empregando uma lei de *softening*, chegou-se a uma resposta tensão deformação mais realista, com uma melhor definição da região de ruptura e sua influência sobre as demais camadas.

A regularização viscosa da plasticidade, através do modelo viscoplástico de Perzyna, permitiu avaliar a resposta mecânica após a ruptura em uma condição de

redistribuição de tensões.

Verificou-se que o colapso associado a um sistema cárstico tem forte influência sobre a configuração mecânica e hidráulica da formação geológica, implicando em uma heterogeneidade importante a ser considerada no modelo de reservatório. A interação entre as cavidades, nas condições geométricas e de contorno modeladas, foi observada.

REFERÊNCIAS

Abbo, A. J. (1997). **Finite Element Algorithms for Elastoplasticity and Consolidation**. PhD Thesis, University of Newcastle, pp. 271, February.

Drew, D. (1985). **Karst Processes and Landforms**. Londres: Macmillan Education.

Fjaer, E.; Holt, R. M.; Horsrud P.; Raaen A. M.; Risnes, R. (2008). **Petroleum Related Rock Mechanics**. *Developments In Petroleum Science*, 2º ED. Elsevier.

Fernandes, G. I. (2009). **Implementação em elementos finitos das equações de pressão e saturação para simulação de fluxo bifásico em reservatórios de petróleo deformáveis**. PhD thesis, Tesede Doutorado de Pernambuco, Brasil.

Gale, J. F. W.; Gomez, L. A. (2007). **Late opening mode fractures in karst-brecciated dolostones of the Lower Ordovician Ellenburger Group, west Texas: Recognition, characterization, and implications for fluid flow**. *American Association of Petroleum Geologist*, 91(7), 1005-1023.

Jeanne, P.; Guglielmi, Y.; Lamarche, J.; Cappa, F.; Marié, L. (2012). **Architectural characteristics and petrophysical properties evolution of a strike-slip fault zone in a fractured porous carbonate reservoir**. *Journal of Structural Geology*, 44, 93-109.

Klimchouk, A. (2009). **Morphogenesis of hypogenic caves**. *Geomorphology*, 106, 100-117.

Loucks, R. G. (1999). **Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications**. *AAPG bulletin*, 83, 1795-1834.

Martini, J. (1979). **Karst in the Black Reef Quartzite near Kaapsehoop**. *Annals of the Geological Survey of South Africa*, 13, 115-128.

Nadeau, P. H.; Ehrenberg, S. N. (2006). **Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships: Reply**. *AAPG Bulletin*, 90(5), 811-813.

Potts, D. M.; Zdravković, L. (1999). **Finite element analysis in geotechnical engineering**. Vol. 1, Published by Thomas Telford Publishing, London.

Silva, A. T. (2011). **The contribution of brittle deformation processes on improving hydrocarbon carbonate reservoirs: the Jandaíra Formation (Turonian – Campanian) as analogue**. Tese (Doutorado). Roma: Dipartimento di Scienze Geologiche – Roma Tre.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-432-0

