

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICAS DOS OCEANOS E DA  
TERRA

LUIZ FERNANDO SANTOS DA SILVA

**SIMULAÇÃO DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RMN) EM IMAGENS  
BIDIMENSIONAIS DE LÂMINAS DE ROCHAS CARBONÁTICAS**

NITERÓI – RJ

LUIZ FERNANDO SANTOS DA SILVA

**SIMULAÇÃO DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RMN) EM IMAGENS  
BIDIMENSIONAIS DE LÂMINAS DE ROCHAS CARBONÁTICAS**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre. Área de Geociências

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Bagueira de Vasconcellos Azeredo

Co-Orientadora: Dra. Giovanna Carneiro

NITERÓI – RJ

2018

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG Gerada  
com informações fornecidas pelo autor

S586s Silva, Luiz Fernando Santos  
SIMULAÇÃO DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RMN) EM IMAGENS  
BIDIMENSIONAIS DE LÂMINAS DE ROCHAS CARBONÁTICAS. / Luiz  
Fernando Santos Silva ; Rodrigo Bagueira de Vasconcellos  
Azeredo, orientador ; Giovanna Carneiro, coorientador.  
Niterói, 2018.  
79 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Niterói, 2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDOT.2018.m.13002563706>

1. Ressonância Magnética Nuclear. 2. Petrofísica. 3.  
Relaxatividade superficial. 4. Carbonato. 5. Produção  
intelectual. I. Azeredo, Rodrigo Bagueira de Vasconcellos,  
orientador. II. Carneiro, Giovanna, coorientador. III.  
Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências.  
IV. Título.

CDD -

Bibliotecária responsável: Yolle Vacariuc Bittencourt - CRB7/6040

# **Luiz Fernando Santos da Silva**

## **SIMULAÇÃO DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RMN) EM IMAGENS BIDIMENSIONAIS DE LÂMINAS DE ROCHAS CARBONÁTICAS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.  
Área de Concentração: Geociências

Aprovada em [21/01/2019]

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof Dr Rodrigo Bagueira de Vasconcellos Azeredo (Orientador)  
Deptº de Geologia/LAGEMAR-UFF

---

Prof. Cleverson Guizan Silva, Dr.  
Deptº de Geologia/LAGEMAR-UFF

---

Dr. Bernardo Coutinho Camilo dos Santos  
Petrobrás

*“All we have to decide is what to do with  
the time that is given us.”*

- J.R.R. Tolkien, *The Fellowship of the Ring*

*Dedico esse trabalho a Deus e todos que contribuíram para  
esse momento de vitória*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me dado forças pra chegar até aqui.

Agradeço também a minha família pelo suporte sem o qual, talvez esse projeto não fosse viável.

Jane Nobre, por sempre, sempre, em todos os momentos me motivar a melhorar e ver em mim um grande potencial, mesmo que às vezes eu mesmo não enxergue. Gostaria de agradecer ao meu orientador Rodrigo Bagueira, por ter me concedido a oportunidade de iniciar o mestrado.

Maira, obrigado por todos os momentos em que não deixou nenhuma dúvida minha sem resposta.

Giovanna Carneiro, eu não tenho como mensurar o quão grato eu sou por tudo o que me ensinou. Acredite, sem a sua ajuda eu não sei se conseguiria aprender tanto sobre RMN.

Agradeço fortemente ao Dr André Sousa, por ter me ajudado aos 45 do segundo tempo.

Francisco, ou melhor, “Vin Diesel” que parceiro de laboratório eu tive. Obrigado por ter sido um grande amigo durante esse tempo de mestrado. Não posso esquecer do José Afrânio, Michael, Livia e Patrick. Tive uma imensa honra de estar na presença de vocês.

E por responder sempre aos meus e-mails e sempre me atender na secretaria da melhor maneira possível, meu muito obrigado vai para Laressa e Maristela.

Agradeço também Universidade Federal Fluminense, por toda estrutura fornecida e ao agradeço ao CNPq e a CAPES pelo auxílio financeiro.

Daniel, mais uma vez... você presente num momento importante meu.

Thamires, Thayná, Horrana, Maria Carolina, Alan Saldanha, Alan Gonçalves, Luana, Camila Pontes e Leide obrigado por sempre estarem por perto quando precisei.

Por último, mas não menos importante. Agradeço a todos os meus professores. Afinal sem vocês quem eu seria?

# **SIMULAÇÃO DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RMN) EM IMAGENS BIDIMENSIONAIS DE LÂMINAS DE ROCHAS CARBONÁTICAS.**

Autor: LUIZ FERNANDO SANTOS DA SILVA

Orientador: RODRIGO BAGUEIRA DE VASCONCELLOS AZEREDO

## **RESUMO**

Nos últimos anos a petrofísica computacional surgiu como uma alternativa rápida e de baixo custo comparados às técnicas empregadas em laboratórios tradicionais, como por exemplo a Ressonância Magnética (RMN). A partir de microtomografia por raio-X, aliados ao avanço da tecnologia de análise, processamento e simulação, tornou-se possível estimar as propriedades petrofísicas das rochas utilizando imagens 3D.

Com a possibilidade de aplicar a petrofísica computacional em imagens binarizadas das lâminas 2D, poderia tornar o método ainda mais abrangente. O simulador RWRMN utiliza a técnica de caminhantes aleatórios, que imitam a dinâmica dos prótons de isótopo de hidrogênio presente em fluidos em meios porosos durante o fenômeno de RMN. A simulação fornece uma distribuição dos tempos de relaxação transversal ( $T_2$ ) pode ser correlacionada à distribuição de tamanhos dos poros.

Essa nova fronteira na aquisição de dados petrofísicos, baseadas em imagens das amostras, esse trabalho tem a finalidade comparar os valores das relaxatividades superficiais das simulações feitas em imagens bidimensionais (2D) de lâminas de rochas carbonáticas, com os valores das relaxatividades superficiais adquiridas em ensaios laboratoriais de plugues em espectrômetros de RMN de baixo campo.

Apesar das limitações principalmente no processo de binarização e na resolução das imagens, a simulação obteve uma boa correlação com os resultados experimentais obtidos em laboratório na amostra de carbonato EY. Dessa forma, os valores das relaxatividades superficiais fornecidas pelo programa RWRMN podem ser uma boa alternativa, nos casos onde as demais fontes de dados petrofísicos, como por exemplo os plugues, não estejam disponíveis.

Essa técnica visa aumentar as possibilidades de aquisição de dados, e assim contribuir por exemplo para o aumento do fator de recuperação da exploração de petróleo.

Palavras-chave: Ressonância Magnética Nuclear; petrofísica; relaxatividade superficial; carbonato, fator de recuperação.

# **SIMULATION OF NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE (NMR) IN TWO-DIMENSIONAL IMAGES OF CARBONATE THIN SECTIONS.**

Author: LUIZ FERNANDO SANTOS DA SILVA

Advisor: RODRIGO BAGUEIRA DE VASCONCELLOS AZEREDO

## **ABSTRACT**

In recent years, computational petrophysics has emerged as a fast and inexpensive alternative to the techniques used in traditional laboratories, such as Magnetic Resonance (NMR). From X-ray microtomography, combined with the advancement of analysis, processing and simulation technology, it became possible to estimate the petrophysical properties of the rocks using 3D images.

With the possibility of applying computational petrophysics in binarized images of 2D slides, it could make the method even more comprehensive. The RWRMN simulator uses the technique of random walkers, which mimic the dynamics of the hydrogen isotope protons present in fluids in porous media during the NMR phenomenon. The simulation provides a distribution of the transverse relaxation times ( $T_2$ ) can be correlated to the pore size distribution.

This new frontier in the acquisition of petrophysical data, based on images of the samples, this work has the purpose of comparing the superficial relaxation values of the simulations made in bidimensional (2D) images of carbonate rock thin-section, with the values of surface relaxivities acquired in tests laboratories of low field NMR spectrometers.

Despite the limitations mainly in the image segmentation process and in the resolution of the images, the simulation obtained a good correlation with the experimental results obtained in the laboratory in the EY carbonate sample. Thus, the values of the surface relaxations provided by the RWRMN program may be a good alternative, in cases where the other petrophysical data sources, such as plugs, are not available.

This technique aims to increase the possibilities of data acquisition, and thus contribute for example to increase the recovery factor of oil exploration.

Keywords: Nuclear Magnetic Resonance; petrophysics; surface relaxation; carbonate; recovery factor.

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	16
1.1	Petrofísica .....	18
2	Objetivos.....	18
3	Conceitos de RMN.....	19
3.1	Relação de $T_2$ com tamanho de poro.....	22
3.2	Saturação de água irreduzível e $T_2$ de corte.....	25
4	Rochas Carbonáticas .....	27
4.1	Processo de formação das rochas carbonáticas.....	28
4.2	Principais minerais constituintes .....	31
4.3	Principais constituintes das rochas carbonáticas .....	33
4.4.	Origem das amostras.....	35
4.4.1	Formação Austin Chalk (amostra AC).....	36
4.4.2	Formação Guelph (amostra GD) .....	37
4.4.3	Formação Edwards (amostras DP, EY e EW).....	37
4.4.4.	Formação Salem (amostra IH) .....	38
5	Porosidade .....	39
6	Metodologia .....	42
6.1	Captação das imagens e binarização .....	42
6.2	Programa RWRMN .....	43
6.3	Ensaio de Ressonância magnética nuclear em laboratório.....	44
7	Processo de Simulação computacional.....	45
7.1	Simulação do decaimento RMN.....	46
8	Resultados e discussões.....	51
8.1	Amostra Austin Chalk (AC) .....	53

8.2	Amostra Desert Pink (DP) .....	58
8.3	Amostra Edwards Yellow (EY) .....	60
8.4	Amostra Guelph Dolomite (GD) .....	63
8.5	Amostra Indiana 70mD (IH).....	65
8.6	Correlação dos resultados .....	68
9.	Conclusão.....	74
	Referências Bibliográficas: .....	76

## LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\vec{B}_0$	campo magnético externo
$\vec{B}_1$	campo magnético oscilante
AG	Algoritmos genéticos.
CA	caminhantes aleatórios
$\vec{M}_0$	Vetor resultante de Magnetização
RF	Rádio frequência.
RMN	Ressonância Magnética Nuclear
RWRMN	Random Walk Ressonância Magnética Nuclear ( simulador)
$T_2$	Relaxação transversal
$\gamma$	Constante giromagnética
$\theta$	Valor do ângulo
$\rho_2$	relaxatividade superficial (ou $\rho$ nos cálculos presentes no capítulo 8)
$\rho_{2\text{fixo}}$	Relaxatividade superficial fixa
$\rho_{2\text{ref}}$	Relaxatividade superficial de referência
$\rho_{2\text{var}}$	Relaxatividade superficial em função da restrição de trajetória.

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1.** EXEMPLO DE GRÁFICO DE UMA CURVA DE DECAIMENTO DE AS AMPLITUDES DOS ECOS DE SPIN EM RELAÇÃO AO TEMPO, TAMBÉM CONHECIDA COM CURVA DE DECAIMENTO DE RELAXAÇÃO TRANSVERSAL OU  $T_2$ . IMAGEM DO LIVRO NMR LOGGING – PRINCIPLES AND APPLICATION (COATTES,1999).. 20
- FIGURA 2 –** EXEMPLIFICAÇÃO DA DINÂMICA ENTRE OS COMPONENTES DE  $T_2$  ( BULK, SUPERFICIAL E DIFUSIVO) DURANTE O MOVIMENTO DOS PRÓTONS PELO INTERIOR DO PORO. IMAGEM MODIFICADA DO LIVRO NMR LOGGING – PRINCIPLES AND APPLICATION (COATTES,1999). 23
- FIGURA 3.** RELAÇÃO ENTRE TAMANHO DE PORO E TEMPO DE RELAXAÇÃO. IMAGEM DO LIVRO NMR LOGGING – PRINCIPLES AND APPLICATION (COATTES,1999). 24
- FIGURA 4.** RESULTADO DA INVERSA DE LAPLACE. FIGURA DA TESE: ESTUDO DE PROPRIEDADES PETROFÍSICAS DE ROCHAS SEDIMENTARES POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (SOUZA, 2012). 25
- FIGURA 5.** O  $T_2$  DE CORTE TEM O OBJETIVO DE DIVIDIR O GRÁFICO ENTRE A REGIÃO BVI E MCBW LIGADOS A POROS PEQUENOS COM PORÇÃO FLUIDA QUE FICA RETIDA NA ROCHA E MFFI LIGADA AOS POROS MAIORES E FLUIDOS COM MAIOR MOBILIDADE. IMAGEM DO LIVRO NMR LOGGING – PRINCIPLES AND APPLICATION (COATTES,1999). 26
- FIGURA 6.** MÉTODO PARA ESTIMAR  $T_2$  DE CORTE. IMAGEM DO LIVRO NMR LOGGING – PRINCIPLES AND APPLICATION (COATTES,1999). 27
- FIGURA 7.** SISTEMA CARBONATO. FONTE: MODIFICADO DE  $CO_2$  IN SEAWATER: EQUILIBRIUM, KINETICS, ISOTOPES, ZEEBE E WOLF-GLADROW, 2001. 29
- FIGURA 8.** PRINCIPAIS CONSTITUINTES DE UMA ROCHA CARBONÁTICA. FONTE: BOLETIM DA PETROBRAS (TERRA, 2010). 34
- FIGURA 9.** MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO DUNHAM (TERRA, 2010). 35
- FIGURA 10.** MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO FOLKS (1962). 35
- FIGURA 11.** O MAPA MOSTRA AS REGIÕES ONDE HÁ AFLORAMENTOS EM SUPERFÍCIE DA CAMADA ONDE ESTÃO PRESENTES AS ROCHAS DO GRUPO AC. FONTE KRYSTAL 2012,USGS REPORT 2012–5159, 2012. 37
- FIGURA 12.** LOCALIZAÇÃO DA FORMAÇÃO GUELPH ( BACIA MICHIGAN) E FORMAÇÃO EDWARDS. 38
- FIGURA 13.** LOCAIS DE EXPLORAÇÃO DE CALCÁRIO DA FORMAÇÃO SALEM SEGUNDO O SITE [HTTP://ACADEMIC.BROOKLYN.CUNY.EDU/GEOLOGY/POWELL/613WEBPAGE/NYCBUILDING/INDIANALIMESTONE/INDIANALIMESTONE.HTM](http://academic.brooklyn.cuny.edu/geology/powell/613webpage/nycbuilding/indianalimestone/indianalimestone.htm) 39
- FIGURA 14.** CLASSIFICAÇÃO DA POROSIDADE DE CHOQUETTE & PRAY (1970). FONTE: MODIFICADO DE SCHOLLE & SCHOLLE (2003). 40
- FIGURA 15.** LAYOUT DO PROGRAMA RWRMN. 43
- FIGURA 16.** SIMULAÇÃO DE CAMINHANTES ALEATÓRIOS: (A) TRAJETÓRIA RESTRITA PARA APENAS MOVIMENTOS PERPENDICULARES (CHAMADA NORMA DE MANHATTAN); (B) EXCELENTE CORRELAÇÃO

QUANDO SE COMPARAM OS RESULTADOS ANALÍTICOS E SIMULADOS. FONTE: ESTIMATING THE SURFACE RELAXIVITY AS A FUNCTION OF PORE SIZE FROM NMR T<sub>2</sub> DISTRIBUTIONS AND MICRO-TOMOGRAPHIC IMAGES. 46

**FIGURA 17.** MODELO SINTÉTICO COM TRÊS FAMÍLIAS DE POROS COM TAMANHOS DIFERENTES, USADO NAS SIMULAÇÕES PARA ESTIMAR VALORES DE RELAXATIVIDADE COM VALORES CONSTANTES PARA AS TRÊS FAMÍLIAS E COM VALORES DIFERENTES ASSOCIADOS A CADA FAMÍLIA DE PORO. OBSERVA-SE QUE EM CADA BORDA DOS POROS HÁ PELO MENOS 3 ESCALAS DE CINZA: POROS COM BORDA CINZA ESCURO ESTÃO ASSOCIADOS A VALORES BAIXOS DE  $\rho_2$ , POSSUINDO RAIOS MAIORES; POROS COM BORDA CINZA ESTÃO ASSOCIADOS A VALORES MÉDIOS DE  $\rho_2$ , POSSUINDO RAIOS MÉDIOS; E POROS COM BORDAS CINZA CLARO ESTÃO ASSOCIADOS A VALORES ALTOS DE  $\rho_2$ , POSSUINDO RAIOS MENORES. FONTE - ESTIMATING THE SURFACE RELAXIVITY AS A FUNCTION OF PORE SIZE FROM NMR T<sub>2</sub> DISTRIBUTIONS AND MICRO-TOMOGRAPHIC IMAGES. 49

**FIGURA 18.** DISTRIBUIÇÃO DE T<sub>2</sub> OBTIDA DO DECAIMENTO SIMULADO COM VALORES DE RELAXATIVIDADE SUPERFICIAL VARIADOS (LINHA CONTINUA) E A DISTRIBUIÇÃO COM DECAIMENTO SIMULADO COM VALORES DE RELAXATIVIDADE SUPERFICIAL DE 20  $\mu\text{M/S}$  (LINHA TRACEJADA). OBSERVANDO QUE A LINHA QUE REPRESENTA VALORES DE RELAXATIVIDADE SUPERFICIAL CONSTANTE APRESENTA UMA FORMA MAIS ESTREITA QUE A FORMA DA OUTRA LINHA. FONTE: ESTIMATING THE SURFACE RELAXIVITY AS A FUNCTION OF PORE SIZE FROM NMR T<sub>2</sub> DISTRIBUTIONS AND MICRO-TOMOGRAPHIC IMAGES. 50

**FIGURA 19.** (A) COMPARAÇÃO ENTRE A FUNÇÃO DA RELAXATIVIDADE SUPERFICIAL OBTIDA COM A SIMULAÇÃO (GA SIGMOID) E A FUNÇÃO COM VALORES DE REFERÊNCIA ADVINDO DE MEDIÇÕES DE LABORATÓRIO (TRUE); (B) DISTRIBUIÇÕES DE T<sub>2</sub> CORRESPONDENTES. FONTE: ESTIMATING THE SURFACE RELAXIVITY AS A FUNCTION OF PORE SIZE FROM NMR T<sub>2</sub> DISTRIBUTIONS AND MICRO-TOMOGRAPHIC IMAGES. 50

**FIGURA 20.** (A) COMPARAÇÃO DAS DUAS LINHAS DE RELAXATIVIDADE SUPERFICIAL ORIUNDAS DA SIMULAÇÃO E OS VALORES DE REFERÊNCIA MEDIDOS EM LABORATÓRIO; E (B) RESPECTIVAS DISTRIBUIÇÕES DE T<sub>2</sub>. A DISTRIBUIÇÃO DE T<sub>2</sub> CORRESPONDE A RELAXATIVIDADE CONSTANTE REPRESENTADA EM (A) É TAMBÉM PLOTADA EM (B) FONTE: ESTIMATING THE SURFACE RELAXIVITY AS A FUNCTION OF PORE SIZE FROM NMR T<sub>2</sub> DISTRIBUTIONS AND MICRO-TOMOGRAPHIC IMAGES. 51

**FIGURA 21.** IMAGENS DA AMOSTRA AC: (A) MICROSCOPIA ÓTICA DE SUA LÂMINA DELGADA; E (B) RESPECTIVA BINARIZAÇÃO EVIDENCIANDO OS POROS EM PRETO E A MATRIZ ROCHOSA EM BRANCO. A ESCALA DA IMAGEM ESTÁ MOSTRADA EM VERMELHO EM (A). 54

**FIGURA 22.** RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DA AMOSTRA AC: A) DISTRIBUIÇÕES DE T<sub>2</sub> EXPERIMENTAL (LINHA AZUL), SIMULADA COM  $\rho_{2, \text{FIXO}}$  (LINHA TRACEJADA VERDE) E SIMULADA COM  $\rho_{2, \text{VAR}}$  (LINHA ROXA); B) GRÁFICO DE RESTRIÇÃO DA TRAJETÓRIA ( $\Xi$ ), ONDE 1 SIGNIFICA 100% DE CHANCE DO CAMINHANTE ALEATÓRIO TER TOCADO A PAREDE DO PORO; E, C) GRÁFICO MOSTRANDO A CORRELAÇÃO ENTRE  $\Xi$  PARA CADA FAMÍLIA DE TAMANHO DE PORO E SUAS RESPECTIVAS FAIXAS DE  $\rho_{2, \text{VAR}}$ . O GRÁFICO EM (A)

- MOSTRA TAMBÉM A CLASSIFICAÇÃO DOS TAMANHOS DO POROS COM BASE NO T<sub>2</sub> DE CORTE DE 92 MS (LINHA VERMELHA VERTICAL). 55
- FIGURA 23.** IMAGENS DA AMOSTRA DP: (A) MICROSCOPIA ÓTICA DE SUA LÂMINA DELGADA; E (B) RESPECTIVA BINARIZAÇÃO EVIDENCIANDO OS POROS EM PRETO E A MATRIZ ROCHOSA EM BRANCO. A ESCALA DA IMAGEM ESTÁ MOSTRADA EM VERMELHO EM (A). 58
- FIGURA 24.** RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DA AMOSTRA DP: A) DISTRIBUIÇÕES DE T<sub>2</sub> EXPERIMENTAL (LINHA AZUL), SIMULADA COM  $\rho_{2, \text{FIXO}}$  (LINHA TRACEJADA VERDE) E SIMULADA COM  $\rho_{2, \text{VAR}}$  (LINHA ROXA); B) GRÁFICO DE RESTRIÇÃO DA TRAJETÓRIA ( $\Xi$ ), ONDE 1 SIGNIFICA 100% DE CHANCE DO CAMINHANTE ALEATÓRIO TER TOCADO A PAREDE DO PORO; E, C) GRÁFICO MOSTRANDO A CORRELAÇÃO ENTRE  $\Xi$  PARA CADA FAMÍLIA DE TAMANHO DE PORO E SUAS RESPECTIVAS FAIXAS DE  $\rho_{2, \text{VAR}}$ . O GRÁFICO EM (A) MOSTRA TAMBÉM A CLASSIFICAÇÃO DOS TAMANHOS DO POROS COM BASE NO T<sub>2</sub> DE CORTE DE 92 MS (LINHA VERMELHA VERTICAL). 59
- FIGURA 25.** IMAGENS DA AMOSTRA EY: (A) MICROSCOPIA ÓTICA DE SUA LÂMINA DELGADA; E (B) RESPECTIVA BINARIZAÇÃO EVIDENCIANDO OS POROS EM PRETO E A MATRIZ ROCHOSA EM BRANCO. A ESCALA DA IMAGEM ESTÁ MOSTRADA EM VERMELHO EM (A). 61
- FIGURA 26.** RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DA AMOSTRA EY: A) DISTRIBUIÇÕES DE T<sub>2</sub> EXPERIMENTAL (LINHA AZUL), SIMULADA COM  $\rho_{2, \text{FIXO}}$  (LINHA TRACEJADA VERDE) E SIMULADA COM  $\rho_{2, \text{VAR}}$  (LINHA ROXA); B) GRÁFICO DE RESTRIÇÃO DA TRAJETÓRIA ( $\Xi$ ), ONDE 1 SIGNIFICA 100% DE CHANCE DO CAMINHANTE ALEATÓRIO TER TOCADO A PAREDE DO PORO; E, C) GRÁFICO MOSTRANDO A CORRELAÇÃO ENTRE  $\Xi$  PARA CADA FAMÍLIA DE TAMANHO DE PORO E SUAS RESPECTIVAS FAIXAS DE  $\rho_{2, \text{VAR}}$ . O GRÁFICO EM (A) MOSTRA TAMBÉM A CLASSIFICAÇÃO DOS TAMANHOS DO POROS COM BASE NO T<sub>2</sub> DE CORTE DE 92 MS (LINHA VERMELHA VERTICAL). 62
- FIGURA 27.** IMAGENS DA AMOSTRA GD: (A) MICROSCOPIA ÓTICA DE SUA LÂMINA DELGADA; E (B) RESPECTIVA BINARIZAÇÃO EVIDENCIANDO OS POROS EM PRETO E A MATRIZ ROCHOSA EM BRANCO. A ESCALA DA IMAGEM ESTÁ MOSTRADA EM VERMELHO EM (A). 63
- FIGURA 28.** RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DA AMOSTRA GD: A) DISTRIBUIÇÕES DE T<sub>2</sub> EXPERIMENTAL (LINHA AZUL), SIMULADA COM  $\rho_{2, \text{FIXO}}$  (LINHA TRACEJADA VERDE) E SIMULADA COM  $\rho_{2, \text{VAR}}$  (LINHA ROXA); B) GRÁFICO DE RESTRIÇÃO DA TRAJETÓRIA ( $\Xi$ ), ONDE 1 SIGNIFICA 100% DE CHANCE DO CAMINHANTE ALEATÓRIO TER TOCADO A PAREDE DO PORO; E, C) GRÁFICO MOSTRANDO A CORRELAÇÃO ENTRE  $\Xi$  PARA CADA FAMÍLIA DE TAMANHO DE PORO E SUAS RESPECTIVAS FAIXAS DE  $\rho_{2, \text{VAR}}$ . O GRÁFICO EM (A) MOSTRA TAMBÉM A CLASSIFICAÇÃO DOS TAMANHOS DO POROS COM BASE NO T<sub>2</sub> DE CORTE DE 92 MS (LINHA VERMELHA VERTICAL). 64
- FIGURA 29.** IMAGENS DA AMOSTRA IH: (A) MICROSCOPIA ÓTICA DE SUA LÂMINA DELGADA; E (B) RESPECTIVA BINARIZAÇÃO EVIDENCIANDO OS POROS EM PRETO E A MATRIZ ROCHOSA EM BRANCO. A ESCALA DA IMAGEM ESTÁ MOSTRADA EM VERMELHO EM (A). 66
- FIGURA 30.** RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DA AMOSTRA IH: A) DISTRIBUIÇÕES DE T<sub>2</sub> EXPERIMENTAL (LINHA AZUL), SIMULADA COM  $\rho_{2, \text{FIXO}}$  (LINHA TRACEJADA VERDE) E SIMULADA COM  $\rho_{2, \text{VAR}}$  (LINHA ROXA); B) GRÁFICO DE RESTRIÇÃO DA TRAJETÓRIA ( $\Xi$ ), ONDE 1 SIGNIFICA 100% DE CHANCE DO CAMINHANTE

ALEATÓRIO TER TOCADO A PAREDE DO PORO; E, C) GRÁFICO MOSTRANDO A CORRELAÇÃO ENTRE  $\Xi$  PARA CADA FAMÍLIA DE TAMANHO DE PORO E SUAS RESPECTIVAS FAIXAS DE  $\rho_{2,VAR}$ . O GRÁFICO EM (A) MOSTRA TAMBÉM A CLASSIFICAÇÃO DOS TAMANHOS DO POROS COM BASE NO  $T_2$  DE CORTE DE 92 MS (LINHA VERMELHA VERTICAL).

