

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA DE POROS EM PÃES  
INDUSTRIALIZADOS EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ARMAZENAMENTO  
PELA TÉCNICA DE MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X

João Carlos Rocha de Lima

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE,  
da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como  
parte dos requisitos necessários à obtenção do  
título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Ricardo Tadeu Lopes

Davi Ferreira de Oliveira

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2024

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA DE POROS EM PÃES  
INDUSTRIALIZADOS EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ARMAZENAMENTO PELA  
TÉCNICA DE MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X

João Carlos Rocha de Lima

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Orientadores: Ricardo Tadeu Lopes

Davi Ferreira de Oliveira

Aprovada por: Prof. Ricardo Tadeu Lopes

Prof. Davi Ferreira de Oliveira

Dr. Anderson Gomes de Paula

Dra. Olga Maria Oliveira de Araújo

Prof. Joaquim Teixeira de Assis

Dra. Roberta Gama Leitão

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2024

Lima, João Carlos Rocha de

Estudo do Comportamento da Estrutura de Poros em Pães Industrializados em Função das Condições de Armazenamento pela Técnica de Microtomografia de Raios X / João Carlos Rocha de Lima. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

IX, 91 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Ricardo Tadeu Lopes

Davi Ferreira de Oliveira

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 79-88.

1. Microtomografia Computadorizada. 2. Caracterização Microestrutural. 3. Condições de Armazenamento do Pão Industrializado. I. Lopes, Ricardo Tadeu *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

*“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um  
oceano.”*  
*Isaac Newton*



## AGRADECIMENTOS

Independente das crenças que a humanidade venha a defender, pelos seus diversos motivos, e, sendo as Leis da Natureza inexoráveis, à Ciência é-lhe permitida retirar-lhe o aspecto axiomático, aos níveis da compreensão humana.

E assim, nos é permitido enxergarmos e entender a funcionalidade dos seus fenômenos, dos mais simples aos mais complexos, às suas peculiaridades e grandiosidades e, aí sim, nos arremetermos à conclusão de uma Causa maior, genitora e gestora, ainda inexplicável, para nossa compreensão, a existência de Deus. Quem sou eternamente agradecido por ter-me dado as condições suficientes e necessárias para eu chegar até aqui, nesta caminhada.

E claro, amparado por meus Professores orientadores Ricardo Tadeu Lopes e Davi Ferreira de Oliveira, minha grande amiga e colaboradora Doutora Olga Maria Oliveira de Araújo, a Doutora Aline S. de Sá Silva, aos quais horas de suas vidas dedicaram-se a ajudar e apoiar-me nesta caminhada, cujos esforços não pouparam para iluminarem minha caminhada, motivo justo que lhes sou imensuravelmente agradecido. E, ainda, como Eu não poderei jamais furtar-me a externar meus agradecimentos ao grande amigo José Lopes, ao Achilles Astuto, ao Ubiratan Araújo, bem como Alessandra Machado e demais companheiros do LIN pelo apoio, pelas diversas sugestões e/ou colaborações recebidas, aos Professores e funcionários do PEN e ao Professor Edgar Francisco Oliveira de Jesus, *in memoriam*.

Aos meus pais, *in memoriam*, pelos seus esforços incondicionais a mim direcionados. A Maria Ester, pela dedicação e apoio e finalmente, a todos meus Irmãos que me apoiaram direta e indiretamente.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA DE POROS EM PÃES  
INDUSTRIALIZADOS EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ARMAZENAMENTO  
PELA TÉCNICA DE MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X

João Carlos Rocha de Lima

Fevereiro/2024

Orientadores: Ricardo Tadeu Lopes

Davi Ferreira de Oliveira

Programa: Engenharia Nuclear

As várias aplicações do uso da microtomografia de raios X (MicroCT ou mCT) têm sido bem-sucedidas em suas finalidades nas aplicações para obtenção de imagens 3D e dados que gerem informações que outras técnicas não podem fornecer, tais como dimensionamentos de espaços vazios, com tanta precisão e detalhamentos, a exemplo como nos trabeculares ósseos, nos poros rochosos e nos poros de pães, nas suas formas de estruturas internas e seus arranjos geométricos. E isto, de uma forma instrumentalmente não invasiva e não destrutiva. Imagens e seus estudos das estruturas de pães têm sido realizadas, nas duas últimas décadas, por diversas técnicas, cujas limitações não existem no emprego da MicroCT, para tais análises. Nesta pesquisa aplicamos a técnica de microtomografia de raios X (MicroCT) para análises de pães industrializados, em condições específicas de temperaturas e acondicionamentos. Com ela pode-se analisar o arranjo geométrico ou a mudança dos poros da massa interna de pães industrializados, de sua casca e farelos. A técnica de MicroCT, foi utilizada no pão industrializado, para avaliar o comportamento da estrutura dos seus poros. Utilizamos amostras de pão industrializados armazenadas em temperatura ambiente do Laboratório (22°C) e em refrigeração (12°C). Concluímos que as condições de armazenamento, devido ao seu acondicionamento em diferentes temperaturas, influenciaram no comportamento de suas respectivas estruturas porosas. Os dados obtidos e as imagens reconstruídas forneceram informações importantes, mostrando modificações de estrutura, em que o pão perdeu líquido, no armazenamento refrigerado. Pode-se avaliar a estrutura porosa do pão e realizamos uma caracterização das alterações das microestruturas ao longo do tempo.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

STUDY OF THE BEHAVIOR OF PORE STRUCTURE IN INDUSTRIALIZED  
BREADS AS A RESULT OF STORAGE CONDITIONS USING X-RAY  
MICROTOMOGRAPHY TECHNIQUE.

João Carlos Rocha de Lima

February/2024

Advisors: Ricardo Tadeu Lopes  
Davi Ferreira de Oliveira

Department: Nuclear Engineering

The various applications of the use of X-ray microtomography (MicroCT or mCT) have been successful in their purposes in applications for obtaining 3D images and data that generate information that other techniques cannot provide, such as sizing empty spaces, with so much precision and detailing, such as in bone trabeculars, in rocky pores and in bread pores, in their forms of internal structures and their geometric arrangements. And this, in an instrumentally non-invasive and non-destructive way. Images and their studies of bread structures have been carried out, in the last two decades, by several techniques, whose limitations do not exist in the use of MicroCT, for such analyses. In this research, we applied the X-ray microtomography (MicroCT) technique to analyze industrialized bread, under specific temperature and packaging conditions. With it, it is possible to analyze the geometric arrangement or the change in the pores of the internal dough of industrialized bread, its crust and crumbs. The MicroCT technique was used on industrialized bread to evaluate the behavior of its pore structure. We used industrialized bread samples stored at laboratory room temperature (22°C) and refrigerated (12°C). We conclude that the storage conditions, due to their storage at different temperatures, influenced the behavior of their respective porous structures. The data obtained and the reconstructed images provided important information, showing structural modifications, in which the bread lost liquid, in the refrigerated storage. The porous structure of the bread can be evaluated and we characterize the changes in microstructures over time.

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica.....	2
3. Fundamentação Teórica.....	21
3.1. Microtomografia Computadorizada de Raios X (MicroCT).....	21
3.1.1.O termo Microtomografia Computadorizada de Raios X (MicroCT).....	21
3.1.2.Pressupostos Teóricos Históricos da Microtomografia Computadorizada de Raios X (MicroCT).....	22
3.1.3.Bases Teóricas Físicas da Microtomografia de Raios X (MicroCT).....	25
3.1.3.1. Princípios de Funcionamento da Microtomografia Computadorizada de raios X.....	28
3.2. Feixe de Raios X.....	30
3.3. Fundamentos da Aquisição e Reconstrução de Imagens.....	30
3.4. O Tecido Esponjoso do Pão Industrializado.....	31
3.4.1. Porosidade.....	32
3.4.2. Trabéculas.....	33
3.5. Mensurações aplicadas aos poros.....	34
4. Materiais e Métodos .....	36
4.1. Caracterização das Amostras .....	37
4.2. Mensuração das massas das amostras com tempo de preparações diferentes .....	38
4.3. Sistema de Microtomografia Computadorizada .....	42
4.4. Processos de Aquisição, Reconstrução e de Segmentação de Imagens .....	44
4.4.1 Aquisição .....	44
4.4.2 A Reconstrução .....	45
4.4.3 A Segmentação .....	47

5. Resultados e Discussões .....	51
5.1. Das Amostras .....	51
5.1.1 Pão Industrializado Tradicional em Temperatura Ambiente (PITTA- 22°C) ....	52
5.1.2 Pão Industrializado Tradicional Acondicionado em Geladeira (PITAG- 12°C). 56	
5.1.3 Pão Industrializado Integral em Temperatura Ambiente (PIITA- 22°C) .....	59
5.1.4 Pão Industrializado Integral Acondicionado em Geladeira (PIIAG- 12°C) .....	62
5.1.5 Esquemas gráficos e análises das amostras em diferentes condições de armazenamento.....	65
5.2. Método de ajuste de esfera (“Sphere Fitting Method”) .....	71
5.3. Mudanças na porosidade ao longo do tempo .....	71
5.4. Mudanças na microestrutura ao longo do tempo .....	72
6. Conclusões .....	76
7. Referências Bibliográficas .....	79

# 1. Introdução

O ano é 2024, seguimos na caminhada do avanço da Ciência e Tecnologia em microtomografia computadorizada de raios X (MicroCT), cuja origem tem como principal grandeza a radiação de raios X, que foi descoberta por Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1943), que recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1901 (BUZUG, 2008). Uma vez que seus estudos, experimentos e observações, enfim, suas pesquisas, permitiram-lhe realizar a descoberta e a outros às suas aplicações iniciais, como no emprego da radiografia por emissão de raios X. E assim foi retirado o véu que cobria o que já estava presente na nossa Natureza terrestre, os “Raios X”, bem como agora sabemos, presentes também na Natureza extraterrestre, o que (ELSNER, R.F., et al., 2005) verificaram, através de observações realizadas com o instrumento Chandra Advanced CCD Imaging Spectrometer (Observatório de raios-X, Chandra é um telescópio espacial lançado pela NASA) e, posteriormente afirmaram que: “Os espectros de raios X da aurora jupiteriana são significativamente diferentes dos espectros de raios X dos cometas.”.

Devido a toda esta caminhada até hoje, o que apresentamos não é apenas uma prova evidente, mas uma condição “sine qua non”, para estarmos a passos seguros explorando a Ciência e utilizando-nos das tecnologias, que sofrem mudanças e adequações à medida em que são aperfeiçoadas e são aplicadas, com êxitos. E a exemplo, temos aqui, mais uma das diversidades das aplicações de usos dos raios X, o seu emprego na técnica de microtomografia de raios X ou MicroCT, que pode ser aplicada em diversos materiais, com diversas finalidades. E como consequência deste processo de avanço, desde a sua descoberta, dos raios X, e com suas aplicações, pudemos ampliar nossos conhecimentos, através de seu emprego, sobre variadas criações humanas e de Deus.

As aplicações da Técnica de Microtomografia de Raios X, têm proporcionado resultados comprovadamente muito relevantes, nos avanços científicos bem como tecnológicos, que tem sido utilizadas como procedimento poderosíssimo de investigações científicas nas várias áreas das Ciências, tais como, na Física, Biologia, Nutrição, Geologia, Ciências dos Materiais, Museologia, Paleontologia, Odontologia, Medicina, Engenharia e nas Artes, na virada do Século XX para o XXI.

A técnica de MicroCT pode ser considerada como uma ferramenta essencial para visualizar e quantificar complexas regiões, áreas e volumes, de uma determinada estrutura, podendo sua resolução espacial das imagens 3D aproximar-se de 1 micrômetro (LANDIS e KEANE, 2010), das regiões das estruturas internas de materiais, sintéticos ou naturais, os quais permitam aplicação da referida técnica, bem como em diversos componentes de diversos elementos dos reinos mineral, vegetal e animal. E provavelmente, em alguns outros materiais existentes no Universo que, por ventura, à técnica não foram submetidos.

Nosso objeto de pesquisa, ou material da amostra estudado, foi o pão industrializado de sanduíche, conhecido comercialmente como “pão de forma”.

Diversos métodos foram apresentados e aplicados nos estudos da estrutura interna do pão, tais como: microscopia óptica, microscopia eletrônica, tomografia de raios X e ressonância magnética ( RATHNAYAKE et al., 2018 ). Acrescente-se a eles a “microtomografia computadorizada de raios X (micro-CT) tem grande potencial devido à sua capacidade de investigar de forma não invasiva a microestrutura em três dimensões.” CHEN et al. (2021). No entanto, em nossa pesquisa, aplicamos a técnica, no pão industrializado de sanduíche, em condições especiais.

Para o sistema de MicroCT, desta pesquisa, foram reunidos e sincronizados vários dispositivos, cuja complexidade de funcionamento pode ser simplificada na forma de um arranjo, ou um sistema de microtomografia computadorizada (SmCT) em que se dispõe de uma fonte de radiação fixa, situada opostamente a um detector, também fixo, tendo-se entre eles uma amostra, apoiada apropriadamente, em um suporte, girante que foi configurado para movimentar-se em torno do seu eixo, com passos pré-determinados, em ângulos, em que a amostra fica sob um feixe de raios X que interage com o seu material constituinte.

Os pães, de uma maneira geral, são os alimentos mais consumido, popular e antigo em todo o Planeta (ARRANZ-OTAEGUI, A. et. al., 2018) e é ainda, o alimento que apresenta no seu consumo as características de praticidade, aceitabilidade sendo fonte de carboidratos e outras de energias, dependendo dos incrementos associados à sua composição. Podendo ainda ser utilizado como fonte de reposição vitamínica e erradicação de determinadas doenças, se no preparado de sua composição estiverem presentes ingredientes apropriados com vitaminas e minerais para esses fins, para o público consumidor em geral ou determinados públicos alvos. Na literatura são verificados diversos produtos alimentícios fortificados com cálcio.

Dentre esses destacam-se os pães (LIMA, Adriana de Sousa, 2014). Sendo apresentado em várias formas e composições, mas constituídos de elementos básicos: farinha, sal, fermento e água. Sua importância alimentar é tamanha que a Organização Mundial de Saúde (OMS) faz recomendações no seu percentual consumo, como parte de uma alimentação saudável. O nosso objeto de estudo foi o pão industrializado, também conhecido como pão de sanduíche ou pão de forma, muito conhecido e utilizado no Brasil e mundialmente, em sanduíches.

Nas últimas duas décadas, algumas análises de estruturas de pão e seus componentes têm sido realizadas através do uso de imagens.

A utilização da MicroCT, permite a visualização tridimensional interna de uma determinada amostra em estudo, suas quantificações de áreas e volumes e análises de milhares de seus planos e/ou seções (MACHADO, Alessandra Silveira, 2015).

As aplicações de MicroCT mais comuns são tipicamente relacionadas à detecção e visualização de características de densidade, volumes ou áreas (NEVES, A. A. et. al., 2015), assim seu emprego, tornou possível a sistematização para visualização, comparação, avaliação e análise das estruturas internas e da morfologia das amostras de pães industrializados, objeto de estudo.

O objetivo, neste estudo, foi empregar a técnica de MicroCT, que se trata de uma técnica não destrutiva na produção de imagens tridimensionais (3D) de alta resolução, derivadas de composições de projeções bidimensionais (2D), para analisar os pães industrializados, para estratificar, mensurar e avaliar os dados, qualitativos e quantitativos.



## 2. Revisão Bibliográfica

Nas últimas duas décadas muitas análises das estruturas de constituição de diversos materiais, em seus elementos ou conjuntos, têm sido realizadas através do uso de imagens, por diversas técnicas, quer sejam, nos minerais, vegetais, dos animais irracionais ou racionais, em seus tecidos ósseos ou outros, e em diversos materiais produzidos pelo homem. No desenvolvimento desses estudos, na busca do aperfeiçoamento de técnicas de imagens utilizou-se, inicialmente, os princípios das técnicas de imagens por raios X, posteriormente da tomografia computadorizada e alcançamos à aplicação da Microtomografia Computadorizada de Raios X (MicroCT), nas pesquisas de investigação das microestruturas, como as porosidades dos diversos tipos de materiais orgânicos e/ou inorgânicos. Afim de obtermos mais informações e conhecimentos, através de imagens, mais completas das complexidades dos arranjos que compõem as estruturas internas, nas regiões de interesses dos objetos de estudos, em seus parâmetros e em suas propriedades.

Com o levantamento do emprego da Técnica de Microtomografia Computadorizada (Micro-CT) pudemos constatar um largo emprego da técnica, já realizado por vários autores, em diversas áreas. No entanto, ainda não aplicado nas mesmas condições e amostras com as mesmas características, em que o fizemos, em nossa pesquisa. A seguir apresentamos trabalhos já realizados com o emprego da técnica de MicroCT, com alguns tipos de materiais e de pães.

LIM, K.S. e BARIGOU, M. (2004) descreveram as imagens e análises da microestrutura celular, 3D, por meio do uso do método da microtomografia computadorizada de raios-X, de alimentos, tais como, chocolate aerado, mouse marshmallow e “muffin” (um tipo de doce em forma de uma massa fina). Obtiveram imagens 3D da microestrutura da espuma formadora dos alimentos e as analisaram. As amostras utilizadas foram constaram de produtos alimentares comercializadas, como uma barra de chocolate aerado, mousse de morango, barra de chocolate em tipo de favo de mel muffin de chocolate e marshmallow. Utilizaram um sistema de MicroCT de raios X de mesa de alta resolução, Skyscan 1072 (Skyscan, Bélgica), detector de raios X consiste em uma câmera CCD digital resfriada. O sistema micro-CT continha um software que permitiu a reconstrução microtomográfica, usando um algoritmo de reconstrução, com um pacote de software T-View (Skyscan, Bélgica, 2003), para o processamento e análise das imagens obtidas por raios X e suas visualizações

3D. Concluíram que a MicroCT foi eficaz na obtenção de imagens da microestrutura das amostras sólidas e semilíquidas, bem como informações das suas microestruturas, como vazios, distribuição da espessura das paredes celulares, conectividades das células.

TRATER e RIZVIB (2005), investigaram “uma tecnologia de imagem não invasiva, microtomografia de raios X (XMT)”, assim chamaram a MicroCT de raios X, para analisarem as microestruturas de “espumas de biopolímero”, o que justificaram pela necessidade do estudo para compreender-se a formação das microestruturas das referidas “espumas”, nas suas amostras de amido de milho, “produzidas por extrusão”. Obtiveram imagens de seções retas transversais, que lhes facilitaram as análises. Concluíram que a técnica de MicroCT de raios X era superior às técnicas convencionais de imagens, nas análises da microestrutura da amostra.

FALCONE et al. (2006) caracterizaram a estrutura do pão ralado. Valeram-se de “amostras” “da fatia de um pão branco comercial”, por apresentarem, aproximadamente, o mesmo teor de umidade. A aquisição da imagem da amostra foi realizada por meio de microtomografia computadorizada de raios X sensível à fase (PS-XRM), técnica da linha SYRMEP (Synchrotron Radiation for Medical Physics) do Laboratório Elettra, Trieste, Itália (onde tem-se de uma linha de luz que foi projetada para pesquisas em radiologia médica, com uma flexibilidade que proporciona a realização da aplicação da técnica de microtomografia nas áreas de ciência dos materiais, geologia, vulcanologia, patrimônio cultural, imagens biomédicas, entre outras). Aplicaram o método em que se selecionam um volume da região de interesse para analisarem volumes menores reconstruídos das imagens obtidas. Verificaram que a análise 3D, a partir da aplicação de técnica aplicada representou uma nova visão para pesquisas com materiais que apresentam arranjos estruturais semelhantes aos porosos.

KOCER et al. (2007) realizaram um estudo da funcionalidade da substituição de açúcar e gordura pela funcionalidade da polidextrose (um carboidrato não digerível), em bolos. No estudo os parâmetros de “distribuição do tamanho das bolhas, tamanho médio das bolhas e uniformidade do tamanho das bolhas” foram fundamentais na caracterização das mudanças ocorridas. As avaliações desses parâmetros foram reveladas pelas análises das respostas fornecidas das imagens das microestruturas das massas das amostras, os bolos produzidos para o estudo proposto, que foi constituído de “Farinha, Açúcar, Gordura, Ovo, Leite em pó desnatado (SMP), Sal, Água, Fermento em pó (BP)”. Para o preparo do bolo foi seguido o “procedimento padrão fornecido pela Flour, Milling and Research Association

(Chorleywood, Reino Unido).” Para a análise da imagem, usaram “um método semelhante a Smolarz et al., 1989 , Barrett e Ross, 1990 , e Lange, Jennings e Shah (1994)”. Para aquisição das imagens usaram uma “câmera digital (Cohu Inc., San Diego, CA) usando lente varifocal (Kowa Optimed Inc., Torrance, CA)” e, para revelar os detalhes (tamanho dos poros  $<0,01 \text{ mm}^2$ ), a câmera digital foi acoplada a um estereomicroscópio com faixa de zoom de  $6,7\times-40\times$  (Olympus SZ-40, Olympus, Melville, NY) equipado com fonte de luz halógena de 6 V/30 W (LSGA-Epi- Illuminator , Olympus TL-3, Olympus, Melville, NY) para iluminação” E para a limiarização foi realizada pelo sistema de análise de imagens (SigmaScanPro 5.0, Jandel Inc., San Rafael, CA), para obter uma imagem em preto e branco do esqueleto e da parede dos poros da região de interesse. Observaram aumento na uniformidade do tamanho das bolhas e a diminuição no tamanho médio das bolhas. E concluíram que a técnica empregada na investigação, para avaliar as características da massa, foi consistente na detecção de diferenças entre as formulações. E que a substituição da polidextrose ocasionou uma mudança no tamanho médio dos poros e na uniformidade do tamanho dos poros na crosta do bolo.

