A woman wearing a white hard hat and a blue blazer is shown in profile, looking down at a large architectural drawing she is holding. The background is a blurred industrial or construction site. The image is framed by a dark orange border with red diagonal lines crossing in the upper right and lower right corners.

**Cleverson Flor da Rosa  
Franciele Bonatto  
João Dallamuta  
(Organizadores)**

## **Impactos das Tecnologias nas Engenharias 3**

**Cleverson Flor da Rosa**  
**Franciele Bonatto**  
**João Dallamuta**  
(Organizadores)

# **Impactos das Tecnologias nas Engenharias**

## **3**

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Lorena Prestes e Geraldo Alves

Revisão: Os autores

#### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
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  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

I34 Impactos das tecnologias nas engenharias 3 [recurso eletrônico] / Organizadores Cleveson Flor da Rosa, Franciele Bonatto, João Dallamuta. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Impactos das Tecnologias nas Engenharias; v. 3)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-193-0

DOI 10.22533/at.ed.930191503

1. Engenharia. 2. Inovações tecnológicas. 3. Tecnologia. I. Rosa, Cleveson Flor da. II. Bonatto, Franciele. III. Dallamuta, João. IV. Título.

CDD 658.5

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

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.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

Esta obra é composta por pesquisas realizadas por professores de cursos de engenharia e gestão. Optamos por uma abordagem multidisciplinar por acreditarmos que esta é a realidade da pesquisa em nossos dias.

A realidade é que não se consegue mais compartimentar áreas do conhecimento dentro de fronteiras rígidas, com a mesma facilidade do passado recente. Se isto é um desafio para trabalhos de natureza mais burocrática como métricas de produtividade e indexação de pesquisa, para os profissionais modernos está mescla é bem-vinda, porque os desafios da multidisciplinariedade estão presentes na indústria e começam a ecoar no ambiente mais ortodoxo da academia.

Esta obra temos aspectos de gestão aplicada, em análises econômicas, de ambiente de negócios, análise de confiabilidade, mapeamento de processos e qualidade. Também são abordadas pesquisas nas áreas de construção e urbanismo. Todos os trabalhos com discussões de resultados e contribuições genuínas em suas áreas de conhecimento.

Boa leitura

Cleverson Flor da Rosa  
Franciele Bonatto  
João Dallamuta

# UMA ABORDAGEM MULTIDISCIPLINAR

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
ANÁLISE DAS ALTERAÇÕES NO AMBIENTE REGULATÓRIO E SEUS IMPACTOS NO DESENVOLVIMENTO DO PRÉ-SAL	
<i>João Sílvio Semolini Olim</i>	
<i>Johnson Herlich Roslee Mensah</i>	
<i>Jamil Haddad</i>	
<i>Roberto Akira Yamachita</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.9301915031</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>11</b>
ANÁLISE DO MAPA DO FLUXO DE VALOR EM UMA FARMÁCIA HOSPITALAR DE VITÓRIA DA CONQUISTA – BA	
<i>Carla Monique Rocha dos Santos</i>	
<i>Adelma Costa Cordeiro</i>	
<i>Cinara Gomes dos Santos</i>	
<i>Iggor Lincolln Barbosa da Silva</i>	
<i>Juliana Cristina de Souza</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.9301915032</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>23</b>
ANÁLISE ECONÔMICA DA INJEÇÃO DE ÁGUA EM CAMPOS MADUROS NA REGIÃO DA BACIA POTIGUAR UTILIZANDO UM MODELO BIDIMENSIONAL	
<i>Talles André Moraes Albuquerque</i>	
<i>Jardel Dantas da Cunha</i>	
<i>Keila Regina Santana Fagundes</i>	
<i>Antônio Robson Gurgel</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.9301915033</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>38</b>
APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DE ANÁLISE DE FALHA - FMEA NA INSTALAÇÃO DE BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO (BCS) EM CAMPOS MADUROS ONSHORE NA BACIA DO RECONCAVO	
<i>Jeanderson de Souza Mançú</i>	
<i>Luiz Eduardo Marques Bastos</i>	
<i>Raymundo Jorge de Sousa Mançú</i>	
<i>Graciele Cardoso Mançú</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.9301915034</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>48</b>
APLICAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO (CEP) COMO MÉTODO DE CONTROLE DA QUALIDADE PARA A SECAGEM DE CAFÉ	
<i>Uilla Fava Pimentel</i>	
<i>Gildeir Lima Rabello</i>	
<i>Willian Melo Poubel</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.9301915035</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>55</b>
LEVANTAMENTO COMPARATIVO SERGIPE VS BRASIL DO CONSUMO, COMERCIALIZAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DO GÁS NATURAL AO LONGO DE 10 ANOS	
<i>Raí Melo de Oliveira</i>	
<i>Thereza Helena Azevedo Silva</i>	

*Marcela de Araújo Hardman Côrtes*

**DOI 10.22533/at.ed.9301915036**

**CAPÍTULO 7 ..... 63**

REDE NEURAL DE ELMAN APLICADA NA PREVISÃO DE PREÇOS DE COMBUSTÍVEIS

*Renan Pires de Araújo*

*Adrião Duarte Dória Neto*

*Andrés Ortiz Salazar*

**DOI 10.22533/at.ed.9301915037**

**CAPÍTULO 8 ..... 70**

BIOPROSPECÇÃO DE ESTRATÉGIAS PARA MANUFATURA DE BIODIESEL

*Débora da Silva Vilar*

*Milson dos Santos Barbosa*

*Isabelle Maria Duarte Gonzaga*

*Aline Resende Dória*

*Lays Ismerim Oliveira*

*Luiz Fernando Romanholo Ferreira*

**DOI 10.22533/at.ed.9301915038**

**CAPÍTULO 9 ..... 85**

USO DO ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP) PARA HIERARQUIZAÇÃO DE MÉTODOS DE MENSURAÇÃO DO GRAU DE APLICAÇÃO DA CONSTRUÇÃO ENXUTA