67

**FIGURA 31.** EM UMA DAS AMOSTRAS DO GRUPO AC, QUE FOI DESCARTADA, TEM-SE DOIS MOMENTOS DO PROCESSO DE BINARIZAÇÃO: (A) RESULTADO FINAL DO PROCESSO DE BINARIZAÇÃO COM PRESENÇA DE RUÍDO; E (B) RESULTADO APÓS A CORREÇÃO PELAS FERRAMENTAS *FILL HOLES*, *ERODE* E *DILATE* DO PROGRAMA IMAGEJ.

70

**FIGURA 32.** IMAGENS DA AMOSTRA DP: (A) MICROSCOPIA ÓTICA DE SUA LÂMINA DELGADA, COM A PRESENÇA DE PONTOS PRETOS RESULTADOS DE UM PROGRAMA DE DIGITALIZAÇÃO; E (B) RESPECTIVA BINARIZAÇÃO.

71

**FIGURA 33.** RESULTADOS DO MÉTODO PARA AC, OBTIDOS A PARTIR DA SIMULAÇÃO PELO PROGRAMA RWRMN SOBRE O MODELO 3D. ESTE MODELO FOI CRIADO USANDO AS IMAGENS OBTIDAS EM UM MICROTOMÓGRAFO DE RAIOS-X.

71

**FIGURA 34.** RESULTADOS DO MÉTODO PARA DP, OBTIDOS A PARTIR DA SIMULAÇÃO PELO PROGRAMA RWRMN SOBRE O MODELO 3D. ESTE MODELO FOI CRIADO USANDO AS IMAGENS OBTIDAS EM UM MICROTOMÓGRAFO DE RAIOS-X.

72

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo possui grandes desafios, um deles, encontra-se na modelagem de reservatórios com o objetivo de realizar uma exploração eficiente. Dessa maneira, obtêm-se:

- estimativas de produção;
- melhorias nos métodos de extração,
- estruturação de toda uma logística desde a exploração até a distribuição do óleo para as refinarias.

A caracterização de reservatório petrolífero consiste em um conhecimento geológico prévio. O que permite uma delimitação da área de exploração, que são geralmente situadas em uma bacia sedimentar, assim como relevar aspectos litológicos e morfológicos. Após a delimitação da área, são aplicados métodos potências e sísmicos com finalidade de encontrar locais com alta possibilidade de concentração de fluidos. Em seguida, os dados gerados por esses métodos são processados e interpretados, e a partir dessas informações são perfurados alguns poços para a confirmação das informações apresentadas até essa etapa. Durante o processo de perfuração dos poços são coletadas amostras de lama de perfuração com material litológico triturado, testemunhos, plugues laterais e realização de perfilagem.

Vale lembrar que é de extrema importância o congelamento dos testemunhos para frear o processo de dilatação material que ocorre com a exposição do material geológico as condições da superfície, ou seja, com uma pressão e temperatura bem menor do que as encontradas em camadas profundas.

Os plugues, que são amostras cilíndricas de 25,4 mm ou 38,1 mm de diâmetro por 50,0 mm de comprimento. Eles podem ser retirados diretamente do poço ou posteriormente dos testemunhos coletados. Após um processo de preparação e saturação dos plugues, podem ser realizados diversos testes de laboratórios como as técnicas de ressonância magnética nuclear (RMN). Trata-se de um método geofísico indireto que consiste na resposta de prótons contidos nos fluidos presentes nos poros graças a utilização de um campo magnético e pulsos de radiofrequência. Sendo interpretada corretamente, pode fornecer dados petrofísicos

como: distribuição de tamanho de poros e porosidade aproximada, que servem para aprimorar ainda mais o modelo de reservatório. Esse método vem ganhando notoriedade nas últimas duas décadas, por conta da quantidade de resultados que podem ser extraídos através interpretação dos tempos de relaxação e também pela sua principal característica: RMN pouco sofre influência da litologia.

No entanto, ainda que essa técnica aplicada aos plugues possa fornecer muitas vantagens, as desvantagens ainda são consideráveis. A começar pela extração de plugues durante a perfuração, que nem sempre é possível ser realizada, tanto por inviabilidades técnicas quanto financeiras. O mesmo se aplica ao processo de extração plugues de testemunhos, que pode comprometer a integridade do mesmo, ou em um intervalo específico de interesse, o testemunho pode não apresentar material suficiente para fornecer um plugue íntegro para as realizações das medições. Sem contar os altos custos do processo de extração, preparação, saturação, disponibilidade e tempo em laboratório.

Para esses casos, o imageamento 3D obtidos a partir de equipamento de micro-tomografia computadorizada por raio-X (micro-CT), apresenta-se com uma excelente técnica não destrutiva. Pois permite uma visualização das estruturas internas dos plugues, possibilitando um registro de seus dados e imagens das amostras diretamente em meio digital. Ainda assim, um imageamento 3D não é algo tão acessível uma vez que o preço do equipamento e custos de manutenção são altos.

Considerando essas dificuldades, uma alternativa seria obter dados petrofísicos a partir de lâminas delgadas. Afinal as lâminas delgadas podem ser confeccionadas de uma área menor que a de um plugue. Além disso, existem métodos computacionais capazes de simular a resposta de RMN a partir de imagens binarizadas das lâminas 2D. Um exemplo seria programa RWRMN, recém-desenvolvido no laboratório UFFLAR, consegue simular um decaimento de  $T_2$  empregando a técnica dos caminhantes aleatórios, de forma similar um ensaio de plugues em um laboratório de ressonância. E dessa forma podem ser realizados diversos ensaios utilizando apenas um computador, cortando custos, tempo e permitindo que os dados gerados sejam compartilhados e armazenados com mais facilidade.

### 1.1. Petrofísica

Introduzido por Archie na década de 50, o termo foi utilizado para melhor descrever o estudo das propriedades físicas e químicas da rocha assim como seus fluidos inseridos.

A petrofísica se interessa particularmente pelas propriedades que permitem a determinação de porosidade, permeabilidade e saturação de fluidos em uma rocha-reservatório, fundamentais para caracterizar o armazenamento e a transmissão de fluidos na rocha, com a finalidade de gerenciar e prever a performance de um reservatório.

A petrofísica é considerada um campo amplo e interdisciplinar e, por essa razão, seu arcabouço aglutina conhecimentos provenientes de diferentes áreas, como geologia, geofísica, química, mecânica, engenharia do petróleo, entre outras. A aplicação da petrofísica também é vasta e abrange praticamente todas as atividades relacionadas à exploração e produção de recursos minerais subterrâneos.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho é estimar o quanto os valores de relaxatividade superficial, obtidas de simulações a partir de uma imagem binarizada de lâmina, se correlacionam com os mesmos valores obtidos em laboratórios a partir de ensaios de RMN em plugues. Dessa forma, ter uma idéia se é possível utilizar as simulações como alternativa, caso os demais métodos (ensaios em plugues laterais e plugues extraídos de testemunhos) não estejam disponíveis. Além de promover:

- Revisão bibliográfica dos conceitos de RMN;
- Revisão bibliográfica sobre rochas carbonáticas;
- Realizar petrofísica em imagens de lâminas de carbonatos;
- Binarizarização das imagens;
- Submeter as imagens ao simulador RWRMN;
- Correlacionar os resultados de distribuição de  $T_2$ ;
- Sugerir possíveis melhorias no processo;

### 3. CONCEITOS DE RMN

A resposta do sinal da RMN vem dos núcleos atômicos sensíveis a técnica, que estão em sua maioria, na água ou do óleo em saturação na rocha e não da própria rocha (BRYAN et al 2013). Para estimativas de distribuição de tamanho de poros em rocha, diferentemente do uso pelas áreas da química e medicina, a técnica utiliza uma frequência de aproximadamente 2 MHz considerado baixo campo. Esse trabalho não irá se aprofundar nas teorias de RMN, o foco será no tempo de relaxação transversal ( $T_2$ ). A seguir terá uma breve introdução de alguns conceitos para facilitar o entendimento.

O fenômeno de RMN em baixo tem início com a ativação de um campo magnético externo, comumente representado por  $\vec{B}_0$ , em núcleos atômicos como  $^1\text{H}$ ,  $^{23}\text{Na}$  e  $^{31}\text{P}$ . Esses núcleos apresentam abundância considerável, principalmente o isótopo de hidrogênio, além de duas importantes características intrínsecas: Momento magnético e angular. Por conta delas, os núcleos exibem um comportamento similar a barra de imã, com dois pólos. Além do movimento de precessão tal como o de um pião.

Com a ativação de  $\vec{B}_0$ , há um torque nos eixos preferenciais de cada núcleo atômico, polarizando-os em sua maioria, em paralelo a  $\vec{B}_0$ . Desse modo, forma-se na mesma direção do campo magnético externo, um vetor magnetização resultante descrito por  $\vec{M}_0$ .

Ao atingir esse estágio, ativa-se um segundo campo magnético oscilante, descrito como  $\vec{B}_1$ . Esse novo campo, localizado na perpendicular a  $\vec{B}_0$ , o gerar um pulso de  $90^\circ$ , causa uma deflexão de  $\vec{M}_0$  do plano longitudinal para o plano transversal, projetando a sua magnetização no mesmo.

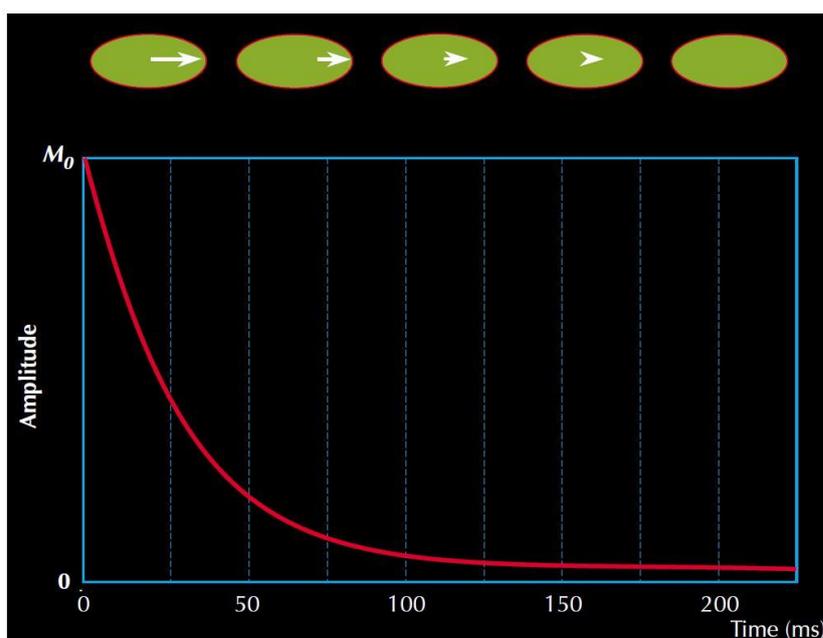
Nesse momento,  $\vec{B}_1$  fica inoperante, o que resulta no retorno de  $M_0$  de volta para o ponto inicial, ou seja, no plano longitudinal, paralelo a  $\vec{B}_0$ . Esse movimento de relaxação fica registrado em um gráfico de amplitude de sinal por tempo através uma curva decaimento de sinal fruto do registro feito por sensores, do enfraquecimento da projeção da magnetização no plano transversal.

### 3.1. Tempo de relaxação transversal ( $T_2$ )

O tempo de decaimento constante da magnetização no plano transversal recebe o nome de Tempo de Relaxação Transversal ou  $T_2$ . A amplitude da sequência dos ecos de spin no tempo  $t$ , sendo a amplitude do vetor magnetização no plano transversal  $M_x(t)$ , pode ser expressa pela equação 1:

$$M_x(t) = M_{0x} e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (1)$$

no qual  $M_{0x}$  = magnitude da magnetização no plano transversal quando  $t=0$ .



**Figura 1.** Exemplo de gráfico de uma curva de decaimento de as amplitudes dos ecos de spin em relação ao tempo, também conhecida com curva de decaimento de relaxação transversal ou  $T_2$ . Imagem do livro NMR Logging – Principles and Application (COATTES,1999).

O tempo de relaxação transversal, pode ser influenciado por características do fluido, propriedades físico-químicas no contato ou quasi-contato sólido/líquido (parede do recipiente do poro no qual o líquido está contido) ou por um gradiente de um campo magnético não homogêneo. Uma descrição mais detalhada de cada um desses fenômenos pode ser dada:

- Relaxação bulk ( $T_{2,B}$ ): sofre forte influências das propriedades do líquido tal como viscosidade e composição química (COATES,1999).

- Relaxação superficial ( $T_{2,S}$ ): influenciada por interações físico-químicas presentes nas paredes dos poros. Ainda há muita discussão sobre as suas causas. Alguns autores como (COATES, 1999 e ANOVITZ & COLE, 2015) apontam para composição mineralógica da superfície da parede do poro. A relaxação superficial tende a ser mais rápida que a relaxação bulk, ou seja,  $T_{2,S} < T_{2,B}$ . A equação 7 correlaciona a relaxação superficial com o produto da relaxatividade superficial com a razão superfície /volume do poro:

$$\frac{1}{T_{2,S}} = \rho_2 \left( \frac{S}{V} \right)_{poro} \quad (2)$$

no qual,  $\rho_2$  = valor de relaxatividade superficial e,  $\frac{S}{V}$  = razão superfície/volume.

A **relaxatividade superficial** ( $\rho_2$ ) é uma medida da capacidade com que a superfície do poro contribui para que a relaxação do próton possa ocorrer. A mesma está subordinada as interações entre fluido e a matriz, molhabilidade da rocha e varia com a mineralogia, sendo que carbonatos apresentam valores mais baixos do que arenitos ( COATES,1999).

- Relaxação difusiva ( $T_{2,D}$ ): ocorre quando o fluido está sob a ação de um campo magnético heterogêneo. Durante esse fenômeno em particular, a difusão causa um efeito direto sobre as precessões dos prótons ficando fora de fase mais rápido a depender da intensidade da magnetização na região onde os próton se encontram. Isso pode diminuir o tempo relaxação  $T_2$ . ( COATES, 1999)

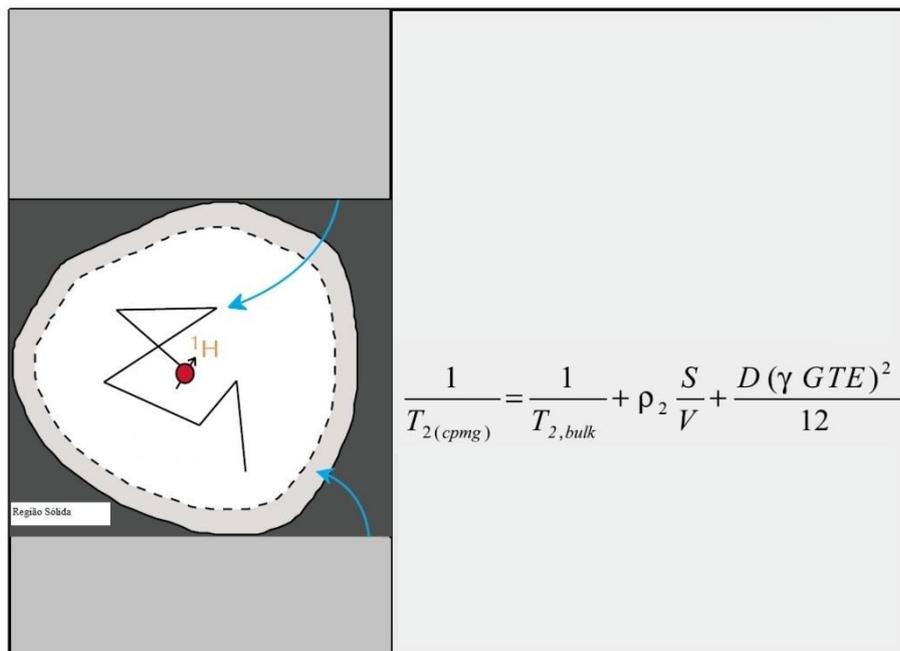
$$\frac{1}{T_{2D}} = \frac{D(\gamma GTE)^2}{12} \quad (3)$$

no qual,  $D$  = coeficiente de difusão translacional,  $\gamma$  = constante giromagnética,  $G$  = gradiente de campo magnético,  $TE$  = tempo entre cada eco da sequência CPMG.

### 3.2. Relação de $T_2$ com tamanho de poro.

Como visto anteriormente, sinal de RF medido pelas ferramentas de registro de RMN se origina a partir dos prótons dos fluidos presentes em poros. Segundo (ANOVITZ & COLE, 2015) quando as amostras litológicas, cujos meios porosos estão saturados a água, a medida  $T_2$  pode ser correlacionada à porosidade, assim como taxa de decaimento dos ecos de spin pode ser relacionada com o tamanho dos poros.

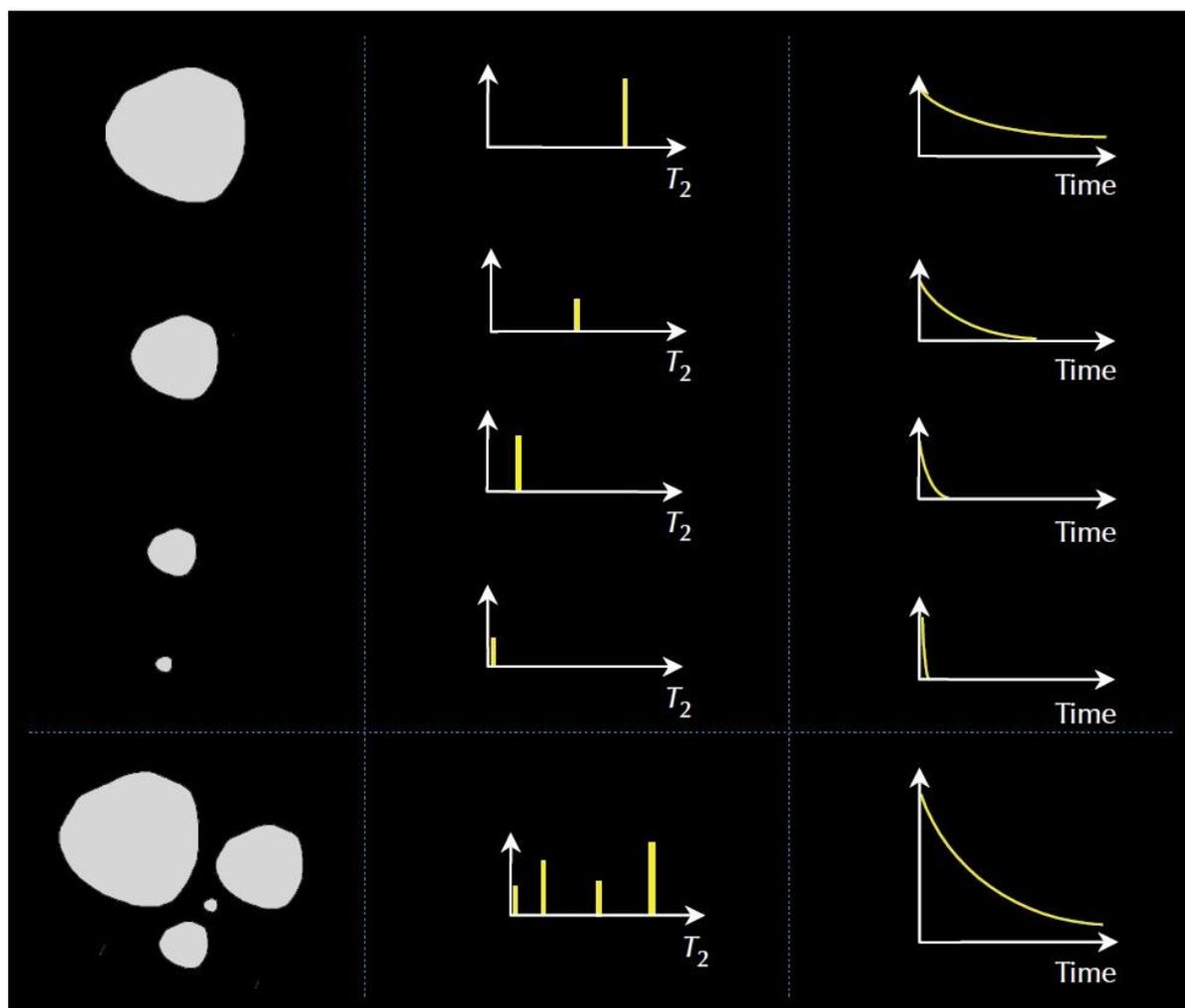
A figura 2, a seguir, demonstra que os valores de  $T_2$  em meios porosos adquirida pela sequência CPMG, na verdade são uma integração dos três tipos de relaxação descritas anteriormente. Uma vez que os prótons presentes nos líquidos contidos nos poros tendem a se movimentar por esse espaço. Durante esse movimento enquanto permanecerem na porção líquida do centro do poro, eles estarão subordinados as propriedades do líquido, e assim o  $T_2$  será similar ao da relaxação bulk do líquido. Ao continuar o movimento e se aproximarem da parede do poro, o  $T_2$  será similar ao da relaxação superficial da parede do poro, conseqüentemente mais rapido que a relaxação bulk. A relaxação difusiva exibe pouca influência em campos magnéticos homogêneos (COATES, 1999).



**Figura 2** – Exemplificação da dinâmica entre os componentes de  $T_2$  ( bulk, superficial e difusivo) durante o movimento dos prótons pelo interior do poro. Imagem modificada do livro NMR Logging – Principles and Application(COATTES,1999).

Quando a RMN ocorre em corpo rochoso saturado apenas água, a relaxatividade superficial se tornará dominante. Nesse caso,  $T_{2,S}$  poderá ser comparado a distribuição de tamanho de poro do material estudado ( Figura 4). Assumindo que os poros tenham geometria similar: (COATES,1999)

- Poros com raios grandes apresentarão uma razão de superfície e volume menor ( $S/V$ ) resultando em um tempo de relaxação  $T_{2,S}$  com valores altos. E assim, uma curva de decaimento mais longo.
- Poros com raios menores apresentarão uma razão  $S/V$  maior resultando em um tempo de relaxação  $T_{2,S}$  com valores baixo e assim gerando uma curva de decaimento mais abrupta.



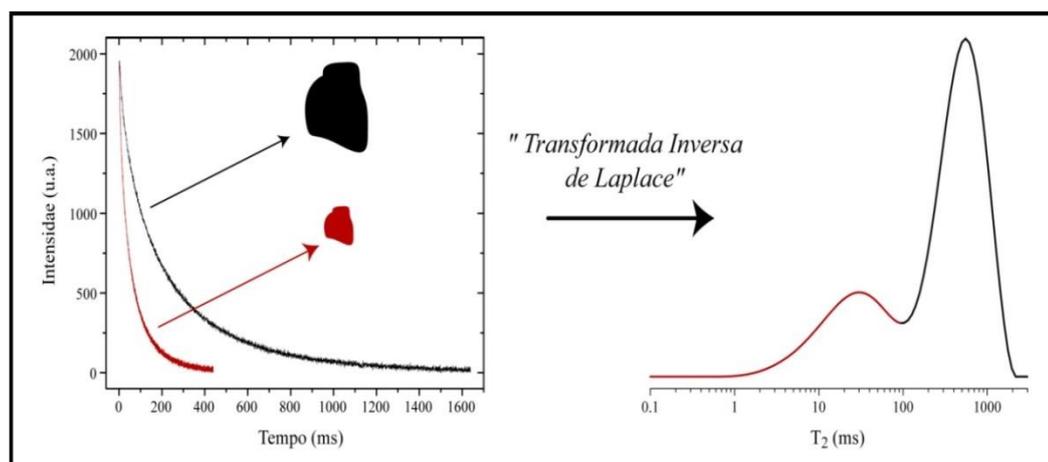
**Figura 3.** Relação entre tamanho de poro e tempo de relaxação. Imagem do livro NMR Logging – Principles and Application (COATTES, 1999).

Como representar o decaimento de cada poro individualmente se torna algo quase impossível, principalmente nas rochas carbonáticas, conhecidas pela grande variabilidade de tamanhos de poros. Utiliza-se o decaimento multiexponencial que na prática significa um somatório de todos os decaimentos dos diferentes tamanhos de poros existentes e assim formar um modelo de decaimento final que represente uma média ponderada que abranja todos os resultados. Descrito por:

$$M(t) = \sum M_i(0) e^{\frac{-t}{T_{2i}}} \quad (4)$$

no qual,  $M(t)$  = magnetização no tempo  $t$ ;  $M_i(0)$  = componente inicial da magnetização transversal;  $T_{2i}$  é o tempo de relaxação na  $i$ -ésima componente da relaxação transversal (COATES, 1999).

Assumindo que o modelo multiexponencial representa uma combinação de todas as curvas de decaimento ligadas as diferentes famílias de tamanhos de poros, é aplicada uma operação matemática chamada Transformada Inversa Laplace resultando em uma curva de distribuição de  $T_2$  (Figura 4), onde o peso volumétrico do decaimento de cada família de tamanho de poro determinará o formato final da curva.



**Figura 4.** Resultado da Inversa de Laplace. Figura da tese: Estudo de propriedades petrofísicas de rochas sedimentares por Ressonância Magnética Nuclear (Souza, 2012).