LAPE, A.D. et al. (2008), aplicaram a técnica de MicroCT para avaliar a estrutura interna do miolo de três amostras de pão. Asseguraram ser a técnica um método analítico não destrutivo que utiliza a penetração de raios X para sondar estrutura interna do pão ralado”. Verificaram as variações nas densidades das amostras devido a absorção ou espalhamento dos raios X, nas mesmas. Afirmaram que a (MicroCT) foi precisa e reveladora na análise de densidade do pão. Realizaram a análise das amostras após a coleta de dados por um aparelho de “raios X de mesa Skyscan<sup>TM</sup>”.

PRIMO-MARTÍN, et al. (2009), baseados em, “( Babin et al., 2006, Lim e Barigou, 2004, van Dalen et al., 2007, Whitworth e Alava, 2004 )”,concluíram que a “microtomografia de raios-X ( $\mu$ CT)”, MicroCT, tratava-se de uma técnica muito benéfica na caracterização de pães preparados por eles (“pãezinhos crocantes eram assados em duas etapas”), e a atribuíram para verificar as desproporções nos atributos “sensoriais e de emissão acústica e nos parâmetros de transporte de água”, das estruturas das amostras por eles pesquisadas.

SHEHZAD et al. (2010) avaliaram a porosidade e estabilidade da massa de pão durante a fermentação, para isto usaram uma metodologia que constatava as modificações de forma e volume da massa do pão no decorrer de sua fermentação, através de câmera digital. Separaram porções da massa em variados arranjos e condições de composições, afim de obterem quatro

porções, como amostras, com propriedades reológicas diversificadas, compostas de farinha, água, óleo, açúcar, fermento e sal, que de acordo com a metodologia empregada foram misturados por dois misturadores diferentes, um convencional “(marca Mahot, fornecido pela VMI, 85-Montaigu, França)” e outro espiral, “DIOSNA (Dierks & Söhne GmbH, Osnabrück, Alemanha)”. Separaram pedaços das massas das amostras e realizaram as aquisições através de uma câmera digital, seguindo a metodologia empregada e, empregaram o software “MATLAB” nas análises das imagens. Constataram que o comportamento da porosidade tem uma relação direta com os ingredientes que compõem a massa e que, na comparação com os resultados de porosidade medidos em microescala, da “microtomografia de raios X”, já anunciados na literatura, com as mesmas composições de massa, por “XRT”, ( Babin, 2005 ) e (Babin et al., 2006 , Babin et al., 2008), têm semelhanças com os resultados encontrados na macro escala, realizadas por eles, com a câmera digital.

ALTAMIRANO-FORTOUL, LE-BAIL, CHEVALLIER, ROSELL (2011), investigaram, com uma combinação de microscopia eletrônica de varredura e microtomografia de raios X, as consequências do vapor na microestrutura da crosta de pão, com o interesse de avaliarem a influência da quantidade de vaporização nas características “físico-químicas e mecânicas da crosta de pão” e a idiossincrasia das suas porosidades. A massa foi preparada seguindo critérios de controle da sua mistura, com os ingredientes de farinha, sal, água e fermento. Em seguida foi dividida e moldada, após o pão pronto, a crosta celular foi tratada como amostra e colocada em um suporte para sofrer o método da aplicação da técnica de microtomografia de raios X, através do Microtomógrafo de raios X, Skyscan 1174 (Skyscan, Bélgica). Após realizadas as aquisições de projeções, das amostras, as suas imagens das seções retas transversais planas, foram reconstruídas com o software (NRecon, Skyscan).

PEREIRA et al. (2011) realizaram uma combinação com Fluorescência de raios X com Microtomografia Computadorizada (XRF e MicroCT) para determinarem a distribuição dos elementos de ferro, cobre e zinco em três amostras de três pacientes diferentes, com “próstata benigna hiperplasia (BPH)” que foram analisadas para associarem estes resultados a um estudo relacionado com a distribuição elementar e concentração de ferro, cobre e zinco em amostras de mama, pulmão e próstata. O propósito foi verificar a correlação entre a concentração desses elementos com as características e patologias de cada tecido, com a vantagem desta técnica, de visualização tridimensional da distribuição elementar, não

danificar a amostra em questão. Analisaram as imagens obtidas, das amostras e observaram que as duas amostras tinham uma maior concentração de ferro em comparação com a concentração de cobre e zinco.

WANG, S. et al. (2011), usaram Sistema para MicroCT, com um equipamento SkyScan 1172<sup>a</sup> (SkyScan 1172) com o software Control (versão 1.5 build 8) com o objetivo de revelar e fazer uma conexão entre a “morfologia da estrutura celular no pão” com suas “propriedades físicas”. Utilizaram como amostras de pães não industrializados. Fizeram as aquisições das varreduras e reconstruíram as imagens usando NRecon (versão 1.6.1.2). Avaliaram que pães apresentaram uma “estrutura labiríntica” e que a visualização das imagens obtidas permitiu a caracterização de poros. E afirmaram que esta foi a primeira vez que foi relatado esta restrição de poros em “produtos de panificação”.

ZHU et al. (2011), investigaram duas espécies de grãos de arroz, um de origem natural e outro, de mesma classe, mas de origem transgênica, por meio de duas técnicas: uma com a aplicação da microtomografia de raios X (MicroCT) de alta resolução e a outra, por meio de “um microscópio eletrônico de varredura ambiental”. Com a primeira, após os processos de aquisições, reconstruções e análises das imagens 3D, obtiveram dados, das peculiaridades estruturais dos núcleos das amostras. Tais como a maior densidade, presença do endosperma e um menor espaço com ar, nos grãos de arroz de origem natural. A aplicação da técnica de MicroCT, nas amostras, foi realizada através de um sistema de microtomografia “de mesa de alta resolução (Modelo 1072, Skyscan, Aartselaar, Bélgica), que consiste em um tubo de raio-X selado com microfoco com um tamanho de ponto de 5 µm operando a uma tensão / corrente de 46 kV / 75 µA, um estágio rotativo e capturado usando uma câmera CCD resfriada de 12 bits (1024 × 1024 pixels).”

LAMPIGNANO, LAVERSE, MASTROMATTEO, DEL NOBILE (2012), examinaram e caracterizaram a microestrutura celular de “seis tipos de massa de pão e pães com teores variados de fermento”, com formatos cilíndricos (compostos de farinha de trigo fermento, sal, água e azeite virgem), por meio da aplicação da técnica de microtomografia de raios X, com a qual obtiveram a imagem 3D da microestrutura celular formadora das massas do pão e do seu processo de formação (de fermentação), para as suas análises realizadas, nas formas, tamanho e arranjos de conectividades. O equipamento utilizado foi “um sistema de microtomografia de raios X de mesa de alta resolução Skyscan 1172 (Skyscan, Bélgica).” Foi utilizado o software de reconstrução NRecon (Skyscan) para a obtenção de imagens das seções

retas transversais. E para os processamentos de imagens e as análises de dados, foi utilizado o software skyscan, CT-Analyzer (CTAn).

TURBIN-ORGER, et al. (2012), dispuseram de massas de pão de diversas composições, preparadas de acordo com um padrão pré-estabelecido, para estudo e caracterização de suas estruturas celulares e os efeitos no processo de desenvolvimento e criação “de bolhas na massa durante a fermentação”, com a aplicação da microtomografia computadorizada de raios X. Utilizaram um feixe monocromático, polarizado, do síncrotron ESRF (F38-Grenoble). Realizaram as aquisições, bem como a reconstrução das imagens o que lhes permitiu a análise da porosidade e conclusão de que as diferentes composições das massas acarretam diferentes arranjos estruturais celulares.

BESBES E., et al. (2013) usaram a microtomografia de raios-X para comparar com a picnometria de hélio na análise da estrutura celular do pão integral, da sua porosidade e densidade. Confirmaram a qualidade da comparação com a “análise em 3-D”. Afirmaram que esta última, a picnometria de hélio, é uma técnica indireta e suscetível a erros, enquanto que a primeira, sendo não destrutiva, permite a observação em 3-D de materiais porosos. Avaliaram a tortuosidade dos poros para relacioná-la com o comportamento do desenvolvimento dos poros no processo de cozimento, e ainda, que os resultados do estudo realizado serão úteis para pesquisas futuras para compreender-se o processo de envelhecimento. Utilizaram na análise da estrutura da amostra (o miolo e da crosta do pão) o equipamento de microtomografia de mesa de alta resolução Skyscan 1174 (Bélgica). Com a configuração de nível de energia de pico de 50 kV e corrente constante de 800 $\mu$ A. Após as aquisições das imagens fizeram a reconstrução tomográfica com o software NRecon, Skyscan. E os respectivos processamentos e análises foram realizados pelo software Skyscan, cujas imagens reconstruídas foram processadas e analisadas usando o software Skyscan, CT-Analyser (CTAn), para renderização das imagens das estruturas, nas regiões de interesses.

GOMEZ et al. (2013) apresentaram um estudo comparativo de algoritmos de limiar automático para segmentação de volume ósseo trabecular em MicroCT. Analisam o histograma de imagens MicroCT, 3D pré-processadas para otimizar alguns parâmetros para encontrar o melhor limiar de nível de cinza. As imagens de MicroCT foram adquiridas com um dispositivo de raios-x microfoco. Mediram os índices morfométricos 3D. Verificaram que a técnica aplicada desempenha um papel importante no aprimoramento da qualidade de imagem da melhor separação entre o volume de fundo e o volume ósseo trabecular.

GUESSASMA e NOURI (2013) aplicaram a técnica da microtomografia de raios X na investigação do “comportamento de compressão do pão ralado”, para estudar mudanças na estrutura aérea, a deformação das paredes celulares e a contração das células sob intervalos de níveis diferentes de compressão, a que as amostras foram submetidas. As amostras analisadas tratavam-se de um tipo de “pão branco comercializado classificado como macio e fofo”, que é denotado por apresentar uma quantidade expressiva de “células finas” cercando células maiores. Realizaram as aquisições de imagens por microtomografia de raios X para diversas compressões. Utilizaram um tomográfico industrial “(tomógrafo industrial Metris XTH225)” com um microfoco com uma dimensão de “cerca de 3  $\mu\text{m}$ ”. Concluíram que a MicroCT de raios X revelou diferentes comportamentos nas estruturas celulares durante as compressões atribuídas.

MASTROMATTEO et al. (2013) avaliaram e caracterizaram a microestrutura celular do pão assado, produzidos com seis tipos de trigo duro, com a aplicação da técnica de microtomografia de raios X (MicroCT). E as características das amostras analisadas foram comparadas com as de pães comerciais. As amostras foram “fotografadas” por um sistema de microtomografia de raios X de mesa, “Skyscan 1172 (Skyscan, Bélgica)”. Utilizaram uma câmera CCD no registro da transmissão do feixe cônico, emitido pelo equipamento, incidido nas amostras, os softwares de reconstrução (3D) NRecon (Skyscan), para reconstrução tomográfica, e o CT-Analyser (CTAn) para processamento e análise das imagens e, também, um algoritmo nele existente para afastar as estruturas maiores conectadas em 3D.

VAN DYCK, et al. (2013), aplicaram o método de análises com aplicação da Técnica de Microtomografia de Raios X (MicroCT), para obterem imagens das seções transversais das amostras dos pães e realizarem as análises morfológicas das microestruturas das mesmas para estudar a versatilidade volumétrica das microestruturas das amostras de quatro tipos de pães produzidos em um comércio local. Afirmaram que “a tomografia computadorizada de raios X foi usada pela primeira vez para criar uma digitalização 3D de alta resolução de uma seção transversal inteira de pão”, nas condições apresentadas, em suas pesquisas.

VIDAL et al. (2013) avaliaram a influência de diferentes pixels em imagens de MicroCT de microestruturas trabeculares do osso em ratos, em parâmetros histomorfométricos. As amostras analisadas (seis amostras) foram de ratos da mesma idade e sexo. As imagens adquiridas foram reconstruídas pelo software NRecon e as análises morfométricas 2D e 3D foram realizado através do software CT Analyser. Os resultados

mostram que nas experiências realizadas com maior tamanho maior de pixel, os valores dos parâmetros obtidos através da análise 3D de todos os parâmetros morfométricos, apresentaram diferença estatisticamente significativa. Observaram ainda que todos os parâmetros mudaram significativamente devido ao aumento do tamanho do pixel.

CAFARELLI et al. (2014), analisaram com a aplicação da técnica de microtomografia de raios-X cinco tipos diferentes de amostras de pão italiano, com diferentes estruturas físicas aparentes. Concluíram que a microtomografia de raios-X combinada com a estatística integrada forneceu dados microestruturais das amostras em análises e foi capaz de classificar as amostras em estudos, em função das suas características estruturais particulares expostas à luz da MicroCT. CAFARELLI, et al. (2014), analisaram com a aplicação da técnica de microtomografia de raios-X cinco tipos diferentes de amostras de pão italiano, com diferentes estruturas físicas aparentes. Concluíram que a microtomografia de raios-X combinada com a estatística integrada fornece dados microestruturais das amostras em análises e é capaz de classificar as amostras em estudos, em função das suas características estruturais particulares expostas. A análise de MicroCT foi realizada com o sistema de microtomografia Skyscan 1172 (Skyscan, Bélgica). Para a obtenção das imagens, para cada amostra, a reconstrução foi realizada pelo software de reconstrução NRecon (Skyscan). E para seus processamentos, o software CT-Analyser (CTAn), foi utilizado.

DEMIRKESEN et al. (2014) afirmaram que o uso MicroCT, geralmente aplicada em medicina apresenta vantagens em relação a outras técnicas de análises de imagens. E foram adiante no emprego da técnica, quando afirmaram que ela cria uma representação em 3-D da estrutura interna do pão, em que empregaram a MicroCT. Acrescentaram gomas, pré-identificadas, na estrutura do miolo de pães sem glúten para estudarem os seus efeitos, por MicroCT. Relacionaram os parâmetros de “porosidade, número, tamanho médio, proporção e arredondamento” e os relacionaram com “dureza, coercitividade e elasticidade dos pães”. Usaram o equipamento “MicroCT 40 (Scano Medical Inc., PA) na pesquisa da estrutura das amostras de pão, não industrializado, sem glúten. Concluíram que, a MicroCT pode qualificar e quantificar de forma plena a aparência das migalhas do pão, pois oferece informações características imprescindíveis das estruturas internas dos poros do pão.

CHAKRABARTI-BELL, WANG e SIDDIQUE (2014), prepararam, de forma controlada, massas de pães à base de farinhas selecionadas (uma canadense e outra australiana), água e fermento, de modo que em seu preparo tivessem características



semelhantes, mas com comportamentos diferentes. Frações do pão para amostras foram separadas, postas em descanso, congeladas e assadas para serem submetidas à aplicação da microtomografia de raios-X, MicroCT, que consistiu no escaneamento, aquisição, reconstrução e análises das imagens 3D, geradas em todo o processo. Objetivaram através da pesquisa obter dados, que lhes fornecem informações do maquinismo da expansão das “bolhas” e das dissemelhanças produzidas pelos tipos de farinhas, no processamento das massas e na qualidade dos pães. Sendo exitosos. Nos processos de aquisições e reconstruções de imagens usaram o software XRadia incluído no VersaXRM-500. Usaram o software de processamento e análises de imagens: ImageJ ([rsbweb.nih.gov/ij/](http://rsbweb.nih.gov/ij/)) para separar a região de interesse nas imagens das amostras e o CTAn v1.11.4.2 ([www.skyscan.be](http://www.skyscan.be)) e o Avizo Fire ([www.vsg3-D.com](http://www.vsg3-D.com)) para as análises realizadas.

MOUSSAWI, et al. (2014) exploraram as mudanças microestruturais causadas pela deformação do pão ralado, através de “bancada de testes mecânicos acoplada a um sistema de microtomografia de raios X”. Analisaram as diferentes imagens de raios X processadas e verificaram que as células das amostras submetidas no estudo, não se deformavam pelas suas compressões e sim pela variação positiva da pressão do ar no interior das mesmas. Uma das suas conclusões da correlação de métodos que empregaram foi que o método que gerou imagens 3D propiciou dados melhores que as técnicas de granulometria, também empregado.

ALMEIDA et al. (2015) fizeram uma comparação tridimensional do transporte do canal e mudanças na geometria apical usando imagens de dentes, obtidas por MicroCT. Utilizaram, como amostras, vinte e oito molares mandibulares. Estas amostras foram digitalizadas por microtomografia computadorizada antes e depois da instrumentação. Suas imagens foram comparadas. Concluíram que não houve diferenças significativas entre os tipos de instrumentos utilizados nos tratamentos aplicados.

CUNHA et al. (2015) utilizaram a Micro-CT para uma avaliação morfométrica precisa do desempenho de “mini-implantes” realizados em substratos ósseos distintos. As imagens dos resultados das amostras foram adquiridas com sistema Micro-CT através do equipamento de modelo 1173 (Bruker, Kontich, Bélgica). Realizaram dois tipos de “mini-implantes”, em dois grupos em conformidade com seus desenhos geométricos. Dispuseram de um quadril bovino como protótipo ósseo. Avaliaram as características do desenho geométrico usando imagens de microscopia eletrônica de varredura e o software Image-Pro Insight. Os parâmetros de qualidade óssea foram avaliados com um sistema de tomografia

computadorizada. Puderam concluir com o resultado que o desempenho mecânico do “mini-implantes” foi diferente, como função das propriedades ósseas.

DE-DEUS, et al. (2015) compararam a porcentagem de área não instrumentada da raiz de canais radiculares preparados com diferentes ampliações usando sistemas alternativos de arquivo único (“Reciproc” e “Waveone”, são instrumentos para o preparo e modelagem de canais radiculares dos dentes) por análise de MicroCT. Utilizaram o sistema de MicroCT, SkyScan 1173. Como, também, De-Deus et al. (2015), realizaram e avaliaram imagens por MicroCT para comparar os resultados de diferentes procedimentos de tratamentos com sistemas de “arquivo único (WaveOne [Dentsply Maillefer, Baillaigues, Suíça] e Reciproc [VDW, Munique, Alemanha]) e um sistema rotatório multifile convencional (BioRaCe [FKG Dentaire, La-Chaux-de-Fonds, Suíça])”. Utilizaram trinta raízes mesiais e dividiram as amostras em grupos característicos. Os resultados das análises realizadas não mostraram diferenças nos resultados obtidos nos diferentes procedimentos adotados nos processos de tratamentos.

NEVES et al. (2015) Constataram que a aplicação da técnica de MicroCT associada à análise digital de imagens apresentou vantagem sobre em relação aos métodos convencionais de microscopia para o estudo das técnicas de remoção de cárie. Dentes molares humanos extraídos apresentando lesões de cárie oclusal foram armazenados por menos de 6 meses em solução aquosa de cloramina a 1% sob refrigeração. Os molares extraídos de cárie foram selecionados e digitalizados por MicroCT, com o equipamento Skyscan 1173 (Bruker micro-CT, Kontich, Bélgica). As projeções de micro-CT adquiridas foram reconstruídas em cortes transversais. E ainda, (Neves et al., 2015), propuseram o uso de imagem Micro-CT para a rotina de processamento automatizado de imagens, para quantificar “o volume de dentina removida, tecido duro acumulado, total detritos e porcentagem de áreas não instrumentadas mecanicamente e do canal radicular”. As aquisições e reconstruções de imagens foram realizadas através do sistema de Micro-CT, Skyscan 1173 (Bruker micro-CT, Kontich, Bélgica, software de controle para 1173, v.1.6.13 e NRecon Reconstruction, v.1.6.9). Ressaltaram, entretanto, que, “as rotinas de aquisição, reconstrução e processamento de imagens as fatias de “Micro-CT” deveriam ser experimentadas e conformadas.

PIMENTA et al. (2015) utilizaram tecnologia de microtomografia de raios X do sistema de Micro-CT do SkyScan 1173, para gerarem imagens para a avaliação do ajuste marginal e interno em coroas de cerâmicas e ligas metálicas (zircônia, dissilicato de lítio e

liga de níquel-cromo. Puderam concluir, nos resultados obtidos da aplicação da MicroCT, que os parâmetros de ajuste marginal e interno dos materiais testados se encontravam de acordo com a literatura em questão.

RZIGUE et al. (2016) desenvolveram um estudo com vistas a entender a existência de uma correlação entre estruturas do pão, gradiente de pressão interno, num intervalo de tempo antecedente às descaracterizações das suas estruturas laterais, tratado como colapso das estruturas laterais, ligadas à adesão da panela. Parte das abordagens, no estudo, foram realizadas com análises de imagens de fatias do pão, usado como amostra, através Microtomografia computadorizada por raios X. E os ingredientes da constituição de pão foram farinha de trigo (matéria seca), sal, açúcar, óleo de colza, levedura comprimida (I.S.I., Lesaffre), de ácido ascórbico e de melhorador (Nutriox, França), que foram revolidos em um misturador espiral VMI SP10 (Montaigu, França). As análises das porosidades das amostras foram feitas com a aplicação da MicroCT, com o equipamento de microtomografia de mesa de alta resolução Skyscan 1174 (Bruker microCT, Kontich, Bélgica), configuração de nível de energia de pico de 50 kV e corrente constante de 800 mA. A porosidade das amostras foi calculada observando-se a textura da crosta e do miolo usando uma microtomografia de mesa de alta resolução Skyscan 1174 (Bruker microCT, Kontich, Bélgica). Utilizou-se um nível de energia de pico de 50 kV e uma corrente constante de 800 mA. As imagens foram reconstruídas e analisadas com o software NRecon (Bruker microCT, Kontich, Bélgica), para gerar as imagens 2D e 3D das estruturas do pão. Verificaram que um intervalo de tempo de espera do pão na panela, após o cozimento, aumenta o colapso do pão e que as variações de temperatura durante o cozimento e resfriamento podem ser fatores intrínsecos no colapso do pão, e também que um comportamento reológico da massa durante a sua formação, pode ser, também, responsável, mas que estudos nesse sentido merecem atenção.