*Arthur Felipe Echs Lucena*

*Luci Mercedes De Mori*

**DOI 10.22533/at.ed.9301915039**

**CAPÍTULO 10 ..... 102**

SEGURANÇA DO TRABALHADO EM CAMPOS PETROLÍFEROS ONSHORE DA BACIA SERGIPE-ALAGOAS: PERCEPÇÕES SOBRE TERCEIRIZAÇÃO, ACIDENTES OMITIDOS E PROCEDIMENTOS ADEQUADOS

*Milson dos Santos Barbosa*

*Débora da Silva Vilar*

*Aline Resende Dória*

*Adyson Barboza Santos*

*Elayne Emilia Santos Souza*

*Luiz Fernando Romanholo Ferreira*

**DOI 10.22533/at.ed.93019150310**

**CAPÍTULO 11 ..... 113**

A INFLUÊNCIA DA ERGONOMIA EM MELHORIAS PRODUTIVAS UTILIZANDO A EQUAÇÃO NIOSH

*Emerson da Silva Moreira*

*Luiz Eduardo Nicolini do Patrocinio Nunes*

**DOI 10.22533/at.ed.93019150311**

**CAPÍTULO 12 ..... 131**

SIMULAÇÃO DA ONDA COMPRESSIONAL APLICADO EM MODELOS DIGITAIS DE ROCHAS

*Gracimário Bezerra da Silva*

*José Agnelo Soares*

*Leopoldo Oswaldo Alcázar Rojas*

**DOI 10.22533/at.ed.93019150312**

**CAPÍTULO 13 ..... 142**

MULTIÁREAS DA ENGENHARIA ELÉTRICA COMO CONTEÚDOS COMPLEMENTARES APLICADOS À REDE PÚBLICA DE ENSINO

*Hélvio Rubens Reis de Albuquerque*  
*Raimundo Carlos Silvério Freire*

**DOI 10.22533/at.ed.93019150313**

**CAPÍTULO 14 ..... 157**

DESENVOLVIMENTO DE BANCADA PARA INVESTIGAÇÃO DE HIDRODEMOLIÇÃO EM AMBIENTES PRESSURIZADOS

*Lidiani Cristina Pierri*  
*Rafael Pacheco dos Santos*  
*Jair José dos Passos Junior*  
*Anderson Moacir Pains*  
*Marcos Aurélio Marques Noronha*

**DOI 10.22533/at.ed.93019150314**

**CAPÍTULO 15 ..... 164**

DELTA NOB

*Andressa Regina Navas*  
*Leticia Tieppo*  
*Renan Ataide*  
*Guilherme Legramandi*  
*Ludmilla Sandim Tidei de Lima Pauleto*  
*André Chaves*

**DOI 10.22533/at.ed.93019150315**

**CAPÍTULO 16 ..... 171**

AValiação comparativa entre métodos de aferição do teor de umidade em peças de madeira de dimensões reduzidas

*João Miguel Santos Dias*  
*Florêncio Mendes Oliveira Filho*  
*Alberto Ygor Ferreira de Araújo*  
*Sandro Fábio César*  
*Rita Dione Araújo Cunha*

**DOI 10.22533/at.ed.93019150316**

**CAPÍTULO 17 ..... 180**

NOVA TÉCNICA DE ESCAVAÇÕES DE MICROTÚNEIS: ANÁLISE DE DESLOCAMENTOS NO MACIÇO DE SOLO UTILIZANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

*Lidiani Cristina Pierri*  
*Rafael Pacheco dos Santos*  
*Jair José dos Passos Junior*  
*Wagner de Sousa Santos*  
*Marcos Aurélio Marques Noronha*

**DOI 10.22533/at.ed.93019150317**

**CAPÍTULO 18 ..... 201**

UTILIZAÇÃO DA BORRACHA DE PNEU COMO ADIÇÃO EM FORMATO DE FIBRA PARA O TIJOLO ECOLÓGICO.

*Gabrieli Vieira Szura*  
*Andressa Zanelatto Venazzi*  
*Adernanda Paula dos Santos*

**DOI 10.22533/at.ed.93019150318**

**CAPÍTULO 19 ..... 215**

ANÁLISE DOS CRITÉRIOS DE ASSENTAMENTO DE SAPATAS DE REVESTIMENTO EM ÁGUAS PROFUNDAS

*Geovanna Cruz Fernandes*

*Douglas Bitencourt Vidal*

*Carla Salvador*

**DOI 10.22533/at.ed.93019150319**

**CAPÍTULO 20 ..... 224**

A EXPLORAÇÃO DAS AREIAS BETUMINOSAS DO CANADÁ: UM EXEMPLO DE RESERVATÓRIO NÃO CONVENCIONAL

*Paulo Sérgio Lins da Silva Filho*

*Fabiano dos Santos Brião*

**DOI 10.22533/at.ed.93019150320**

**SOBRE OSA ORGANIZADORES ..... 233**



## SIMULAÇÃO DA ONDA COMPRESSIONAL APLICADO EM MODELOS DIGITAIS DE ROCHAS

### Gracimário Bezerra da Silva

Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (Mestrado)  
João Pessoa – PB