### 3.3. Saturação de água irreduzível e $T_2$ de corte

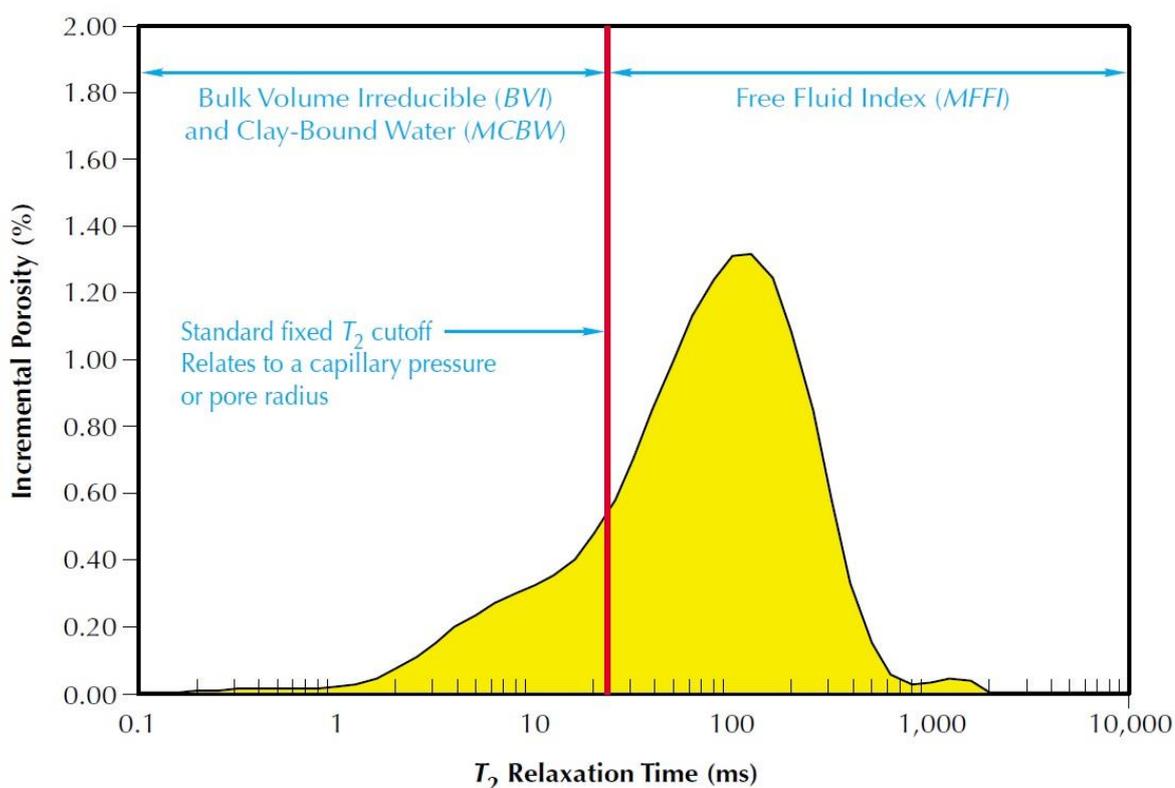
A partir desse ponto torna-se possível a determinação do BVI (sigla em inglês de Bulk Volume of Irreducible). Trata-se de uma estimativa do volume de água irreduzível presente na formação ou amostra relacionadas a molhabilidade e pressão capilar. Segundo (COATES, 1999) embora seja uma técnica recente, já é bastante empregada hoje em dia. Água irreduzível trata-se da porção líquida ligada aos poros de menores diâmetros que fica retida na rocha. Essa porção líquida representa hoje um grande desafio no processo de extração de óleo e gás, pois geralmente, por conta dessa retenção em regiões como gargantas de poros, os fluidos de interesse permanecem no reservatório, ocasionado um baixo fator de recuperação.

Fator de recuperação é o percentual que se espera produzir do volume de petróleo e gás presente em um reservatório, segundo relatório do seminário sobre aumento do fator de recuperação ( ANP, 2017), cita que nos dados do Boletim Anual de Recursos e Reservas (BAR, 2016), o fator de recuperação de todas as jazidas petrolíferas em reservas provadas no Brasil era de apenas 9% até 2016, com

previsão de crescimento para 15% a 20% para 2017. A cada 1% de aumento de fator de recuperação significa um aumento considerável na produção.

A técnica de determinação de BVI (Figura 6) consiste em dividir o gráfico em duas regiões com um valor de  $T_2$  de corte ( $T_2$  cutoff) de forma que:

- A região à esquerda, os valores de  $T_2$  que representam os poros de menor diâmetro e assim da porção de água irreduzível/garganta de poros.
- A região à direita, os valores de  $T_2$  que representam os poros de maior diâmetro e assim toda a porção fluida que pode ser extraída com maior facilidade.

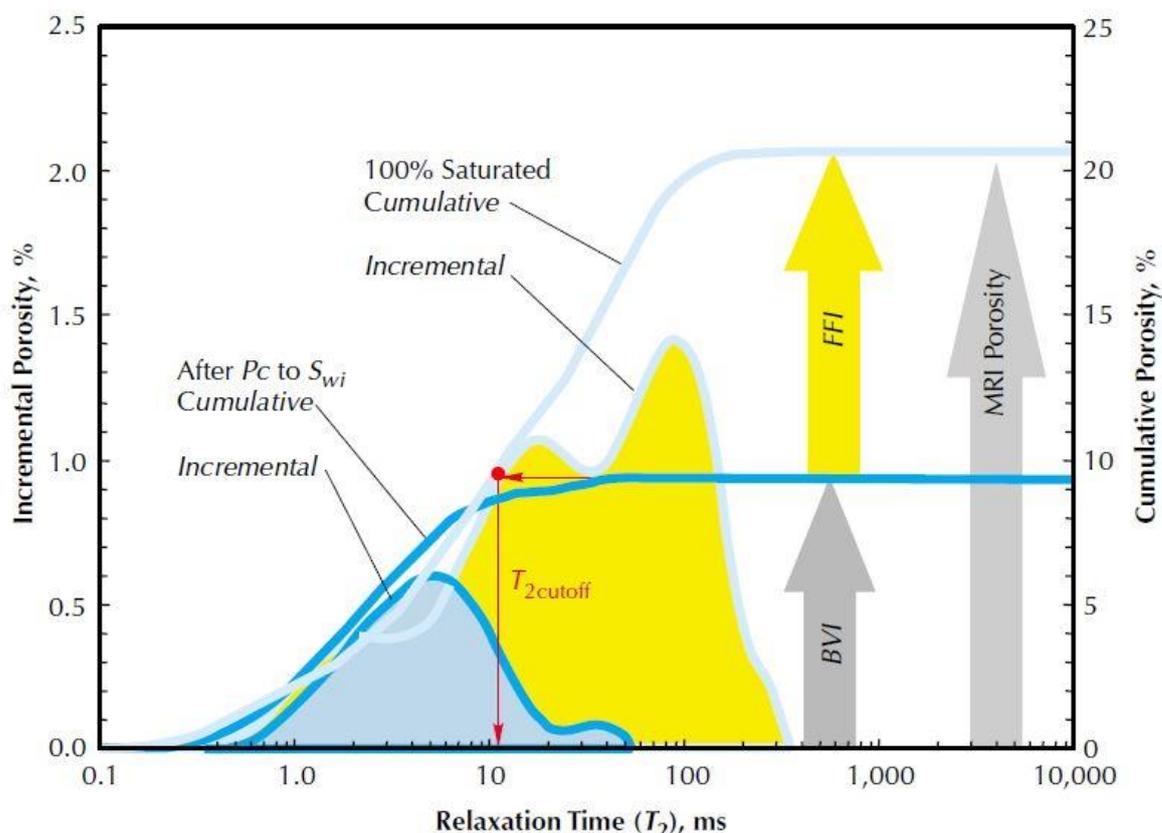


**Figura 5.** O  $T_2$  de corte tem o objetivo de dividir o gráfico entre a região BVI e MCBW ligados a poros pequenos com porção fluida que fica retida na rocha e MFI ligada aos poros maiores e fluidos com maior mobilidade. Imagem do livro NMR Logging – Principles and Application (COATTES, 1999).

Para obter o valor  $T_2$  de corte é necessário ter os valores dos ensaios de RMN do plugue a ser interpretado sob duas condições:

- Saturado 100% em água ( $S_w$ ) e o mais desidratado possível ( $S_{wi}$ ).
- Plotar as duas curvas no gráfico de porosidade incremental x  $T_2$ .
- A partir do ponto onde a curva de  $S_{wi}$  toca o gráfico da porosidade cumulativa, seguir pelo eixo do gráfico até o ponto de interseção com a curva  $S_w$  e rebater para o eixo de  $T_2$ .

O valor encontrado é o  $T_2$  de corte (Figura 6).



**Figura 6.** Método para estimar  $T_2$  de corte. Imagem do livro NMR Logging – Principles and Application (COATTES,1999).

Mas se por alguma razão os dados dos ensaios de laboratórios do plugues nas condições  $S_{wi}$  e  $S_w$  não estejam disponíveis, os valores padrões utilizados são  $T_2$  de corte de 33 ms para arenito e 92 ms para carbonato (COATES, 1999). Esses valores funcionam bem para amostras da área do Golfo do México, porém alguns fatores como a química das paredes dos poros e textura podem influenciar esses valores.

#### 4. ROCHAS CARBONÁTICAS

Nesse capítulo será abordado o processo de formação das rochas carbonáticas, desde precipitação dos sedimentos, passando pelos processos deposicionais e diagenéticos. Assim uma breve caracterização de seus componentes, classificações e os tipos de porosidades existentes. O intuito desse capítulo é demonstrar o quão desafiador pode ser fazer estimativas nesse tipo de rocha. Para se ter uma idéia, de acordo com dados disponibilizados pela ANP em julho de 2017, o fator de recuperação para os reservatórios carbonáticos no Brasil

em produção acumulada são de apenas 2% (com previsão de aumento para 18% com possíveis reservas) enquanto no arenito tem-se 21% (com previsão de aumento para 33% com possíveis reservas).

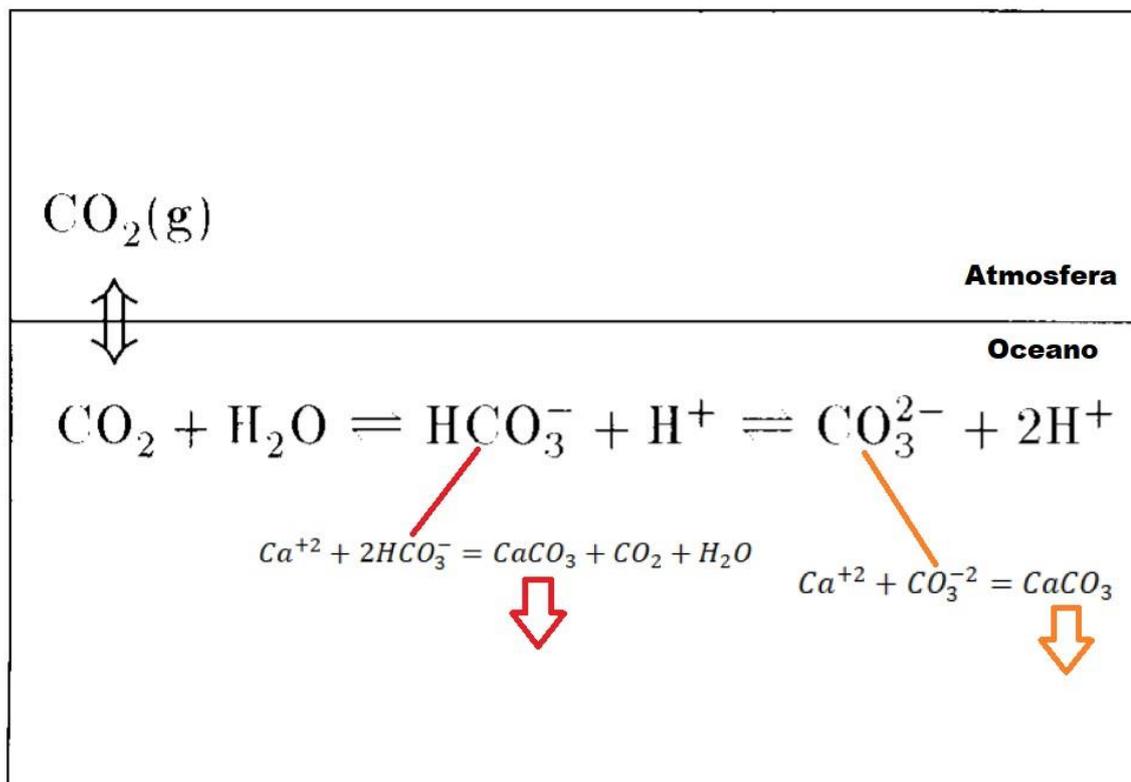
Rochas carbonáticas representam aproximadamente 50% da produção de óleo e gás do mundo. Entre os tipos de rochas carbonáticas, uma grande porcentagem das reservas de hidrocarbonetos mundiais foi prospectada de dolomitos, pois na maioria das vezes, são mais porosas e permeáveis que os calcários (HALLEY & SCHMOKER, 1983). Diferente de muitos reservatórios areníticos, que normalmente apresentam um único tipo de porosidade (i.e., porosidade primária - interpartícula) de natureza uniforme (homogênea), nas rochas carbonáticas são encontradas mais de um tipo de porosidade. Essa característica transmitida na forma de heterogeneidade petrofísica aos reservatórios (MAZULLO & CHILINGARIAN, 1992).

#### 4.1. Processo de formação das rochas carbonáticas

Os ambientes marinhos supersaturados em bicarbonato  $HCO_3^-$  e íon carbonato  $CO_3^{2-}$ , provenientes da dissociação do dióxido de carbono em água na da interação oceano/atmosfera são locais propícios para o processos de calcificação combinar suprimentos cálcio ( $Ca$ ) e/ou magnésio ( $Mg$ ), promovendo assim a formação do mineral de carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) Zeebe e Wolf-Gladrow (2001) (Figura 8). A dinâmica recém-descrita responde pela principal fonte de produção sedimentos carbonáticos. Grande parte dos acúmulos de carbonatos são frutos da intensa atividade orgânica presente em mares com temperatura alta, baixa profundidade, boa oferta de luz e pouca participação de terrígenos em suspensão.

Organismos que participam desse ciclo do carbono total tende a promover a calcificação por meio de biomineralização induzida ou controlada que terá como resultado uma precipitação de carbonato de cálcio da água do mar para suas estruturas tais como exoesqueleto, conchas, espículas entre outros. A precipitação também pode ocorrer diretamente da água do mar graças a supersaturação.

## Sistema Carbonato



**Figura 7.** Sistema Carbonato. Fonte: Modificado de  $\text{CO}_2$  IN SEAWATER: EQUILIBRIUM, KINETICS, ISOTOPES, Zeebe e Wolf-Gladrow, 2001. E equações de calcificação simplificadas de Gattuso (1999); Leclercq (2002)

Com a formação desse sedimento carbonático seguido da deposição no substrato marinho, tem-se o início da fase pré deposicional (CHOQUETTE & PRAY, 1970). Nesse estágio, segundo (MAZULLO, 2004) há basicamente porosidade primária tais como: porosidade interpartículas, como as encontradas nas areias carbonatadas, poros intrapartículas (como os presentes nos bioclastos e outros grãos aloquímicos), fenestral (poros formados por bolhas de gás e encolhimento de sedimentos em carbonatos lisos), poros de abrigo (shelter) e de estrutura de crescimento (comuns em construções de recifes). Segundo (CHOQUETTE & PRAY, 1970) na fase deposicional, ainda em superfície ou a poucos metros de profundidade, ocorre a deposição da lama carbonática, ou micrita, responsável por quase 2/3 da porosidade total. Nos casos da rocha ser formada por grãos carbonáticos bem selecionados, essa fração pode ficar acima de 1/3 da massa total.

Contudo essa porosidade primária em rochas carbonáticas sofre uma grande redução durante a fase pós deposicional. Graças à cimentação gerada por fluidos ainda supersaturados, compactação ocasionada pelo soterramento diminuindo consideravelmente a porosidade e por vezes até cimentando a rocha por completo. E na transição entre a fase deposicional e pós deposicional, inicia-se o processo de diagênese (CHOQUETTE & PRAY,1970).

A diagênese pode ser definida como um episódio onde as condições físico-químicas que regem os processos geológicos atuam sobre sedimentos depositados, depósitos residuais e sobre todos os tipos de rocha na superfície da crosta nos primeiros milhares de quilômetros de profundidade, com temperaturas até  $\approx 200^{\circ}\text{C}$  e sob baixas pressões.

Segundo (CHOQUETTE & PRAY,1970) o processo pós deposicional divide-se em três episódios: eogenético , mesogenético e telogenético.

Eogenético – tem início logo após a deposição, geralmente com pouca profundidade, temperatura e pressão. Tem influência direta do ambiente deposicional. Ainda sofre os efeitos das dinâmicas ocorridas na superfície como exposição subárea, influência biológica, zona de saturação de água. Se ocorrer em zona de saturação por água meteórica, ou seja, com Ph mais baixo do que estagio de precipitação dos sedimentos carbonáticos, prevalecerá o processo de dissolução, principalmente da aragonita, com efeito de uma nova precipitação desse mesmo material nos poros ainda existentes. Caso ocorra em uma zona de água marinhas/supersaturadas com Ph maior ou igual do estagio de pré deposicional, há cimentação carbonática nos poros, crescimentos dos grãos e redução da porosidade.

Mesogenético: tem sua ação iniciada quando a camada depositada encontra-se a uma profundidade que a isola da superfície devido ao contínuo soterramento de material sedimentar sobre a mesma. Há um aumento considerável na pressão, devido ao peso das camadas acima ou em alguns casos a ações tectônicas de regime compressional presentes na região como, por exemplo, falhas e dobras. Há também um aumento na temperatura devido aumento do grau geotérmico característico ao se afastar da superfície em direção ao núcleo. Essa pressão gerada tende a causar uma maior compactação dos grãos do arcabouço e assim reduzindo ainda mais a porosidade principalmente a primaria. Todavia, por conta da percolação de fluidos, na maior parte das vezes com alta temperatura e/ou baixo Ph,

podendo ocorrer localmente um aumento significativo da porosidade tanto primária quanto secundária.

Ocorrendo o aumento do soterramento e conseguinte pressão e temperatura a rocha sedimentar passa para o estágio de metamorfismo, onde o calcário existente tende a se tornar mármore.

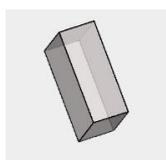
Telogenético: esse estágio só ocorre se a camada antes soterrada for novamente exposta a superfície subaérea sofrendo com ações do intemperismo físico e químico principalmente com a ação corrosiva das águas meteóricas e erosão.

#### 4.2. Principais minerais constituintes

O carbonato de cálcio é o principal composto químico dos minerais presentes nas rochas carbonáticas. Seus minerais principais são: a Aragonita, Calcita e Dolomita. Os três possuem composição química similar com estruturas cristalinas diferentes e segundo (KORBEL e NOVAK, 2001) possuem essas características:

Aragonita –  $CaCO_3$  :

- Dureza ( Mohs) - 3.5 a 4;
- Sistema cristalino – Ortorrômbico;
- Forma cristalina – acicular



•

Densidade –

2.9 g/cm<sup>-3</sup>

Dentre os três minerais é o que apresenta maior grau de instabilidade e solubilidade. Quando presente em rochas carbonáticas formadas em ambientes marinhos, tende a ser o constituinte de grãos aloquímicos como os oóides e pelóides ou em bioclastos e cimento.

Algumas hipóteses foram apresentadas por Tucker (2001) para a sua precipitação inorgânica. A primeira diz que possivelmente aragonita e calcita com teor de Mg tendem a se precipitar quando a concentração de CO<sub>2</sub> está alta e a razão Mg/Ca baixa na água do mar. A segunda correlaciona locais com alta energia com

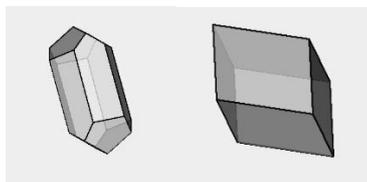
grande suplemento de carbonato na água do mar favoreceriam precipitação de aragonita. E a terceira comenta sobre uma alternância na mineralogia do oóides durante o Fanerozóico coincidentemente como a variação do nível do mar onde os momentos de regressão marinha propiciaria a deposição de aragonita.

Bessler e Rodrigues (2007) citam em seu artigo que alguns organismos têm preferência em biomineralizar aragonita por conta da capacidade evolutiva de manipular os cristais aciculares, e assim podem criar estruturas entrelaçadas formando carcaças mais solidas e mais resistentes a quebra.

Exemplo - moluscos bivalves e briozoários

Calcita –  $CaCO_3$ :

- Dureza ( Mohs) – 3;
- Sistema cristalino – Hexagonal/Trigonal;
- Forma cristalina – prismático/ Romboedros;



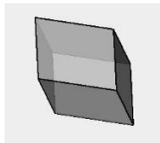
- Densidade –  $2.7 \text{ g/cm}^3$ .

O mineral calcita é a principal constituinte das rochas carbonáticas. Podendo ser encontrada nos grãos aloquímicos (oóide, oncoide, pelóite, intraclasto e bioclastos), matriz (micrita) e cimento. Em relação à aragonita, apresenta maior estabilidade, resiste mais a ação dissolução e tende a preservar melhor os fósseis. Segundo (TUCKER, 2001) as fases de elevação do nível do mar tende a favorecer deposição de calcita. Ela também pode ser fruto de biomineralização como, por exemplo, no caso dos foraminíferos, Rhodophyta (algas vermelhas), Chlorophyta (algas verdes) e Chrysophyta coccolitos.

Dolomita –  $CaMg(CO_3)_2$  :

- Dureza ( Mohs) 3.5 a 4;
- Sistema cristalino – Hexagonal;

- Forma cristalina – Romboedros;



- Densidade – 2.87 g/cm<sup>-3</sup>.

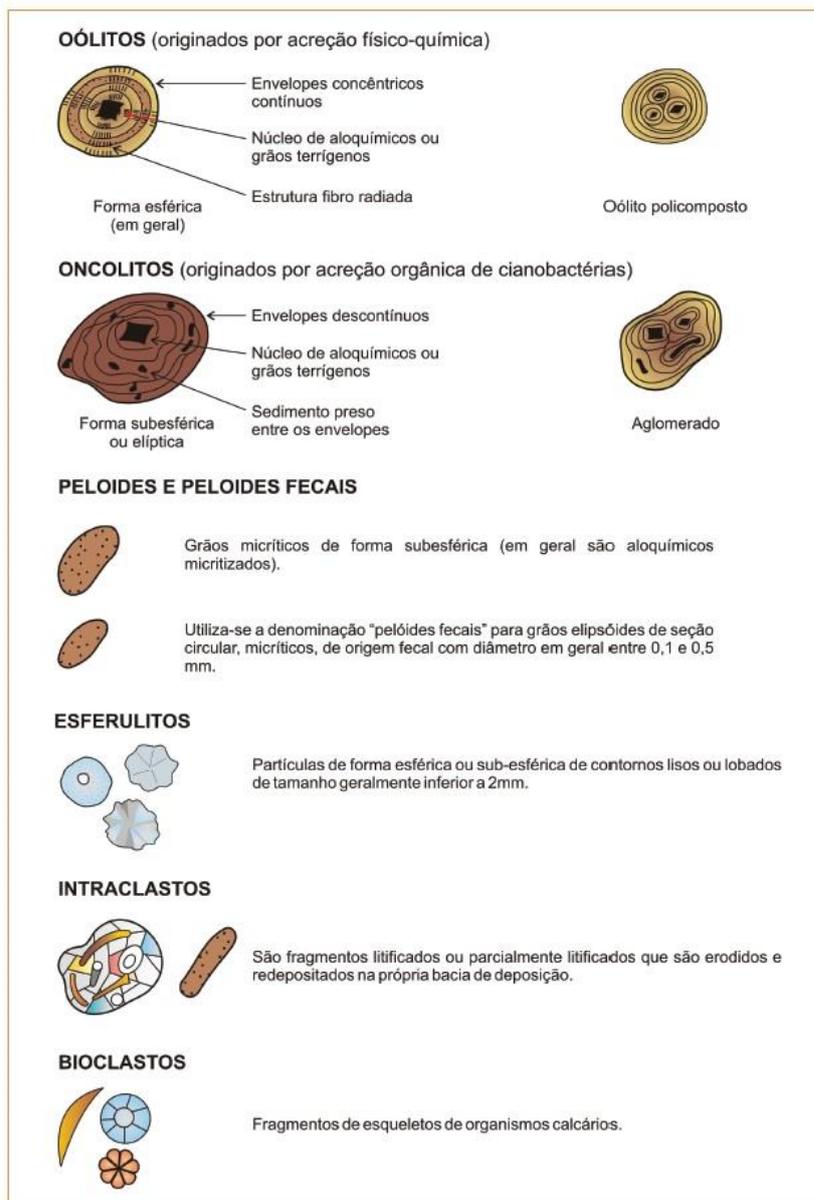
Dentre os três minerais é o que apresenta maior resistência às ações diagenéticas como dissolução e compactação. Formada na maioria dos casos durante a diagênese. O processo de dolomitização onde com a entrada de *Mg* na estrutura química da calcita, muda seu sistema cristalino para Hexagonal se tornando o mineral Dolomita. Por conta dessa mudança no hábito cristalino, a textura original da rocha, arranjo e contorno dos grãos podem ser alterados de forma total ou parcial. Uma das principais características desse processo é um aumento das porosidades existentes e a acentuação da microporosidade devido aos microcristais de dolomita que surgem em quase toda porção rochosa que passou pelo processo de dolomitização.