TAN et al. (2016) mesclaram as aplicações das técnicas tomografia de raios X e microtomografia de raios X, MicroCT, como técnicas de capturas e formação de imagens, que foram reconstruídas em imagens 2D e 3D, respectivamente, associando softwares afins, para examinar e analisar a estruturas internas aeradas das espumas tratadas com ultrassom e suas “estruturas de bolo”. Usaram uma sonda de ultrassom de intensidade de 20KHz-400W (Digital Sonifier Modelo 450, Branson Ultrasonics Corporation, Danbury, Connecticut, EUA), no processo de tratamento das amostras com ultrassom. As amostras usadas foram compostas de soro de leite em pó, água destilada, açúcar, sal e farinha. As imagens obtidas,

das amostras de espuma e bolo, após todo o processo da aplicação da técnica de MicroCT, com a utilização de um sistema de microtomografia de mesa Skyscan 1172, foram digitalizadas. Após a etapa de aquisição de imagens, do processo, foram realizadas as reconstruções das mesmas, obtendo-se um conjunto de seções transversais planas 2D, por meio do software NRecon do sistema Skyscan e imagens 3D pelo software VGStudio MAX 2.2. Com a MicroCT visualizaram e diferenciaram os “efeitos das espumas e bolos de proteína de soro de leite” submetidos ao ultrassom, enquanto a tomografia computadorizada permitiu a visualização de toda a estrutura da amostra.

GUILLERMIC et al. (2017) formularam uma massa de macarrão contendo “farinha de trigo vermelha dura de primavera (feita a partir de uma mistura de variedades Canada Western Red Spring classificadas, CWRS)”, água e sal, seguindo critérios pré-estabelecidos, para preparação de macarrão para servir como amostra, com a finalidade de provarem que, as propriedades das bolhas de ar existentes em sua massa sofrem alterações, no processo de sua fabricação. Argumentaram ser a técnica de microtomografia de raios X, microCT, uma técnica eficiente para examinar e registrar processo de alterações das bolhas do macarrão no seu processo de fabricação. O que está de acordo com ( Babin et al., 2007 , Falcone et al., 2006 , Koksel et al., 2016a , Turbin-Orger et al., 2015 ), quando afirmaram que o método, microtomografia de raios X, tem sido usufruído com resultados positivos em “produtos massa de pão para medir de forma não invasiva a distribuição do tamanho das bolhas e sua evolução ao longo do tempo”. Realizaram os procedimentos experimentais, no processo de aquisição das imagens, com a aplicação da técnica empregada na linha de luz do Dispositivo de Inserção de Instalações de Terapia e Imagem Biomédica (BMIT-05ID-2 SOE-1) na Fonte de Luz Canadense (Saskatoon, Saskatchewan). Quanto as reconstruções, foram realizadas com o software NRecon na obtenção das “fatias ( $4000 \times 4000$  pixels) da amostra de massa de macarrão”. E para as análises das imagens utilizaram o “software de código aberto Fiji ( Schindelin et al., 2012 ), e os plugins “3D Object Counter” ( Bolte & Cordelières, 2006 ) e “BoneJ” Particle Analyzer ( Doube et al., 2010 )”. Constataram e concluíram com a aplicação da técnica e análises dos resultados, que o processo de “laminação aprisionam bolhas dentro da folha de massa”, avaliaram seus tamanhos e lhes classificaram de aspecto homogêneo.

LOMOLINO, et al. (2017), usaram um arranjo com análises de microtomografia de raios-X, associada com avaliação de textura e sensorial para especular as propriedades das estruturas do “pão ralado”, afim de avaliaram a qualidade de tipos específicos de pães assados

(“com einkorn milenar (*Triticum monococcum* L.) e trigo comum (*Triticum aestivum* L.)”). Afirmaram que o uso da microtomografia computadorizada de raios-X (microCT), ampliou os estudos de estruturas porosas, permitindo análises nos materiais em três dimensões, sem, no entanto, danificá-las. Citaram autores que foram bem sucedidos na aplicação desta técnica, MicroCT de raios X, nos estudos de “morango (Lim & Barigou, 2004 )”, “espumas extrudadas de biopolímero (Trater et al ., 2005)”, “amidos extrusados (Babin et al ., 2007 )”, “carne (Frisullo et al ., 2009 )” e “massa de farinha de trigo (Bellido et al ., 2006 )”.

VILAR et al. (2017) determinaram os volumes dos canais de amostras de dentes, seus volumes de tecido ósseo e volume ósseo, propriamente, através de um sistema de micro tomografia de raios X (MicroCT), (“Sistema de microtomografia de raios X para amostras pequenas e leves usando detector de tela plana”), que apresentaram como uma proposta incrementação, na aplicação do método, com o objetivo de torná-lo prático e eficiente com vistas à sua capacidade de executar tarefas com rapidez, agilidade e eficácia que ajudassem a otimizar o tempo e recursos. Com as propriedades da portabilidade e da possibilidade de ser aplicado, também, em algumas aplicações acadêmicas, na área biomédica e em pesquisas de algumas amostras de materiais diversos de baixo número atômico. Usaram o equipamento SkyScan 1173, para as aquisições que realizaram, com variadas configurações.

ZUOLO et al. (2017) selecionaram e depois digitalizaram 102 amostras de dentes incisivos inferiores, de um conjunto maior de dentes, em um aparelho Micro-CT (SkyScan 1173; Bruker-microCT, Kontich, Bélgica), com o objetivo avaliarem, por meio de análise de imagens de microtomografia computadorizada, a “frequência percentual de microfissuras dentinárias”, que por ventura viessem a ocorrer, em função do “preparo do canal radicular” com os sistemas TRUShape e Self-Adjusting File (sistemas com procedimentos invasivos para retiradas de materiais dos dentes, com equipamentos específicos, que assim são denominados). Usaram um outro grupo de dentes com o sistema rotativo de sequência completa convencional (BioRace) e um sistema de reciprocidade de arquivo único (Reciproc), (sistemas cujos procedimentos empregam instrumentos no processo de tratamentos dentários) como técnicas de referência para comparação. Escanearam, também, estas amostras antes e após a aplicação dessas técnicas, como parte dos procedimentos das avaliações. Concluíram, através das análises por MicroCT que os sistemas de preparação utilizados não fomentaram a formação de microfissuras nas amostras.

JEKLE, FUCHS e BECKER (2018) realizaram um estudo de investigação do “efeito metodológico da Análise de Perfil de Textura padrão na taxa de firmeza de migalhas de pão de trigo, com diferentes texturas iniciais”. Usaram como amostra um pão preparado com “farinha de trigo tipo 550 da Rosenmühle GmbH Landshut, Ergolding, Alemanha”, cujos critérios de produção foram seguidos em conformidades da Associação Internacional de Ciência e Tecnologia de Cereais (ICC) e com análise do teor de proteína pelo Método Kjeldahl (EBC), com a finalidade de investigar implicações da sistematização e dos procedimentos na metodologia padrão que afetem no comportamento de firmeza das migalhas de pão. Afirmaram que na metodologia padrão existe uma correlação direta e linear e relevante entre a “fração de vazios e a firmeza do miolo”. Mas, no entanto, configurações da massa e os comportamentos de firmeza podem, algumas vezes, não terem correspondências ou serem incertas. E a possível presença de materiais sólidos iguais de migalhas, influencia no aprisionamento ou expansão dos gases, no cozimento.

OLIVEIRA LIMA et al. (2019) distinguiram a forma estrutural do sistema de canais radiculares de molares mandibulares por meio de microtomografia computadorizada. Dispuseram de 104 primeiros molares inferiores. Usaram o equipamento de MicroCT (SkyScan 1173, Bruker, Kontich, Bélgica) para escanear as amostras. Obtiveram a área superficial e volume do canal radicular mesial pelo software “CTAn” e “CTvol” e usaram o software “NRecon” (v 1.6.1.0; Bruker, Kontich, Bélgica), para reconstruírem os arquivos de projeção em um conjunto de dados tridimensional. Puderam observar uma variabilidade morfológica significativa e que a configuração do canal radicular é altamente variável. A micro-CT mostrou uma alta visibilidade dos canais adicionais, além dos principais.

O. DE ARAÚJO (2019) propõe o emprego da técnica de microtomografia computadorizada de raios X, microCT, associado com simulação computacional de fluxo de fluidos, como uma metodologia de “caracterização e avaliação de amostras de rochas”, que tem como fundamento a utilização de diferentes volumes representativo do elemento (REVs) da amostra, em análise, por microCT.

SUN, et al. (2020) usaram a MicroCT de raios X síncrotron para investigar alterações causadas “nos parâmetros da fase gasosa”, de massas de pão, devido à redução de sódio no preparo da massa do pão, no processo de panificação. Prepararam a mistura da massa de pão misturando varinhas de trigo com concentrações de sal diferenciadas. Usaram um mixógrafo (National MFG. CO., Lincoln, NE, EUA). Caracterizaram a “distribuição de tamanho de bolha

(BSD)”, com experimentos de microtomografia de raios X síncrotron, nas linhas de luz Biomedical Imaging and Therapy BMIT-BM 05B1-1 e BMIT-05ID-2 na Canadian Light Source (Saskatoon, SK, Canadá).

CHEN et al. (2021) abordaram as mudanças estruturais no pão, no intervalo de tempo de seu armazenamento ambiente, com a aplicação da técnica de microtomografia computadorizada de raios X. A amostra submetida ao estudo foi o “pão” fresco, constituído de farinha de trigo, fermento, água e sal, ingredientes identificados de suas origens e cuja massa, composta de farinha foi preparada seguindo critérios de controle, segundo uma “receita”, que foi formatada, em pães que foram descansados e assados, resfriados e posteriormente postos em armazenamento, em condições constantes com parâmetros de controle adotados. No processo de aquisição das imagens, as amostras foram submetidas a um “scanner micro/nano-CT EasyTom XL Ultra 230-160 (RX Solutions, Chavanod, França).” Para a reconstrução das imagens, foi utilizado o software “X-Act CT (RX Solutions, Chavanod, França).” E as análises das imagens foram realizadas, 3D e 2D, foram realizadas com o software Avizo (ThermoFisher Scientific, Waltham, MA, EUA). Concluíram que ocorreu perda acumulativa, durante um intervalo de tempo de armazenamento, da massa do pão e, também, do seu volume, em função da perda da água. E que a MicroCT foi eficiente nas revelações das características e grandezas microestruturais do pão e suas modificações nas condições do estudo realizado.

GAO e ZHOU (2021) fizeram uma análise do “processamento oral do pão” e apresentaram um estudo resultante dessas investigações das características fundamentais que os produtos de panificação, os pães, devem apresentar com vistas ao atendimento das necessidades dos consumidores, no presente e no futuro. Concluíram esses estudos em que ressaltam os aprimoramentos para a reformulação do pão com benefícios para a saúde, não apenas os cuidados característicos das propriedades nos pães, para atenderem suas demandas, mudanças no comportamento do processo de ingestão, o processo mastigatório, como também, “os desafios do envelhecimento da população”. E como parte dos estudos realizados, mostraram “a estrutura tridimensional do miolo de pão reconstruída por microtomografia de raios X auxiliada por computador (A imagem 3D da crosta do pão é reproduzida por van Dyck et al. (2014) com permissão da Elsevier, Copyright 2014.)” (Gao e Zhou, 2021).

GERMISHUYS e MANLEY (2021) produziram um pão à base de farinha de trigo torrada para o estudo que realizaram da avaliação da estrutura da “bolha da massa liofilizada

e as propriedades do espumado pão, com a aplicação da técnica da microtomografia de raios X (MicroCT). O que justificam citando ( Withers et al., 2021 ), quando afirmaram que a MicroCT é “uma técnica não invasiva que tem a capacidade de produzir imagens tridimensionais (3D) de alta qualidade”, (Withers et al., 2021). E afirmaram ainda, citando ( Schoeman, Williams, du Plessis, & Manley, 2016), que a técnica de MicroCT fornece dados que são usados para “obter imagens transversais que podem ser usadas para gerar uma representação tridimensional (3D) da amostra”. Para o preparo das massas liofilizadas e os mini pães, os ingredientes utilizados foram água, farinha, sal, açúcar, farinha de soja, ácido ascórbico e “ $\alpha$ -amilase fúngica”, gordura vegetal e levedura que foram misturados e manipulados seguindo uma metodologia escolhida. As aquisições de imagens de microtomografia computadorizada de raios X, MicroCT, foram realizadas através de um sistema de tomografia computadorizada de raios X de alta resolução da “General Electric Phoenix V|Tome|X L240 (General Electric Sensing & Inspection Technologies GmbH, Phoenix, Wunstorff, Alemanha)”. Os processamentos das imagens para as suas reconstruções, visualizações e análises, bidimensionais e posteriormente os seus volumes e as extrações dos volumes de interesses foram realizados com os softwares de reconstrução pelo sistema “(Datos | x® 2.1, General Electric Sensing & Inspection Technologies GmbH, Phoenix, Wunstorff, Alemanha)” e o software “Volume Graphics VGStudio Max 3.1 (Volume Graphics GmbH, Heidelberg, Alemanha)” (GERMISHUYS e MANLEY, 2021). Dentre as conclusões oriundas das observações realizadas na pesquisa destacaram, “a diminuição da espessura da haste do pão produzido a partir da farinha de trigo torrada” e o “aumento de porosidades para todas as amostras de tratamento”. E “uma melhoria nas propriedades de espuma do pão em termos de finura e textura do miolo”.



## 3. Fundamentação Teórica

O capítulo presente expõe os pressupostos teóricos e as fundamentações teóricas da Microtomografia de raios X, sua etimologia, fatos históricos antecedentes ao seu surgimento, com seus protagonistas, seus relevantes conceitos, a metodologia empregada na sua aplicação, o arranjo do Sistema Microtomografia Computadorizada de Raios X (SMicroCT) e os parâmetros básicos das estruturas das amostras utilizadas.

### 3.1 Microtomografia Computadorizada de Raios X (MicroCT)

A microtomografia computadorizada de raios X (MicroCT) é uma técnica, com alta resolução espacial, 3D, para caracterizar de forma não destrutiva a microestrutura de materiais, em nível de micron (LANDIS E KEANE 2010).

#### 3.1.1 O termo Microtomografia Computadorizada ou “MicroCT”

O termo Microtomografia Computadorizada ou “MicroCT”, é apropriado para designar a técnica de Microtomografia Computadorizada de raios X, como uma técnica de investigação micrométrica de estruturas de materiais. Formado pela composição de duas

palavras. A primeira que vem do grego “Mikros”, pequeno e, também designa unidade de medida, a milionésima parte, representado por “ $\mu$ ” ( $10^{-6}$ ). E a segunda palavra, vem das iniciais da tradução, do termo da língua inglesa de Tomografia Computadorizada (“computed tomography”), assim tem-se MicroCT, mCT ou “ $\mu$ CT”, cujo significado está atribuído a uma técnica científica de investigação na ordem de grandeza da milionésima parte, através dos raios X: “A microtomografia computadorizada de raios X”.

### **3.1.2 Pressupostos Teóricos Históricos da Microtomografia Computadorizada de Raios X (MicroCT)**

O século XIX foi muito promissor em diversas áreas para a humanidade, com diversas descobertas e revelações da genialidade. Mas, especialmente na Física tivemos personagens cientistas com grandes impactos que caracterizaram transformações na Ciência: Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), Antoine Henri Becquerel (1852-1908) e Marie Salomea Sklodwska-Curie (1867-1934) e Pierre Curie (1859-1906). O primeiro agraciado com o Prêmio Nobel de Física, em 1901, pela descoberta dos raios X, o segundo, também, agraciado com o mesmo prêmio, em 1903, pela descoberta da radioatividade, que o dividiu com a terceira, Marie Curie, conjuntamente com seu marido, Pierre Curie (MARTÍNEZ-REINA, AMADO-GONZÁLEZ, 2013), com quem aprofundou-se no estudo da radioatividade e descobriram os elementos Rádio e Polônio.

Com a descoberta dos raios X, em 8 de novembro de 1895, por Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923), que foi laureado com o primeiro “Prêmio Nobel” de Física de 1901 (NOBEL LECTURES, 1901-1970), uma nova dimensão das pesquisas científicas foi alcançada pela comunidade científica e a humanidade, como foi anunciada na ocasião, de apresentação da referida premiação no discurso feito pelo presidente da Royal Swedish Academy of Sciences, (ODHNER, C.T. 1901), na época, ao afirmar: “E não há nenhuma

dúvida que a ciência física ganhará muito sucesso quando esta estranha forma de energia for suficientemente investigada e seu amplo campo completamente explorado”. E ainda, acrescentou que “... tomando-se um desenho da sombra disto sobre uma placa fotográfica...”. Neste discurso percebe-se, variadas possibilidades futuras com a descoberta e um pré-anúncio do surgimento da produção das primeiras de imagens por Raios-X, como exames diagnósticos.

Já no Século XX, durante a “Primeira Guerra Mundial”, um sistema de radiografia portátil, o qual produzia imagens por raios X, como exame diagnóstico, foi usado por Marie Salomea Sklodwska-Curie, quem conquistou, também, o Prêmio Nobel em 1911, sendo desta vez em Química. Assim àquele emprego da técnica, pela Medicina, do uso de imagens, produzidas por raios X, foi aplicado, também, em benefício dos combatentes daquela guerra, concretizando o que fora anunciado em discurso na ocasião da entrega do primeiro Prêmio Nobel de Física.

Assim a afirmação de que “A descoberta de X-Ray em 1895 foi o início de uma mudança revolucionária em nosso entendimento do mundo físico” (ASSMUS, A.,1995), estava alinhada com os avanços científicos, que se sucederam nos anos seguintes, através de diversos pesquisadores, decorrentes dos efeitos das emissões de radiações, , como a descoberta da radioatividade e, especialmente em 1899, com as publicações de que o “tório” era um emissor de radiações e a descoberta dos elementos químicos “polônio” e “rádio”, (MARTINS, R. de A.,1990).

Fazendo-se uma progressão, desde então, à atualidade, no tempo e na história da Ciência, podemos perceber, numa grande proporção, os avanços e a otimização no arranjo de elementos envolvidos, num sistema de obtenção de imagens por raios X, comparando-se às suas primeiras imagens radiográficas, ao que alcançamos atualmente. Que são os elementos de fonte emissora de raios X, o objeto em que os raios são propositalmente incidentes, o tipo de anteparo de registro das radiações ou de sua ausência e os sistemas de software e hardware. O resultado desta otimização é materializado pelo sistema que compõe a tomografia computadorizada, isto é, a tomografia de raios X, o que num intervalo de tempo muito pequeno originou a microtomografia computadorizada de raios X, ou MicroCT.

Em resumo temos que, em “History of Computed Tomography”, (BULL,1980) afirmou que Godfrey Newbold Hounsfield (1919-2004), engenheiro da EMI Ltda., Inglaterra, deu um “passo revolucionário” quando reuniu três elementos necessários para o advento da tomografia computadorizada: o fenômeno da cintilação de determinados cristais, quando expostos aos raios X, a eletrônica associada e o uso dos computadores. Quem, por sua

trajetória perseverante em seus estudos, experimentações e trabalhos, anunciou durante a realização do Congresso Anual do Instituto Britânico de Radiologia (British Institute of Radiology, em Londres, abril de 1972), os seus resultados experimentais, as suas primeiras imagens resultantes das pesquisas que realizou, com um de seus colaboradores, James Ambrose, como afirma (CARVALHO, 2007): “Após várias imagens experimentais com peças e animais, foi feita a primeira imagem diagnóstica, em uma paciente selecionada pelo Dr. Ambrose, com suspeita de tumor no lobo frontal esquerdo, ainda não confirmado.” Assim estava instituído uma nova metodologia científica de exame diagnóstico como foi reportado por (CARVALHO, 2007): “Ambrose e Hounsfield, em 1972, apresentaram um novo método de utilização da radiação para medir descontinuidades de densidades, obtendo imagens, inicialmente do cérebro, com finalidades diagnósticas”. O que foi chamado, inicialmente, princípio de Hounsfield. Ficando então, claramente demonstrado que o princípio de Hounsfield tinha uma aplicação clínica (BULL, 1980).

No entanto, aquele tipo de imagem tinha limitações de visualizações de alcance às regiões de interesse nas amostras em questão. E com este, a tomografia computadorizada, estas limitações foram rompidas com o avanço de mais uma outra dimensão investigativa. Uma vez que a tomografia computadorizada registra e combina “informações de uma série de imagens 2D de absorção de raios X registradas à medida que o objeto é girado em torno de um único eixo” (LANDIS e KEANE, 2010). No entanto, deve-se observar que, na aplicação da medicina, com a tomografia computadorizada a fonte de raios X e o detector giram em torno do objeto (paciente) que fica parado. Ressalta-se que a geometria do arranjo do sistema de tomografia computadorizada dos sistemas convencionais, pode ficar limitada levando-se em conta as características do feixe de raios X e do detector. Pois, há uma relação entre as dimensões da fonte de raios X e a resolução da imagem projetada, pois, quanto menor as dimensões da região da fonte emissora, melhor será o resultado da imagem projetada (LANDIS e KEANE, 2010).

A descoberta dos raios X, significou um marco fundamental, em exames diagnósticos por imagens à medicina, inicialmente. E tendo decorridos 128 (cento e vinte oito) anos, tal descoberta, cuja aplicação no processo de registros de imagens de um determinado material, através de emissões dos raios X, incidindo sobre ele, em função de sua densidade, que gerou a radiografia de projeção convencional, foi um primeiro passo para a tomografia computadorizada. Em adição, sucedeu-se um imenso progresso, em todo o processo pós-

descoberta, através dos anos que se seguiram, nas diversidades das inovações, como o que temos hoje a microtomografia computadorizada de raios X.