### José Agnelo Soares

Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Mineração e Geologia  
Campina Grande – PB

### Leopoldo Oswaldo Alcázar Rojas

Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (Mestrado)  
João Pessoa – PB

**RESUMO:** A caracterização das propriedades petrofísicas das rochas e o estudo de suas propriedades elásticas são de extrema importância na análise de reservatórios petrolíferos. Imagens microtomográficas permitem gerar modelos digitais de rochas os quais têm possibilitado a avaliação dessas propriedades das rochas. Através de modelos digitais de rochas, determinou-se a velocidade da onda compressional no meio rochoso de uma amostra de rocha carbonáticas, extraída de um afloramento da Bacia do Araripe, mediante a utilização dos softwares *Avizo Fire 8.1* e *Comsol Multiphysics*. O objetivo deste trabalho consiste em determinar a velocidade

da propagação da onda P em uma amostra de rocha carbonática que pode ser caracterizado como um reservatório de petróleo, a partir de imagens microtomográficas já disponíveis, utilizando simulação numérica, e comparar com o valor estimado experimentalmente. Através do *Comsol Multiphysics* foi feito o estudo sobre a propagação da onda P no meio rochoso. Por fim, os resultados obtidos foram discutidos e analisados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Microtomografia de raios-x, petrofísica, onda compressional.

**ABSTRACT:** The characterization of the petrophysical properties of the rocks and the study of their elastic properties are of extreme importance in the analysis of oil reservoirs. Microtomographic images allow the generation of digital rock models which have enabled the evaluation of these rock properties. By means of digital rock models, the velocity of the compressional wave in the rocky medium of a sample of carbonaceous rock extracted from an outcrop of the Araripe Basin was determined using the software *Avizo Fire 8.1* and *Comsol Multiphysics*. Thus, the objective of this work is to determine the velocity of the propagation of the P wave in a sample of carbonate rock that can be characterized as an oil reservoir, from microtomographic images already available, using numerical simulation, and compare it with

the estimated experimental value. Through the Comsol Multiphysics the study on the propagation of the P wave in the rocky medium was made. Finally, the results obtained were discussed and analyzed.

**KEYWORDS:** Microtomography of x-rays, petrophysics, compressional wave.

## 1 | INTRODUÇÃO

A descoberta de um reservatório de petróleo é possível após um dispendioso estudo e análise de dados geofísicos e geológicos de uma bacia sedimentar. Na indústria de petróleo faz-se o uso do método sísmico de reflexão, sendo este, um método de prospecção (mais utilizado) que fornece alta definição das feições geológicas de superfícies propícias a acumulação de hidrocarbonetos, a um custo relativamente baixo (Thomas, 2004).

O levantamento sísmico se dá através da geração de ondas sísmicas (vibrações) por meio de fontes artificiais, que se propagam através do meio rochoso. Essas ondas são refletidas e refratadas de acordo com a presença de diferentes constituições petrofísicas (Thomas, 2004). Parte da energia onda emitida é refratada passando para cama inferior, enquanto parte da energia dessa onda é refletida, retornando à superfície. Ao chegar à superfície, as reflexões dos pulsos de ondas são captadas por determinados equipamentos de registro, denominados receptores (sensores) que podem ser geofones ou hidrofones. No caso em que o levantamento sísmico ocorre em terra, utiliza-se geofones que se tratam de receptores eletromagnéticos. Por outro lado, quando o levantamento sísmico é em água, são utilizados os hidrofones, sendo estes, receptores de pressão.

De acordo com Figueiredo (2007), a porção de energia refletida é proporcional à diferença de impedância acústica entre os dois meios.

As ondas elásticas por ser de dois tipos: ondas de cisalhamento (Ondas S) e ondas compressoriais (Ondas P). As ondas P propagam-se em todos os meios (sólidos, líquidos ou gasosos). São ondas de compressão porque comprimem e distendem as rochas, alterando o seu volume e são ondas longitudinais que fazem a rocha vibrar paralelamente na direção da onda (DIAS et al., 2014). A velocidade de propagação deste tipo de onda varia com o meio em que se propaga, sendo adotados os seguintes valores: 330 m/s no ar, 1450 m/s na água e 5000 m/s no granito. Já as ondas S são ondas transversais em que o deslocamento do meio é perpendicular à direção de propagação da energia emitida. Segundo Thomas (2004), até o momento somente as ondas P vem sendo utilizadas comercialmente nos levantamentos sísmicos.

Atualmente, o uso de sistemas de geração de imagens, como a exemplo, a microtomografia computadorizada de raios-X, tem possibilitado na determinação de propriedades petrofísicas assim como o estudo da propagação de ondas acústicas em rochas-reservatórios de óleo e/ou gás. Neste contexto, o presente trabalho tem como

objetivo determinar a velocidade de propagação da onda compressional ou onda P em uma amostra de rocha carbonáticas, que pode ser caracterizado como um reservatório de petróleo, a partir de imagens microtomográficas.