#### 4.3. Principais constituintes das rochas carbonáticas

Matriz carbonática – também chamada de lama carbonática ou micrita. Trata-se do material carbonático constituído por cristais com granulação inferior a 0,0625mm cuja formação por muitas vezes ocorre simultaneamente aos grãos aloquímicos. Não há um consenso sobre a origem dessa matriz, as teorias mais aceitas são (TERRA, 2010):

- Abrasão mecânica e biológica;
- Desintegração das carapaças calcárias de organismos;
- Atividade microbial;
- Biomineralização induzida por alguns organismos.

Cimento - É o material que preenche os espaços porosos na rocha fruto da precipitação a partir de fluidos supersaturados em CaCO<sub>3</sub>. Os principais minerais são aragonita, calcita e dolomita, também conhecido como esparito. Os demais constituintes estão mostrados na Figura 9.



**Figura 8.** Principais constituintes de uma rocha carbonática. Fonte: Boletim da Petrobras (TERRA, 2010).

As figuras 16 e 17 mostram detalhes das classificações de Dunham (1962) e Folks (1962), respectivamente.

CALCÁRIOS ALÓCTONES					CALCÁRIOS AUTÓCTONES				
Componentes originais não-ligados organicamente durante a deposição (<10% grão >2 mm)				Textura deposicional não-reconhecível	Componentes originais não-ligados organicamente durante a deposição		Componentes originais ligados organicamente durante a deposição		
Contém Matriz (Partículas tamanho argila/silte fino)					>10% grãos >2 mm		Organismos que atuam como obstáculos	Organismos que encrustam e ligam	Organismos que constroem um arcabouço rígido
Suportado por matriz		O arcabouço é grão-suportado com matriz	Sem matriz, grão-suportado		Suportado pela matriz	Suportado por componentes maiores que 2 mm			
Menos de 10% de grãos	Mais de 10% de grãos								
<i>Mudstone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Grainstone</i>	<i>Crystalline</i>	<i>Floatstone</i>	<i>Rudstone</i>	<i>Bafflestone</i>	<i>Bindstone</i>	<i>Framestone</i>

Figura 9. Método de classificação segundo Dunham (TERRA, 2010).

ROCHAS ALOQUÍMICAS			
I CIMENTO CALCITA ESPÁTICA		II MATRIZ CALCITA MICROCRISTALINA	
INTRACLASTOS (i)		INTRAMICRITO (IIi)	
OOLITOS (o)		DOMICRITO (IIe)	
FÓSSEIS (b)		BIOMICRITO (IIb)	
PELETS (p)		PELMICRITO (IIp)	
ROCHAS ORTOQUÍMICAS		ROCHAS RECIFAIS AUTÓCTENES	
III CALCITA MICROCRISTALINA SEM ALOQUÍMICOS		IV BIOLITTO (IV)	
MICRITO (III m)			
DISMICRITO (III m x)			
		 CALCITA ESPÁTICA CALCITA MICROCRISTALINA	

Tamanho de Grão	Constituintes transportados	Constituintes autógenos	Tamanho de Grão
64 mm	Calcirrudito muito grosso	Cristalino extremamente grosso	4 mm
16 mm	Calcirrudito grosso		
4 mm	Calcirrudito médio		
1 mm	Calcirrudito fino	Cristalino muito grosso	1 mm
0,5 mm	Calcarenito grosso		
0,25 mm	Calcarenito médio	Cristalino grosso	0,25 mm
0,125 mm	Calcarenito fino		
0,062 mm	Calcarenito muito fino	Cristalino médio	0,062 mm
0,031 mm	Calcilutito grosso		
0,016 mm	Calcilutito médio	Cristalino fino	0,016 mm
0,008 mm	Calcilutito fino		
	Calcilutito muito fino	Afanítica	0,004 mm

Figura 10. Método de classificação segundo Folks (1962).

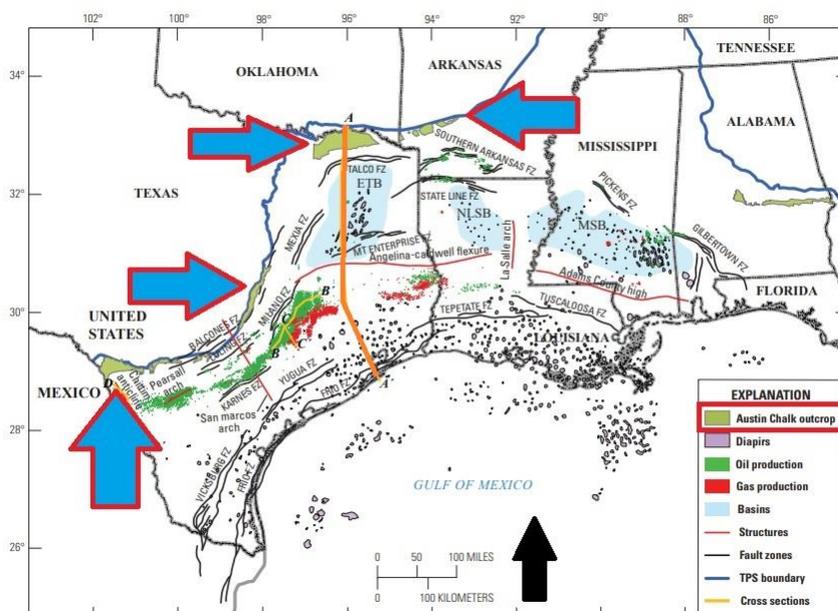
#### 4.4. Origem das amostras

As amostras presentes nesse trabalho são oriundas de plugues retirados de rochas carbonáticas de bacias sedimentares norte-americanas pela empresa

Kocurek. Infelizmente, a mesma não divulga os locais exatos onde foram coletadas essas amostras. As informações a seguir são resultado de levantamentos bibliográficos a partir dos seus respectivos nomes: Austin Chalk (AC), Desert Pink (DP), Edwards Yellow (EY), Edwards White (EW), Guelph Dolomite (GD) e Indiana Limestone (IH).

#### 4.4.1. Formação Austin Chalk (amostra AC)

De acordo com (PEARSON, 2012), Austin Chalk, trata-se de uma formação classificada como packstone (Dunham, 1962) composto principalmente por coccolitóforos (Dawson, 1995). A formação apresenta rochas de baixa permeabilidade e porosidade. Embora seja chamado de chalk (giz), as margas (calcários com 35 a 60% de argila) são prevalentes, alternando com camadas de giz para formar um pacote heterogêneo. Esse pacote possivelmente foi depositado durante um evento de nível de mar alto mundial (Vail e outros). Através do estado do Texas, o carbonato depositou-se em ambiente marinho raso com profundidade entre 30 e 300 pés (10 e 100 m) durante o cretáceo superior. A formação possui uma espessura que varia de 150 a 800 pés (45 a 250 m). De forma ampla e regional, Austin Chalk foi dividida em três unidades principais – inferior, médio e superior. Hovorka e Nance (1994) descrevem cada porção de acordo com a variação das espessuras das camadas de giz e margas intercaladas. Na camada inferior há mais giz, seguindo para as camadas do meio, as intercalações têm espessuras equivalentes com presença de cinza vulcânica e a superior onde não há uma alternância cíclica (Figura 11).



**Figura 11.** O mapa mostra as regiões onde há afloramentos em superfície da camada onde estão presentes as rochas do grupo AC. Fonte Krystal 2012, USGS Report 2012–5159, 2012.

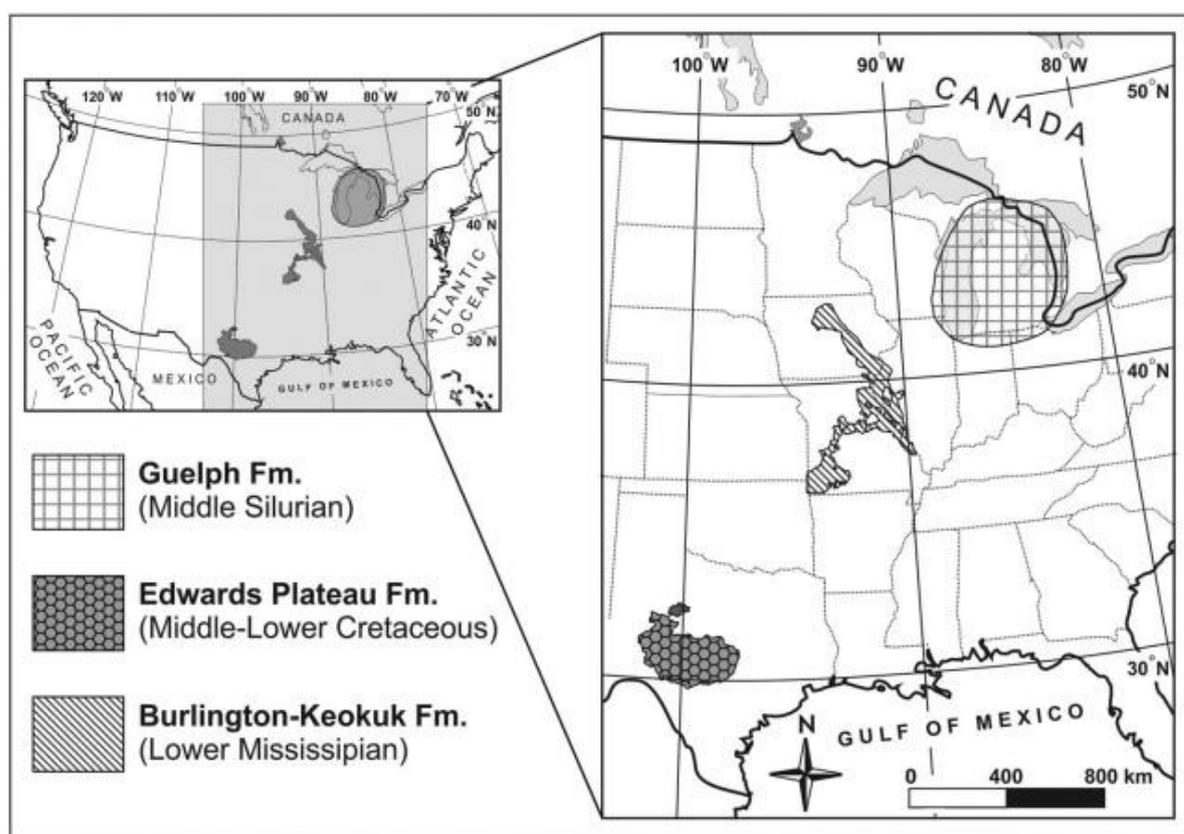
#### 4.4.2. Formação Guelph (amostra GD)

Segundo Silva (2015), a formação Guelph constitui-se de carbonatos de plataforma e recifal que afloram através de um cinturão de aproximadamente 15 a 30 km entre a península de Bruce e o Rio Niágara, no sudoeste do Lago Ontario (Coniglio, 2003). Como discutido por Coniglio (2004), a formação Guelph corresponde ao grupo albermarlo superior (siluriano médio) sobreposto por carbonatos do grupo salina do siluriano superior. De acordo com alguns autores, por exemplo, Brett (1990), Zheng (1999) e Coniglio (2003), essa formação foi influenciada por processos climáticos e tectônicos após sofrer uma história diagenética complexa (Figura 12).

#### 4.4.3. Formação Edwards (amostras DP, EY e EW)

Segundo Silva (2015) e Rose (1970), a Formação Edwards inclui idades que possivelmente estão relacionadas ao estágio albiano (médio-inferior Cretáceo) devido a processos de deposição transgressiva-regressiva em um paleoambiente marinho raso, que ocorreu nas margens de plataforma central do Texas (ROSE,

1970; LAND & PREZBINDOWSKI, 1981; MACLAY & SMALL, 1986; FERRILL & MORRIS, 2008). Neste estudo, foram investigadas amostras de carbonato de três diferentes afloramentos, Edwards White (EW), Edwards Yellow (EY) e Desert Pink (DP), que exibem potencialmente texturas características. Recentemente, estudos de caracterização envolvendo tais rochas Castro (2013) aponta para a presença de calcita como a predominante fase mineral para amostras de carbonato EW e EY (Figura 12).

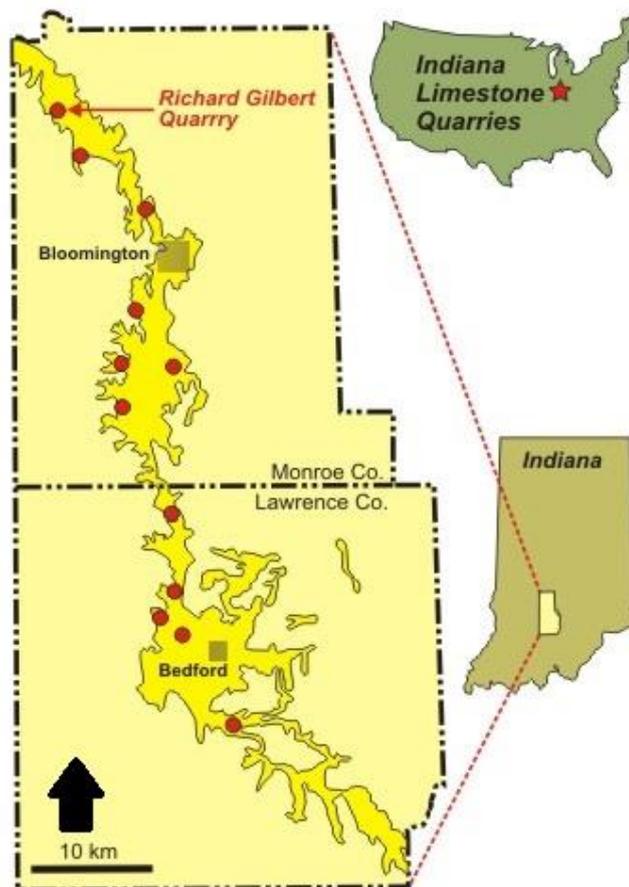


**Figura 12.** Localização da Formação Guelph ( Bacia Michigan) e Formação Edwards.

#### 4.4.4. Formação Salem (amostra IH)

De acordo com o site ([academic.brooklyn.cuny.edu](http://academic.brooklyn.cuny.edu)) Indiana Limestone está localizado ao sul do estado de Indiana no EUA, também conhecido oficialmente de Formação Salem, consiste em uma camada com espessura média de 52 m de composta de calcário variando de cinza claro a cinza azulado que se oxidou localmente em um amarronzado claro. Grãos médios a grossos, bem ordenado e poroso. Sendo constituídos de pequenos fósseis preservados e fragmentos fósseis.

O fósil mais abundante é o foraminífero *Endothyra baileyi* com até 1 mm de comprimento. Fragmentos de bryozoários também são comuns na Formação Salem. O carbonato dessa formação pode ser classificado como Grainstone (DUNHAM, 1962). Depositados em mares rasos, tropicais durante o Missipiano médio a tardio 335-340 Ma. (Figura 13)



**Figura 13.** Locais de exploração de calcário da Formação Salem segundo o site <http://academic.brooklyn.cuny.edu/geology/powell/613webpage/NYCbuilding/IndianaLimestone/IndianaLimestone.htm>

## 5. POROSIDADE

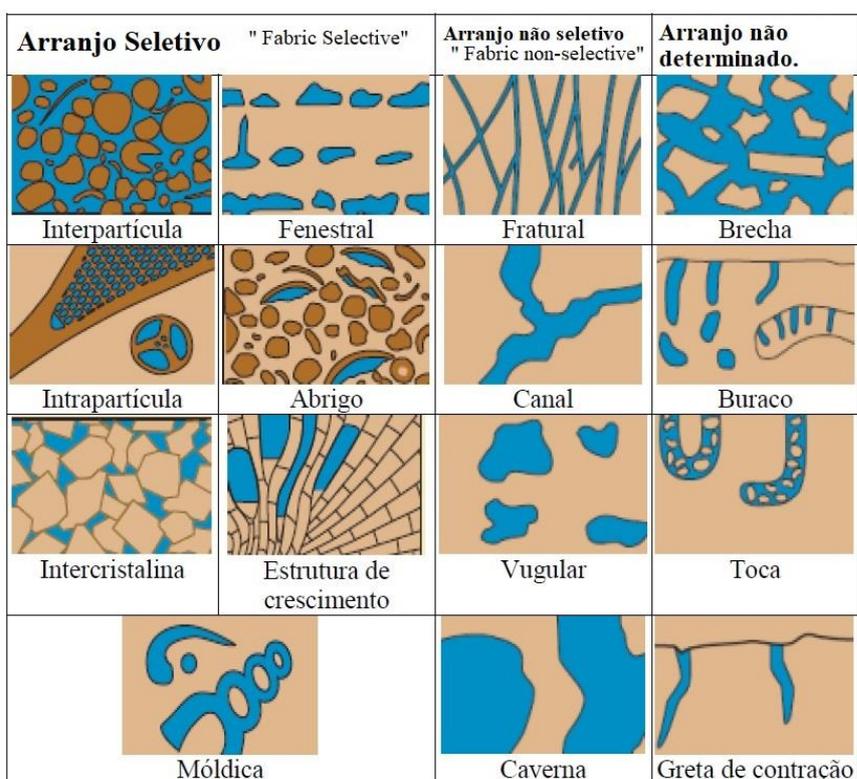
Trata-se da porção da rocha com espaço para abrigar fluidos. São divididas em porosidade total ( $\Phi_{total}$ ) e porosidade efetiva ( $\Phi_{Efetiva}$ ), dadas por:

$$\Phi_{total} = \frac{\text{Volume dos Poros}}{\text{Volume total}}$$

$$\Phi_{Efetiva} = \frac{\text{Volume de poros conectados entre si}}{\text{Volume total}}$$

A estimativa da porosidade efetiva é de grande importância para avaliação do potencial produtivo de um campo petrolífero.

A porosidade pode ser dividida em porosidade primária, quando é formada no momento de deposição dos sedimentos que darão origem a rocha sedimentar após os eventos de compactação e diagênese, e porosidade secundária quando é formada durante o processo diagenético ou por processos ocasionados por intemperismo físico (dilatação, contração, rachaduras), químico (ação erosiva provocada principalmente por água da chuva) ou biológico. A Figura 14 mostra um esquema com os tipos de porosidade em rochas carbonáticas (Scholle & Scholle, 2003).



**Figura 14.** Classificação da porosidade de Choquette & Pray (1970). Fonte: modificado de Scholle & Scholle (2003).

As partículas sólidas que compõem o arcabouço que sustentam e estrutura interna das rochas carbonáticas são descritas por (CHOQUETTE & PRAY, 1970) como " Fabric Elements". Dessa forma, quando grande parte da porosidade tanto primária quanto secundária for resultado do arranjo seletivo dessas partículas é denominado como "Fabric selective" e quando boa parte dessas porosidades são provocadas por outros fatores que independem desse arranjo seletivo foram

denominadas “ Fabric non Selective”. E ainda há um terceiro caso onde não fica claro qual o fator que contribuiu mais para as porosidades, denominado aqui como “ Arranjo não determinado”.

Porosidade de arranjo seletivo.

- Porosidade Interpartícula – Porosidade entre os grãos, geralmente formada no momento de deposição.
- Porosidade Intrapartícula – Porosidade presente dentro dos grãos, ocorrendo de forma localizada. Geralmente formada durante a diagênese, principalmente por dissolução. Contudo pode ser originada também no momento de pré deposição.
- Porosidade Inter cristalina – Porosidade que ocorre entre os cristais da rocha, comumente associada aos processos de dolomitização por substituição, processo característico da diagênese.
- Porosidade Moldica – Porosidade remanescente da dissolução de grãos aloquímicos e ou de bioclastos de composição geralmente aragonítica durante a diagênese.
- Porosidade Fenestral – porosidade resultante do ressecamento provocado pela passagem de fluido gasoso.
- Porosidade de abrigo (Shelter) – Porosidade formada pela obstrução de partículas maiores impedindo a deposição de micrita ou o preenchimento de cimento. Muito presente no estágio pré-deposição.
- Porosidade de estrutura de crescimento ( Framework) – Porosidade gerada a partir do crescimento de organismos vivos, como algas calcárias e corais.

Porosidade de arranjo não seletivo.

- Porosidade de Fratura – formadas graças a esforços tectônicos que gerando deformações, escorregamentos e deslizamentos. Tem como resultado o aumento da porosidade e permeabilidade efetivas. Assim como propiciar um aumento no fluxo de fluidos presentes em locais antes confinados.
- Porosidade Vugular – apresentam poros com diâmetros geralmente superiores a 1/16 mm originados possivelmente pela ampliação de

porosidades intrapartícula e interpartícula por dissolução ou recristalização.

- Porosidades Canal e Caverna – são originadas geralmente a partir de outras pré-existentes que passaram pelo processo de dissolução.

Porosidade de arranjo não determinado.

- Porosidade Brecha – são originadas geralmente a partir de outras preexistentes que passaram pelo processo de dissolução.
- Porosidade Buraco e toca – são originadas por atividade biogênica.
- Porosidade de gretas de contração – ou também conhecida pelo termo em inglês Shrinkage. São formadas caso ocorra uma exposição subaérea das rochas carbonáticas, onde ações do intemperismo como corrosão por água meteórica com phmais ácido, rupturas causadas pela variação de temperatura e ressecamento, originarão deformações que caso sejam preservadas resultarão nessa modalidade de porosidade.

## **6. METODOLOGIA**

### **6.1. Captação das imagens e binarização**

Esse trabalho foi realizado com base em imagens de microscopia ótica de lâminas delgadas oriundas de plugues de carbonatos, impregnadas com resina epóxi azul para destacar o espaço poroso. Esse procedimento foi realizado no laboratório Lagesed da UFRJ no equipamento Zeiss axio A1. A resolução de cada imagem foi determinada através da contagem de pixels existentes ao longo da reta de escala pré-existente, obtendo um número aproximado de pixels por micrômetro. Foi selecionada uma área de estudo da imagem, livre de qualquer agente que pudesse adulterar o resultado das binarizações.

O segundo passo consistiu no processo de binarização onde as tonalidades da imagem foram segmentadas em brancas e pretas, representando as partes sólidas e os espaços porosos, respectivamente. Por fim a imagem final é salva em TIFF ou PNG. Nesse trabalho foi utilizado o programa ImageJ, contudo há outros

programas que podem realizar o mesmo trabalho, tal como o programa Avizo 8. Concluída essa etapa, as imagens foram submetidas no programa RWRMN.

## 6.2. Programa RWRMN

Desenvolvido no laboratório UFFLAR pelo pesquisador Dr. Francisco Benavides, o programa RWRMN (sigla para Random Walk \ Ressonância Magnética Nuclear) efetua simulações de RMN a partir de imagens binarizadas de lâminas delgadas de rochas, tendo como resultado final as curvas de decaimento de  $T_2$  e também as curvas de distribuição de  $T_2$  após a aplicar a transformada inversa de Laplace. Essa simulação tem como objetivo reproduzir digitalmente os mesmos ensaios de RMN realizados em laboratório em plugues de rocha.

O programa RWRMN (Figura 16) entrega antes mesmo de iniciar o processo de simulação, informações como:

- quantidade de píxeis pretos presentes na imagem, dando uma ideia de quantos caminhantes aleatórios (CA) usar.
- a partir razão da entre o número total de píxeis pretos e o total de píxeis na imagem chega um valor de porosidade.

Essa razão pode ser comparada porosidade do plugue da rocha medida em laboratório.

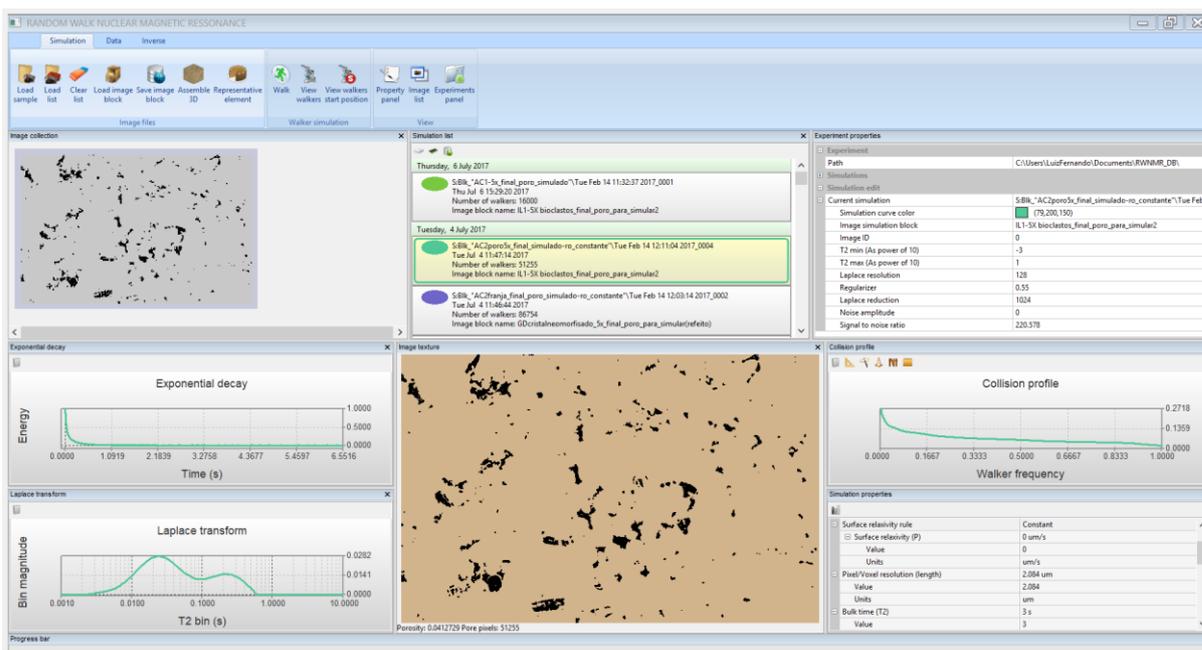


Figura 15. Layout do Programa RWRMN.

O programa também fornece como resultados finais, uma série de arquivos .csv que registram dados:

- da taxa de decaimentos das colisões dos CA.
- simulações com relaxatividade constante e variável.
- histograma de colisões dos CA usados nas simulações.

Os caminhantes são os principais agentes desse mecanismo, e assim como os demais tópicos acima descritos serão abordados no capítulo 7.

Esses dados são processados no programa Matlab gerando os gráficos que serão analisados no capítulo 9.