Durante a década de 1970, vários estudos foram desenvolvidos em diversas áreas e na de radiologia, num aperfeiçoamento da radiografia convencional para uma radiologia digital, especificamente o advento da técnica de reconstrução digital de imagens tomográficas, pelos pesquisadores Allan M. Cormack (1924 – 1998) e Godfrey N. Hounsfield que receberam, conjuntamente, o Prêmio Nobel de Fisiologia ou Medicina de 1979, pelo desenvolvimento da tomografia assistida por computador (BOERCKEL et al., 2014).

Com as necessidades de investigações de materiais em outras áreas, tais como na nanotecnologia e engenharia de materiais em microescalas, novos estudos foram direcionados para o desenvolvimento de tomógrafos que atendessem às novas demandas. Assim o desenvolvimento de tomógrafos, por pesquisadores, que pudessem fornecer imagens em dimensões microestruturais com alta resolução espacial, 3D, (STOCK, 1999), foi fomentado para as novas necessidades de investigação de materiais. Destaca-se, neste desenvolvimento, nos anos de 1980 o físico Lee Feldkamp (1942-2021), quem desenvolveu o primeiro Microtomógrafo destinado para análises de imperfeições nas estruturas de materiais automotivos (BOERCKEL et al., 2014). E a partir de então, foi o responsável pela ampliação e adequação das metodologias clínicas de Tomografia Computadorizada, com adaptações à uma nova metodologia clínica, quando elaborou o algoritmo de feixe cônico para o processo de reconstrução de imagens em três dimensões.

Como resultado de todos os estudos e pesquisas realizadas no âmbito das técnicas de produção de imagens investigativas, ao longo dos anos que se seguiram e até nos dias de hoje muitas de suas aplicações foram introduzidas na Ciência por meio de tecnologias, em forma de diversos equipamentos, como o Microtomógrafo utilizado em nosso estudo.

### **3.1.3 Bases Teóricas Físicas da Microtomografia de Raios X (MicroCT)**

Através de seus estudos, Roentgen descobriu os raios X em 1895. Assim denominados por ele, que verificou que os raios X possuíam as propriedades físicas de que podiam atravessar materiais opacos a luz, que eles podiam escurecer “placas fotográficas”, produziam ionização de um gás o qual atravessavam e propagavam-se em linha reta e não eram desviáveis por campos elétricos ou magnéticos. O surgimento dos raios X ocorre quando, na presença de um campo elétrico, os elétrons são acelerados no sentido de um alvo metálico com o qual

colide e como consequência da colisão os raios X são produzidos, isto é, é parte da energia do evento que é transformada em energia eletromagnética, enquanto a outra parcela de energia transforma-se em energia térmica. Por (KAPLAN, 1962) temos que, os raios X são produzidos por colisão de raios catódicos com um alvo sólido, com poder de penetração cujo alcance, em uma dada substância, depende da sua natureza, e da substância (KAPLAN, 1962). Já (EISBERG, 1986) afirma que a frenagem dos elétrons pelo material do alvo, produz a emissão de radiação eletromagnética. Sendo a energia transformada do processo de colisão dos elétrons, com um alvo metálico, após o que eles sofrem uma desaceleração.

A interação da radiação homogênea com a matéria, é regida pela equação (3.1), relacionando-se as suas intensidades, incidente e a transmitida através do material.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.1)$$

Onde tem-se que,  $I$  intensidade, após atravessar a espessura,  $x$ , do material,  $I_0$ , é a intensidade do feixe incidente no material,  $\mu$ , é uma constante, para cada material denominado coeficiente de absorção, dependente do material e da radiação incidentes. A característica do material de absorção depende da densidade e tipo de átomos na trajetória do feixe.

A absorção atômica diminui à medida que a energia dos fótons de raios X aumenta (o comprimento de onda diminui), exceto nas proximidades das “bordas” de absorção de raios X que são características de cada elemento atômico. Em geral, para uma energia fixa de fótons de raios X, os elementos com número atômico,  $Z$ , inferior (menos elétrons) absorvem menos do que os elementos com  $Z$  superior (LANDIS e KEANE, 2010).

Os princípios físicos básicos da Microtomografia Computadorizada de Raios X são os da física de absorção de raios X.

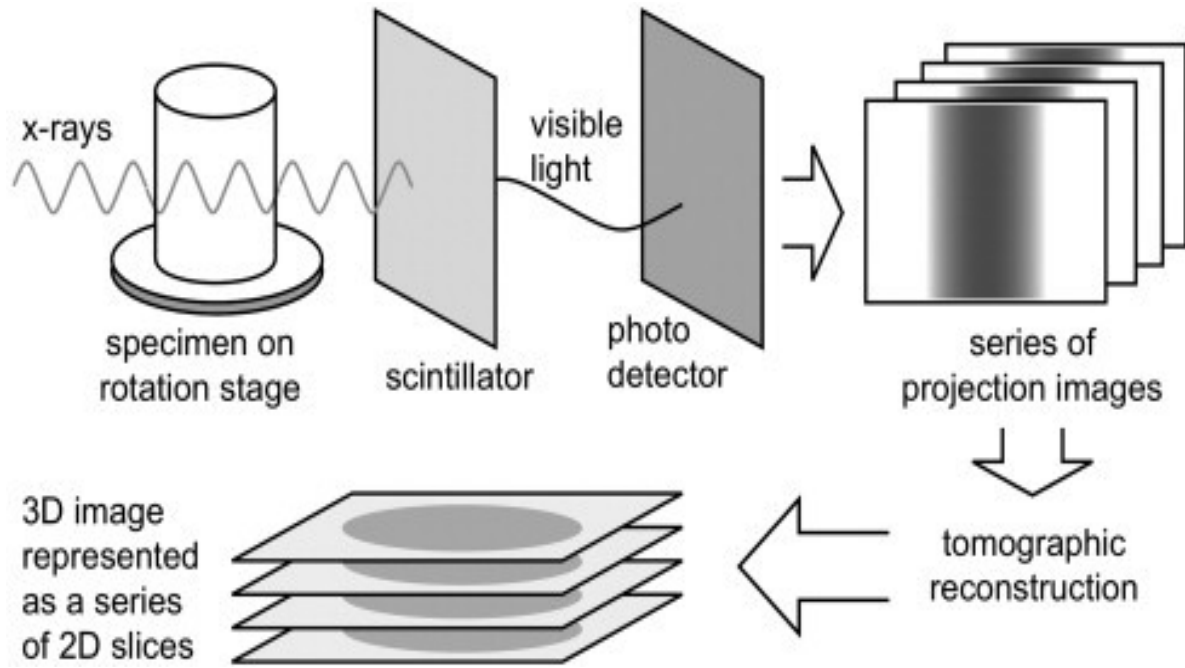
Assim sendo, são os mesmos princípios básicos regentes do processo de formação das imagens de projeção em duas dimensões associados aos cálculos necessários para a construção da imagem de um volume, a partir do conjunto das imagens obtidas de projeção em duas dimensões. Em que as imagens adquiridas são reconstruídas, e cujos dados obtidos são utilizados para produzirem uma imagem digital tridimensional, com o conjunto dos elementos de volume, ou pixel 3D, representando o ponto da amostra que sofreu a absorção de raios X, que tem uma relação direta da sua densidade.

Sabemos que às aplicações da técnica da tomografia computadorizada tiveram como alvos às aplicações para a medicina, mas as suas possibilidades de investigações de estruturas internas dos demais materiais direcionaram suas aplicações a outras áreas. E com isso, houve

um avanço nas pesquisas para melhorias dos equipamentos que pudessem fornecer, com a aplicação do método, melhores imagens em materiais de diferentes densidades. Convencionalmente o funcionamento nos tomógrafos de raios X, os elétrons eram acelerados em direção a um alvo para produzirem a radiação. O advento da aquisição de radiografias 2D requisiu cintilação apropriada, para transformar a radiação dos raios X em luz visível, e fotodetectores para elaborar uma imagem digital (LANDIS e KEANE, 2010). De uma maneira geral, nos dispositivos de microtomografia de raios X, a energia eletromagnética obtida, raios X, é resultado das interações que seguem os mesmos princípios físicos, já descritos acima, onde ocorre a transformação de uma forma de energia em outras, produzindo de energia eletromagnética e energia térmica.

A onda (fótons) incidente no material, pode passar parcial ou totalmente através dele. A absorção dependerá das características elementares dos raios X e do material (coeficientes de atenuação) incidente. E no caso da transmissão, através de um elemento deste material, ou em todo ele, ocorrerá em obediência à “lei de Beer-Lambert” (DE ARAÚJO, 2019).

De uma forma básica pode-se conceber através de uma representação esquemática e planificada a aquisição e a reconstrução que são etapas do processo de obtenção de uma imagem tridimensional através de um sistema de microtomografia computadorizada de raios X, como está, na figura I, de forma adaptada, a representação de um croqui, de um processo de obtenção de uma imagem tridimensional. Em que são obtidas imagens de projeção de raios X, em fatias 2D e, reconstruídas, metodicamente, para a produção de imagem 3D. Um esquema bem ilustrativo pode ser considerado como o da figura 1.



**Figura 1- Representação de um croqui do processo de obtenção de uma imagem tridimensional. São obtidas uma série de imagens de projeção de raios X, fatias 2D, reconstruídas metodicamente para produzir uma imagem 3D (adaptado de LANDIS e KEANE, 2010).**

Com o uso da técnica de microtomografia de raios X aplicada à diversos materiais, com diversos coeficientes de atenuação, numa mesma amostra, há a necessidade de que as fontes sejam policromáticas, tenham uma variação de energia  $\Delta E$  ( $0 < \Delta E < E_{m\acute{a}x}$ ). Em função dessas características, abrangendo-se todos os possíveis caminhos de cada incremento das estruturas dos materiais da amostra a equação (3.1) fica representada adequadamente de acordo com a equação (3.2), em que o termo  $E$  representa a energia dos raios X e a atenuação linear para ou substâncias compostas é calculado por  $\mu(x, y, E)$ .

$$I = \int_0^{E_{m\acute{a}x}} I_0 e^{[-\oint \mu(x,y,E) dl]} dE \quad (3.2)$$

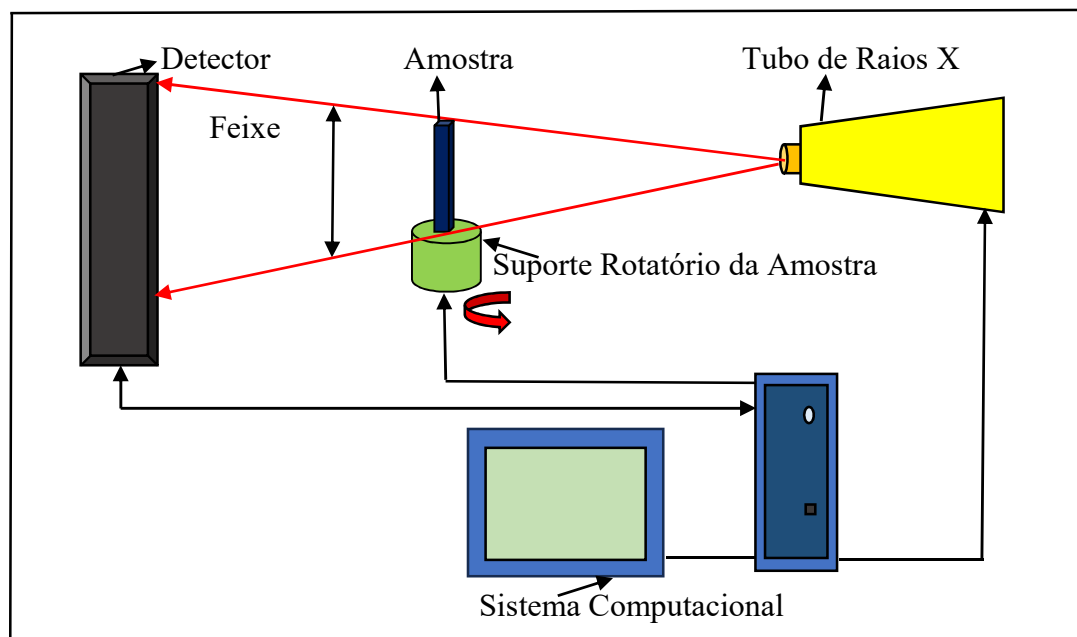
### 3.1.3.1 Princípios de Funcionamento da Microtomografia Computadorizada de raios X



Para um esquema básico de aquisição de imagens, em microtomografia Computadorizada de Raios X, tem-se que ter de forma metódica, articulada e interativa, um arranjo com os seguintes elementos: uma fonte, emissora da onda eletromagnética (raios X), o material com quem a onda incidirá, que é a amostra de análise, um detector, material registrador e um espaço mensurável entre esses elementos básicos. No caso do Sistema de microtomografia Computadorizada de Raios X, com seus componentes principais, ele é constituído, basicamente, por: sistema computacional, tubo emissor micro focal de raios X, o colimador, o suporte para a amostra e o detector de raios X, que pode ter acoplado um detector de cintilação e um dispositivo de carga acoplada (CCD) (BOERCKEL et al., 2014) (Figura 1). As ondas eletromagnéticas, na forma de raios X, são formadas no emissor microfocal de radiação, são direcionadas para a amostra em investigação, e esta atenua parte dessas ondas incidentes, em concordância com as propriedades características do material que compõe a amostra, e outra fração do feixe de ondas é transmitido através do material e atinge o detector de cintilação (CLARK; BADEA, 2014).

No detector de cintilação ocorre a transformação da radiação transmitida em luz visível (fótons) e identificada pelos detectores de dispositivo de carga acoplada (CCD) para a conversão indireta dos fótons de raios X em carga elétrica, sinal eletrônico, que é digitalizado e enviado ao computador, onde os dados são processados (HOLDSWORTH; THORNTON, 2002; LI et al., 2008). O elemento pixel, da imagem adquirida no escaneamento, representa uma média de absorção dos fótons pelo detector de cintilação (QUEIROZ et al., 2019). Neste processo, para a reconstrução da imagem tridimensional, o pixel é transformado em voxel, unidade tridimensional capaz de representar a profundidade na imagem microtomográfica (LOPES et al., 2012).

Um tipo de representação esquemática de um Sistema de Microtomografia computadorizada de raios X pode ser visto na figura 2, o qual representa, basicamente, o sistema adotado em nossa pesquisa. Para reconstrução microtomográfica, imagens de raios X são adquiridas em um número de visualizações de rotações em até 360°. Todo o conjunto do sistema é composto por processo de digitalização que é regido por um sistema de software e hardware, que pode realizar a reconstrução microtomográfica (com um algoritmo específico), o processamento e análise das imagens de raios X, visualizações 2D e visualizações 3D com possibilidades diversas de vistas e cortes das imagens das amostras na tela.



**Figura 2- Esquema ilustrativo do Sistema de Microtomografia Computadorizada.**

### 3.2 Feixe de Raios X

Um feixe de raios X é o conjunto de raios X, chamados coletivamente de radiação (KAPLAN, 1962), por ser um conjunto de raios X. O seu formato geométrico oferece vantagens nas análises das amostras sob sua varredura, por exemplo não permite a perda de informações da amostra à varredura sofrida por ele, o que impacta diretamente na reconstrução espacial da imagem da amostra, e não apenas planificada. A amostra posicionada fixa, sobre a base rotatória, que rotaciona em  $360^\circ$ , entre o canhão de raios X e o detector, obedecendo o parâmetro do passo angular, pré-estabelecido. A consequência desta dinâmica rotacional, associada às aquisições e a reconstruções em conjunto com a um algoritmo, como por exemplo o de Feldkamp, (de ARAÚJO, 2019) propriamente para este tipo de feixe, permite obter imagens de dimensões micrométricas das amostras, de uma parte selecionada ou de toda ela, que ficou sob o feixe cônico. Outro exemplo de algoritmo é o de Hoshen-Kopelman (WANG, Shuo et al, 2011), que pode ser usado como parte da análise de pão.

### 3.3 Fundamentos da Aquisição e Reconstrução de Imagens

No sistema de microtomografia computadorizada (microCT) com a amostra sob a varredura do feixe de raios X, iniciado o processo de análise da amostra, tem-se uma das etapas do processo de formação tridimensional das imagens, a aquisição. A configuração do sistema preestabelecida será capaz de permitir a produção de imagens em alta resolução de grandes (relativamente), médias ou pequenas amostras. No caso de uma fonte pontual, que resulta o tipo de feixe cônico ou na forma de “leque”, as dimensões da fonte de raios X é um fator relevante na configuração do sistema para a obtenção da imagem.

A formação da imagem da amostra, neste processo, é regida pelos mesmos princípios físicos de atenuação dos raios X pelos materiais (MACHADO et al., 2014), em função dos seus átomos e do seu arranjo molecular. O feixe de raios X, oriundos dispositivo emissor de radiação incide sobre a amostra, realizando um escaneamento de varredura e de acordo com o arranjo molecular que constitui o material da amostra, uma fração do feixe de radiação é transmitida através da amostra e outra fração é atenuada. A fração do feixe que é transmitida através da amostra atinge e interage com o detector, ocorrendo o registro da radiação. Esses registros são o conjunto de dados que serão convertidos em informações para a formação da imagem.

A reconstrução é uma outra etapa, seguinte à aquisição, para se obter a imagem, cujos dados que foram adquiridos na etapa anterior, são transformados em informações, através de algoritmos, para sua análise. Conforme afirma (BUZUG, 2008) em “*Computed Tomography From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT*”, a melhoria na qualidade da imagem dependerá de uma matemática de reconstrução sofisticada. Nesta obra ele apresenta toda formalização matemática do processo de reconstrução de imagens. Onde apresenta a Transformada de Fourier em função de sua relevância no âmbito do processamento de sinais para a tomografia computadorizada. E apresenta que, para definir a transformada de Radon no espaço tridimensional, é necessário estudá-la como linha de integração, em uma dimensão, definida ao longo do feixe de raios X e convertida em uma superfície, em duas dimensões. Posteriormente, faz-se as conversões das integrais de projeção em integrais de superfície.

A microtomografia computadorizada de raios X fornece uma quantidade considerável de dados da ordem de gigabytes. Os algoritmos matemáticos de reconstrução, específicos, tratará as projeções bidimensionais e promoverá a obtenção do modelo tridimensional da imagem. Segundo (BAIRD; TAYLOR, 2017), a técnica de MicroCT proporciona a

reconstrução de imagens tridimensionais, a partir associação de centenas de secções transversais da aquisição de imagens, do material investigado.

Todo este processo de captura e análise tem sua origem inicialmente nos bytes (caracterizado pelo espaço de armazenamento de uma imagem digital, contendo oito bits), pixels (corresponde a medida de um centésimo da polegada, comporta o conjunto de três bytes) e voxel (é combinação de "volume" e "pixel" onde o pixel é uma combinação de "imagem" e "elemento".) que são os elementos formadores da imagem em 3D.

### **3.4 O Tecido Esponjoso do Pão Industrializado**

O tecido esponjoso de determinados materiais orgânicos como o tecido ósseo é formado com espaços vazios e de matéria sólida, os poros e redes de ligação ou limitação e contenção desses espaços vazios, podem ser chamados de trabéculas, que por sua vez podem ser denominados de células de um conjunto. Alguns outros materiais não orgânicos podem apresentar as configurações de sua constituição semelhantes a um tecido esponjoso. E encontra-se na literatura científica, da ciência dos materiais, a caracterização de que poros interligados entre si, através de uma rede interconectada, podem ser caracterizados como uma estrutura de células abertas (RATHNAYAKE, NAVARATNE, NAVARATNE, 2018).

Assim a rede celular que compõe o pão já foi caracterizada por diversos autores de várias formas, por suas propriedades e semelhanças a outros tipos de tecidos. (CHEN et al., 2021) citando ( CAUVAIN, 2012 ; RATHNAYAKE et al., 2018 ) afirma que o pão pode ser considerado uma espuma sólida de células abertas, constituído basicamente de duas partes, uma fluídica, que contém ar e outra sólida, com os demais componentes.

Afim de atender às demandas reológicas do pão, o seu processamento passa por fases que vão desde as escolhas dos seus ingredientes, o preparo da massa ao seu processo de assadura. O conjunto de todas essas etapas de sua preparação influencia nos tamanhos e formas dos poros, conseqüentemente, em suas conectividades, que são heterogêneas, o que caracteriza a estrutura resultante, isto é o seu tipo de composição tecidual, pós assado. Ressalta-se que mesmo após todo o processamento do pão, as condições de seu armazenamento influenciarão nas suas características. (CAUVAIN, 1998) afirma que as alterações na natureza físico-química do amido de trigo durante o armazenamento são um importante fator que contribui para a mudança no produto.

A massa do pão foi qualificada por (WANG et al., 2011) como uma espuma que tem sido objeto de estudo e que suas propriedades da estrutura como a textura são características influenciadoras da percepção no manuseio e mastigação. E nesta direção o miolo de pão foi caracterizado por (ELGETI, et al., 2015) como um tecido esponjoso alimentar.

### 3.4.1 Porosidade

A porosidade da massa do pão foi identificada por (SHEHZAD et al., 2010) fração de vazio, " $F_v$ ", em suas pesquisas quando analisavam a porosidade e a estabilidade da massa de pão durante etapa de fermentação na sua preparação. E em concordância na denominação, segundo (JEKLE, et al, 2018), classifica-se a parte interna do pão, considerada como “poro” de: “A fração de vazio, “ $\alpha$ ” (ou porosidade, pois o pão tem fase de ar contínuo) do miolo sem crosta (ou fração de área)”. De uma maneira geral, encontra-se na literatura grandezas escalares que caracterizam os “poros”, para melhor caracterizar a constituição estrutural e a forma do tecido de que é composto por ele. São essas grandezas o “diâmetro de poros”, a “área de poro”, o “volume de poros”, a “conectividade”, a “densidade de conectividade” e o “número de poros”. Relaciona-se a área do poro com a área total, classificando como sendo a área do poro a soma de todos os “poros” e a área total como sendo a área de interesse a ser analisada.