## 2 | METODOLOGIA

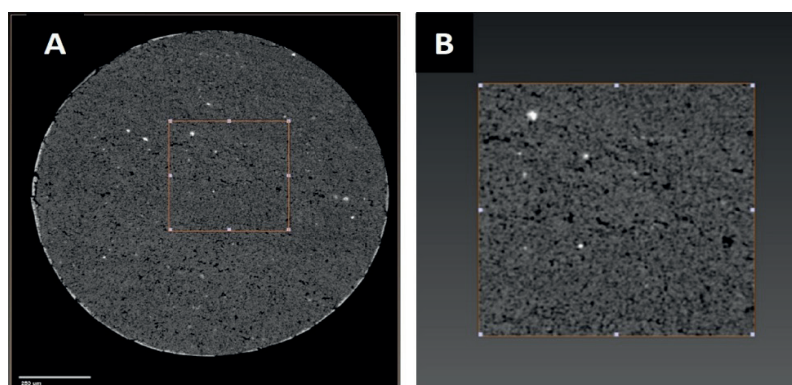
A amostra investigada, denominada PT11\_H1, é de uma rocha carbonática, a qual consiste de uma rocha sedimentar que pode ser caracterizada como um potencial reservatório de petróleo e gás. Tal amostra, em forma de plugue, foi extraída de um afloramento da Formação Santana na Bacia do Araripe.

A Bacia do Araripe está localizada no nordeste brasileiro, mais especificamente, nas regiões sul do estado do Ceará, oeste do estado de Pernambuco e leste do Piauí, sendo a que apresenta a maior área de exposição de rochas cretáceas (12.200 km<sup>2</sup>) dentre as bacias interiores do Nordeste. O embasamento dessa bacia é caracterizado por granitos, gnaisses, migmatitos, quartzitos e outras rochas de baixo grau metamórfico (clorita-xistos, filitos e mármore) (Hasui, 2012). Divide-se nos grupos Araripe e Cariri, que por sua vez são subdivididos nas formações Cariri, Brejo Santo, Missão Velha, Abaiara, Rio das Batateiras, Crato, Ipubi, Santana e Exu (Martill, 2007).

A Formação Santana aflora na parte inferior da Chapada do Araripe e está subdividida em três Membros: Crato, Ipubi e Romualdo (Brito, 1975; Arai et al, 2004). A amostra deste estudo pertence ao membro Crato.

As propriedades petrofísicas e acústica da amostra de rocha em estudo foram estimadas através da análise de imagens de microtomografia de raios-X, por meio de simulação numérica, a qual foi feita com a utilização dos softwares *Avizo Fire 8.1* e *Comsol Multiphysics*.

Para gerar um modelo digital de rocha, foram selecionadas 300 imagens localizadas na porção intermediária da amostra, sendo então, selecionadas as imagens de número 301 a 600. As 300 imagens selecionadas foram processadas por meio do software *Avizo Fire 8.1* e, a partir das imagens processadas, retirou-se um *subvolume* cúbico de dimensões 300 por 300 por 300 *voxels*, como mostrado na Figura 1, usando o comando *extract subvolume*.



**Figura 1.** Slice 2D da amostra em estudo a) Imagem importada no *Avizo Fire*, b) Região de

interesse.

Fonte: Dados de Pesquisa.

Segundo Apolinário (2016) a obtenção da velocidade de propagação da onda compressional, a partir das imagens microtomográficas, é baseada em uma modelagem 3D que emprega o método numérico de elementos finitos na simulação da propagação da onda. Para isto foi utilizado o software *Comsol Multiphysics*.

Neste trabalho, a malha utilizada foi gerada por meio das imagens de microtomografia compiladas no *Avizo Fire 8.1*.

A Figura 2 apresenta o fluxo de trabalho para a geração da malha da amostra em estudo, utilizando o software *Avizo Fire 8.1*, onde são utilizados os *slices* segmentados.

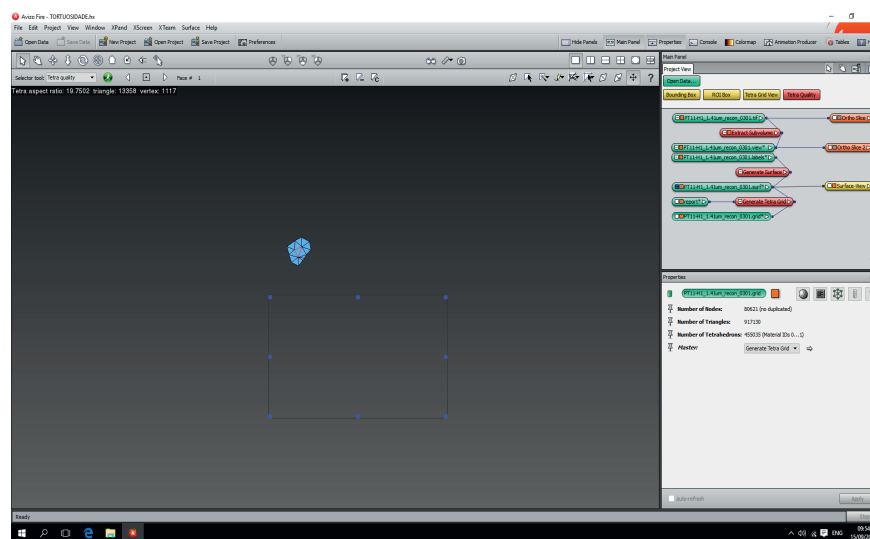
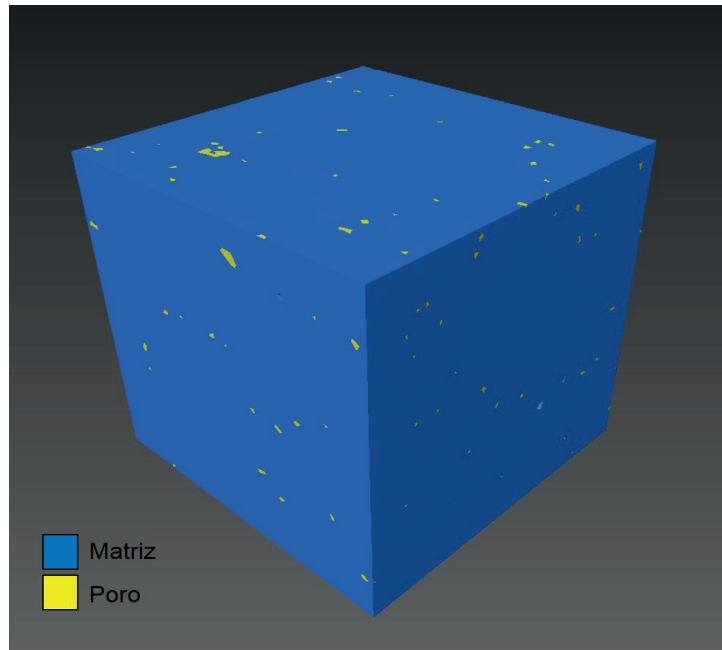