### 6.3. Ensaio de Ressonância magnética nuclear em laboratório

Os plugues utilizados nos ensaios de RMN no laboratório foram saturadas com uma solução de 30.000 ppm de KCL pela aplicação de pressão de vácuo de 2.000 psi e mantidas imersas na solução até que as medições de RMN fossem realizadas. As medições do tempo de relaxação transversal de  $T_2$  do isótopo  $^1\text{H}$  foram realizadas a  $30^\circ\text{C}$  num espectrômetro de bancada NMR Maran Ultra de 460 G (equivalente a 2 MHz para  $^1\text{H}$ ), utilizando uma sonda de 52 mm. As curvas de relaxação  $T_2$  foram adquiridas com sequência de pulso Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) (Meiboom e Gill, 1958) com 32 varreduras, 8.192 ecos, um tempo ao eco de 200  $\mu\text{s}$  e um tempo de reciclo de 10s. Todas as amostras foram embaladas em filme de teflon para evitar perda de fluido durante as medições. Antes e depois de cada medição, as massas foram medidas para avaliar possíveis perdas de fluido saturante. As medidas de RMN foram realizadas no laboratório de aplicações de RMN e na Petrofísica da Universidade Federal Fluminense.

## 7. PROCESSO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional presente nesse trabalho foi descrita no artigo “Estimating the surface relaxivity as a function of pore size from NMR  $T_2$  distributions and micro-tomographic images” publicado na revista *Computers & Geosciences* em 2017. Alguns pontos importantes serão brevemente descritos nesse capítulo.

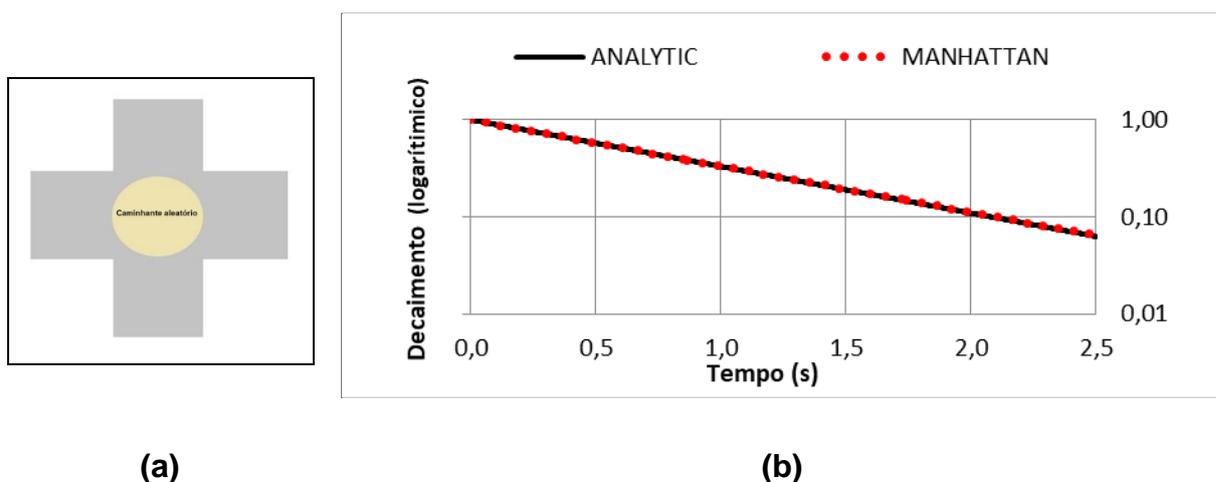
Como descrito no capítulo 3, o tempo de relaxação transversal ( $1 / T_2$ ) dos prótons em moléculas da fase líquida pode ser reforçado por interações de contato ou quase contato com as interfaces sólido / fluido. Dentro do limite do regime de difusão rápida, a interação sólido-fluido é o mecanismo de relaxação dominante e a taxa de relaxação de um fluido ocupando o espaço dos poros pode ser aproximada por Brownstein and Tarr (1979) :

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left( \frac{S_p}{V_p} \right) = \rho_2 \frac{c}{R_p} \quad (5)$$

na qual,  $R_p$  = raio do poro,  $c$  = fator de forma (1, 2 e 3 para poros planos, cilíndricos e esféricos, respectivamente).

A representação da imagem digital da amostra de rocha fornece apenas uma aproximação das formas dos poros que a depender da sua resolução pode exibir pouco detalhamento. O contorno de qualquer imagem digital trata-se na verdade um aglomerado de píxeis quadrados. Isso pode induzir imprecisões, pois mesmo depois do processo de binarização, um único píxel pode ser segmentado em duas tonalidades o que atrapalha a determinação precisa das áreas limite de poro pelo caminhantes aleatórios.

Os caminhantes aleatórios (CA) são partículas cujo movimento obedece um caminho determinado por passos aleatórios. Possuem um ponto de partida, caminham a passos com distâncias equivalentes entre si e sua direção é determinada aleatoriamente. Por essa razão, para garantir que os CA permanecessem o máximo possível sobre os píxeis inteiramente pretos (ligados aos poros), foi aplicada uma restrição no movimento do caminhante para direções perpendiculares, conforme descrito em Watanabe e Nakashima (2002), obtendo um ajuste preciso para os resultados analíticos, como mostrado na Figura 16.



**Figura 16.** Simulação de caminhantes aleatórios: (a) trajetória restrita para apenas movimentos perpendiculares (chamada norma de Manhattan); (b) excelente correlação quando se comparam os resultados analíticos e simulados. Fonte: Estimating the surface relaxivity as a function of pore size from NMR T2 distributions and micro-tomographic images.

### 7.1. Simulação do decaimento RMN

Para as simulações, foi utilizada a abordagem baseada em píxel do método de caminhante aleatório para simular o decaimento magnético, aqui representado por  $M(t)$ , em uma amostra de rocha (Benavides, 2017). A amostra é descrita por uma imagem digital 2D na qual os píxeis pretos são identificados nos elementos de imagem que representam o espaço poroso.

O valor de  $M(t)$  decai de acordo com dois mecanismos de relaxação: relaxação não uniforme (relaxação superficial) e bulk. O contato do fluido com as paredes do poro produz relaxação não uniforme  $MNU(t)$ .

Na simulação, cada um dos milhares de caminhantes são colocados aleatoriamente, nos espaços de píxeis pretos, e difundem em passos discretos até os píxeis vizinhos (Talabi, 2009). Sempre que a partícula atinge a parede sólida, ou seja, quando a partícula encontra um píxel branco, é penalizada por um fator  $\delta$  que depende da relaxatividade superficial, cuja relação é dada por:

$$\delta = \frac{2\Delta\rho}{3D} \quad (6)$$

no qual  $\rho = \rho_2$  = relaxatividade superficial transversal,  $\Delta$  = resolução da imagem e  $D$  = coeficiente de difusão translacional, Bergman (1995). Nessa seção ( $\rho = \rho_2$  relaxatividade superficial).

Toda partícula do fluido faz a mesma contribuição para a magnetização não uniforme  $MNU(t)$ . Quando o caminhante atinge a superfície sólida, tem sua magnetização reduzida, através da multiplicação  $1-\delta$  (Tan, 2014). Ao colidir com um píxel branco, o CA, muda a direção do movimento aleatório. Desse modo, seu movimento fica restrito apenas a área coberta por píxeis pretos.

Segundo Benavides (2017), houve um beneficiamento do fato de que em uma simulação com caminhantes aleatórios, o número total de colisões nas paredes é proporcional ao tamanho do poro em que reside (quanto maior for o poro, menor será o número total de colisão de parede e vice-versa). Assim, ao invés de associar diretamente um valor de relaxatividade superficial a razão superfície/volume, de acordo com o tamanho dos poros (o que seria impossível nas implementações práticas), foi associado um valor de relaxatividade superficial a um determinado número de colisões na parede. Em outras palavras, a relaxatividade da superfície é  $\rho = \rho(\xi)$ , sendo  $\xi$  o número total de colisões nas paredes, normalizadas para o número total de iterações na simulação.

Com a ajuda de uma simulação preliminar com os CA denominada Simulação de Mapeamento (MS), determina-se um valor de classificador  $\xi$  para cada caminhante. Ocorre a penalização do fator  $\delta$  descrita acima e no fim da simulação, temos o conjunto normalizado de pares  $\left(k, \frac{y_k}{n_{st}}\right)$ ,  $k = 1, \dots, N$ , no qual  $N$  é o número total de caminhante,  $k$  é a identificação do caminhante,  $y_k$  é o número total de colisões que o caminhante teve, e  $n_{st}$  é o número total de iterações. O valor  $\xi_k = y_k/n_{st}$  pode ser interpretado como a possibilidade de um caminhante  $k$  colidir com a parede do poro durante a simulação variando numa escala de 1 a 0

Segundo Benavides (2017), para simular o decaimento CA com base numa função candidata  $\rho_c(\xi)$  foi adotado o seguinte procedimento: para cada caminhante (representado por  $k$ ), foi atribuído um valor de relaxatividade  $\rho_k$  de acordo com  $\xi_k$  calculado no MS, ( $\rho_k = \rho_c(\xi_k)$ ). Dessa forma, a ação é executada com cada

caminhante presente na imagem, e ao final, é realizado um somatório da contribuição de todos CA, produzindo um decaimento exponencial. Acompanhe o comparativo abaixo o comparativo entre o ensaio de RMN de laboratório e a simulação digital.

Como visto no capítulo 3, nos ensaios de laboratório :

- O decaimento exponencial é uma função da amplitude de sinal gerado pelos ecos de spin pelo tempo de relaxação, onde quanto maior o poro, menos abrupto é a curva decaimento.

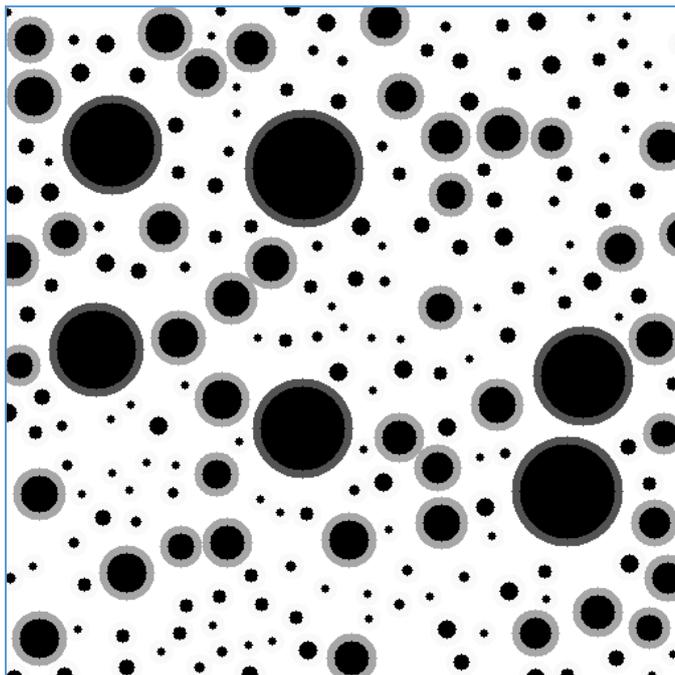
Já na simulação:

- O decaimento exponencial é uma função das populações de CA agrupadas por taxas de colisões, durante o tempo em que os caminhantes resistem a penalização do fator  $\delta$  , onde quanto maior o poro, menor a taxa de colisões dos CA e assim menos abrupto é a curva decaimento.

Em seguida é aplicada a transformada inversa de Laplace ao decaimento exponencial simulado associada a função  $\rho_c$ .

São utilizados Algoritmos Genéticos (GA) no intuito de encontrar a relaxatividade superficial cuja função tenha a melhor correlação com a distribuição de  $T_2$  de referência. O objetivo dos GA é propiciar um ambiente onde seja encontrada a melhor solução de um problema em meio a uma população de possíveis resultados (BENAVIDES, 2017).

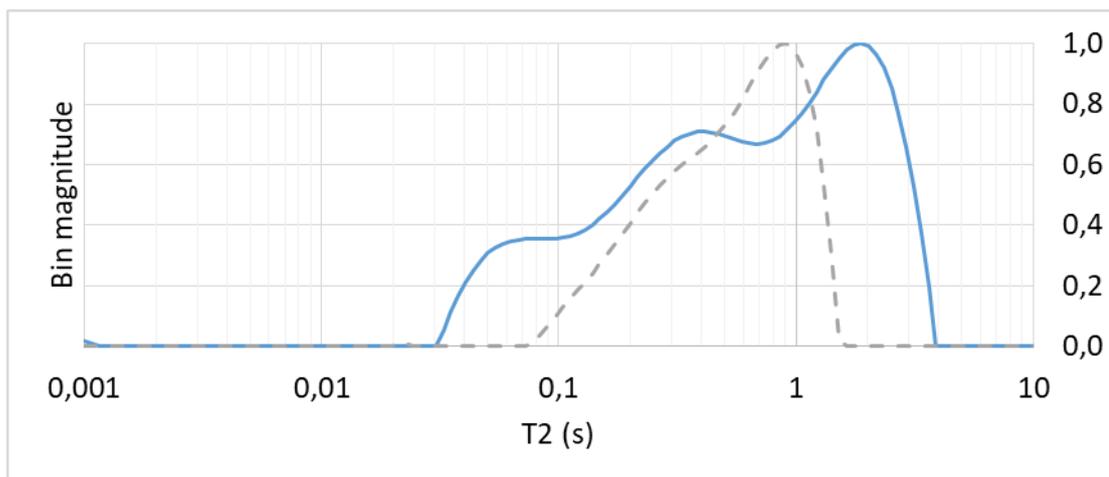
Para validar a técnica e demonstrar a variação da distribuição de  $T_2$  foi utilizada uma imagem de fundo branco com três populações de poros de tamanhos variados como exemplo sintético (Figura 24). Para cada população foi associado uma escala de cinza destacando valores de relaxatividades diferentes. Foi realizado uma simulação 2D onde cada vez que um caminhante colidia contra a parede gerava um valor em escala de cinza, ou seja, havia perda de energia correspondente ao valor de relaxatividade.



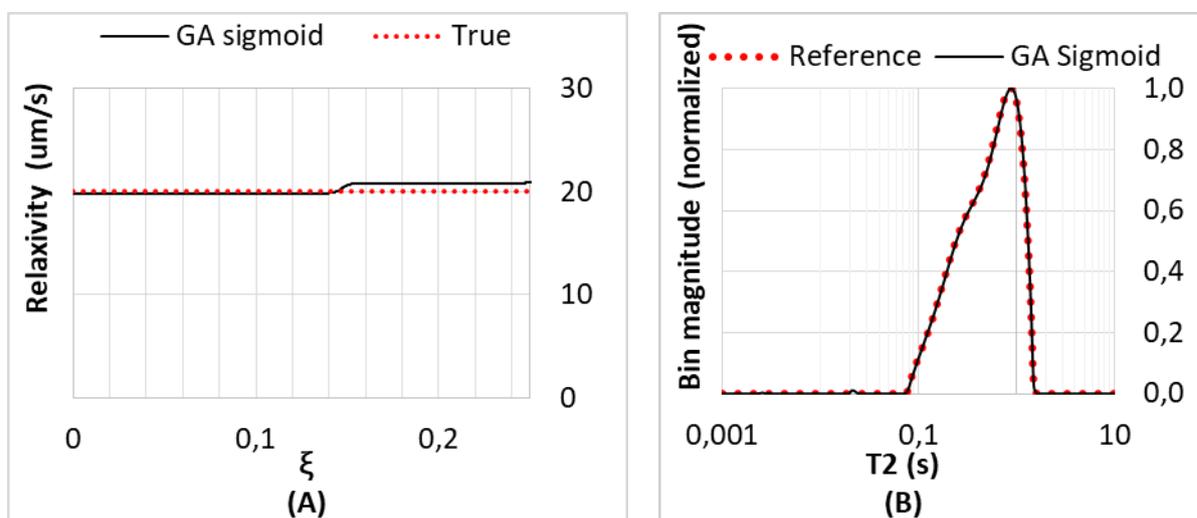
**Figura 17.** Modelo sintético com três famílias de poros com tamanhos diferentes, usado nas simulações para estimar valores de relaxatividade com valores constantes para as três famílias e com valores diferentes associados a cada família de poro. Observa-se que em cada borda dos poros há pelo menos 3 escalas de cinza: poros com borda cinza escuro estão associados a valores baixos de  $\rho_2$ , possuindo raios maiores; poros com borda cinza estão associados a valores médios de  $\rho_2$ , possuindo raios médios; e poros com bordas cinza claro estão associados a valores altos de  $\rho_2$ , possuindo raios menores. Fonte - Estimating the surface relaxivity as a function of pore size from NMR  $T_2$  distributions and micro-tomographic images.

Nessa simulação o tempo de relaxação bulk foi de 3 s e a resolução assumida foi de  $\Delta = 2 \mu\text{m}$  e um total de 54.575 caminhantes, cada pixel da imagem recebeu um caminhante.

O resultado foram duas distribuições de  $T_2$ , uma oriunda do decaimento simulado com relaxatividade superficial variando um valor estimado para cada população de poros e a outra do decaimento simulado com Relaxatividade superficial constante com valor de  $20 \mu\text{m/s}$  para todas as três populações. As duas curvas de relaxação apresentaram diferença para a mesma distribuição de tamanho de poros. Principalmente a que representou o valor de relaxatividade superficial constante que ficou mais estreita e unimodal.



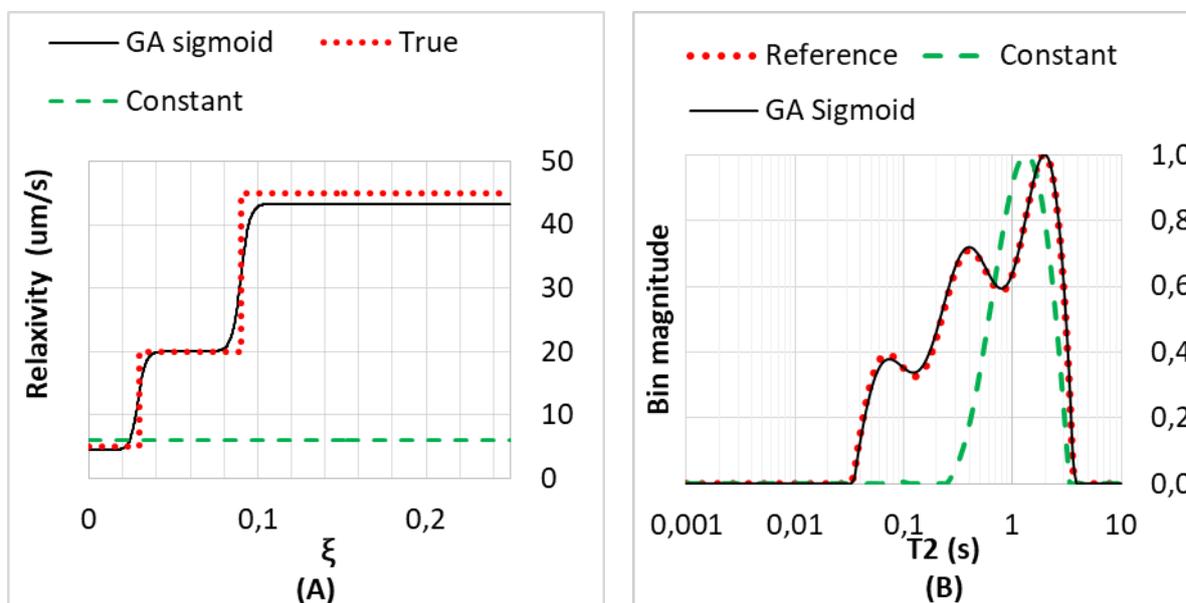
**Figura 18.** Distribuição de  $T_2$  obtida do decaimento simulado com valores de relaxatividade superficial variados (linha contínua) e a distribuição com decaimento simulado com valores de relaxatividade superficial de  $20 \mu\text{m/s}$  (linha tracejada). Observando que a linha que representa valores de relaxatividade superficial constante apresenta uma forma mais estreita que a forma da outra linha. Fonte: Estimating the surface relaxivity as a function of pore size from NMR  $T_2$  distributions and micro-tomographic images.



**Figura 19.** (A) Comparação entre a função da relaxatividade superficial obtida com a simulação (GA sigmoid) e a função com valores de referência advindo de medições de laboratório (True); (B) distribuições de  $T_2$  correspondentes. Fonte: Estimating the surface relaxivity as a function of pore size from NMR  $T_2$  distributions and micro-tomographic images.

O segundo gráfico tem o foco nos valores de relaxatividade superficial variando entre as três famílias de tamanhos de poros diferentes. E mais uma vez o método apresentou sucesso no cenário com valores de relaxatividade variáveis, em

contra partida em nenhum dos gráficos as curvas que representavam valores constantes de relaxatividade para essa simulação obtiveram bons resultados.



**Figura 20.** (A) Comparação das duas linhas de relaxatividade superficial oriundas da simulação e os valores de referência medidos em laboratório; e (B) respectivas distribuições de  $T_2$ . A distribuição de  $T_2$  corresponde a relaxatividade constante representada em (A) é também plotada em (B) Fonte: Estimating the surface relaxivity as a function of pore size from NMR  $T_2$  distributions and microtomographic images.

## 8. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Nessa seção serão apresentados os resultados das distribuições de  $T_2$  obtidas via simulação do decaimento exponencial a partir das imagens 2D (lâminas delgadas), objetivando a obtenção do parâmetro relaxatividade superficial. Os valores obtidos serão confrontados com os obtidos experimentalmente utilizando o método descrito por Souza et al. (2012), por ser considerado um dos mais acurados (chamado a partir de agora de  $\rho_{2,ref}$ ). O método desenvolvido por Benavides et al. (2017) também será utilizado para obter  $\rho_2$  a partir de imagens microtomográficas (chamado a partir de agora de 3D), cujos resultados serão comparados aos valores

obtidos com as imagens 2D (chamado de 2D). Estes dados serão discutidos com base na descrição geológica das amostras.

Quanto a determinação do tamanho de cada poro de fato, ainda não há uma técnica específica que correlacione um determinado  $T_2$  a um correspondente tamanho de poro. Em termos práticos, a quantificação de tamanhos de poros é baseada na proporcionalidade entre  $T_2$  e tamanho de poros: valores baixos são associados a poros pequenos e valores altos são associados a poros grandes. Para discriminar e qualificar esse tamanho de poros utilizando as distribuições de  $T_2$  fez-se uso da classificação descrita na seção 3.1, separando o sistema poroso em duas frações pela aplicação do  $T_2$  de corte de 92 ms: o sinal acima desse corte será classificado como poros grandes, correspondentes ao fluido livre, enquanto os abaixo desse corte como poros pequenos, correspondentes ao fluido irreduzível.

A tabela 1 mostra alguns dados petrofísicos das amostras estudadas, medidas pela técnica de injeção de gás (petrofísica básica) e por RMN. As porosidades ( $\phi$ , dada em unidades de porosidade, u.p.) obtidas por ambos os métodos apresentaram uma excelente correlação entre si. A tabela mostra ainda a densidade de grão ( $\rho_{\text{grão}}$ ), com resultados típicos de carbonatos (acima de 2,7 g/cm<sup>3</sup>), e a relaxatividade superficial de referência ( $\rho_{2,\text{ref}}$ ), mostrando que as amostras estudadas possuem uma variação alta, com valores entre 12,4  $\mu\text{m/s}$  e 35,8  $\mu\text{m/s}$ . A partir deste ponto, as amostras serão identificadas pelas siglas também mostradas na tabela.

**Tabela 1.** Porosidade ( $\phi$ , em unidades de porosidade), densidade de grãos ( $\rho_{\text{grain}}$ ), porosidade por RMN ( $\phi_{\text{RMN}}$ ) e relaxatividade superficial de referência ( $\rho_{2,\text{ref}}$ ) das amostras estudadas. Erro Relativo =  $[(\phi_{\text{He}} - \phi_{\text{RMN}}) / \phi_{\text{He}}]$ . As siglas indicadas serão utilizadas para nomear as amostras ao longo do texto.

Amostra	Sigla	$\phi_{\text{He}}$ (p.u.)	Erro Relativo	$\phi_{\text{RMN}}$ (u.p.)	$\rho_{\text{grão}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{2,\text{ref}}$ ( $\mu\text{m/s}$ )
Austin Chalk	AC	23,0	-0,034	23,7	2,70	23,3
Desert Pink	DP	30,5	-0,042	31,8	2,71	12,3
Edwards Yellow	EY	22,9	-0,200	27,5	2,61	10,5
Guelph Dolomite	GD	7,9	-0,265	10,0	2,84	12,4
Indiana 70 mD	IH	18,9	0	18,9	2,69	35,8

A tabela 2 mostra as resoluções das imagens 2D. Para todas as amostras, as resoluções obtidas foram bastante próximas entre si, o que aumenta a qualidade da comparação dos resultados.