Assim pode-se calcular o poro, como fração de vazio, sendo a relação entre a soma de todos os poros dividida pela área total, ambas da área de interesse. Analogamente, considerando-se nas regiões de vazio como de volumes de poros, da região de interesse, " $V_p$ ", e volume total da região de interesse, " $V_t$ ", e a fração unidade de volume de poro, de “ $\alpha$ ”, em que esta fica representada pela equação (3.3).

$$\alpha = \frac{V_p}{V_t} \quad (3.3)$$

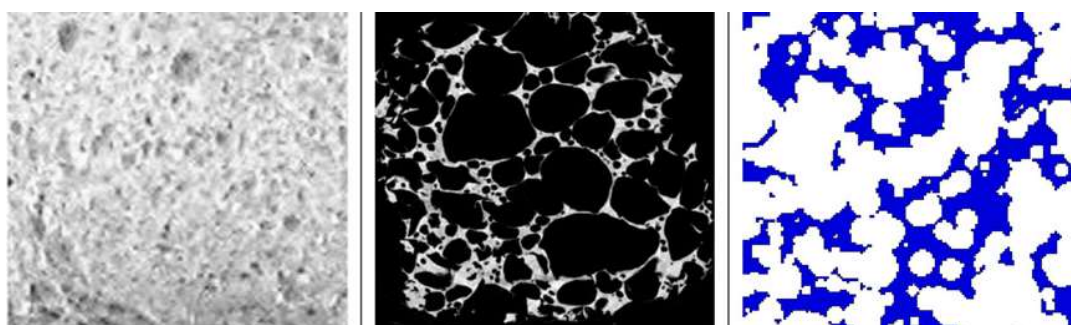
De forma generalizada (CHEN et al.,2021) afirmam que porosidade é a razão do espaço aberto no material, pelo volume total do material e, no caso específico para o pão, ela corresponde o volume total dos poros no pão.

É a porosidade um parâmetro fundamental no pão, pois ela pode indicar o tipo de pão, sua textura, sua densidade relativa em função de outros tipos de pães e/ou massas, sua qualidade e até mesmo a atratividade e a escolha do consumidor, pois, é um fator que obviamente facilita a sua mordida, a mastigação e a ingestão (ELGETI, et al., 2015). E é o número e distribuição de tamanho de poros que diferem nos tipos de pães. Este parâmetro é tão importante que tem uma relação direta com as propriedades mecânicas do par poro-trabécula. E estas são fundamentais da massa de farinha de trigo, vindo a afetar o comportamento de manipulação da massa e influenciam seus componentes (UPADHYAY, R., 2014).

### 3.4.2 Trabéculas

Para cada área de aplicação o termo “trabécula” pode apresentar nuances no seu significado, no entanto, sua etimologia e funcionalidade (de sustentação, conectividade ou parede) não variam, de acordo com (LIU, et al., 2012), pode ser considerado como uma haste de sustentação, formando uma rede de sustentação ou trabéculas.

Assim as paredes, da formação dos poros, nos miolos do pão industrializado, que os envolvem podem ser consideradas como trabéculas do tecido esponjoso, que são partes integrantes fundamentais do volume total,  $V_t$ , da região de interesse, do pão industrializado. Como está ilustrado na Figura 3.



**Figura 3 –Da esquerda para a direita fotos onde pode-se observar do macro ao micro poros e/ou trabéculas (adaptado de WANG et al, 2013).**

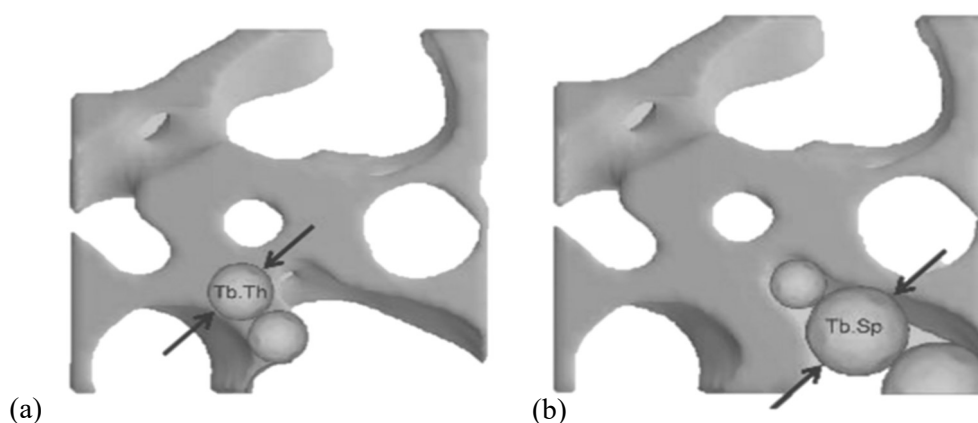
Os tipos de poros presentes na região de interesse do pão industrializado caracterizam-se pela variedade de formas (com semelhanças ao tecido esponjoso ósseo); tamanhos; suas

quantidades; seus arranjos de conectividades (como apresentam) e suas sustentações por meio de suas trabéculas.

### 3.5 Mensurações Aplicadas aos Poros

Sendo a porosidade um parâmetro fundamental do pão, ela exerce uma função fundamental na sua caracterização. Assim sendo podem-se quantificar algumas grandezas fundamentais e grandezas derivadas relacionadas a eles, tais como: área, densidade absoluta, densidade relativa, diâmetro, volume, larguras e espessuras das suas paredes (trabéculas) e ainda, os aspectos de números de suas conectividades e de sua quantidade, por áreas de interesse (WANG et al., 2011).

De acordo com a figura 4, pode-se empregar uma ou mais metodologias específicas, apropriadas, para a obtenção dos resultados de mensuração dos poros. Utilizamos nesta pesquisa um método de ajuste de esferas, “Sphere Fitting Method” (BOUXSEIN, 2010) para quantificar as espessuras ou grossura e a separação de estrutura. Que consiste, fundamentalmente, em uma comparação espacial, onde os espaços vazios são preenchidos com esferas de diâmetros conhecidos, através dos voxels contidos nos espaços vazios. Em que os parâmetros de espessura trabecular média (Tb. Th) e a separação trabecular média (Tb. Sp) e o número de trabéculas precisam ser embasados em cálculos tridimensionais.



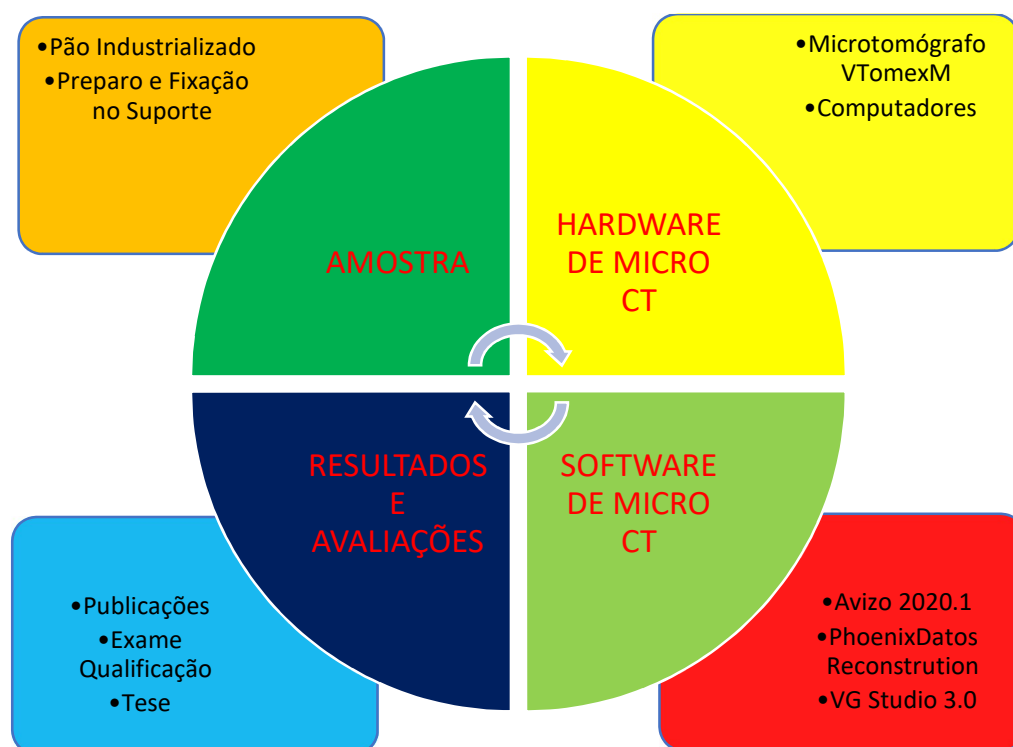
**Figura 4 - Representação esquemática do encaixe da esfera, uso do algoritmo para método 3D direto: (a) espessura da estrutura do pão e (b) estrutura de separação. Onde (Tb. Th) é espessura trabecular média e (Tb. Sp) é a separação trabecular média (adaptado de ODGAARD et al, 1993).**

## 4. Materiais e Métodos

Neste capítulo são apresentadas as amostras, com suas identificações, a metodologia empregada, a configuração do sistema de MicroCT, seus componentes, suas configurações, as etapas de formação das imagens obtidas.

A metodologia empregada na pesquisa é sistematizada através do diagrama da figura 5.





**Figura 5 – Diagrama da Sistematização empregada na Pesquisa**

Partindo do segundo quadrante, tem-se: No Segundo quadrante, na cor verde escuro, está representando o dado de entrada que corresponde a matéria prima, objeto de pesquisa (AMOSTRA), o pão industrializado, que foi preparado, preservado e disposto adequadamente fixo no suporte giratório de amostras, a “amostra” propriamente dita.

No primeiro quadrante, na cor amarela, tem-se todos os recursos materiais tecnológicos, sistema de MicroCT (HARDWARE DE MICRO CT), necessários para submeter a amostra, e computadores para estratificar, analisar e avaliarem os dados do processamento.

No quarto quadrante, na cor verde claro, tem-se as linguagens de comunicação (programação) e algoritmos entre a “Amostra” (SOFTWARE DE MICRO CT) empregadas nos processos aquisição, tratamentos de quantificação e qualificação de dados e reconstrução das imagens e estratificação das informações obtidas.

No terceiro quadrante, na cor azul escuro, tem-se a materialização de todo processamento do ciclo, nas suas diversas etapas (RESULTADOS E AVALIAÇÕES).

#### **4.1. Caracterização das Amostras**

A amostra, objeto de nosso estudo, é o pão industrializado de forma. Que é conhecido como pão de forma de sanduíche, encontrado comercialmente nos supermercados e nos comércios de pães, de médio e grande portes. Dois, dos seus diversos tipos foram selecionados, por serem os mais comumente consumidos, que são o “Pão Industrializado Tradicional” (PIT) e o “Pão Industrializado Integral” (PII), pois diferem entre si em acréscimos de materiais às suas constituições básicas na massa. Seu fabricante, é a Empresa denominada “Wickbold & Pão Indústrias Alimentícias Ltda.”, situada na Estrada do Curicica ,190. CEP: 22780 190 Rio de Janeiro, RJ, Brasil, cujo CNPJ é 62.691-043/0006-22. O processo de fabricação e preparos para comercialização dos pães, obedeceram às Leis e Resoluções brasileiras, fornecidas pela Empresa, constantes em Anexo.

As amostras foram caracterizadas por:

- a) (PITTA- 22°C): Pão Industrializado Tradicional em Temperatura Ambiente (22°C). Que é constituído por Farinha de trigo enriquecida com ferro e ácido fólico, açúcar, óleo de soja, sal, glúten, sal hipossódico e conservadores propionato de cálcio e sorbato de potássio. Sendo massa total do pacote:  $M = 500\text{g}$ , com 20 (vinte) fatias, com massa, aproximada,  $m = 25\text{g}$ , cada fatia, de dimensões, aproximadas, laterais das fatias:  $10\text{cm} \times 10\text{cm} (\pm 1,0\text{cm})$  (dados do fabricante). E a massa da fatia medida (amostra):  $m = 20,47\text{g}$ .
- b) (PITAG- 12°C): Pão Industrializado Tradicional Acondicionado em Geladeira (12°C). Que é constituído por Farinha de trigo enriquecida com ferro e ácido fólico, açúcar, óleo de soja, sal, glúten, sal hipossódico e conservadores propionato de cálcio e sorbato de potássio. Sendo massa total do pacote:  $M = 500\text{g}$ , com 20 (vinte) fatias, com massa  $m = 25\text{g}$ , cada fatia, de dimensões, aproximadas, laterais das fatias:  $10\text{cm} \times 10\text{cm} (\pm 1,0\text{cm})$  (dados do fabricante). E a massa da fatia medida (amostra):  $m = 23,26\text{g}$ . E a média entre as massas das fatias:  $m_{fT} = 21,84\text{g}$  (amostras de pão tradicional).
- c) (PIITA- 22°C): Pão Industrializado Integral em Temperatura Ambiente (22°C). Que é constituído por Farinha de trigo integral, farinha de trigo enriquecida com ferro e ácido fólico, fibra de trigo, glúten, açúcar, óleo de soja, sal e conservadores propionato de cálcio e ácido sórbico. Sendo massa total do pacote:  $M = 500\text{g}$ , com 20 (vinte) fatias, com massa  $m = 25\text{g}$ , cada fatia, de dimensões, aproximadas, laterais das fatias:  $10\text{cm}$

x 10cm ( $\pm 1,0$ cm) (dados do fabricante). E a massa da fatia medida (amostra):  $m = 20,25$ g (amostra).

- d) (PIIAG- 12°C): Pão Industrializado Integral Acondicionado em Geladeira (12°C). Que é constituído por Farinha de trigo integral, farinha de trigo enriquecida com ferro e ácido fólico, fibra de trigo, glúten, açúcar, óleo de soja, sal e conservadores propionato de cálcio e ácido sórbico. Sendo massa Total do pacote: 500g e, com 20 (vinte) fatias, com massa  $m = 25$ g, cada fatia, de dimensões, aproximadas, laterais das fatias: 10cm x 10cm ( $\pm 1,0$ cm) (dados do fabricante). E a massa da fatia medida (amostra):  $m = 24,56$ g. E a médias das massas das fatias:  $m_{fI} = 22,40$ g (amostras de pão integral). Deve-se levar em consideração que as diferenças nas medidas, de cada uma das fatias, em cada tipo de amostra, que não se apresentam todas exatamente iguais.

#### **4.2. Mensuração das massas das amostras com tempo de preparações diferentes**

As mensurações iniciais das massas das amostras: Pão Industrializado Tradicional em Temperatura Ambiente (PITTA-22°C), Pão Industrializado Tradicional Acondicionado em Geladeira (PITAG-12°C), Pão Industrializado Integral em Temperatura Ambiente (PIITA-22°C) e Pão Industrializado Integral Acondicionado em Geladeira (PIIAG-12°C), foram realizadas em nosso Laboratório, no LIN, com a balança digital que tem a seguinte descrição: ( AG 200, Cap. Max.= 199,9990 g ; Cap. Min. = 10 mg; e = 1mg e d = 0,1mg). Imagens das mensurações realizadas das massas, das amostras, com a balança digital estão nas figuras 6,7 e 8.



**Figura 6: Mensuração do Pão Industrializado Tradicional em Temperatura Ambiente (PITTA-22°C). Massa da fatia medida (amostra):  $m = 20,47\text{g}$ .**



**Figura 7: mensuração do Pão Industrializado Tradicional Acondicionado em Geladeira (PITAG12°C). Massa da fatia medida (amostra):  $m = 23,26\text{g}$ .**

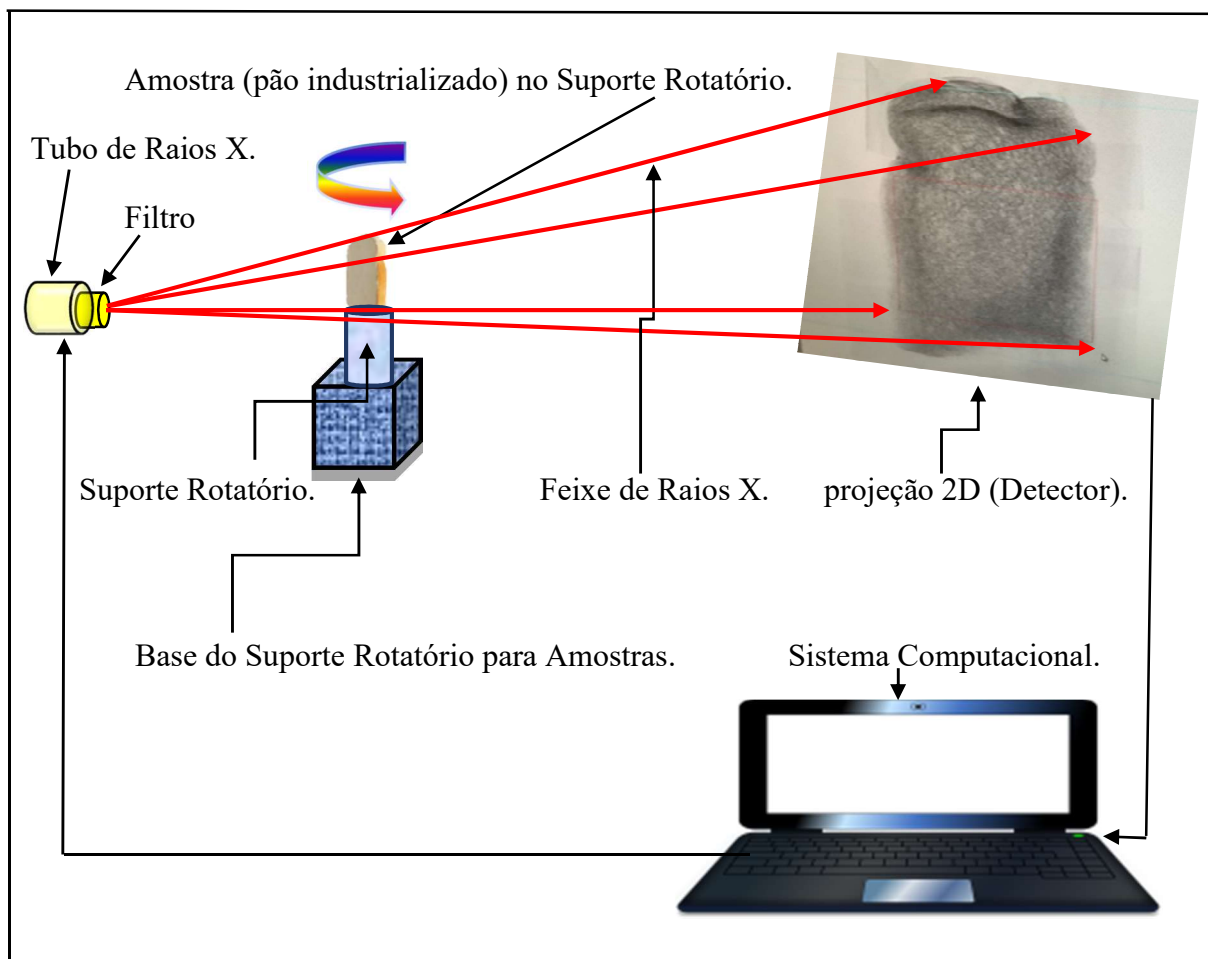




**Figura 8: Mensuração do Pão Industrializado Integral em Temperatura Ambiente (PIITA-22°C). Massa da fatia medida (amostra):  $m = 23,92\text{g}$ .**

#### **4.3 Sistema de Microtomografia Computadorizada.**

Uma concepção de uma representação esquemática básica do cenário do Sistema de Microtomografia Computadorizada utilizado em nossa pesquisa, no Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN) está na figura 9, ilustrada abaixo.



**Figura 9 - Esquema básico ilustrativo do cenário do Sistema de Microtomografia Computadorizada.**

O equipamento do Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN/PEN/COPPE/UFRJ), onde a pesquisa foi desenvolvida, que denominamos de Sistema de MicroCT, é basicamente

composto pelo Microtomógrafo PhoenixV|tome|x M (Waygate Technologies), da General Electric, apresentado na figura 10.



**Figura 10 - Microtomógrafo, PhoenixV|tome|x M (Waygate Technologies), da General Electric, com sua mesa de controle para telemanipulação de partes internas do conjunto do sistema de MicroCT.**

#### **4.4. Processos de Aquisição, Reconstrução e de Segmentação de Imagens**



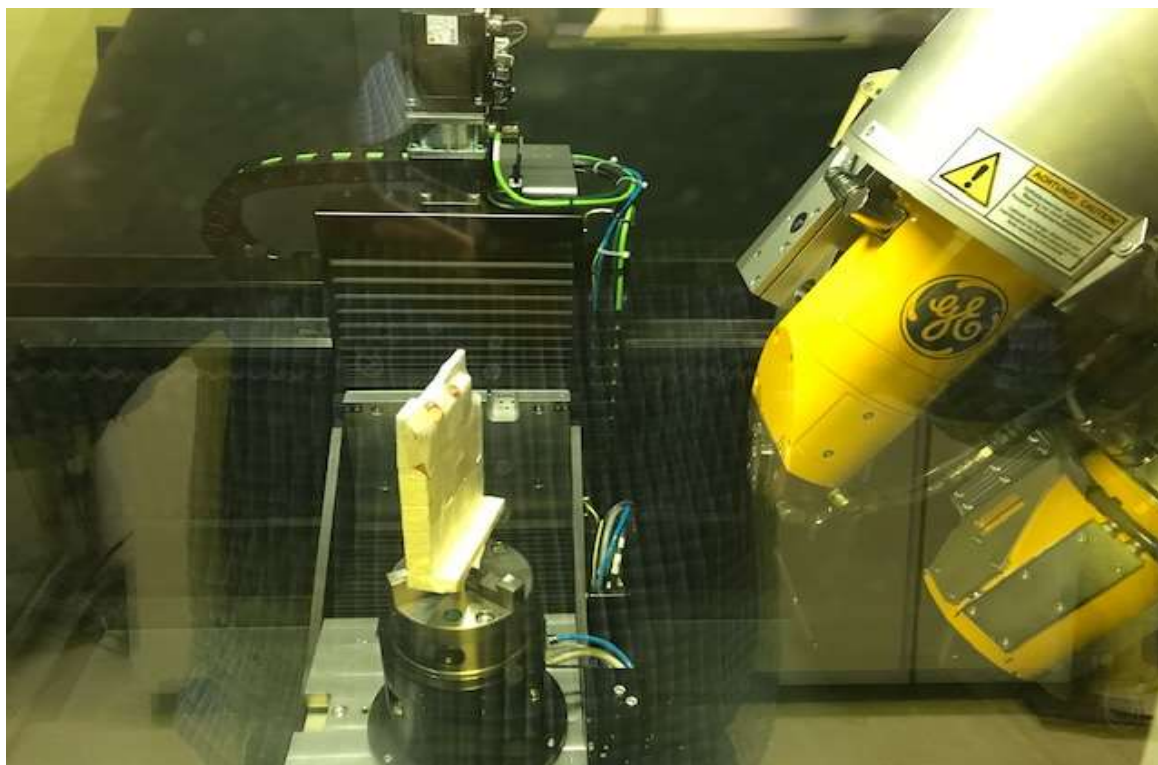
Todo o processo de pesquisa foi realizado no Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN-PEN-COPPE-UFRJ).