Figura 2. Fluxo de trabalho para a geração da malha da amostra em estudo.

Fonte: Dados de Pesquisa.

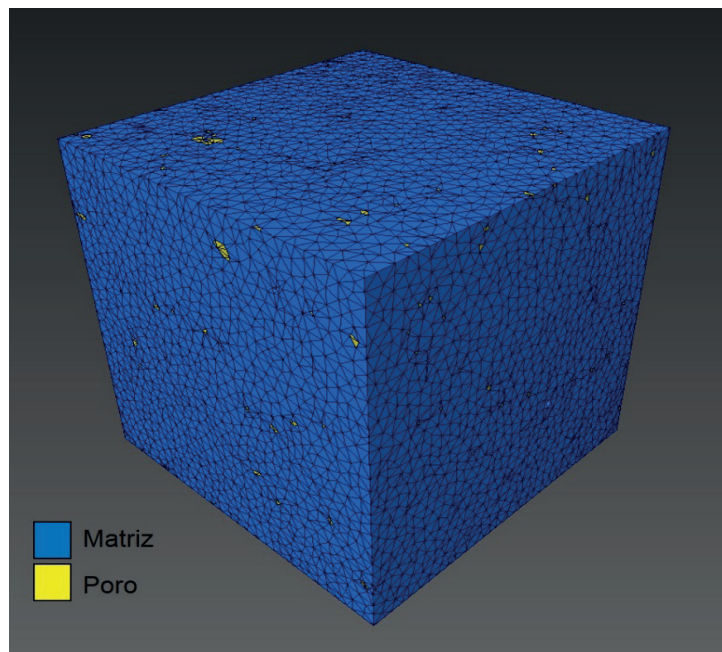
Para se gerar a malha, partiu-se do *subvolume* gerado a partir das imagens microtomográficas. Ao *subvolume*, foi conectada a ferramenta de binarização *edit new label field*, para que fosse determinado quais *voxels* representavam poros e quais representavam matriz. Dentro da ferramenta, por meio do *segmentation editor*, adicionou-se a fração poro e a fração matriz, utilizando o limiar de tom de cinza com valor de 55. Sendo que para a fração poro, adotou-se os valores de zero até o valor do limiar, e para a fração matriz, do valor do limiar até o valor máximo.

Realizado o processo de segmentação, então, utilizou-se o comando *remove islands* e *smooth labels*. O comando *remove islands* irá remover possíveis ruídos existentes nas imagens, e o comando *smooth labels*, tem a finalidade de simplificar o modelo por meio da suavização das porções angulosas das imagens (Apolinário, 2016). Depois desse processo, aplicou-se a ferramenta *Generate Surface* no qual uma superfície 3D é gerada, como é mostrada na Figura 3.



**Figura 3.** Superfície 3D gerada a partir de slices segmentados.

**Fonte:** Dados de Pesquisa.



**Figura 4.** Malha utilizada na modelagem de propagação da onda P.

**Fonte:** Dados de Pesquisa.

Para que a malha seja gerada não podem existir interseções entre os elementos da superfície, assim é necessário aplicar alguns testes como o *intersections test* e o *orientation test*. Foram também aplicados alguns filtros como o *prepare generate tetra grid*, e o *fix intersection* com o objetivo de obter uma malha bem representativa. Na Figura 4 mostra a malha tetraédrica gerada.

Após gerada, a malha foi importada para o *Comsol Multiphysics*, onde foram submetidas aos ensaios de simulação de propagação das ondas compressoriais. Após a malha ser importada, o próprio software a interpreta e gera domínios, que são grupos de tetraedros que representam um mesmo material, sendo definidos em seguida, os materiais que constituíam cada domínio. Assim, assumiu-se que o domínio de matriz da rocha seria composto por apenas um mineral, a dolomita. Já o domínio dos poros seria composto de ar. Posteriormente, para cada material foram adicionadas as propriedades, mostradas na Tabela 1, necessárias para o estudo de propagação da onda P, sendo estes valores extraídos da literatura.