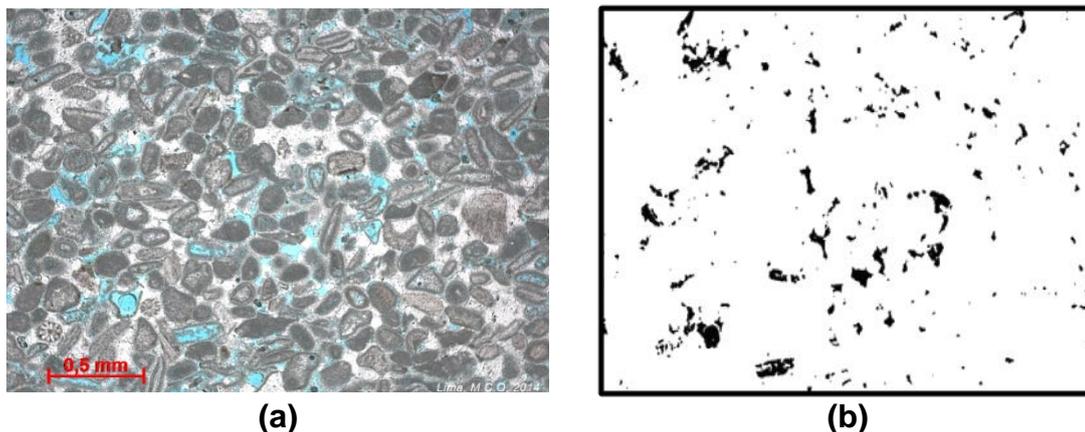
**Tabela 2.** Parâmetros das imagens na pré-simulação e estimativa de porosidade. Erro Relativo =  $[(\phi_{He} - \phi_{RWRMN}) / \phi_{He}]$

Amostra	Escala (pixel/ $\mu\text{m}$ )	Resolução ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )	$\phi_{He}$ (p.u.)	Erro Relativo	$\phi_{RWRMN}$ (%)
AC	0,48	2,08	23,0	0,826	4
DP	0,46	2,17	30,5	0,125	8
EY	0,50	2,00	22,9	0,090	11
GD	0,48	2,08	7,9	0,493	4
IH	0,46	2,17	18,9	0,735	5

A tabela também mostra as porosidades obtidas pelo programa RWRMN, oriundas da soma de todos os poros, normalizada pela área total amostrada. Os dados mostram uma grande diferença entre as porosidades  $\phi_{RMN}$  (tabela 1) e  $\phi_{RWRMN}$  (tabela 2), resultado este já esperado considerando a grande diferença de amostragem entre ambas as técnicas. No entanto, esta diferença não significa que o espaço poroso amostrado pelos dois métodos seja diferente em relação ao tamanho dos poros e suas distribuições. Os resultados deste trabalho também focam nesta discussão, ou seja, se essa subamostragem de porosidade também se reflete na subamostragem da distribuição de tamanho dos poros.

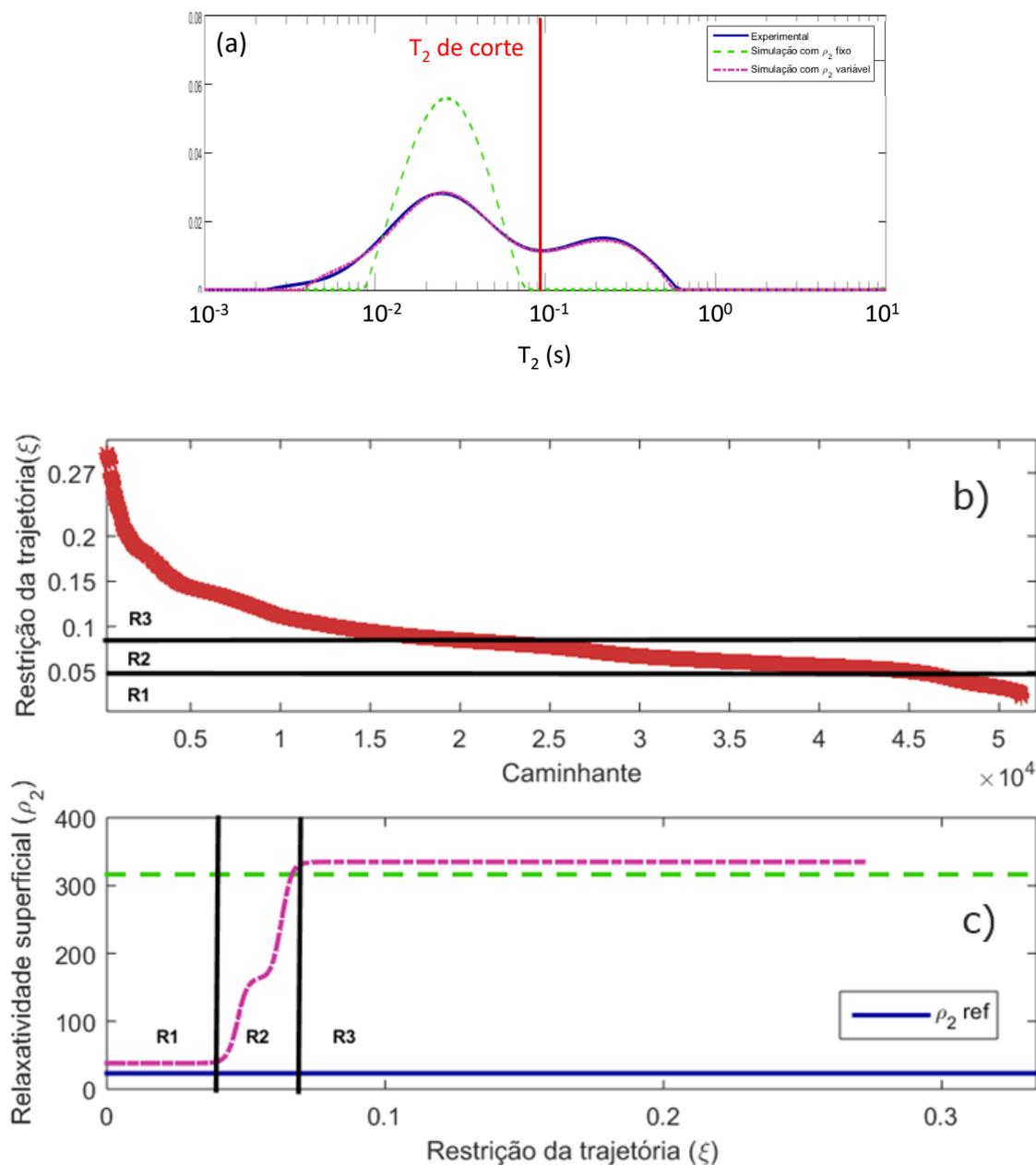
### 8.1. Amostra Austin Chalk (AC)

A Figura 20 mostra a imagem obtida da lâmina delgada da amostra AC e o resultado de sua binarização. Na imagem (a), a resina epóxi que permeia os espaços porosos se apresenta em cor azul, que após a binarização se converte em poros de cor preta (b).



**Figura 21.** Imagens da amostra AC: (a) microscopia ótica de sua lâmina delgada; e (b) respectiva binarização evidenciando os poros em preto e a matriz rochosa em branco. A escala da imagem está mostrada em vermelho em (a).

A amostra AC é classificada como um packstone (DUNHAM, 1962) composta pelo acumulado de bioclastos e outros grãos aloquímicos, com forte presença de matriz micrítica e cimento. Este fato é uma característica marcante de sua evolução diagenética, posicionada possivelmente no final do estágio deposicional ou início do pós-deposicional (CHOQUETTE & PRAY, 1970). O resultado desta característica se reflete numa diminuição considerável do espaço poroso, atingindo principalmente a porosidade interpartícula e assim prejudicando a população de poros de raios maiores. Os bioclastos e os demais grãos aloquímicos como oóides, pelóides e intraclastos possuem um bom nível de preservação das suas estruturas, dessa forma, possivelmente não houve grandes alterações em seus espaços intraparticular, favorecendo a porosidade intraparticular. Há indícios de dissolução, podendo ter sido resultado de uma percolação de fluidos com baixa saturação. Essa dinâmica ajuda a compreender o comportamento bimodal da distribuição experimental de  $T_2$ , mostrado pela curva azul da Figura 20(a).



**Figura 22.** Resultados das simulações da amostra AC:

a) distribuições de  $T_2$  experimental (linha azul), simulada com  $\rho_{2,fixo}$  (linha tracejada verde) e simulada com  $\rho_{2,var}$  (linha roxa); há também a classificação dos tamanhos dos poros com base no  $T_2$  de corte de 92 ms (linha vermelha vertical).

b) gráfico de restrição da trajetória ( $\xi$ ), onde 1 significa 100% de chance do caminhante aleatório ter tocado a parede do poro; e,

c) gráfico mostrando a correlação entre  $\xi$  para cada família de tamanho de poro e suas respectivas faixas de  $\rho_{2,var}$ .

A Figura 22(a) mostra as distribuições de  $T_2$  resultantes da simulação 2D com relaxatividade superficial fixa ( $\rho_{2,fixo}$ ) e variável ( $\rho_{2,var}$ ), e também o resultado obtido experimentalmente. A distribuição experimental revela duas populações claras de

poros, que são perfeitamente separadas pelo  $T_2$  de corte aplicado, como mostra a linha vermelha vertical no gráfico. O resultado de  $\rho_{2,fixo}$  encontrado foi de 316,4  $\mu\text{m/s}$ , bastante distante do valor de referência, 23,3  $\mu\text{m/s}$ . tal como mostra a linha verde tracejada e azul na Figura 22(c). O algoritmo utilizado no RWRMN, como já explicado no capítulo 7, utiliza o decaimento da magnetização experimental para buscar valores de  $\rho_2$  que permitam obter o melhor ajuste entre a simulação e o experimento. Com isso, um cuidado especial deve ser tomado na interpretação dos resultados, pois sendo  $T_2$  dependente tanto dos tamanhos dos poros (através do termo  $S/V$  na equação 7), quanto de  $\rho_2$ , a resolução da imagem utilizada irá ditar a escala da relaxatividade resultante. Em outras palavras, se a resolução da imagem é insuficiente para entregar ao simulador a totalidade dos poros existentes em uma amostra, o algoritmo, buscando o melhor ajuste, poderá gerar relaxatividades irreais para atingir seu objetivo. Este fato parece ter afetado os resultados da amostra AC de uma maneira bastante dramática.

Esta amostra possui a maior parte de sua porosidade à esquerda do  $T_2$  de corte, portanto dominada por poros menores, que podem ter valores abaixo da resolução da imagem. Utilizando  $\rho_{2,ref}$  e a relação entre  $T_2$  e tamanho de poro (equação 5), pode-se calcular qual o tamanho de poro correspondente ao  $T_2$  de corte aplicado, dado por:

$$(V/S)_{corte} = \rho_{2,ref} \cdot T_{2,corte} = 2,1 \mu\text{m}. \quad (7)$$

O termo  $V/S$  neste cálculo é interpretado como o raio hidráulico dos poros, distância sensível à técnica de RMN. O valor encontrado está muito próximo aos valores de resolução das imagens ( $\sim 2 \mu\text{m/pixel}$ ), podendo-se concluir com isso que os sinais à esquerda do  $T_2$  de corte podem não ter sido considerados pela simulação. No entanto, o resultado com  $\rho_{2,fixo}$  mostrou uma maior correlação justamente com a moda de menores  $T_2$ . Certamente, esse resultado está equivocado, tendo sido gerado, provavelmente, pela maior intensidade daqueles sinais, forçando o ajuste dos resultados da simulação. Este fato gerou o valor extremamente alto de  $\rho_{2,fixo}$  encontrado pelo programa.

Uma vez identificado o problema descrito, pode-se proceder a uma correção. Obviamente, a correlação deveria ter sido feita com a moda de maiores  $T_2$ , pois como já dito, somente a fração de poros com maior tamanho está representada nas imagens utilizadas pelo simulador. O  $T_2$  médio da moda à esquerda do  $T_2$  de corte

foi de aproximadamente 30 ms (vide curva verde tracejada na Figura 23a), o que geraria um  $(V/S)_{\text{médio}}$  de:

$$(V/S)_{\text{médio}} (T_{2,\text{médio}} = 30 \text{ ms}) = \rho_{2,\text{fixo}} \cdot T_{2,\text{médio}} = 316,4 \cdot 0,03 = 9,5 \text{ } \mu\text{m}.$$

Utilizando esse resultado e o  $T_2$  médio da moda à direita do  $T_2$  de corte ( $T_{2,\text{médio}} = 0,3$  s), tem-se a relaxatividade corrigida:

$$\rho_{2,\text{fixo}} = (V/S)_{\text{médio}} / T_{2,\text{médio}} = 9,5 / 0,3 = 31,6 \text{ } \mu\text{m/s}.$$

Este valor se aproxima mais satisfatoriamente do valor de referência.

A figura 22(b) mostra que a quantidade de caminhantes em função da restrição de suas trajetórias, a qual foi dividida em três regiões coloridas e nomeadas como R1, R2 e R3, de acordo com o valor de  $\rho_{2,\text{var}}$ . A figura 21(c) mostra a distribuição de  $\rho_{2,\text{var}}$  resultante da simulação, na qual os correspondentes domínios de variação estão também demarcados por regiões coloridas, correspondentes às demarcadas na figura 23(b). A soma dos caminhantes em cada uma dessas regiões permite quantificar a fração de porosidade constituída pelos poros que foram classificados pela simulação com relaxatividades específicas, de acordo com a faixa de restrição de trajetória.

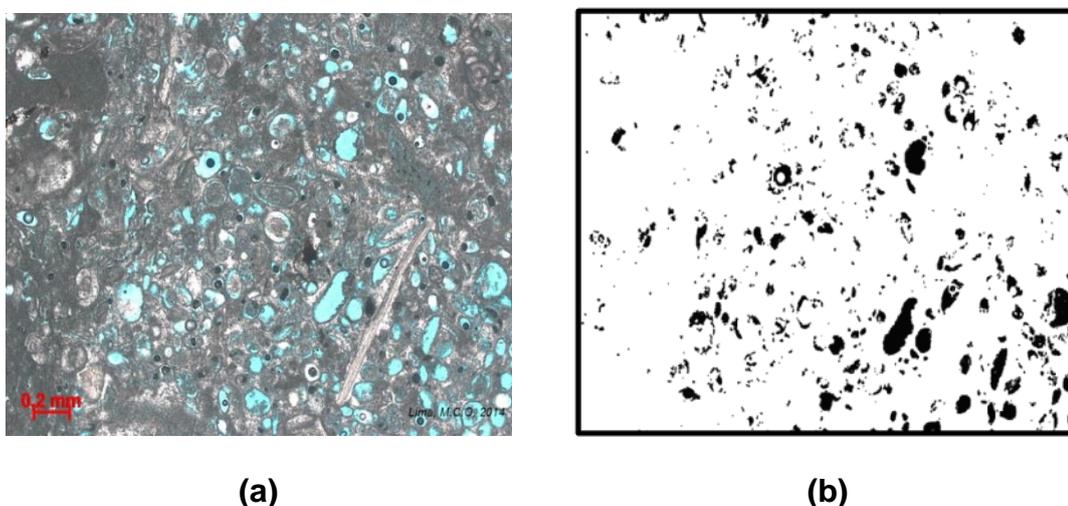
A figura 22(c) mostra que a variação mínima e máxima de  $\rho_{2,\text{var}}$  foi de 38,3 a 334,8  $\mu\text{m/s}$  (linha roxa tracejada), respectivamente. Os valores encontrados, quando comparados ao valor de referência, foram bastante discrepantes. Os resultados da simulação com relaxatividade variável produziu uma distribuição de  $T_2$  que se ajusta perfeitamente à curva experimental. A distribuição de  $\rho_{2,\text{var}}$  obtida revelou a presença de três regiões distintas:

- R1: constante entre  $0,00 > \xi > 0,04$  e  $\rho_{2,\text{var}} = 38,3 \text{ } \mu\text{m/s}$ ;
- R2: transição crescente entre  $0,04 > \xi > 0,07$ , com relaxatividades variando entre  $38,3 \text{ } \mu\text{m/s} > \rho_{2,\text{var}} > 334,8 \text{ } \mu\text{m/s}$ ;
- R3: constante entre  $0,07 > \xi > 0,27$  e  $\rho_{2,\text{var}} = 334,8 \text{ } \mu\text{m/s}$ .

A maioria dos caminhantes aleatórios, tal como mostra a Figura 23(b), está dentro da região com grande restrição de trajetória possuindo uma relaxatividade bastante alta. A região de mais baixa restrição, e que portanto representa os poros com  $T_2$  acima do valor de corte, possuem  $\rho_{2,\text{var}} = 38,3 \text{ } \mu\text{m/s}$ , se correlacionando bem com o valor fixo encontrado e também com o valor de referência, da maneira acima descrita.

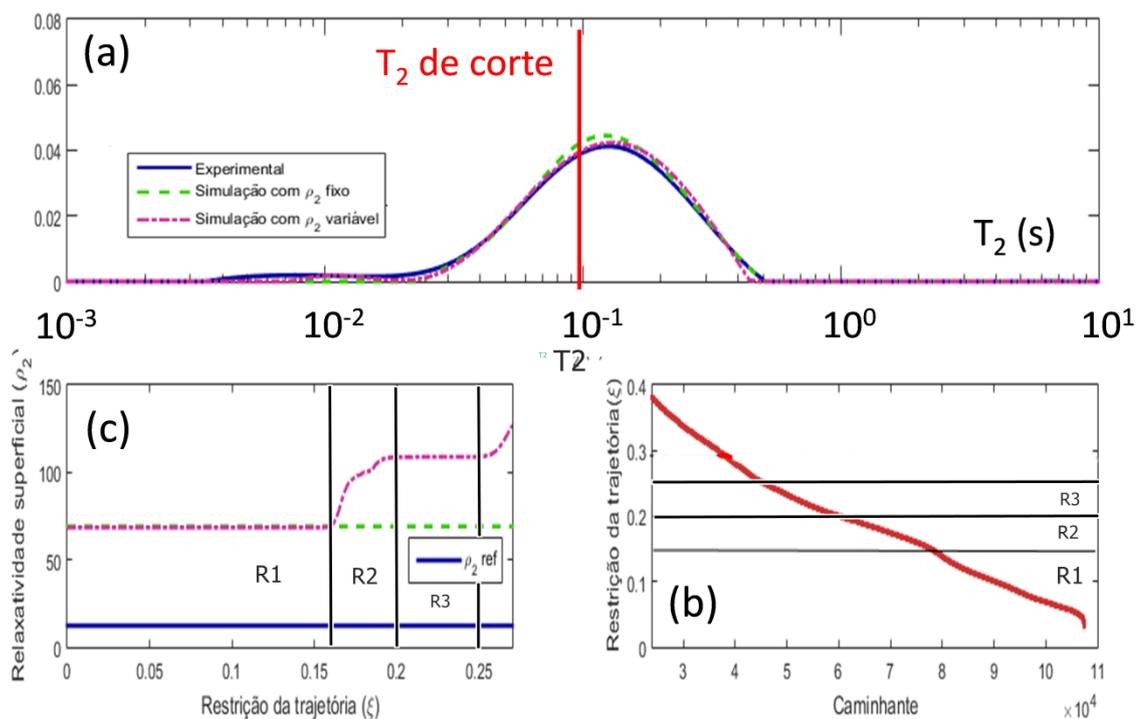
## 8.2. Amostra Desert Pink (DP)

A figura 23 mostra a imagem obtida da lâmina delgada da amostra DP e o resultado de sua binarização. Na imagem (a), a resina epóxi que permeia os espaços porosos se apresenta em cor azul, que após a binarização se converte em poros de cor preta (b).



**Figura 23.** Imagens da amostra DP: (a) microscopia ótica de sua lâmina delgada; e (b) respectiva binarização evidenciando os poros em preto e a matriz rochosa em branco. A escala da imagem está mostrada em vermelho em (a).

A amostra DP é classificada como um wackestone (DUNHAM, 1962) por apresentar suporte de matriz micrítica e cimento, maior do que a participação de bioclastos e outros grãos aloquímicos. Durante sua evolução diagenética, esta rocha sofreu a ação da dissolução que atuou basicamente em alguns grãos do arcabouço. Possivelmente, essas estruturas eram compostas por um material mais solúvel, por exemplo aragonita, do que a composição da matriz (TUCKER, 2001). O resultado foi uma população de porosidade móldica com contornos circulares bem definidos, isolados, concentrando boa parte da porosidade existente nesses espaços. Observando a boa preservação dos contornos dos moldes e dos bioclastos ainda existentes, apesar de ter sofrido a ação corrosiva da dissolução, a amostra DP apresentou distribuição unimodal compatível essa característica, como mostra a curva azul da Figura 23(a).



**Figura 24.** Resultados das simulações da amostra DP:

- a) distribuições de  $T_2$  experimental (linha azul), simulada com  $\rho_2$ ,fixo (linha tracejada verde) e simulada com  $\rho_2$ ,var (linha roxa); há também a classificação dos tamanhos dos poros com base no  $T_2$  de corte de 92 ms (linha vermelha vertical).
- b) gráfico de restrição da trajetória ( $\xi$ ), onde 1 significa 100% de chance do caminhante aleatório ter tocado a parede do poro; e,
- c) gráfico mostrando a correlação entre  $\xi$  para cada família de tamanho de poro e suas respectivas faixas de  $\rho_2$ ,var.

Os resultados mostrados na Figura 25(a) indicam uma grande correlação entre as distribuições de  $T_2$  experimental e simuladas. O espaço poroso desta amostra apresenta somente uma moda principal, com  $T_{2,\text{médio}}$  de 100 ms aproximadamente. Desta maneira, a aplicação do  $T_2$  de corte divide a distribuição em duas frações com quantidades aproximadamente iguais de porosidade. A Figura 25(b) mostra uma menor quantidade de restrição da trajetória dos caminhantes, em torno de 40%, com decaimento mais suave do que o encontrado para a amostra AC. O valor médio do tamanho de poros representado por  $(V/S)_{\text{médio}} = \rho_{2,\text{ref}} \cdot T_{2,\text{médio}} = 1,2 \mu\text{m}$ , que neste caso é bastante próximo do valor de corte,  $(V/S)_{\text{corte}} = \rho_{2,\text{ref}} \cdot T_{2,\text{corte}} = 1,1 \mu\text{m}$ . Representando aproximadamente metade da resolução das imagens, estes números indicam que uma fração pequena do espaço poroso foi considerada na simulação.

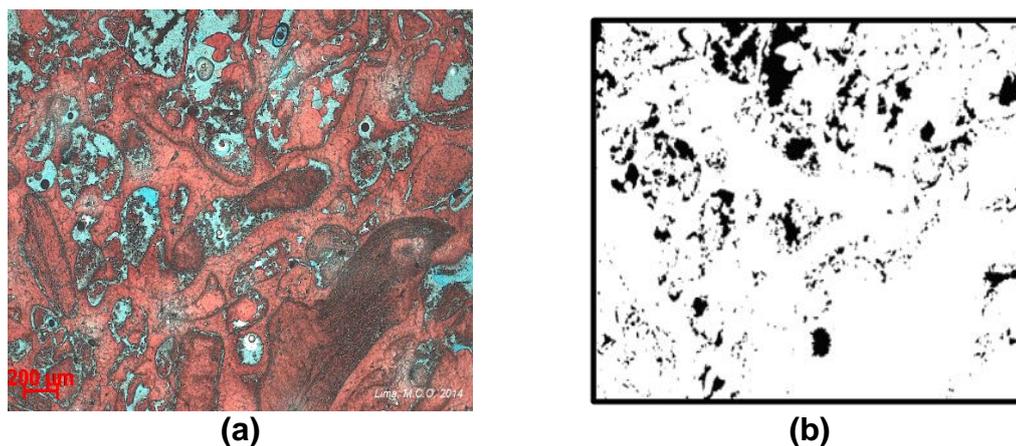
Esta amostra possui  $\rho_{2,ref}$  de 18,8  $\mu\text{m/s}$ , enquanto o  $\rho_{2,fixo}$  obtido foi de 69,1  $\mu\text{m/s}$ , bastante discrepantes entre si. O gráfico da figura 25(c) mostra estes valores em azul e verde, respectivamente. Já a curva roxa mostra a variação da relaxatividade em função da restrição da trajetória, indicando que, para que as curvas de  $T_2$  pudessem ser ajustadas, o simulador teve que utilizar valores de  $\rho_{2,var}$  bastante altos e pouco distribuídos, tendo definido um patamar inicial bastante longo em:

- R1:  $0,00 > \xi > 0,16$  e  $\rho_{2,var} = 68,5 \mu\text{m/s}$ ,
- R2: uma região crescente entre  $0,16 > \xi > 0,20$ , com relaxatividades variando entre  $68,5 \mu\text{m/s} > \rho_{2,var} > 108,8 \mu\text{m/s}$ ;
- R3: atingindo então outro patamar entre  $0,20 > \xi > 0,25$  com  $\rho_{2,var} = 108,8 \mu\text{m/s}$ .

Ao final, a curva cresce novamente, mas não atinge um novo patamar. Estes valores mostram que a simulação não encontrou valores que se correlacionam com o valor de  $\rho_{2,ref}$ , muito provavelmente devido à baixa correlação entre o espaço poroso da amostra e as quantidades captadas na imagem 2D. Esta baixa correlação pode ter sido causada pela presença de defeitos de digitalização na imagem óptica (Figura 24a).

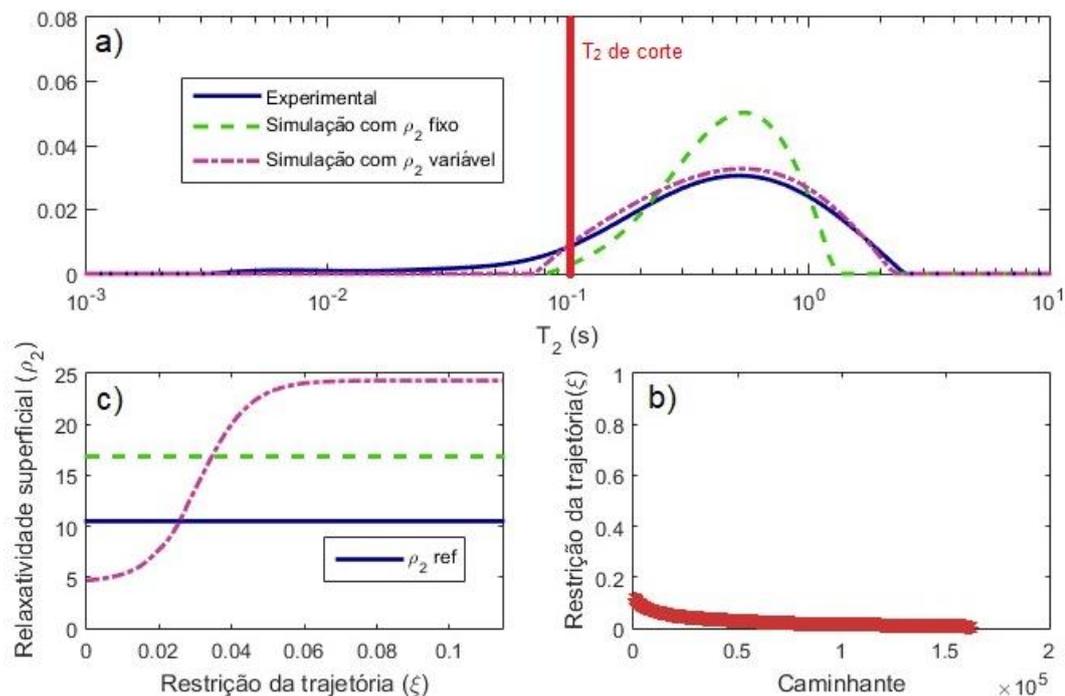
### 8.3. Amostra Edwards Yellow (EY)

A figura 26 mostra a imagem obtida da lâmina delgada da amostra EY e o resultado de sua binarização. Na imagem (a), a resina epóxi que permeia os espaços porosos se apresenta em cor azul, que após a binarização se converte em poros de cor preta (b).