As amostras não precisaram de um preparo especial para serem submetidas para as análises. Foram mantidas em um tipo de polímero fino durante seus acondicionamentos, afim de que estivessem livres de quaisquer alterações indesejáveis. Foram fixadas de forma simples no suporte rotatório da base para amostras no equipamento de MicroCT para as aquisições.

#### 4.4.1 Aquisição

Para a aquisição de dados, em cada amostra, o Microtomógrafo, PhoenixV|tome|x M (Waygate Technologies), da General Electric, foi configurado para o processo de aquisição com uma energia de 70 kV, uma corrente de 200  $\mu$ A, um tempo de exposição em cada projeção de 300  $\mu$ s, 5 frames e um tamanho de voxel de 75 (micro m)  $\mu$ m.

Como pode ser visto na figura 11, uma das amostras fixada no suporte da amostra do Microtomógrafo PhoenixV|tome|x M (Waygate Technologies), durante a etapa de aquisição, no Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN-PEN-UFRJ)



**Figura 11 : Amostra (fatia de pão) fixada no suporte de amostra sobre a base rotatória e o Tubo de Raios X, durante a aquisição, no interior do Microtomógrafo utilizado na pesquisa.**

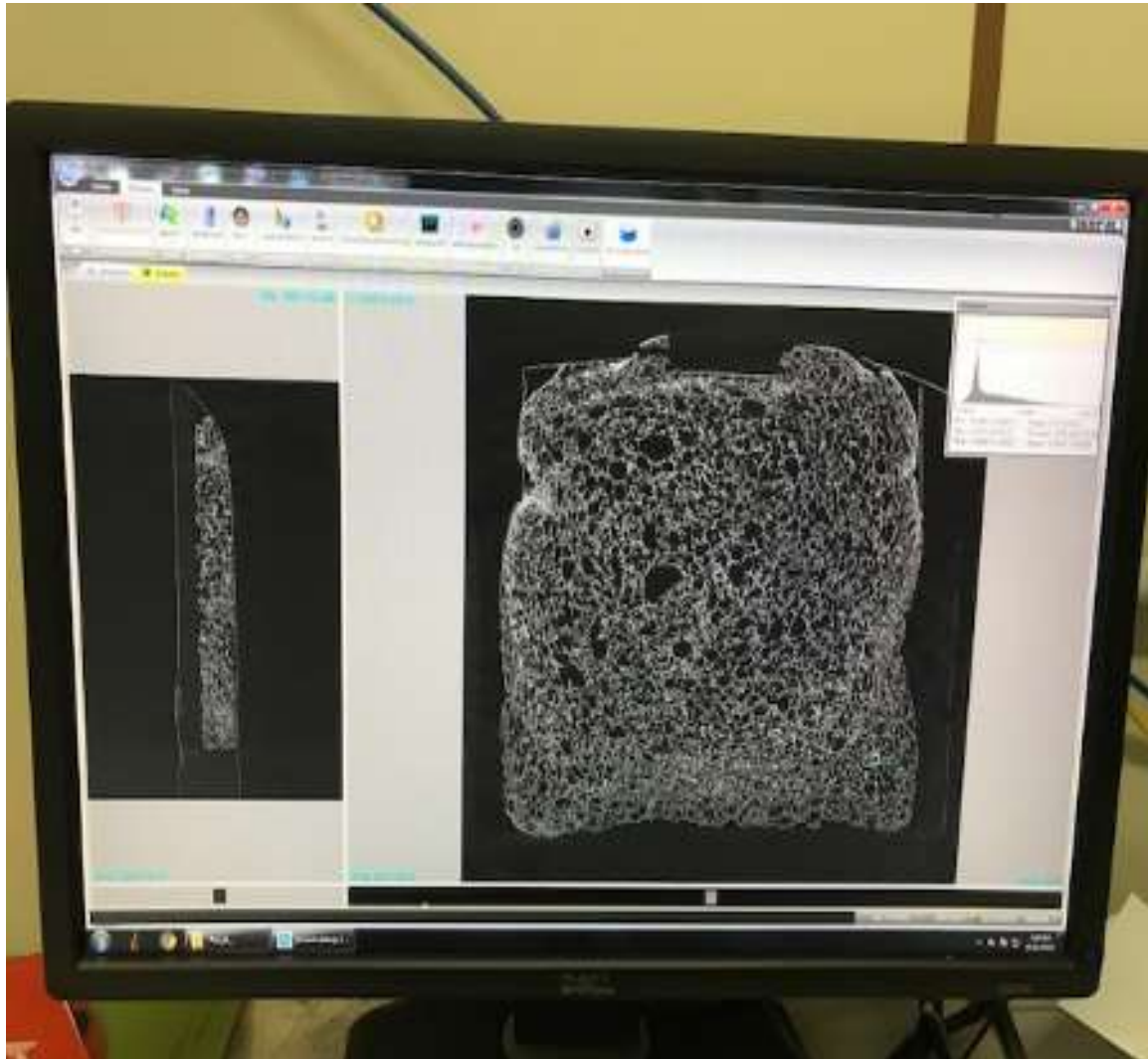
#### **4.4.2 A Reconstrução**

O processo de reconstrução foi realizado com o software Phoenix Datos Reconstruction. Os dados adquiridos da MicroCT foram reconstruídos com software “Datos x reconstruction (Version 2.5.0) software”, onde aplicamos correções de alinhamento e um filtro de realce de borda. Para visualização das imagens reconstruídas utilizamos os softwares VG Studio 3.0 e Avizo 2020.1. As análises das imagens foram realizadas pelo “CTAnalysis v.1.18.4”, pois ele permite análise 2D e 3D, sendo provido de instrumental de processamento e segmentação de imagens e algoritmo para renderização de volumes (MANTOVANI, 2013) e o “Softwares Avizo v. 2020.3”. A característica fundamental de utilização do primeiro são os aspectos do coeficiente de voxel e a morfometria em imagens binárias. Já o segundo software permite ao analista correlacionar-se com os dados de forma ativa e monitorada de diversos parâmetros gerando um conjunto de dados organizados em forma de rede convertendo-os em imagem real espacial (imagem 3D). Assim informações completamente complexas ficam disponíveis para serem pesquisadas, tratada, analisadas, extraídas e disponibilizadas. No entanto a resolução espacial da imagem gerada pela MicroCT, segundo (DE ARAÚJO, 2019), é determinada fundamentalmente, pelo tamanho e número de elementos do sistema de detector, o tamanho do ponto focal de raios X e as distâncias entre o objeto detector e objeto fonte de raios X.

Assim, ações devem ser aplicadas, no processo da reconstrução da imagem, para as investigações que se desejam realizar, tais como verificação do alinhamento das fatias geradoras do volume, ajuste de suavização na imagem, correção do efeito dos processos da absorção e transmissão do feixe na amostra, em conjunto com a sua geometria no processo de aquisição da imagem da amostra, conhecido como efeito de endurecimento do feixe e ainda correção, se houver, da consequência dos pixels mortos, que no processo anterior, isto é, o de aquisição, produz um artefato em formato de anel.

Um dos resultados de um do processo de reconstrução de imagens, de uma das amostras, está mostrado na figura 12, abaixo. Primeiro, do lado esquerdo do monitor, na

figura, a reconstrução da imagem de uma fatia de amostra de pão para análise, na posição sagital, seguida da posição coronal, na parte central e direita do monitor, gerada pelo Sistema de Microtomografia Computadorizada.



**Figura 12:** aparência de um dos resultados do processo de Reconstrução da Imagem, primeiro na posição sagital seguida da posição coronal, de uma fatia de amostra de pão para análise, gerada pelo Sistema de Microtomografia Computadorizada.

#### **4.4.3 A Segmentação**

Uma das etapas do tratamento das imagens foi o processo de segmentação que é um recurso muito útil para análise de fase em imagens 2D e 3D, consiste, de uma certa forma, em um histograma de intensidade de voxel, que segundo (LANDIS e KEANE, 2010), assinala a frequência ou número de ocorrências de voxels de uma intensidade específica. De uma forma geral, pode-se dizer que é um processo em que se converte uma imagem inicial, em níveis de cinza. Em uma segmentação simples uma imagem em preto e branco é criada a partir da imagem em tons de cinza, afim de melhorá-las em suas qualidades para análises. O registro de um dos processos de segmentação da imagem de uma das amostras está na figura 13.

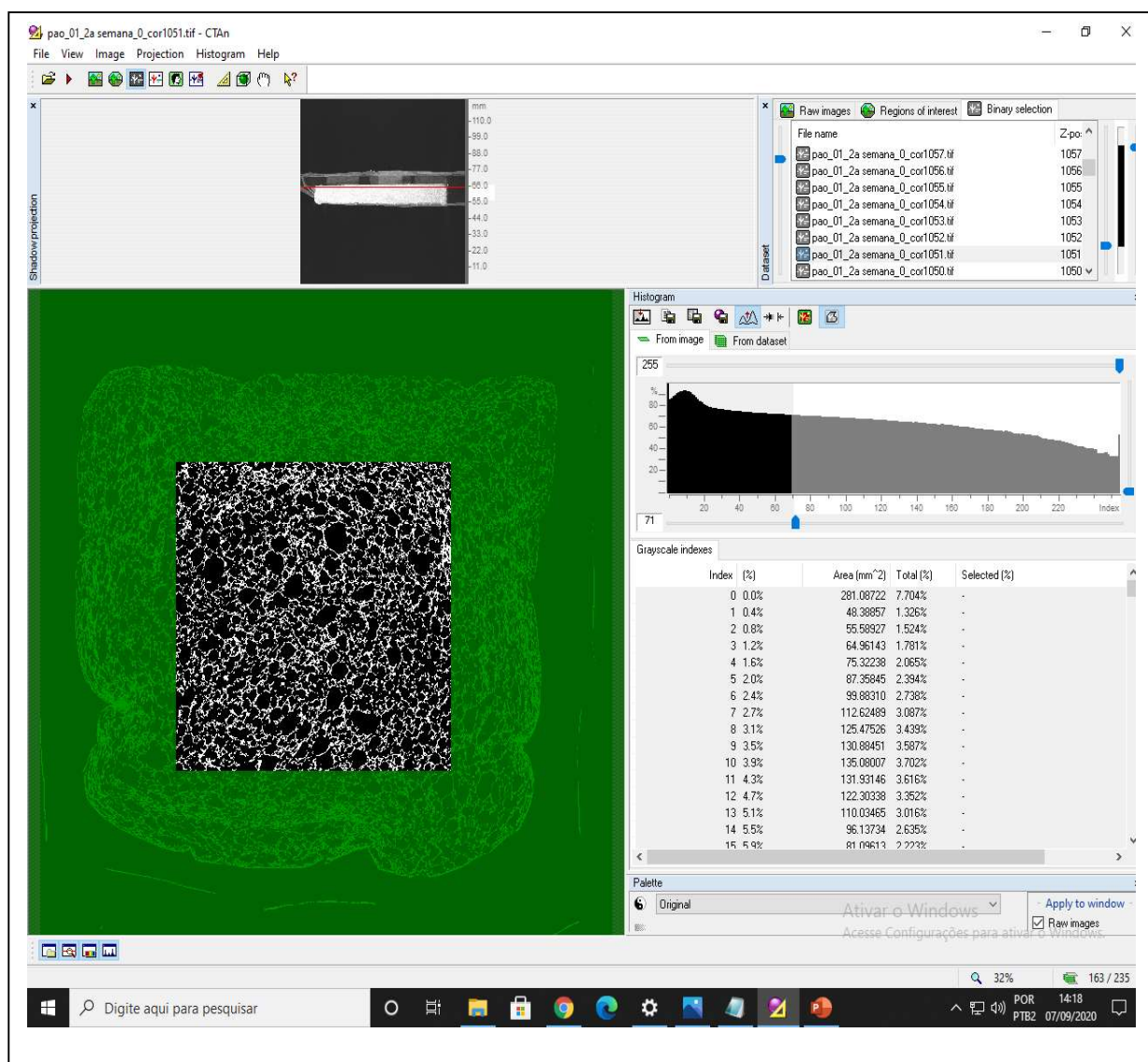
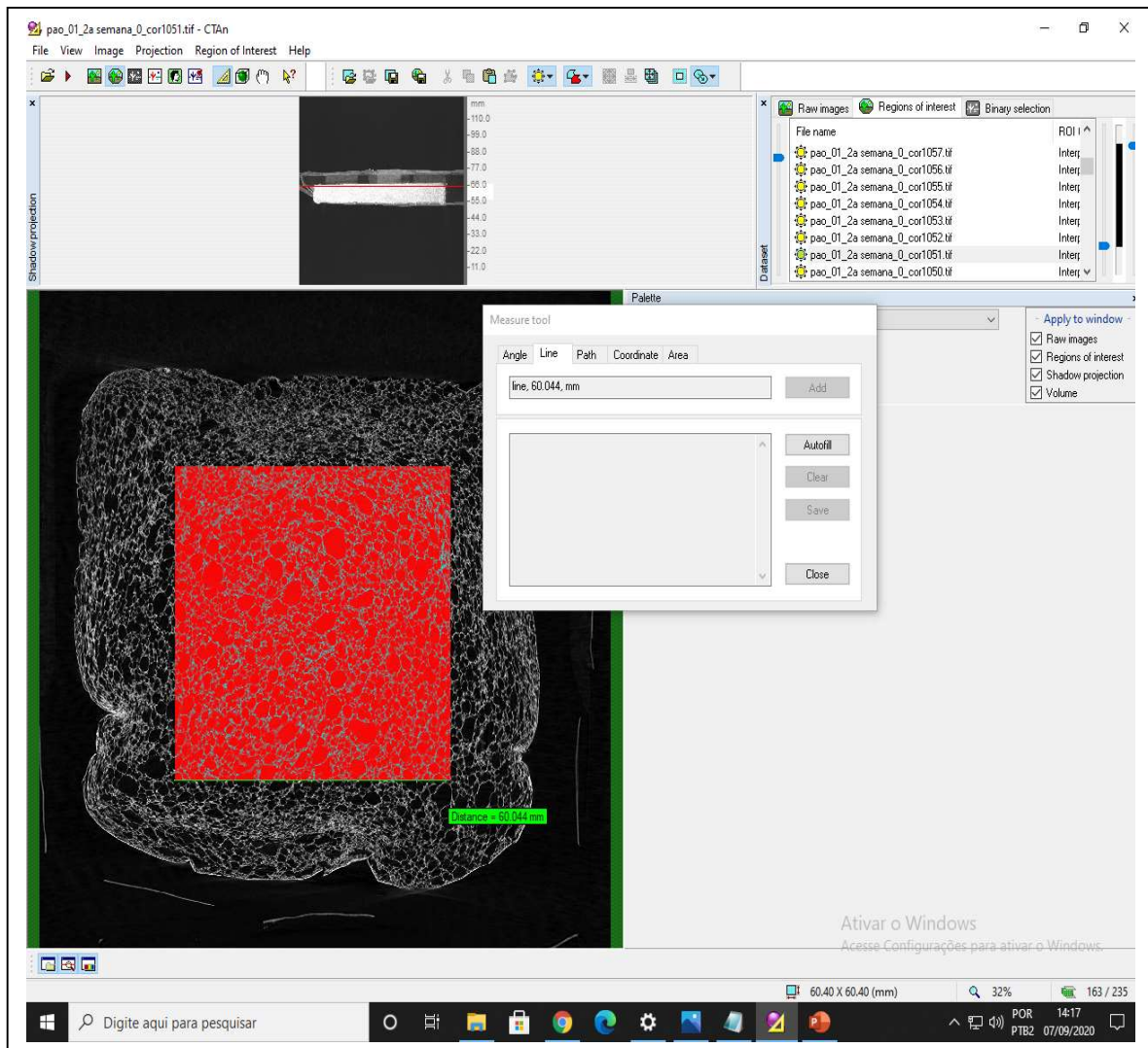


Figura 13 - Um dos processos de segmentação da imagem de uma das amostras.



Como parte da metodologia, em cada amostra foi verificada, através de software específico, a estrutura da região de interesse, neste caso a central, (ROI) para análises. Com o pode ser verificado na figura 14 da Região central de interesse (60 x 60 mm), de uma das amostras.



**Figura 14 - Região central de interesse, “ROI” central de uma das amostras.**

A ROI em uma imagem é a uma região limitada em que é destacada por ser de interesse para a análise a ser realizada. A denominação “ROI”, é a abreviatura da expressão, “Region of Interest”, do idioma inglês. A técnica da metodologia da “ROI” é formada por algoritmos específicos para imagem. Tecnicamente, “ROI” é um recurso de processamento digital que, segundo (WESTERTERP, M., et al, 2007), permite que a imagem na região de interesse tenha

sua qualidade aprimorada, em detrimento da qualidade da imagem na região que ultrapassa os limites da “ROI”.

Pode-se obter-se uma figura de um “ROI” central em visualização 3D, como a imagem destacada de um ROI central na figura 15, como uma das etapas do processo da análise, da metodologia.



**Figura 15 – Resultado da Metodologia de Análise ROI, de uma região central, de uma das fatias da amostra, em Visualização 3D**

## 5. Resultados e Discussões

A aplicação da técnica da MicroCT, com a metodologia empregada, os tratamentos e análise dos dados, permitiu constatar alterações nas microestruturas nos dois tipos de pães industrializados de sanduíche, o integral e o tradicional, nas condições propostas, no intervalo de tempo de acondicionamento e observações para as análises, que foi de 4 semanas e em temperatura ambiente (22 °C) e em geladeira (12 °C), cujas mudanças sofridas puderam ser visualizadas, qualificados e quantificados, com a aplicação da técnica da MicroCT, que permitiu obter-se os resultados que podem ser verificados inclusive visualmente em que os aspectos das microestruturas das amostras mostraram-se diferenciadas. O que favorece estudos dos comportamentos de estruturas de tecidos que podem apresentar características idênticas ou aproximadas.

### 5.1 Das Amostras

Com as metodologias oriundas da aplicação da MicroCT, nas amostras, em conjunto com os softwares dos processos de obtenções das imagens das mesmas, foi possível acessar informações qualitativamente e quantitativamente sobre a morfologia e a microestrutura dos dois tipos de pães, cujas diferenças são significantes. Primeiro é que as estruturas são visualmente diferentes entre os pães tradicional e o integral, antes e após as análises metodológicas. Segundo, apresentam diferenças nas suas composições, conforme dados do fabricante. Terceiro, às suas respectivas reologias têm públicos diferentes, determinando assim tratamentos diferentes nos seus preparos, que resulta em comportamentos sensoriais e respostas diferentes às mesmas condições a que forem expostos e, por último, por tudo anteriormente apontado, reagiram diferentemente, às condições de armazenamento em função do tempo, como mostraram às análises realizadas.

Através do conjunto de dados e informações adquiridos, as imagens foram processadas em 2D e 3D. Por sua vez, as imagens obtidas permitiram outras análises das amostras, que foram classificadas de acordo com os seus tipos e formas de acondicionamentos. Uma das metodologias foi aplicar um código de cores para relacioná-lo com as respectivas espessuras das estruturas que destaca a perda de volume ao longo das semanas para as diferentes condições de armazenamento, em uma das análises. Assim, pudemos constatar as diferenças

sofridas em suas microestruturas. As mudanças, de cada amostra, podem ser visualizadas nas últimas figuras de cada um dos itens 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3 e 5.1.4.