Propriedade	Dolomita	Ar
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	2820	1,3
Velocidade do som (m/s)	5789	340
Compressibilidade (Pa-1)	Não utilizado	1,01x10-4
Módulo de cisalhamento (GPa)	45	Não utilizado
Módulo de incompressibilidade (GPa)	94,9	Não utilizado

**Tabela 1.** Valores de entrada das propriedades dos materiais utilizadas no *Comsol Multiphysics*.

**Fonte:** Dados de pesquisa.

Para realização do ensaio, utilizou-se o módulo *pressure acoustics transient, time dependent*, dentro da sessão *acoustics* do *Comsol Multiphysics*. Este módulo permite estudar a passagem de pulsos de pressão ao longo do tempo que atravessam determinado meio (Apolinário, 2016). Também foram definidas que as unidades utilizadas nos ensaios seriam na ordem de micrômetros e microssegundos, devido, respectivamente, às dimensões da amostra e visando otimizar o tempo de ensaio. O intervalo de tempo de estudo do ensaio foi definido para iniciar em zero e encerrar em 0,15 's, tempo necessário para a onda P se propagar no meio rochoso.

Por fim, delimitou-se o sistema de estudo, sendo determinadas as regiões as quais ocorreriam a propagação de ondas, as fronteiras do sistema, os valores iniciais de pressão de gradiente de pressão, além do local da aplicação do pulso de pressão. A propagação de ondas foi configurada para ocorrer em todos os domínios, independente de poro ou matriz. As fronteiras do sistema selecionadas foram todas as faces do cubo, exceto a que havia sido selecionada para ser a face na qual ocorreria a emissão do pulso de pressão. O pulso de pressão foi selecionado para ocorrer na face do

cubo que possuísse o menor número de domínios, se propagando em direção à face aposta, de acordo com a Equação (1).

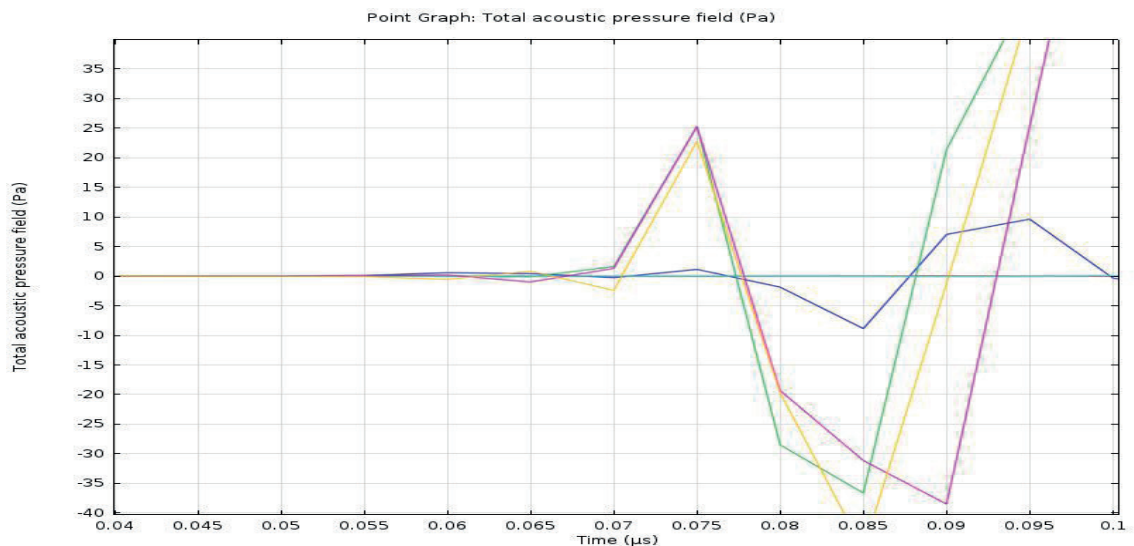
$$P = A_{mp} \cdot \text{sen}(2\pi ft) \quad (1)$$

Onde:  $P$  é o pulso de pressão;  $A_{mp}$  é a amplitude inicial do pulso de pressão;  $f$  é a frequência da onda; e  $t$  é o tempo.

Utilizou-se uma amplitude de 100 Pa. A frequência adotada foi de 25 MHz, para que pudesse ser observada ao menos uma forma de onda completa no interior da amostra. Depois, foram selecionados seis pontos de leitura por meio da ferramenta *Point Graph*, existente no menu *Results*, sendo selecionados os quatro vértices da face oposta ao plano de aplicação do pulso de pressão, e dois pontos no centro da face.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resultado gerado pelo *Comsol Multiphysics* é um gráfico de pressão por tempo (Figura 5), que evidencia a primeira chegada de onda  $P$  em cada ponto, representada por cada curva.



**Figura 5.** Variação de pressão gerada pela passagem da onda simulada no *Comsol Multiphysics*.

Fonte: Dados de Pesquisa.

A partir da Figura 5, foi realizada uma picagem da onda sendo medido o tempo da chegada da primeira onda para cada ponto. Com o dado do tempo de chegada da primeira onda, foi realizado o cálculo da velocidade de propagação da onda computacional ( $V_{comp}$ ) por meio da Equação (2).

$$V_{\text{comp}} = n.R/t \quad (2)$$

Onde:  $V_{\text{comp}}$  é a velocidade de propagação da onda computacional;  $n$  é o número de *slices* da subamostra;  $R$  é a resolução de cada amostra do imageamento por microtomografia; e  $t$  é o tempo de chegada da primeira onda nos pontos de medição.