**Figura 25.** Imagens da amostra EY: (a) microscopia ótica de sua lâmina delgada; e (b) respectiva binarização evidenciando os poros em preto e a matriz rochosa em branco. A escala da imagem está mostrada em vermelho em (a).

A amostra EY pode ser classificada como um Packstone (DUNHAM,1972) que sofreu uma forte ação da dissolução atuando principalmente sobre os grãos do arcabouço, muito provavelmente bioclastos compostos por aragonita (TUCKER, 2001), gerando porosidade móldica. Essa ação atinge com menor intensidade o micrito. Há uma forte tendência para poros de maior tamanho, já que sua porosidade está associada aos moldes e à corrosão de parte do micrito, elucidando sua distribuição unimodal de  $T_2$ , caracterizada por valores longos acima do  $T_2$  de corte. Devido à intensa ação da corrosão, a rocha de origem pode ser situada no estágio deposicional com percolação de fluidos corrosivos.



**Figura 26.** Resultados das simulações da amostra EY:

a) distribuições de  $T_2$  experimental (linha azul), simulada com  $\rho_{2,fixo}$  (linha tracejada verde) e simulada com  $\rho_{2,var}$  (linha roxa); há também a classificação dos tamanhos dos poros com base no  $T_2$  de corte de 92 ms (linha vermelha vertical).

b) gráfico de restrição da trajetória ( $\xi$ ), onde 1 significa 100% de chance do caminhante aleatório ter tocado a parede do poro; e,

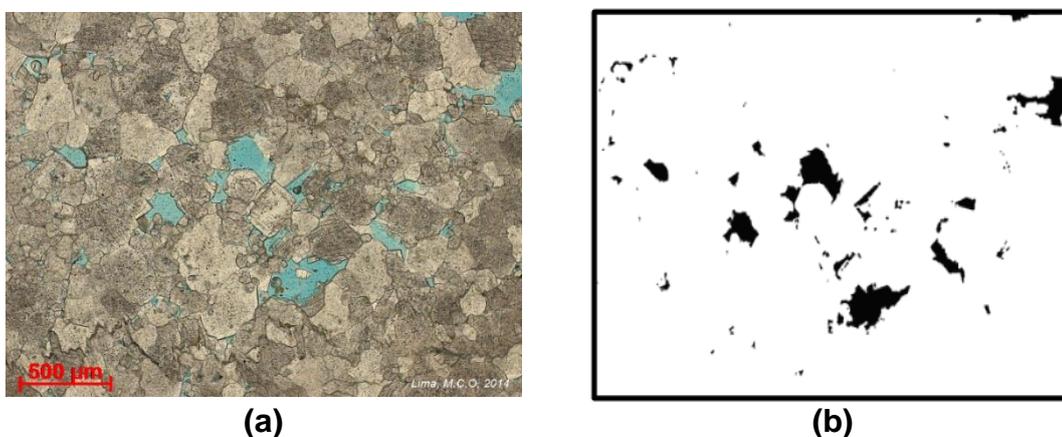
c) gráfico mostrando a correlação entre  $\xi$  para cada família de tamanho de poro e suas respectivas faixas de  $\rho_{2,var}$ .

A figura 26(a) mostra as distribuições de  $T_2$  resultantes. Novamente, os resultados mostraram uma boa correlação entre si, com a simulação utilizando  $\rho_{2,var}$  apresentando melhor correlação do que a obtida com  $\rho_{2,fixo}$ , quando comparadas com a experimental. O valor de referência,  $\rho_{2,ref} = 16,5 \mu\text{m/s}$ , pode ser utilizado para se calcular o tamanho médio do poro representado pelo  $T_2$  de corte de 92 ms. Para esta amostra, o resultado obtido foi  $(V/S)_{corte} = \rho_{2,ref} \cdot T_{2,corte} = 1,5 \mu\text{m}$ , novamente abaixo da resolução da imagem estudada. No entanto, a distribuição de  $T_2$  obtida experimentalmente para esta amostra está bastante acima do valor de corte, o que sugere uma boa representatividade do espaço poroso na imagem. A figura 26(b) mostra um resultado de apenas 20% de restrição máxima para os caminhantes aleatórios da simulação, fato que não corrobora a quantidade de porosidade determinada pela distribuição de  $T_2$ . A figura 26(c) mostra os resultados das relaxatividades, a qual mostra uma excelente correlação entre os valores de  $\rho_{2,fixo} = 16,9 \mu\text{m/s}$  e  $\rho_{2,ref} = 16,5 \mu\text{m/s}$ . Já os resultados de  $\rho_{2,var}$  não apresentaram uma

correlação tão boa quanto para o caso fixo. A curva roxa tracejada da mesma figura mostra que, para trajetórias muito pouco restritas, que devem se relacionar com os poros de maiores tamanhos, nessa seção inicial, não há a formação clara de um patamar, mas há um aumento relativamente lento entre  $0,00 > \xi > 0,05$ . A partir de 0,05, forma-se um patamar entre  $0,05 > \xi > 0,12$  com o valor de  $\rho_{2,var} = 24,3 \mu\text{m/s}$ . Após este patamar, que se encontra relativamente próximo do valor de referência, não houve mais variação, indicando que toda a distribuição de  $T_2$  foi satisfatoriamente explicada até aquele limite máximo de  $\rho_{2,var}$ . Este resultado parece fazer sentido, considerando a pequena quantidade de porosidade representada pelos poros abaixo de  $(V/S)_{\text{corte}}$ , acima calculado.

#### 8.4. Amostra Guelph Dolomite (GD)

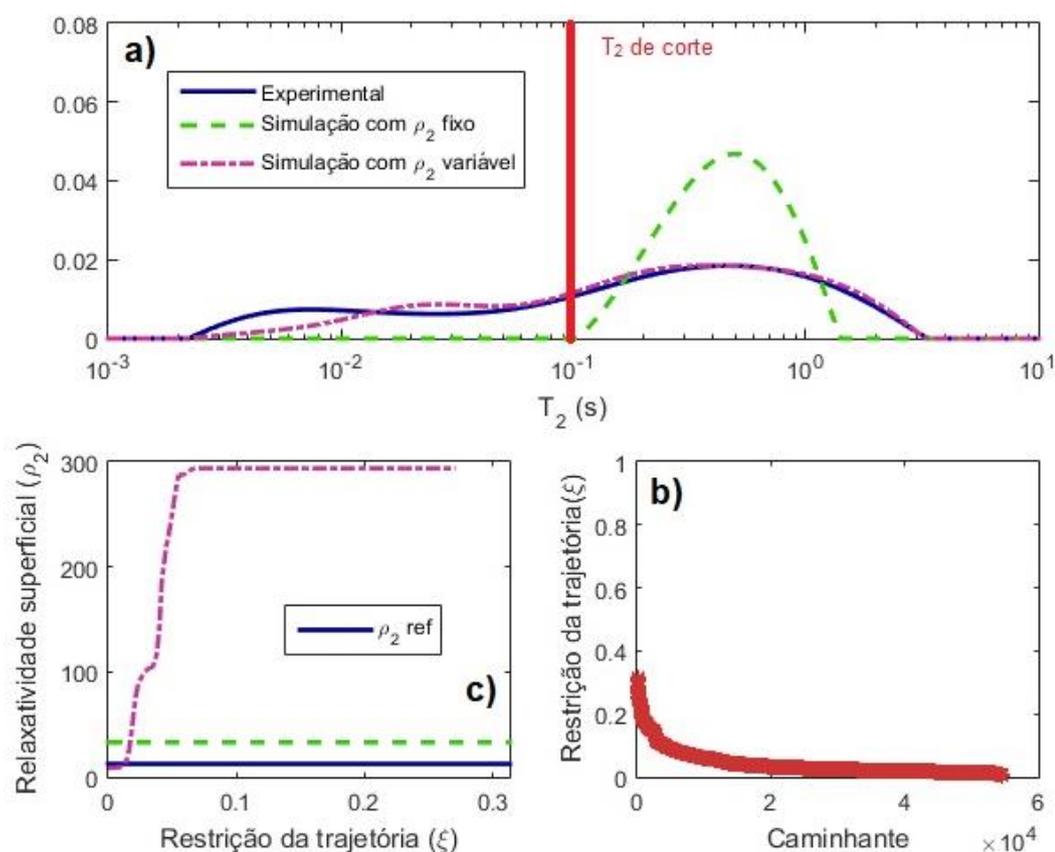
A figura 27 mostra a imagem obtida da lâmina delgada da amostra GD e o resultado de sua binarização. Na imagem (a), a resina epóxi que permeia os espaços porosos se apresenta em cor azul, que após a binarização se converte em poros de cor preta (b).



**Figura 27.** Imagens da amostra GD: (a) microscopia ótica de sua lâmina delgada; e (b) respectiva binarização evidenciando os poros em preto e a matriz rochosa em branco. A escala da imagem está mostrada em vermelho em (a).

Todas as estruturas presentes durante o estágio deposicional desta amostra, tais como grãos de arcabouço oóides, pelóides, intraclastos e bioclastos, tiveram seus registros apagados. Isso é uma característica muito comum do processo de recristalização. Além disso, observando as arestas retilíneas presentes principalmente nos contornos dos poros, e o arranjo estrutural na forma de mosaico hipidiotópico (*Hypidiotopic fabric*) ou mosaico idiotópico (*Idiotopic fabric*), segundo a classificação de Sibley e Gregg (1987), as amostras desse grupo apresentam

feições de textura dolomítica planar-s ou planar-e, ou seja, além da recristalização, pode ter ocorrido um processo de dolomitização. Hipótese confirmada no valor de  $2,84 \text{ g/cm}^3$  (tabela 1), descrito na seção 4.2 como a densidade da Dolomita. O processo de dolomitização no calcário tem o efeito de promover mudanças na forma dos cristais, mudando de trigonal (calcita) para romboédrica (dolomita), graças à entrada do ion  $\text{Mg}^+$  na fórmula química  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . O efeito desse processo é um aumento na porosidade já existente, em especial na porosidade intercrystalina. A dolomitização tem grandes chances de ter ocorrido no estágio mesogenético (estágio pós-deposicional). A figura 28(a) mostra as distribuições de  $T_2$  obtidas. O resultado experimental mostra uma distribuição bimodal, cuja aplicação do  $T_2$  de corte foi capaz de dividi-la em duas frações com quantidades similares, corroborando os achados geológicos acima descritos. Para esta amostra, o valor de  $\rho_{2,\text{ref}}$  medido foi de  $12,4 \mu\text{m/s}$ .



**Figura 28.** Resultados das simulações da amostra GD:

a) distribuições de  $T_2$  experimental (linha azul), simulada com  $\rho_{2,\text{fixo}}$  (linha tracejada verde) e simulada com  $\rho_{2,\text{var}}$  (linha roxa); há também a classificação dos tamanhos dos poros com base no  $T_2$  de corte de 92 ms (linha vermelha vertical).

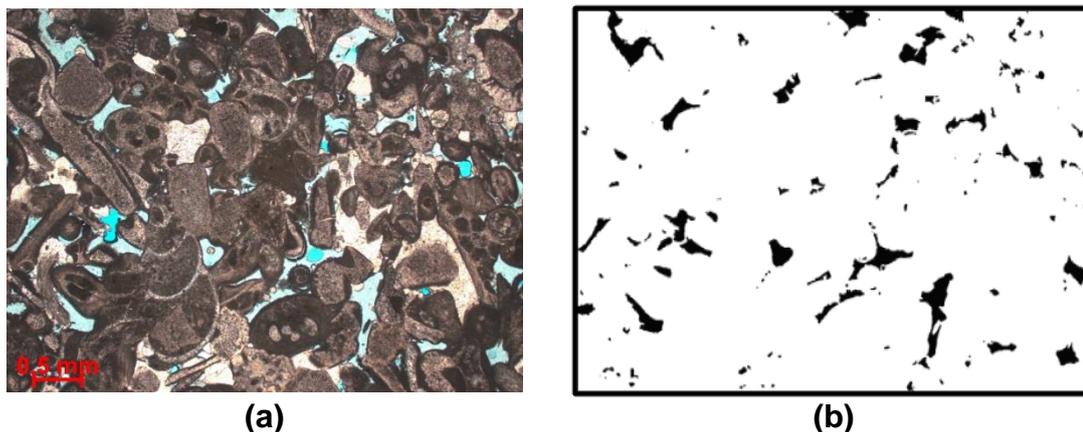
b) gráfico de restrição da trajetória ( $\xi$ ), onde 1 significa 100% de chance do caminhante aleatório ter tocado a parede do poro; e,

c) gráfico mostrando a correlação entre  $\xi$  para cada família de tamanho de poro e suas respectivas faixas de  $\rho_{2,\text{var}}$ .

Para esta amostra, o  $T_2$  de corte, presente no gráfico (a), representa um tamanho de corte de  $(V/S)_{\text{corte}} = \rho_{2,\text{ref}} \cdot T_{2,\text{corte}} = 1,1 \mu\text{m}$ , um valor baixo considerando a resolução da imagem estudada. Assim como para as demais amostras, espera-se que os poros de tamanhos menores, relacionados à fração de fluido irreduzível, não tenham influência sobre a determinação da relaxatividade por ambos os métodos. A figura 28(b) mostra uma porcentagem de aproximadamente 40% para a restrição da trajetória, compatível com a fração de porosidade situada na região à direita do  $T_2$  de corte do gráfico (a). Os gráficos da Figura 28(c) mostram os resultados de relaxatividade obtidos. O valor de  $\rho_{2,\text{fixo}}$  obtido foi de  $29,7 \mu\text{m/s}$ , bastante maior do que o  $\rho_{2,\text{ref}}$  medido. Já o parâmetro  $\rho_{2,\text{var}}$  mostrou uma variação muito grande, iniciando em  $9,8 \mu\text{m/s}$  e terminando em  $271,1 \mu\text{m/s}$ . No início da curva, região de baixa restrição de trajetória, um patamar no valor de  $9,8 \mu\text{m/s}$  pode ser identificado entre  $0,00 > \xi > 0,015$ . Após este patamar, a curva cresce entre  $0,015 > \xi > 0,030$  para atingir um novo patamar com  $\rho_{2,\text{var}} = 80,7 \mu\text{m/s}$ , para então crescer novamente entre  $0,030 > \xi > 0,090$ , para atingir o patamar final com  $\rho_{2,\text{var}} = 271,0 \mu\text{m/s}$ . O valor mais correspondente à fração de poros presente na imagem estudada foi, provavelmente, o de  $\rho_{2,\text{var}} = 9,8 \mu\text{m/s}$ , visto o baixo valor de tamanho de poro representado pelo  $T_2$  de corte, significando que os poros menores, caracterizados pelas altas relaxatividades, não estavam representadas na imagem da lâmina delgada estudada.

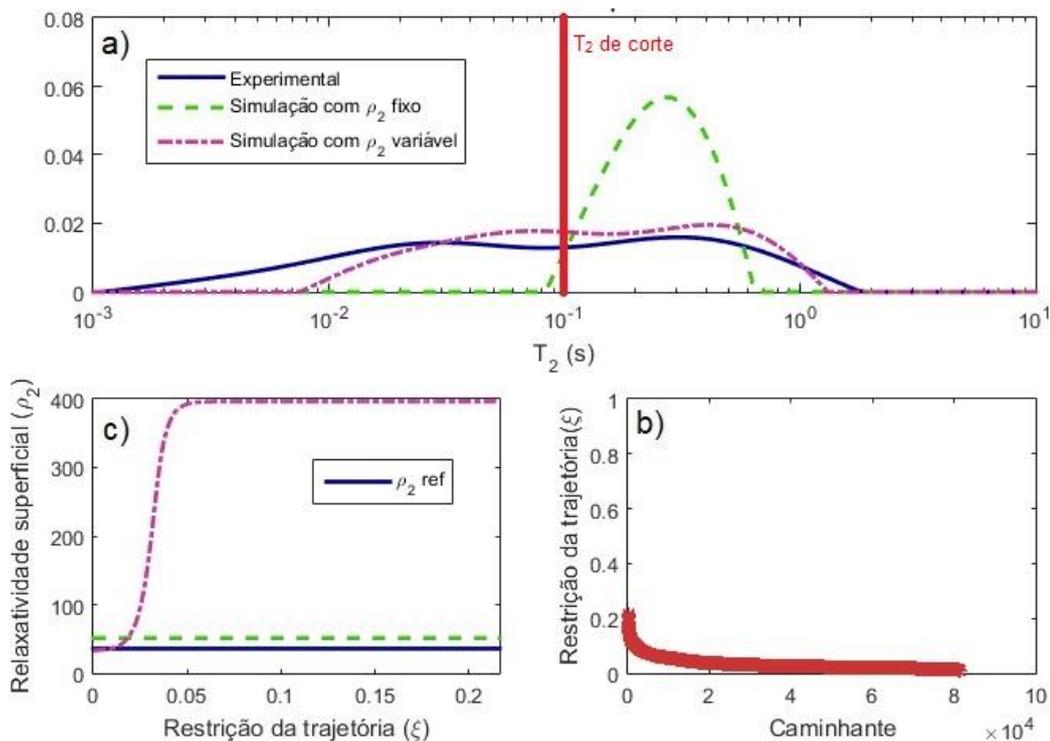
### 8.5. Amostra Indiana 70mD (IH)

A figura 29 mostra a imagem obtida da lâmina delgada da amostra IH e o resultado de sua binarização. Na imagem (a), a resina epóxi que permeia os espaços porosos se apresenta em cor azul, que após a binarização se converte em poros de cor preta (b).



**Figura 29.** Imagens da amostra IH: (a) microscopia ótica de sua lâmina delgada; e (b) respectiva binarização evidenciando os poros em preto e a matriz rochosa em branco. A escala da imagem está mostrada em vermelho em (a).

A amostra IH, classificada como um grainstone (DUNHAM, 1972) apresenta uma grande quantidade de bioclastos muito bem preservados, sendo esses os principais constituintes do seu arcabouço. Uma pequena parte da sua porosidade interpartícula está totalmente preenchida por cimento, o que indica ser resultado de uma possível deposição e soterramento rápido em ambiente de média a alta energia, posteriormente à deposição de cimento por algum fluido supersaturado em carbonato. Há pouca ação de agentes diagenéticos como dissolução e compactação, situando-a possivelmente em um estágio pré-deposicional. Esta amostra apresentou uma distribuição de  $T_2$  experimental bastante larga, com quantidades relativamente altas de poros pequenos, ou seja, daqueles que se encontram à esquerda do  $T_2$  de corte. Isto sugere que uma parte significativa do espaço poroso teve sua informação perdida devido à resolução da imagem utilizada no estudo.



**Figura 30.** Resultados das simulações da amostra IH:

a) distribuições de  $T_2$  experimental (linha azul), simulada com  $\rho_{2,fixo}$  (linha tracejada verde) e simulada com  $\rho_{2,var}$  (linha roxa); há também a classificação dos tamanhos dos poros com base no  $T_2$  de corte de 92 ms (linha vermelha vertical).

b) gráfico de restrição da trajetória ( $\xi$ ), onde 1 significa 100% de chance do caminhante aleatório ter tocado a parede do poro; e,

c) gráfico mostrando a correlação entre  $\xi$  para cada família de tamanho de poro e suas respectivas faixas de  $\rho_{2,var}$ .

O respectivo valor de tamanho de corte encontrado foi de  $(V/S)_{corte} = \rho_{2,ref} \cdot T_{2,corte} = 3,3 \mu\text{m}$ , sendo  $\rho_{2,ref} = 35,8 \mu\text{m/s}$ . Esta amostra apresentou o maior valor de  $\rho_{2,ref}$ , o que levou ao maior tamanho de corte ( $3,3 \mu\text{m}$ ). Este valor está acima da resolução da imagem, e portanto permite concluir que a moda relativa à água livre (à direita do  $T_2$  de corte) está bem representada na imagem da lâmina. A figura 30(b) mostra que um valor máximo de aproximadamente 20% dos caminhantes apresentaram restrição em sua trajetória, portanto contribuíram para o valor da relaxatividade.

A figura 30(c) mostra que o valor de  $\rho_{2,fixo}$  encontrado foi  $97,5 \mu\text{m/s}$ , valor aproximadamente 3 vezes maior do que o de referência. Já a curva obtida para relaxatividade variável mostrou um patamar inicial bastante curto, entre  $0,00 > \xi > 0,03$ , com  $\rho_{2,var} = 33,2 \mu\text{m/s}$ , que então cresce rápida e acentuadamente entre  $0,03 > \xi > 0,05$ , para então terminar em um novo patamar no qual  $\rho_{2,var} = 396,8 \mu\text{m/s}$ . Claramente, a correlação se deu entre o valor do primeiro patamar, cuja restrição de

trajetória baixa o correlaciona com os poros de maiores tamanhos. O maior valor está muito longe do valor de referência, enquanto o valor menor é praticamente idêntico a  $\rho_{2,ref}$ .

### 8.6. Correlação dos resultados

A tabela 3 mostra a compilação de todos os resultados de relaxatividade, juntamente com o cálculo da porcentagem de perda de porosidade ( $\Delta\phi$ ), quando comparados  $\phi_{RWRMN}$  e  $\phi_{RMN}$ .

**Tabela 3.** Valores de relaxatividade superficial entregues pelo programa RWRMN e relaxatividade de referência. Diferença entre as porcentagens das porosidades ( $\Delta\phi$ ) entre  $\phi_{RMN}$  (experimental) e  $\phi_{RWRMN}$ . Foram utilizados os valores mínimos de  $\rho_{2,var}$  nessa tabela.

Amostra	$\rho_{2,fixo}$ ( $\mu\text{m/s}$ )	$\rho_{2,var}$ ( $\mu\text{m/s}$ )	$\rho_{2,ref}$ ( $\mu\text{m/s}$ )	$\Delta\phi$ (%)
AC	31,6	38,3	23,3	83,1
DP	69,1	68,5	18,8	74,8
EY	16,9	24,3	16,5	60,0
GD	29,7	9,8	12,4	60,0
IH	97,5	33,2	35,8	73,5

Em uma análise geral, os melhores resultados foram obtidos pelas simulações com relaxatividade variável, sendo as melhores correlações obtidas para as amostras GD, IH, EY e AC, respectivamente. Considerando as análises geológicas realizadas a partir das lâminas delgadas, pode-se concluir que as amostras caracterizadas por uma maior dissolução de grãos, que atuou especificamente sobre os bioclastos e grãos aloquímicos, gerou moldes de contornos circulares e bem definidos, concentrando nelas boa parte da porosidade existente na região coberta pela lâmina. De acordo com Choquette & Pray (1970), com a exceção da amostra GD, as amostras listadas acima podem ser agrupadas geologicamente entre estágio pré deposicional e deposicional da formação do carbonato.

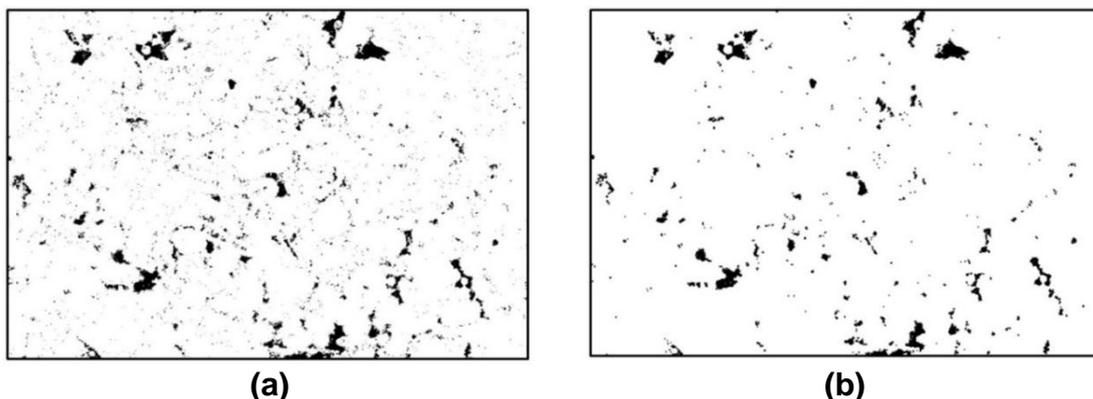
Em AC, embora à primeira vista um cenário no qual as curvas  $\rho_{2,ref}$  e  $\rho_{2,var}$  foram melhores correlacionadas, a curva de  $\rho_{2,fixo}$  descartou erroneamente os a moda de  $T_2$  relacionada aos poros de maiores tamanhos, mostrando que a simulação foi pesada pela maior quantidade de porosidade relacionada aos poros de menores tamanhos. Com a observação e correção desta característica do algoritmo utilizado, a curva de  $\rho_{2,fixo}$  de foi capaz de entregar uma resposta com melhor correlação.

Algo similar acontece com a amostra GD em relação ao parâmetro  $\rho_{2,fixo}$ , porém a curva de  $\rho_{2,fixo}$  deu ênfase à família de poros com maiores tamanhos. O evento da dolomitização aumentou consideravelmente a porosidade total da rocha, contudo a imagem não conseguiu captar a porosidade intercrystalina, pois o seu tamanho está muito abaixo da resolução da imagem.