#### **5.1.1 Pão Industrializado Tradicional em Temperatura Ambiente (PITTA-22°C)**

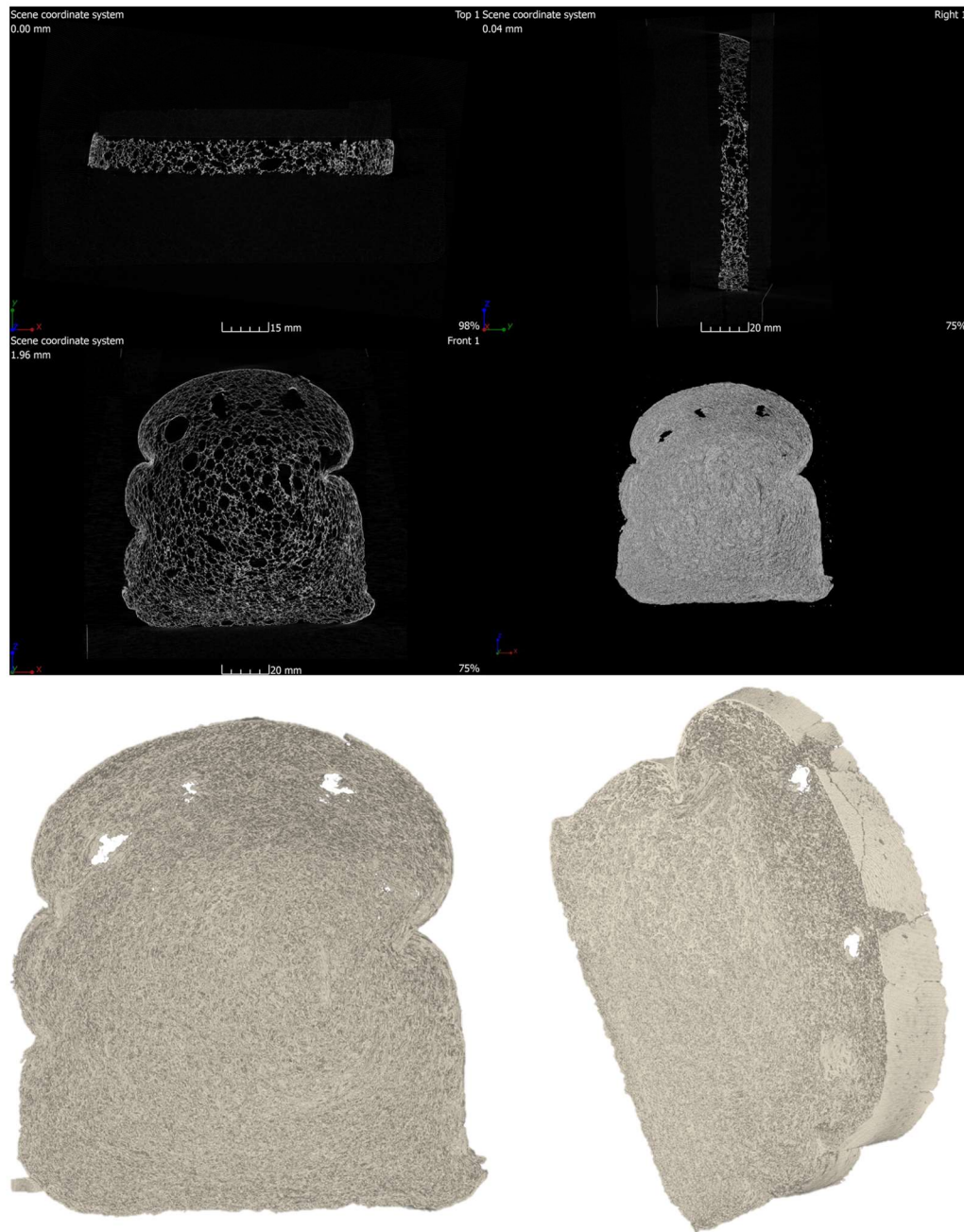
O pão industrializado tradicional acondicionado em temperatura ambiente (PITTA-22°C), apresenta aparência e textura menos densa, comparado ao pão industrializado integral temperatura ambiente (PIITA - 22°C). Pois, temos na sua descrição a composição diferenciada. A figura 16 representa fatia da amostra (PITTA - 22°C) reconstruída nas vistas transaxial, coronal e sagital e volume com cores em nível de cinza. E abaixo, volume 3D reconstruído em diferentes posições da amostra.



## Pão de Sanduíche

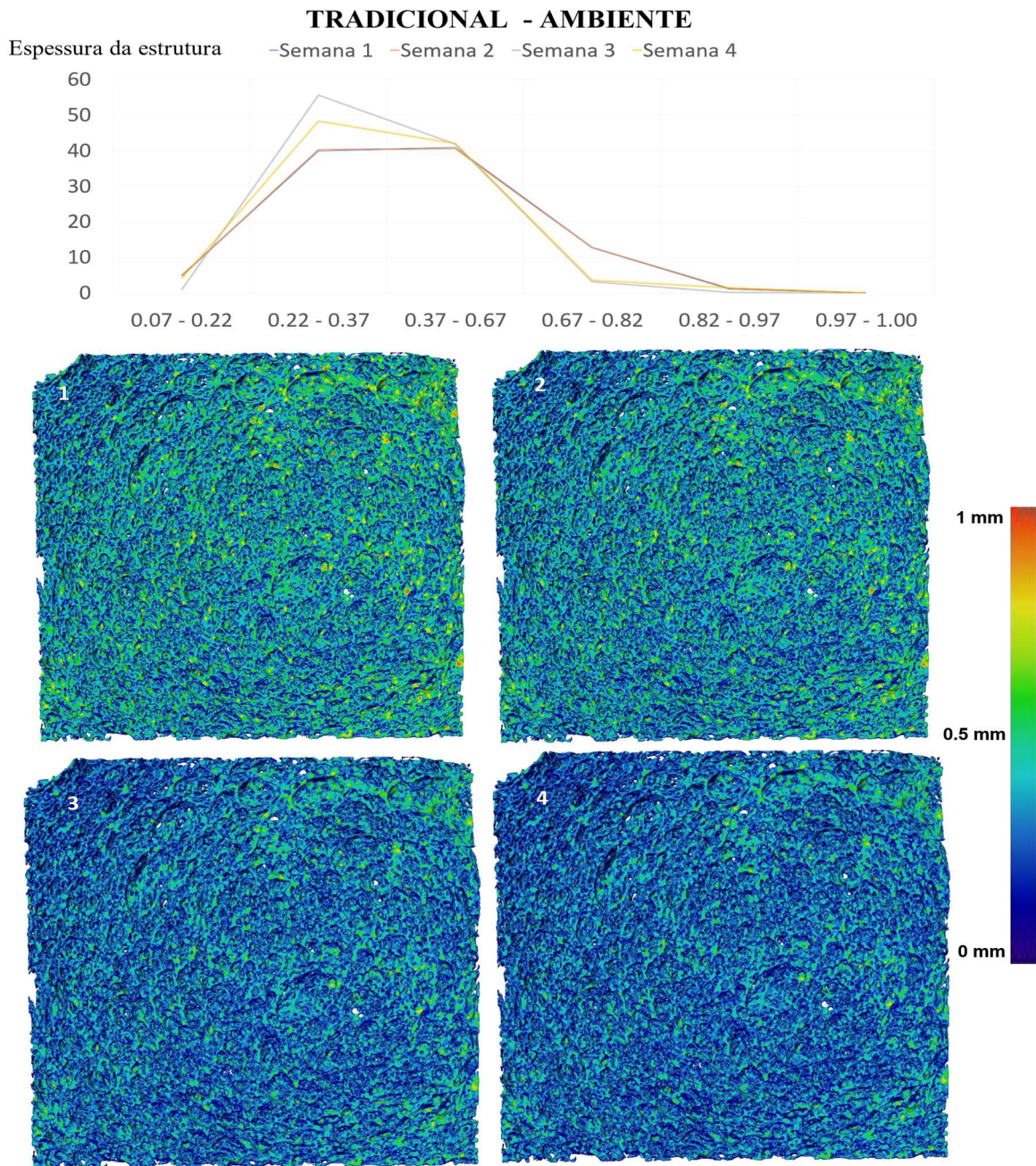
Tipo: Tradicional

Condicionamento: Temperatura Ambiente



**Figura 16 - Fatias reconstruídas nas vistas transaxial, coronal e sagital e volume 3D reconstruído em diferentes posições da amostra (PITTA - 22°C).**

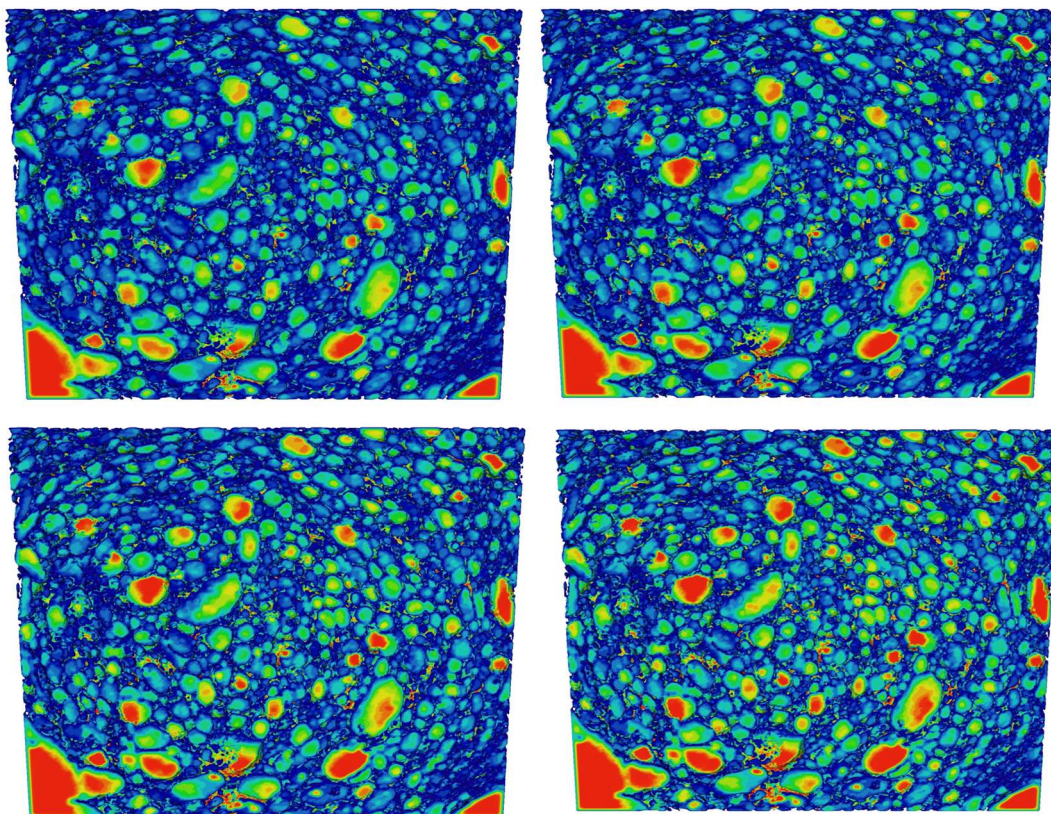
A relação da espessura da estrutura dos poros pode ser verificada por meio da Visualizações das mudanças microestruturais (profundidade de 2,025 mm) na amostra de Pão Industrializado Tradicional em Temperatura Ambiente (PITTA - 22°C), que são demonstradas na figura 17 onde o código de cores está relacionado com a espessura das estruturas que destaca a perda de volume ao longo das semanas para as diferentes condições de armazenamento.



**Figura 17 - Amostra (PITTA - 22°C), ao longo das 4 semanas, onde o código de cores está relacionado com a espessura das estruturas que destaca a perda de volume ao longo das semanas.**



As visualizações de mudanças microestruturais (profundidade de 2,025 mm), na amostra de Pão Industrializado Tradicional em Temperatura Ambiente (PITTA - 22°C) ao longo das 4 semanas de acondicionamento, podem ser observadas na figura 18, iniciando-se a observação pela imagem da linha um com coluna um, seguida da imagem da linha um com coluna dois, e ainda, da imagem da linha dois com coluna um e, por último, da imagem linha dois com coluna dois. Tem-se um aumento na cor vermelha, indicativo de mudanças nas suas microestruturas, conforme a escala gráfica do código de cores.



**Figura 18 - Mudanças microestruturais no Pão Industrializado Tradicional em Temperatura Ambiente (PITTA - 22°C) ao longo das 4 semanas de acondicionamento.**

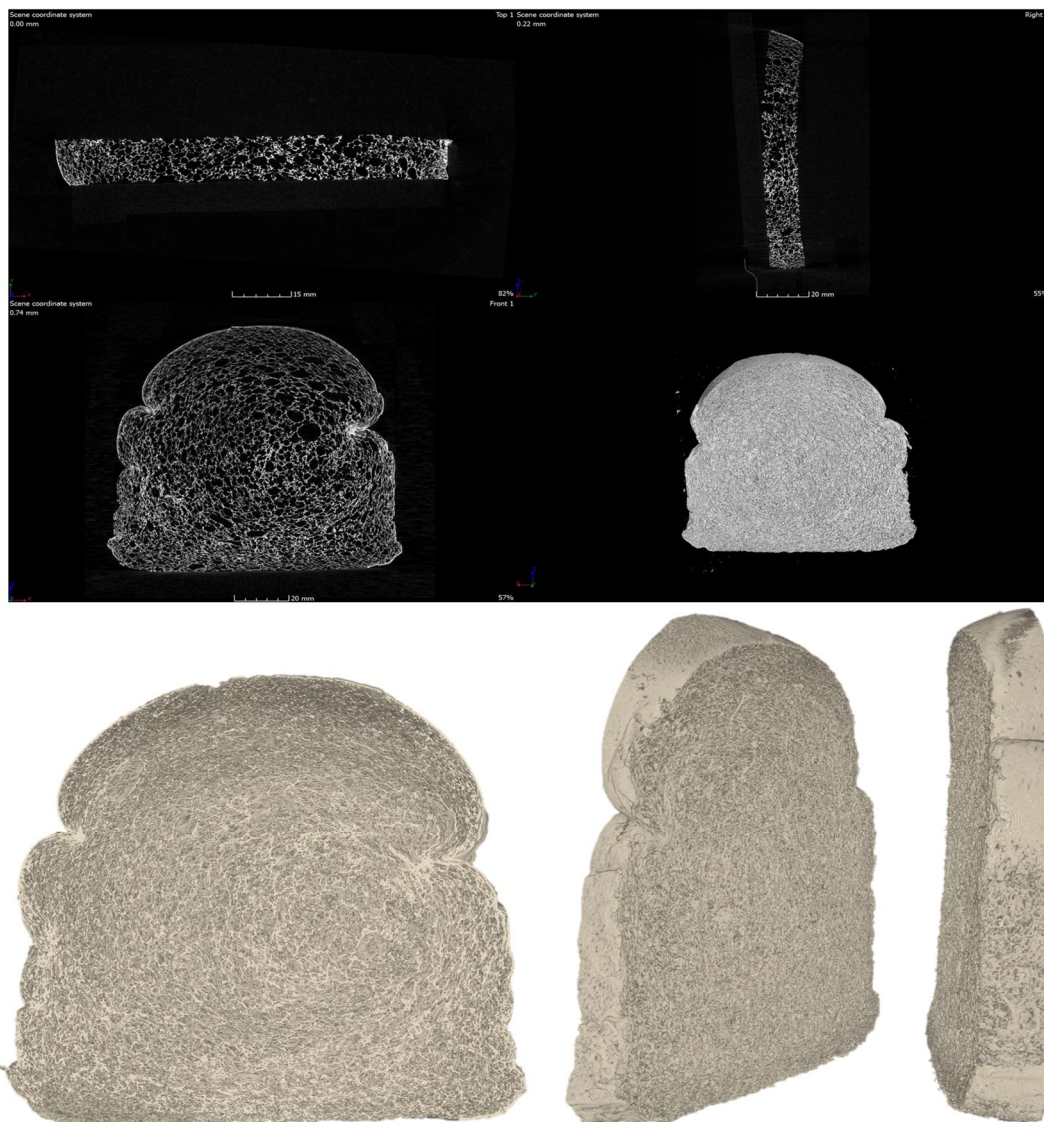
#### **5.1.2 Pão Industrializado Tradicional Acondicionado em Geladeira (PITAG - 12°C)**

O pão industrializado tradicional acondicionado em Geladeira (PITAG - 12°C) apresenta as mesmas características iniciais da amostra (PITTA - 22°C), pois, é uma outra fatia do mesmo pacote desta amostra, mas que foi acondicionada de forma diferente. A Figura 19 representa fatia da amostra (PITAG - 12°C) reconstruída nas vistas transaxial, coronal e sagital e volume com cores em nível de cinza da amostra de pão tradicional acondicionado em geladeira. E, abaixo, no segundo plano, Volume 3D reconstruído em diferentes posições da amostra.

### Pão de Sanduíche

Tipo: Tradicional

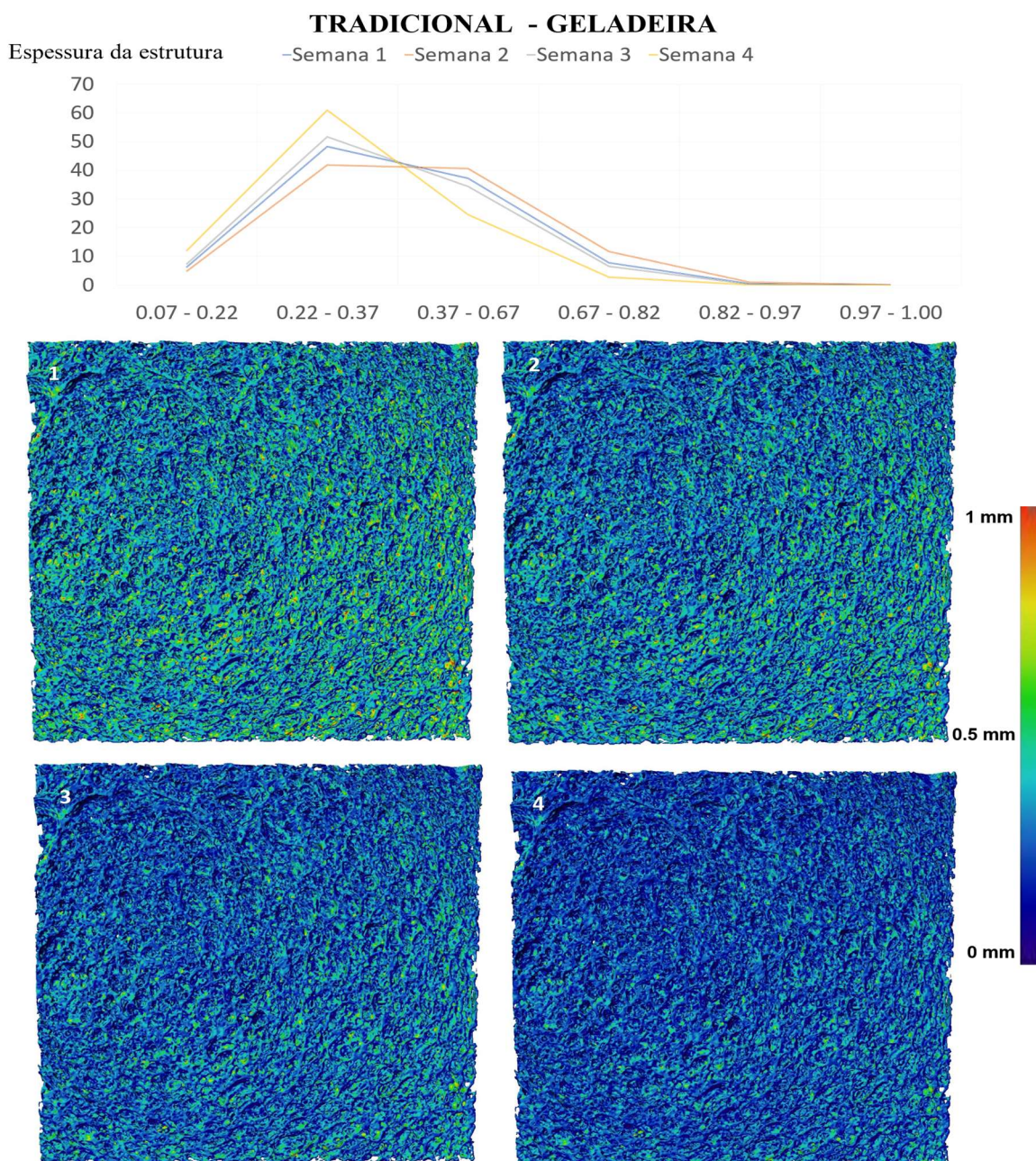
Condicionamento: Geladeira



**Figura 19 - Fatias reconstruídas nas vistas transaxial, coronal e sagital e volume 3D reconstruído em diferentes posições da amostra (PITAG - 12°C).**



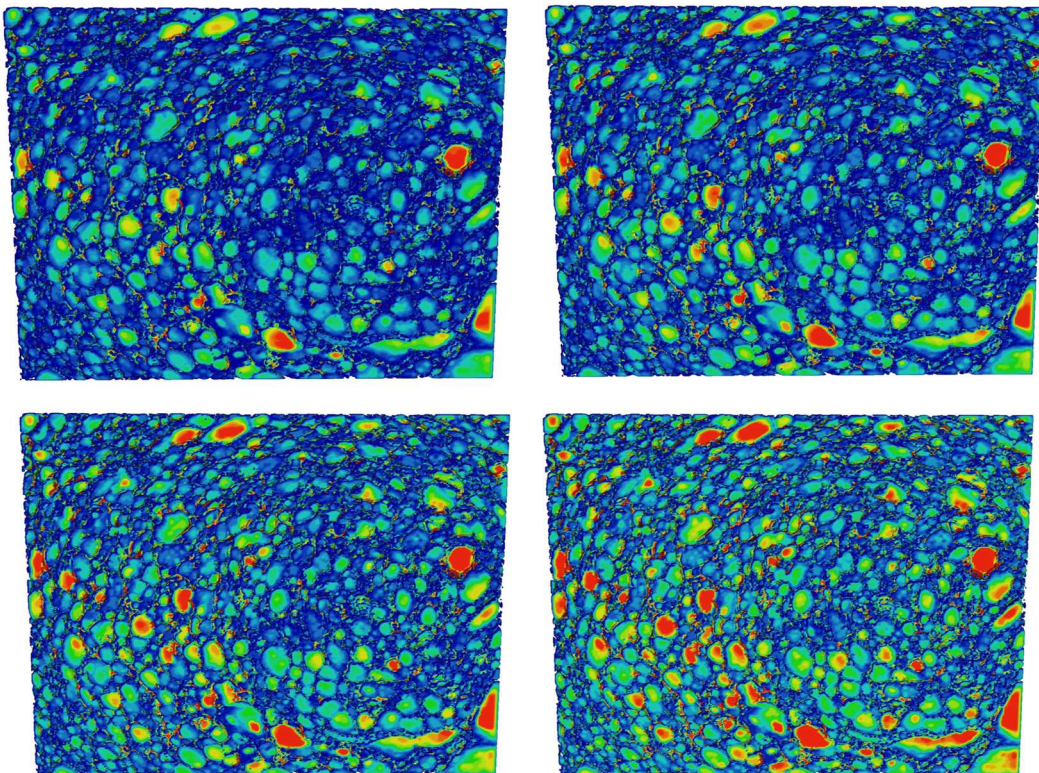
A relação da espessura da estrutura dos poros pode ser verificada por meio da Visualizações das mudanças microestruturais (profundidade de 2,025 mm) na amostra de Pão Industrializado Tradicional em Acondicionado em Geladeira (PITAG - 12°C), que são demonstradas na figura 20 onde o código de cores está relacionado com a espessura das estruturas que destaca a perda de volume ao longo das semanas para as diferentes condições de armazenamento.