Para fins de comparação, o valor da velocidade de propagação da onda P na amostra de rocha em estudo obtido de forma experimental é de 5789 m/s. Este dado foi obtido no laboratório de petrofísica da Universidade Federal de Campina Grande, através do equipamento *Autolab 500®*. Equipamento, este, utilizado para a medição das propriedades elásticas.

Na Tabela 2 são mostrados os resultados dos ensaios de porosidade, permeabilidade e tortuosidade obtidos através da petrofísica computacional a partir de imagens de microtomografia de raios-x, assim como também, o valor da velocidade da onda compressional, sendo este estudo acústico realizado na amostra em estudo por meio do *software Comsol Multiphysics*.

Amostra	Porosidade (%)	Permeabilidade (mD)	Tortuosidade	Vp (m/s)
PT11_H1	9,96	0,000015	2,5	6043

**Tabela 2.** Propriedades petrofísicas da amostra em estudo obtidas através da petrofísica computacional.

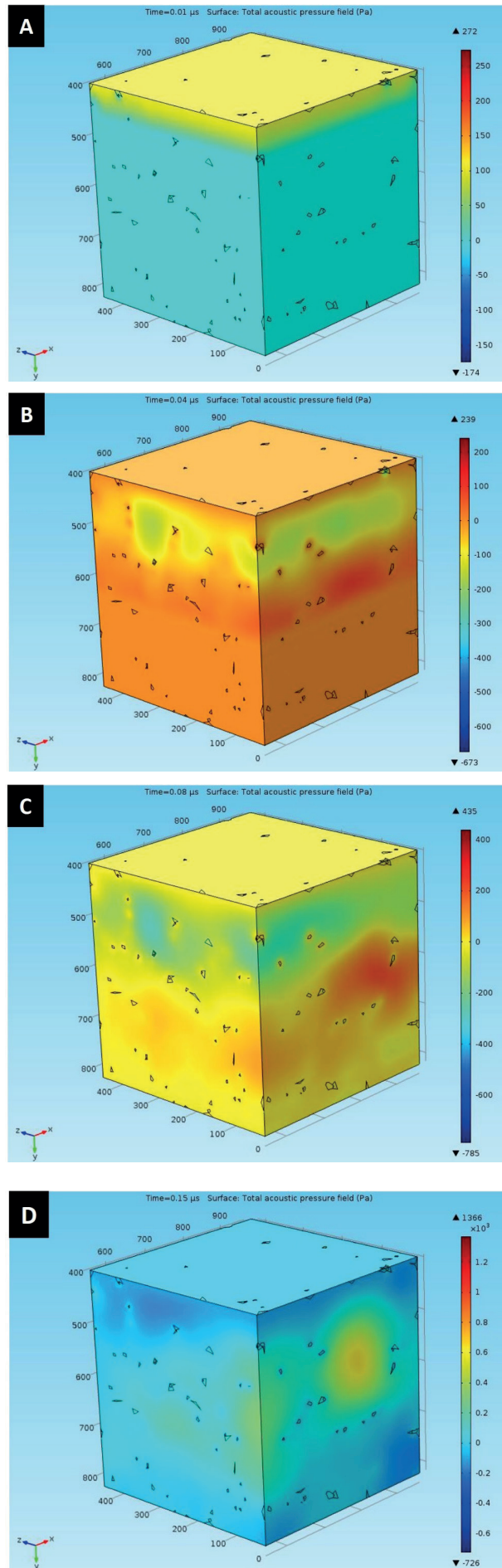
Fonte: Dados de Pesquisa.

Analisando a propagação da onda compressional (Onda P) na amostra em estudo, nota-se que houve uma certa aproximação nos resultados de velocidade da onda P extraído da literatura com o obtido através de simulação numérica. Contudo, a amostra estudada apresenta uma baixa porosidade e uma certa homogeneidade, o que facilita a propagação da onda P no meio.

De acordo com Apolinário (2006), acredita-se que para otimização do cálculo de velocidades de ondas P pelo método computacional, deva-se adicionar um número maior de pontos de leitura, podendo assim obter um valor médio de velocidade com um nível de confiabilidade maior.

A Figura 6 mostra a simulação de como a onda compressional se propaga no meio nos tempos de 0,01  $\mu\text{s}$ , 0,04  $\mu\text{s}$ , 0,08  $\mu\text{s}$  e 0,15  $\mu\text{s}$ . É possível observar que no tempo de 0,08  $\mu\text{s}$  a onda já tem atravessado todo o meio.