A amostra IH obteve também uma incompatibilidade entre as  $\rho_{2,fixo}$  e sua referência. Ainda que todas as amostras tivessem sido submetidas aos mesmos processos de tratamento e processamento, essa incompatibilidade pode ter ocorrido, em resposta ao fato da simulação não ter conseguido captar com eficiência a grande variação de tamanhos de poros.

A limitação das imagens certamente influencia a resolução das relaxatividades, mas também deve se discutir o efeito dos métodos utilizados no processamento das mesmas. Anovitz & Cole (2015) advertem acerca da obtenção de imagens binarizadas como base para experimentos. Mesmo nos mais simples sistemas porosos (nos quais os poros preenchidos pela resina epóxi demonstram destaque nítido), o processo de binarização precisa ser testado utilizando mais de um método. Uma das razões mais importantes citadas naquele trabalho relata que mesmo dentro de um determinado grão maciço, sem porosidade, há variações no nível de escala de cinza provocando um aumento no nível de ruído, e os píxeis nos limites entre os grãos tendem a dispor uma variação nos valores da escala de cinza. Tanto os ruídos, quanto essa variação de valores na escala podem levar o programa que realiza a binarização a colocar píxeis pretos onde não há poros ou colocar píxeis brancos onde há poros, ainda que o método tenha sido aplicado corretamente.

Durante o processo de binarização efetuado pelo programa ImageJ, essa anomalia foi observada em todas as amostras, como mostra o exemplo da figura 31 para a lâmina de uma amostra do grupo AC. Devido a esse problema, essa imagem foi descartada.

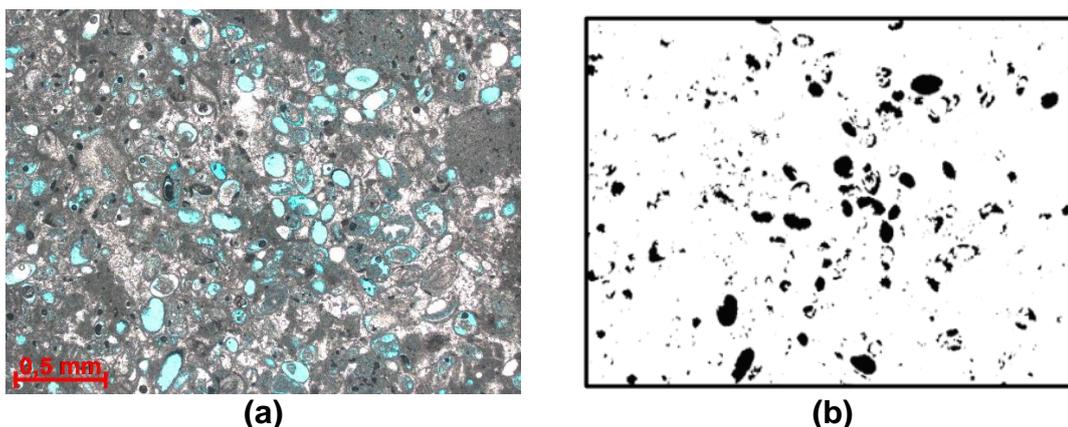


**Figura 31.** Em uma das amostras do grupo AC, que foi descartada, tem-se dois momentos do processo de binarização: (a) resultado final do processo de binarização com presença de ruído; e (b) resultado após a correção pelas ferramentas *Fill Holes*, *Erode* e *Dilate* do programa ImageJ.

Para Anovitz & Cole (2015), ainda que a binarização possa ser feita manualmente, isso não afasta o risco de ocorrerem resultados inconsistentes. Wildenschild & Sheppard (2013) dizem que, mesmo nos casos onde a binarização ocorreu com sucesso, a seleção manual depende muito da interpretação do operador. Por outro lado, embora os métodos automatizados sejam os preferidos, até mesmo eles podem oferecer limitações ao serem aplicados a imagens variadas do mesmo material. Para contornar esse problema, eles sugerem que a técnica seja reproduzida utilizando mais de um método, afim de encontrar um resultado médio com o auxílio de métodos estatísticos.

A solução realizada nesse trabalho para remediar esse problema foi utilizar ferramentas adicionais disponíveis no programa ImageJ, chamadas *Fill Holes*, *Erode* e *Dilate*. O primeiro elimina pequenos píxeis pretos presentes em locais onde há partes sólidas. O segundo evidencia um pouco mais os poros, “escavando” as paredes dos poros remanescentes. O terceiro suaviza o efeito resultado do método anterior, tornando os contornos internos das paredes dos poros mais regulares. Essas ferramentas foram usadas de forma manual, pois até o presente momento não é possível delimitar uma região de ação para esses efeitos, ou seja, ao eliminar o ruído da imagem, parte da porosidade também é perdida.

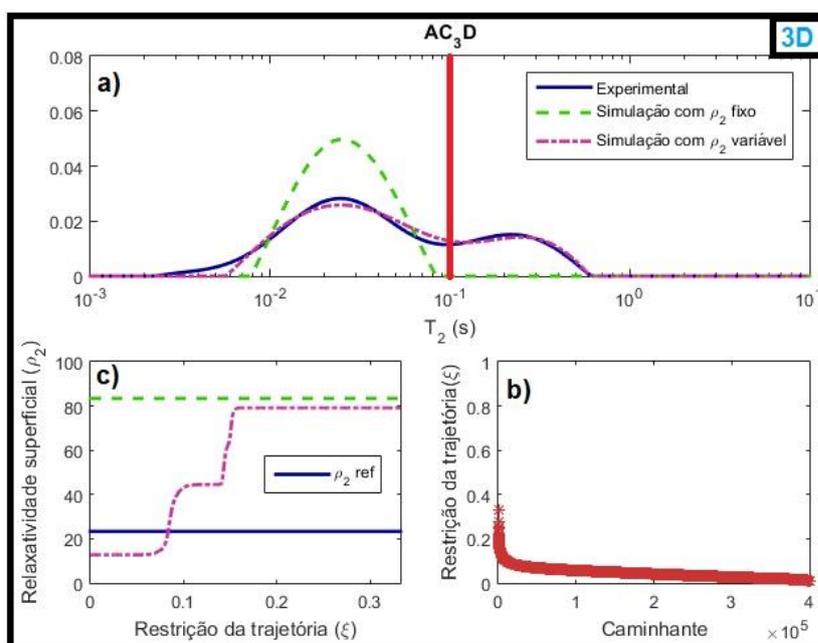
A fotografia da lâmina delgada mostrada na Figura 31(a) mostra a presença de sinais pretos, arredondados, espalhados por praticamente toda a imagem, indicando que algum problema ocorreu durante a digitalização da mesma. Estes pontos podem exercer uma influência negativa nas simulações, pois o processo de binarização irá certamente contá-los como matriz. Apesar deste fato, foi decidido manter esta amostra.



**Figura 32.** Imagens da amostra DP: (a) microscopia ótica de sua lâmina delgada, com a presença de pontos pretos resultados de um programa de digitalização; e (b) respectiva binarização.

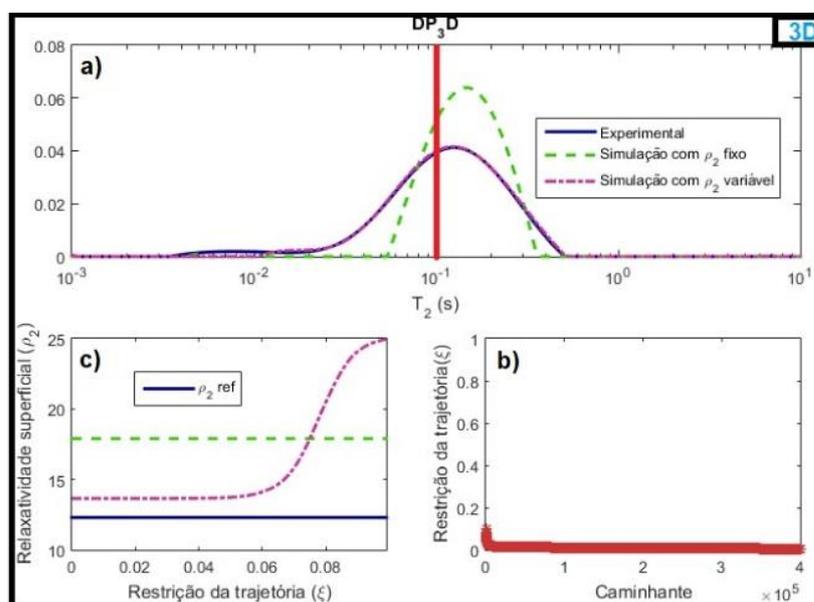
Todas as limitações descritas acima determinaram a quantidade de porosidade captada pelas imagens. Comparando as respectivas porosidades, mostradas como percentual de diferença em relação aos valores experimentais (tabela 4), vê-se altas porcentagens.

As rochas carbonáticas tendem a demonstrar uma grande variação nos tipos, formatos e tamanhos de poros graças à sua complexa evolução diagenética. Por essa razão também foram realizadas simulações com base na microtomografia de raio-X, utilizando sólidos 3D, para as amostras AC (Figura 33) e DP (Figura 34).



**Figura 33.** Resultados do método para AC, obtidos a partir da simulação pelo programa RWRMN sobre o modelo 3D. Este modelo foi criado usando as imagens obtidas em um microtomógrafo de raios-X.

As simulações em 3D discriminadas nas figuras utilizaram 400 imagens para construção do sólido 3D. Como visto, há pouca variação nas distribuições de  $T_2$  entre o 2D e 3D, o que revela o grande potencial das simulações realizadas com as lâminas delgadas.



**Figura 34.** Resultados do método para DP, obtidos a partir da simulação pelo programa RWRMN sobre o modelo 3D. Este modelo foi criado usando as imagens obtidas em um microtomógrafo de raios-X.

A tabela 4 mostra as resoluções das imagens, número de iterações realizadas pelo programa RWRMN e as porosidades obtidas pelo programa para cada amostra. O número de iterações foi considerada maior para o método 3D do que para o 2D, o que indica a maior quantidade de informação presente naquele tipo de imagem. Por esta razão, tal como mostrado por Benavides et al. (2017), espera-se resultados mais precisos para este método. Para todas as amostras e técnicas de imageamento, as resoluções das imagens foram bastante próximas entre si, o que aumenta a qualidade da comparação dos resultados.

A amostra AC apresentou o mesmo equívoco na simulação, observada e acima discutida para a distribuição de  $T_2$  com  $\rho_{2,fixo} = 83,5 \mu\text{m/s}$ . Após a aplicação da mesma correção, obteve-se:

$$(V/S)_{\text{médio}} (T_{2,\text{médio}} = 30 \text{ ms}) = \rho_{2,fixo} \cdot T_{2,\text{médio}} = 83,5 \cdot 0,03 = 2,5 \mu\text{m}.$$

Utilizando esse resultado e o  $T_2$  médio da moda à direita do  $T_2$  de corte ( $T_{2,\text{médio}} = 0,3 \text{ s}$ ), tem-se a relaxatividade corrigida:

$$\rho_{2,\text{fixo}} = (V/S)_{\text{m\u00e9dio}} / T_{2,\text{m\u00e9dio}} = 2,5 / 0,3 = 8,5 \mu\text{m/s}.$$

Este valor se aproxima mais satisfatoriamente do valor de  $\rho_{2,\text{var}}$  obtido para as trajet\u00f3rias menos restritas.

**Tabela 4.** Valores de relaxatividade superficial entregues pelo programa RWRMN e relaxatividade de refer\u00eancia. N\u00famero de itera\u00e7\u00f5es = n\u00famero total de opera\u00e7\u00f5es feitas pelo programa RWRMN. Foram utilizados os valores m\u00ednimos de  $\rho_{2,\text{var}}$  nessa tabela.

Amostra	N\u00famero de itera\u00e7\u00f5es	Resolu\u00e7\u00e3o ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )	$\phi_{\text{RMN}}$ (%)	$\phi_{\text{He}}$ (p.u.)	$\phi_{\text{RWRMN}}$ (%)	$\rho_{2,\text{fixo}}$ ( $\mu\text{m}/\text{s}$ )	$\rho_{2,\text{var}}$ ( $\mu\text{m}/\text{s}$ )	$\rho_{2,\text{ref}}$ ( $\mu\text{m}/\text{s}$ )
AC 2D	51.255	2,08	23,7	23,0	4,0	38,6	38,3	23,3
AC 3D	400.000	2,00			15,0	8,5	12,8	
DP 2D	107.444	2,17	31,8	30,5	8,0	69,1	68,5	12,3
DP 3D	400.000	2,00			33,0	17,9	13,7	

Os valores obtidos para a amostra AC foram menores do que o valor de refer\u00eancia, contudo n\u00e3o muito distantes entre si. J\u00e1 os resultados obtidos pelo m\u00e9todo 3D para a amostra DP mostraram uma excelente correla\u00e7\u00e3o, especialmente quando comparados aos obtidos pelo m\u00e9todo 2D. Este fato \u00e9 facilmente compreendido lembrando que, al\u00e9m da melhor amostragem do espa\u00e7o poroso caracter\u00edstico do m\u00e9todo 3D, os resultados 2D foram possivelmente afetados pelo defeito, acima descrito, na digitaliza\u00e7\u00e3o da imagem 2D.

A tabela 4 mostra que, mesmo para o m\u00e9todo 3D, os valores de  $\rho_{2,\text{fixo}}$  obtidos apresentaram menores correla\u00e7\u00f5es, corroborando os achados de Benavides et al. (2017) e os obtidos pelo m\u00e9todo 2D para as demais amostras.

Considerando os resultados  $\rho_{2,\text{var}}$ , pode-se concluir que o m\u00e9todo 2D aqui realizado pode ser utilizado para estimativa do par\u00e2metro relaxatividade superficial de amostras de rochas sedimentares, quando imageamento mais sofisticados, tal como os microtomogr\u00e1ficos, n\u00e3o estiverem dispon\u00edveis.

## 9. CONCLUSÃO.

Os resultados das relaxatividades variáveis entregues pelas simulações feitas a partir de imagens das lâminas, obtiveram boa correlação com resultados dos ensaios de RMN feitos em plugues nas amostras AC, EY GD e IH. Já os resultados das distribuições de  $T_2$  entregues pelas simulações feitas a partir de imagens das lâminas, obtiveram melhores correlações com os resultados de referência na amostras DP e EY. Graças ao cenário favorável de imagem com boa resolução, binarização e os tipos de porosidades, especialmente a móldica, produzindo certo padrão de formato de poro quase circular fortemente presente nas amostras.

Dessa forma, os resultados encontrados nas simulações da amostra EY obteve as melhores correlações com dados de referência dentre todas as amostras. Com isso, os dados obtidos nessa simulação, a partir da imagem bidimensional, apresenta-se como uma opção para correlacionar a distribuição de  $T_2$  com tamanhos de poro. Assim, proporciona uma grande diminuição na quantidade de dados a serem armazenados, já que uma imagem 2D comparado as imagens das tomografias em 3D ocupa um espaço muito menor o que gera economia de armazenamento digital e facilidade para transmitir pela internet. E assim, os modelos de exploração criados poderiam ser atualizados mais rápido. Dessa forma, contribuir para o incremento do fator de recuperação por exemplo.

O método funciona, contudo apresenta limitações. A começar pelo processo de preparação das lâminas que precisa ser bem executado garantindo que a resina de cor azulada (epóxi) atinja todos os poros, principalmente os de menor tamanho, exemplo observado na amostra IH. Em seguida, o processo de aquisição das imagens precisa ter um nível de nitidez o suficiente para que o processo de binarização consiga capturar o máximo da porosidade possível. É aconselhável que o processo de binarização conduzido com extrema cautela como: conhecimento prévio dos aspectos geológicos da formação da rocha estudada, principalmente diferenciar as regiões onde há poros que de fato e regiões onde isso não seja possível. A partir de um processo de binarização bem executado, os dados gerados pelo programa de simulação necessitam de uma atenção extra, principalmente as tabelas cedem dados para as curvas de distribuição de  $T_2$ , em especial as das curvas de simulação com valores constantes que são baseadas em apenas um único valor.

Um dos grandes desafios no cenário atual dos estudos de RMN encontra-se no assunto da relaxatividade superficial, discute-se o quanto composição química das paredes dos poros, pode ocasionar em uma diminuição do tempo de relaxação. Contudo esse é um campo que necessita de maior aprofundamento para que se diminua as incertezas presentes. Na parte computacional, seria interessante o desenvolvimento de algoritmos dedicados a complexidade da evolução diagenética das rochas sedimentares, especialmente os carbonatos.

Vale lembrar que esta técnica serve como mais uma ferramenta para aumentar a precisão dos resultados finais de um projeto, ou como alternativa no caso de não ser possível a extração de plugues nos eventos anteriormente descritos, obedecendo às recomendações descritas nesse trabalho. Não é aconselhável usá-la como fonte única de informações para projetos maiores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ANOVITZ, Lawrence M. COLE, David R. **Characterization and analysis of porosity and pore structures**. Reviews in Mineralogy & Geochemistry – Mineralogical Society of America, v. 80, p.p 61-164, 2015.
- BENAVIDES, Francisco. BAGUEIRA, Rodrigo. CARNEIRO, Giovanna. LEIDERMAN, Ricardo. SOUZA, André. **Estimating the surface relaxivity as a function of pore size from NMR T2 distributions and micro-tomographic images**. Research paper – Computers & Geosciences 106 – ELSEVIER, p.p 200-208, 2017.
- BERGMAN, D.J., DUNN, K.-J., SCHWARTZ, L.M., MITRA, P.P., **Self-diffusion in a periodic porous medium: a comparison of different approaches**. Phys. Rev. E 51, 3393–3400, 1995
- BESSLER, Karl E. RODRIGUES, Laécio C. **OS POLIMORFOS DE CARBONATO DE CÁLCIO – UMA SÍNTESE FACIL DE ARAGONITA** – Artigo – Instituto de Química, Universidade de Brasília, Vol. 31, No. 1 p.p 178-180, 2018
- BRYAN J, KANTZAS A, MAI A., **Heavy oil characterization using low field NMR**. CSPG/CSEG/CWLS GeoConvention 2008, Calgary, Alberta, Canada, May 12–15, 2008. AAPG Search and Discovery Article, 2013
- BRETT, c.e., GOODMAN, w.m., LODUCA, s.t., **Sequences, cycles, and basin dynamics in the Silurian of the Appalachian foreland basin**, sediment. Geology 69, 191–244, 1990
- BROWNSTEIN, K.R., TARR, C.E.,. **Importance of classical diffusion in NMR studies of water in biological cells**. Phys. Rev. A 19, 2446–2453, 1979
- CASTRO, L.T., ARCHILLA, N.L., MISSÁGIA, R.M., CEIA, M.A.R., NETO, I.A.L., DE SOUZA, F.R., **Medidas de Propriedades Petrofísicas e Identificação Mineralógica de Afloramentos Carbonáticos**. 13th International.Congress of the Brazilian Geophysical. Society Abstracts, aug., 1129–1133, Rio de Janeiro 2013
- CHOQUETTE, Philip W. PRAY, Lloyd C. **Geologic Nomenclature and Classification of Porosity in Sedimentary Carbonates** – The American Association of Petroleum Geologist Bulletin, Vol. 54, No 2, p.p 207-250, 1970
- COATES, George R. PRAMMER, Manfred G. XIAO, Lizhi. **NMR Logging Principles and Applications** – Halliburton Energy Services Publication H02308, p.p 1-67, 1999.
- CONIGLIO, M., Zheng, Q., CARTER, T.R., **Dolomitization and recrystallization of middle Silurian reefs and platform carbonates of the Guelph formation, Michigan basin, southwestern Ontario**. Bull. Can. Petrol. Geol. 51 (2),p.p 177–199, 2003

CONIGLIO, M., FRIZZELL, R., PRATT, B.R. **Reef-capping laminites in the upper Silurian carbonate-to-evaporite transition**, Michigan basin, southwestern Ontario. *Sedimentology* 51 (3), p.p 653–678, 2004.

Dawson, W.C., KATZ, Barry., ROBISON, V.D, **Austin Chalk (!) petroleum system Upper Cretaceous**, southeastern Texas: a case study *Transactions – Gulf Coast Association of Geological Societies*, v.45, p.157-163, 1995

DUNHAM, R.J. **Classification of Carbonate Rocks according to Depositional Texture** - *American Association of Petroleum Geologists*, 1,p.p108-121, 1962

FERRILL, D.A., MORRIS, A.P., **Fault zone deformation controlled by carbonate mechanical. Stratigraphy**, Balcones Fault System, Texas. *AAPG Bull.* 92 (3), 359–380, 2008

GATTUSO, J-P.; ALLEMAND, D.; FRANKIGNOULE, M. **Photosynthesis and calcification at cellular, organismal and community levels in coral**: a review on interactions and control by carbonate chemistry. *American Zoology*, v.39, p. 160-183, 1999

HALLEY, R.B., and SCHMOKER, J.W., **High porosity Cenozoic carbonate rocks of south Florida**: progressive loss of porosity with depth: *AAPG Bulletin*, v. 67, p. 191-200, 1983

HOVORKA, S.D., NANCE, H.S., **Dynamic depositional and early diagenetic processes in a deep-water shelf setting**, Upper Cretaceous Austin Chalk, north Texas: *Transactions – Gulf Coast Association of Geological Societies*, v.44, p.269-276, 1994

INDIANA LIMESTONE

<<http://academic.brooklyn.cuny.edu/geology/powell/613webpage/NYCbuilding/IndianaLimestone/IndianaLimestone.htm>> Acesso em: 19 jul. 2018

KORBEL, Petr. NOVAK, Milan. **THE COMPLETE ENCYCLOPEDIA OF MINERALS – Description of over 600 Minerals from around the world** – Grange BooksPLC,UK , p.p 302, 2001

LAND, L.S., PREZBINDOWSKI, D.R.,**The Origin and Evolution of Saline Formation Water, Lower Cretaceous Carbonates**, South-Central. Texas, U.S.A. *J. Hydrol.* 54 (3), p.p 51–74,1981

LECLERCQ, N.; GATTUSO, J-P; JAUBERT, J. **Primary production, respiration, and calcification of a coral reef mesocosm under increased CO<sub>2</sub> partial pressure**. *Limnology and Oceanography*, v.47, n. 2, p. 558-564, 2002

MACLAY, R.W., SMALL, T.A., **Carbonate geology and hydrology of the Edwards aquifer in the San Antonio area**, Texas. *Texas Water Development Board - Report* v. 296, pp. 1–90, 1986

MAZZULLO, S.J. **Overview of Porosity Evolution in Carbonate Reservoir**. Search and Discovery Article #40134 - Kansas Geological Society Bulletin – v. 79, 2004.

MAZZULLO, S.J., CHILINGARIAN, G.V. **Diagenesis and origin of porosity**, in G.V. Chilingarian, S.J. Mazzullo, and H.H. Rieke, eds., **Carbonate Reservoir Characterization: A Geologic-Engineering Analysis**, Part I: Elsevier Publ. Co., Amsterdam, Developments in Petroleum Science 30, p. 199-270, 1992

PEARSON, Krystal. **Geologic Models and Evaluation of Undiscovered Conventional and Continuous Oil and Gas Resources** – Upper Cretaceous Austin Chalk, U.S. Gulf Coast: U.S Geological Survey Scientific Investigations Report 2012-5159, p.p 1-5, 2012

**RELATÓRIO DO SEMINÁRIO SOBRE AUMENTO DO FATOR DE RECUPERAÇÃO NO BRASIL**. Agencia Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis - ANP. Rio de Janeiro, 2017.

ROSE, P.R., **Stratigraphic interpretation of submarine versus subaerial discontinuity surfaces: an example from the Cretaceous of Texas**. Geol. Soc. Am. Bull. 81, 2787–2798, 1970

SCHOLLE, P. A.; ULMER-SCHOLLE, D. A. **A color guide to petrography of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagenesis**. Tulsa. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 77 474p, 2003.

SILVA Jr, Gilberto P. **Petrophysical studies of north American Carbonate rock samples and evaluation of pore-volume compressibility models** – Article – Journal of Applied Geophysics – ELSEVIER, p.p 256-266, 2015

SOUZA, André. **Estudo de propriedades petrofísicas de rochas sedimentares por Ressonância Magnética Nuclear**. 2012. 236f . Tese de Doutorado – Universidade de São Carlos, São Paulo, 2012.

TALABI, O., ALSAYARI, S., IGLUBER, S., BLUNT, M.J., **Pore-scale simulation of NMR response**. J. Pet. Sci. Eng. 67, 168–178, 2009

TAN, M., XU, J., ZOU, Y., XU, C., **Nuclear magnetic resonance (NMR) microscopic simulation based on random-walk: theory and parameters analysis**. J. Cent. South Univ. 21, 1091–1097, 2014

TERRA, Gerson José S. **Classificação de rochas Carbonáticas aplicável as bacias sedimentares brasileiras** – Petrobras, Rio de Janeiro, Vol. 18, No 1, p.p 9-29, Nov. 2009/Maio 2010.

TUCKER, Maurice E. **SEDIMENTARY PETROLOGY – an Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks** – Third Edition – Blackwell Science, p.p 287, 2001

VAIL, P.R., MITCHUM, R.M., THOMPSON, Sam III **Seismic stratigraphy and global changes of sea level** , part 4: Global cycles of relative changes of sea level, *in* Payton, C.E., ed., *Seismic stratigraphy – Application to hydrocarbon exploration*: Tulsa, Okla., American Association of Petroleum Geologists Memoir, v. 26, p.83-97, 1977

WATANABE, Y., NAKASHIMA, Y., RW3D. m: **Three-dimensional random walk program for the calculation of the diffusivities in porous media**. *Comput. Geosci.* 28, 583–586, 2002

WILDENSCHILD D, SHEPPARD AP **X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems**. *Adv Water Resour* 51:217–246, 2013

WOLF-GLADROW, Dieter. ZEEBE, Richard E. **CO<sub>2</sub> in seawater: Equilibrium, Kinetics, isotopes** – Elsevier Oceanography Series, p.p 2-9, 2001

ZHENQ, Q., **Carbonate Diagenesis and Porosity Evolution in the Guelph Formation** Ph.D. Thesis University of Waterloo, Waterloo, 1999