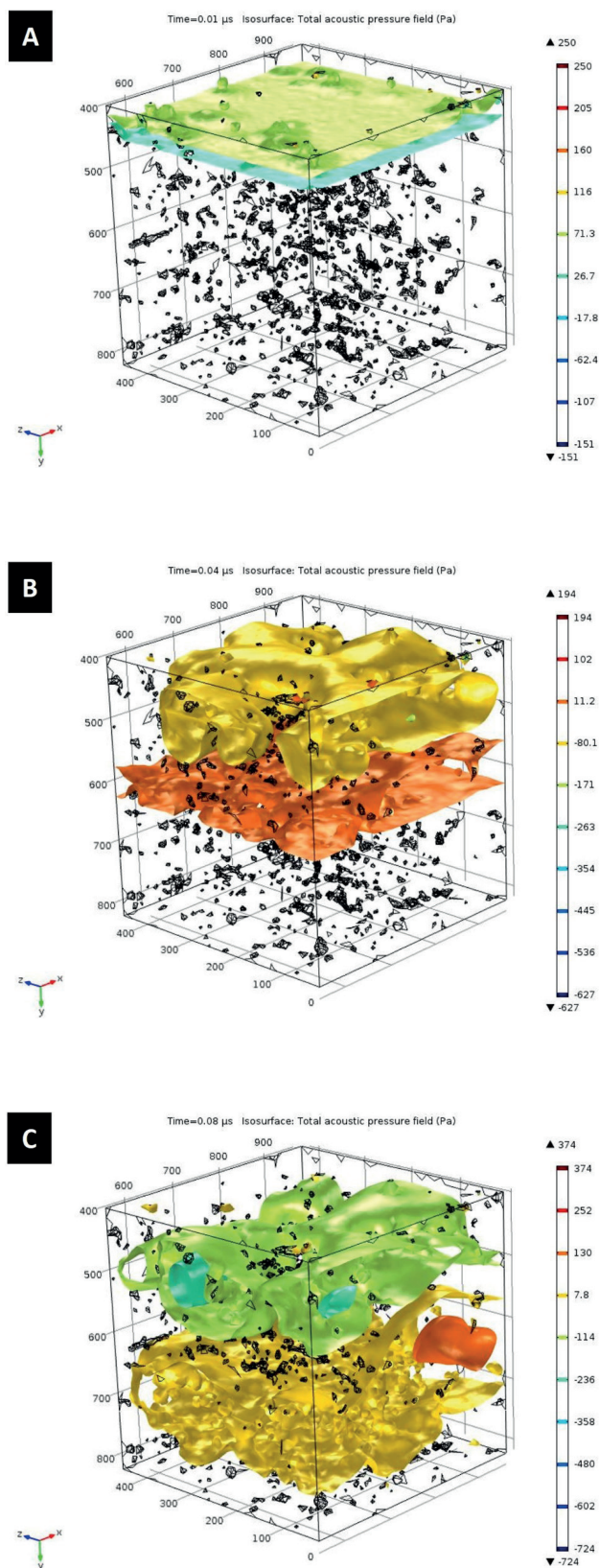




**Figura 6.** Propagação da onda de pressão na amostra em estudo nos tempos de a) 0,01  $\mu$ s; b) 0,04  $\mu$ s; c) 0,08  $\mu$ s; e d) 0,015  $\mu$ s.

Fonte: Dados de Pesquisa.

Na Figura 7 também é mostrada a propagação da onda compressional no meio estudado, nos tempos de  $0,01 \mu s$ ,  $0,04 \mu s$  e  $0,08 \mu s$ , de forma a visualizar como a onda se propaga no interior da amostra. É possível observar a má conectividade entre os poros o que evidencia uma baixa permeabilidade da rocha.



**Figura 7.** Propagação da onda de pressão na amostra nos tempos de a)  $0,01 \mu s$ ; b)  $0,04 \mu s$  e c)  $0,08 \mu s$ .

Fonte: Dados de Pesquisa.

Como o software *Comsol Multiphysics* faz leituras pontuais, pode-se ocorrer a propagação de onda diretamente pela matriz da subamostra, sem haver nenhuma influência do poro e do fluido contido em seu interior, e isso, gera resultados predominantemente superdimensionados, pouco representativos e pouco comparativos com as velocidades de onda P medidas convencionalmente. No entanto, como a leitura da velocidade computacional na amostra relativamente se aproximou da leitura de velocidade obtida de forma convencional, fica evidenciado que o potencial do método computacional para o estudo de velocidades de ondas compressoriais elásticas foi, de certa forma, representativa.

## 4 | CONCLUSÕES

A aplicação do método computacional para obtenção de velocidades de ondas P gerou um valor próximo ao do medido convencionalmente em laboratório para a mesma amostra, e desta forma, fica evidenciado que a medição pontual de velocidade para a amostra em estudo tem apresentado uma boa representatividade e tem se mostrada satisfatória, uma vez que, o meio estudado é homogêneo, e isso, facilita a propagação da onda.

## REFERÊNCIAS

- APOLINÁRIO, F. O.; **Influência da Saturação Fluida nas Propriedades Elásticas de Rochas Carbonáticas**. Dissertação de Mestrado – Programa De Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB, 2016.
- ARAI, M.; CARVALHO, I. S.; CASSAB, R. C. T.; **Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do Araripe**. Informativo da Fundação Paleontológica. 2004.
- BRITO, I. M.; **Chapada do Araripe. As Bacias Sedimentares do Nordeste do Brasil**. 1975.
- DIAS, A. G.; FREITAS, M. C.; GUEDES, F.; BASTOS, M. C; **Onda sísmica**. Revista de Ciência Elementar. Vol. 2. Nº 1. 2014.
- FIGUEIREDO, A. M.; **Mapeamento Automático de Horizontes e Falhas em Dados Sísmicos 3D baseado no algoritmo de Gás Neural Evolutivo**. Dissertação. Rio de Janeiro. PUCRio. Departamento de Informática, 2007.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M.; BARTORELLI, A.; **Geologia do Brasil**. Primeira edição. São Paulo: Beca, 2012. p. 510.
- MARTILL, D.M. **The age of the Cretaceous Santana Formation fossil Konservat Lagerstätte of north-east Brazil: a historical review and an appraisal of the biostratigraphic utility of its palaeobiota**, Cretaceous Research, 2007.
- THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. Ed – Rio de Janeiro. Interciência: Petrobras, 2004.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-193-0