**Figura 20 – Amostra (PITAG - 12°C), onde o código de cores está relacionado com a espessura das estruturas que destaca a perda de volume ao longo das semanas.**



As visualizações de mudanças microestruturais (profundidade de 2,025 mm), na amostra de Pão Industrializado Tradicional em Temperatura Ambiente (PITAG - 12°C) ao longo das semanas de acondicionamento, podem ser observadas na figura 21, iniciando-se a observação pela imagem da linha um com coluna um, seguida da imagem da linha um com coluna dois, e ainda, da imagem da linha dois com coluna um e, por último, da imagem linha dois com coluna dois. Tem-se um aumento na cor vermelha, indicativo de mudanças nas suas microestruturas, conforme a escala gráfica do código de cores.



**Figura 21 - A figura mostra mudanças microestruturais no Pão Industrializado Tradicional Acondicionado em Geladeira (PITAG - 12°C) ao longo das semanas de acondicionamento.**

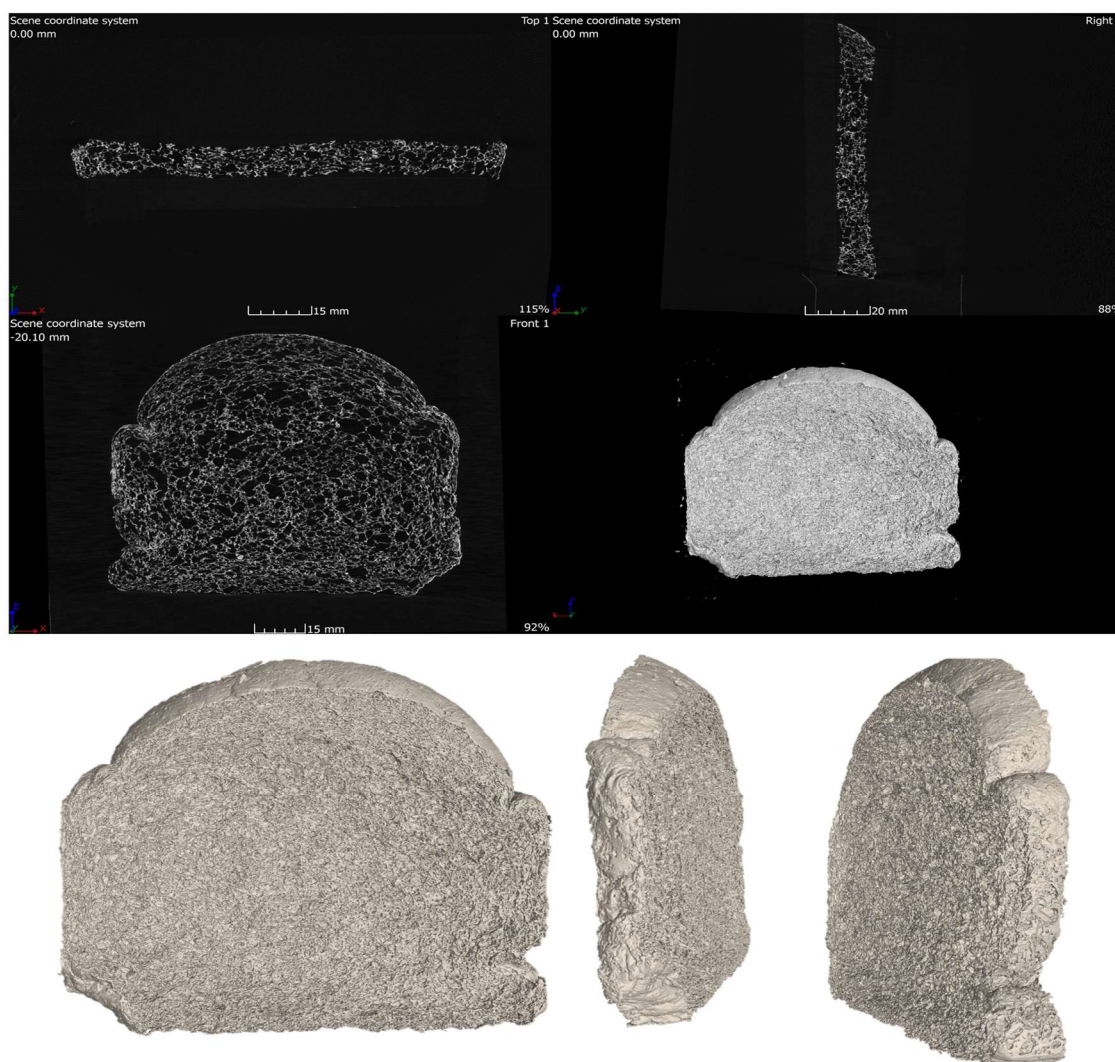
### 5.1.3 Pão Industrializado Integral em Temperatura Ambiente (PIITA - 22°C)

O pão industrializado integral acondicionado em temperatura ambiente (PIITA - 22°C), possui na sua composição mais ingredientes que o pão industrializado tradicional em temperatura ambiente (PITTA - 22°C). E por isto apresenta um aspecto mais denso comparado ao (PITTA - 22°C). A figura 22 representa fatia reconstruída nas vistas transaxial, coronal e sagital e volume com cores em nível de cinza da amostra (PIITA - 22°C) na primeira semana. E abaixo a imagem do volume 3D reconstruído em diferentes posições da amostra.

#### Pão de Sanduíche

Tipo: Integral

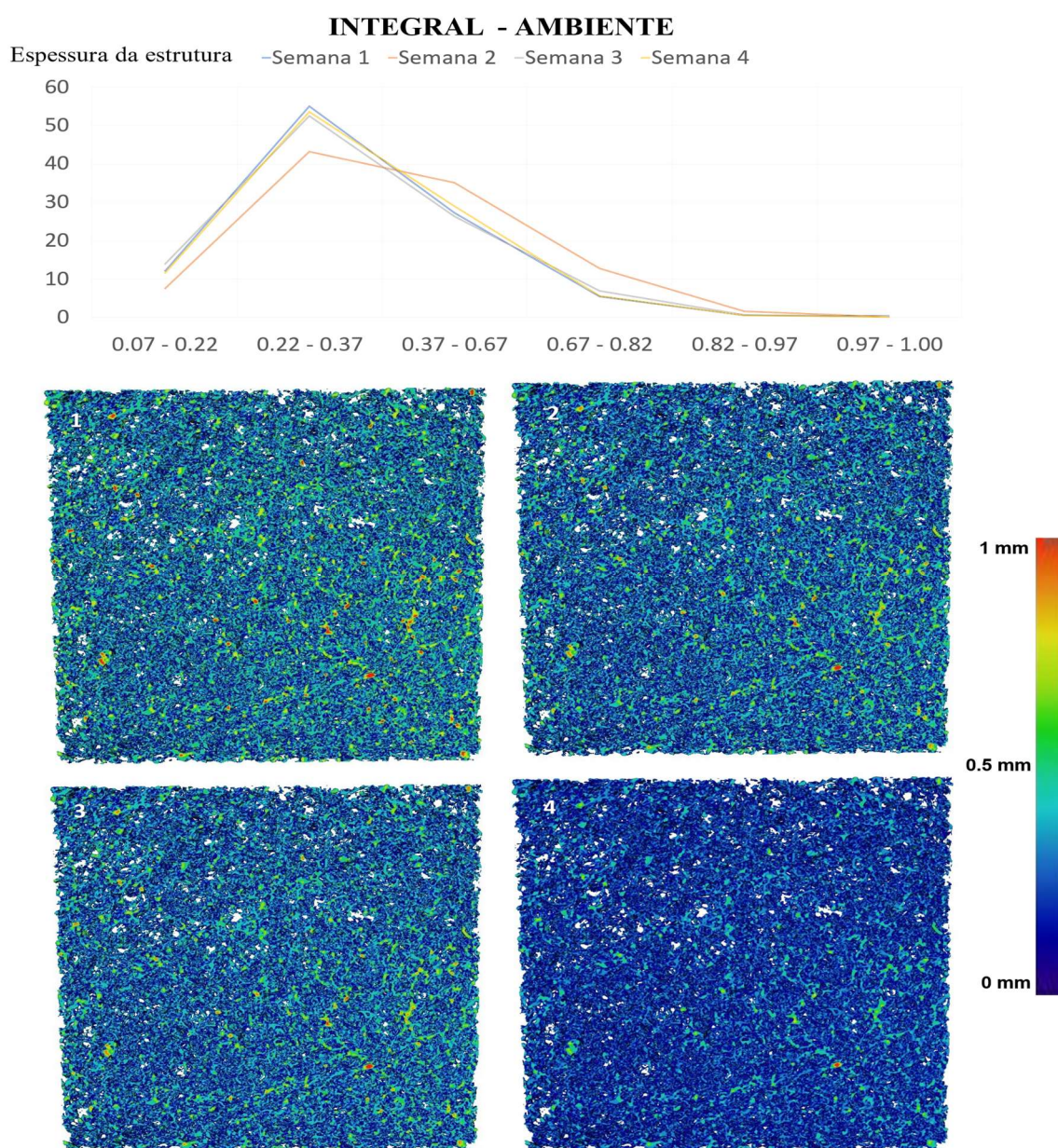
Condicionamento: Temperatura Ambiente



**Figura22 - Fatias reconstruídas nas vistas transaxial, coronal e sagital e volume 3D reconstruído em diferentes posições da amostra (PIITA - 22°C).**



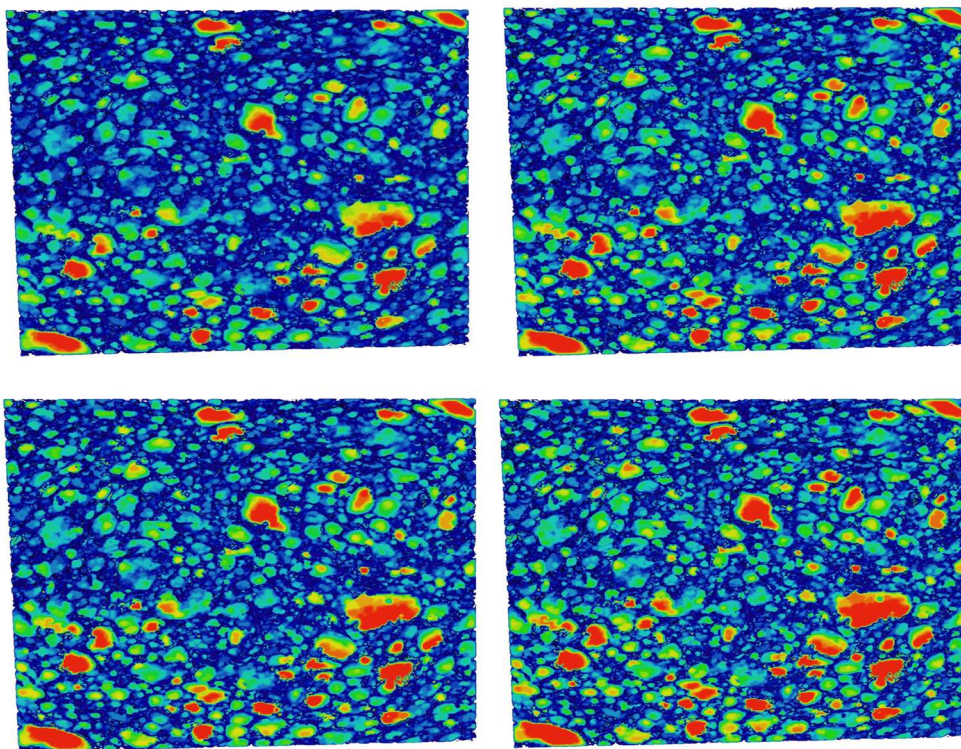
A relação da espessura da estrutura dos poros pode ser verificada por meio da Visualizações das mudanças microestruturais (profundidade de 2,025 mm) na amostra de Pão Industrializado Tradicional em Acondicionado em Geladeira (PIITA - 22°C), que são demonstradas na figura 23, onde o código de cores está relacionado com a espessura das estruturas que destaca a perda de volume ao longo das semanas para as diferentes condições de armazenamento.



**Figura 23 - Amostra (PIITA - 22°C), onde o código de cores está relacionado com a espessura das estruturas que destaca a perda de volume ao longo das semanas.**



As visualizações de mudanças microestruturais (profundidade de 2,025 mm), na amostra de Pão Industrializado Tradicional em Temperatura Ambiente (PIITA - 22°C) ao longo das semanas de acondicionamento, podem ser observadas na figura 24, iniciando-se a observação pela imagem da linha um com coluna um, seguida da imagem da linha um com coluna dois, e ainda, da imagem da linha dois com coluna um e, por último, da imagem linha dois com coluna dois. Tem-se um aumento na cor vermelha, indicativo de mudanças nas suas microestruturas, conforme a escala gráfica do código de cores.



**Figura 24 - Mudanças microestruturais no Pão Industrializado Tradicional Acondicionado em Geladeira (PIITA - 22°C) ao longo das semanas de acondicionamento.**

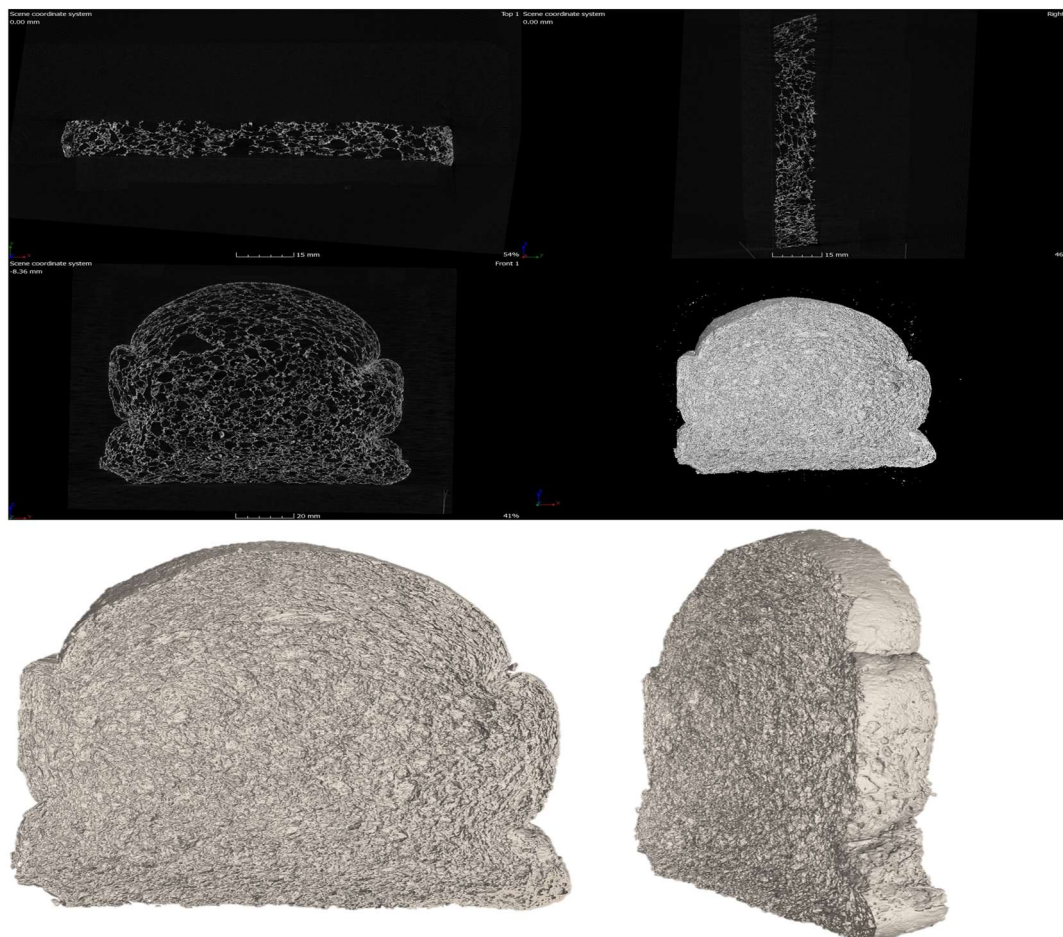
#### 5.1.4 Pão Industrializado Integral Acondicionado em Geladeira (PIIAG - 12°C)

O pão industrializado integral acondicionado em Geladeira (PIIAG - 12°C) apresenta as mesmas características iniciais da amostra (PIITA - 22°C), pois, é uma outra fatia do mesmo pacote desta amostra, mas que foi acondicionada de forma diferente. A Figura 25 representa fatia reconstruída nas vistas transaxial, coronal e sagital e volume com cores em nível de cinza da amostra (PIIAG - 12°C). E abaixo a imagem do volume 3D reconstruído em diferentes posições da amostra.

##### Pão de Sanduíche

Tipo: Integral

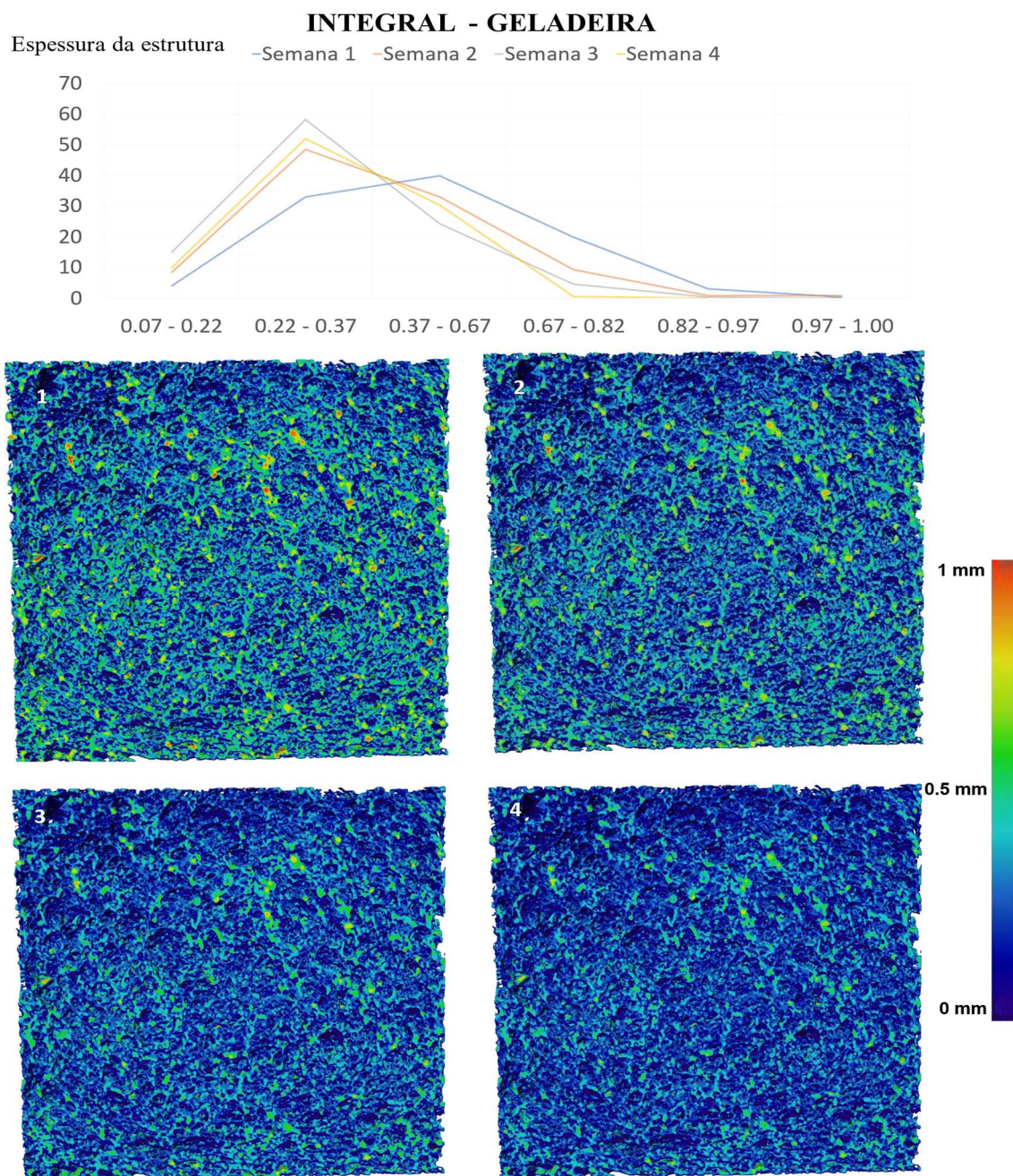
Condicionamento: Geladeira



**Figura 25 - Fatias reconstruídas nas vistas transaxial, coronal e sagital e volume 3D reconstruído em diferentes posições da amostra (PIIAG - 12°C).**



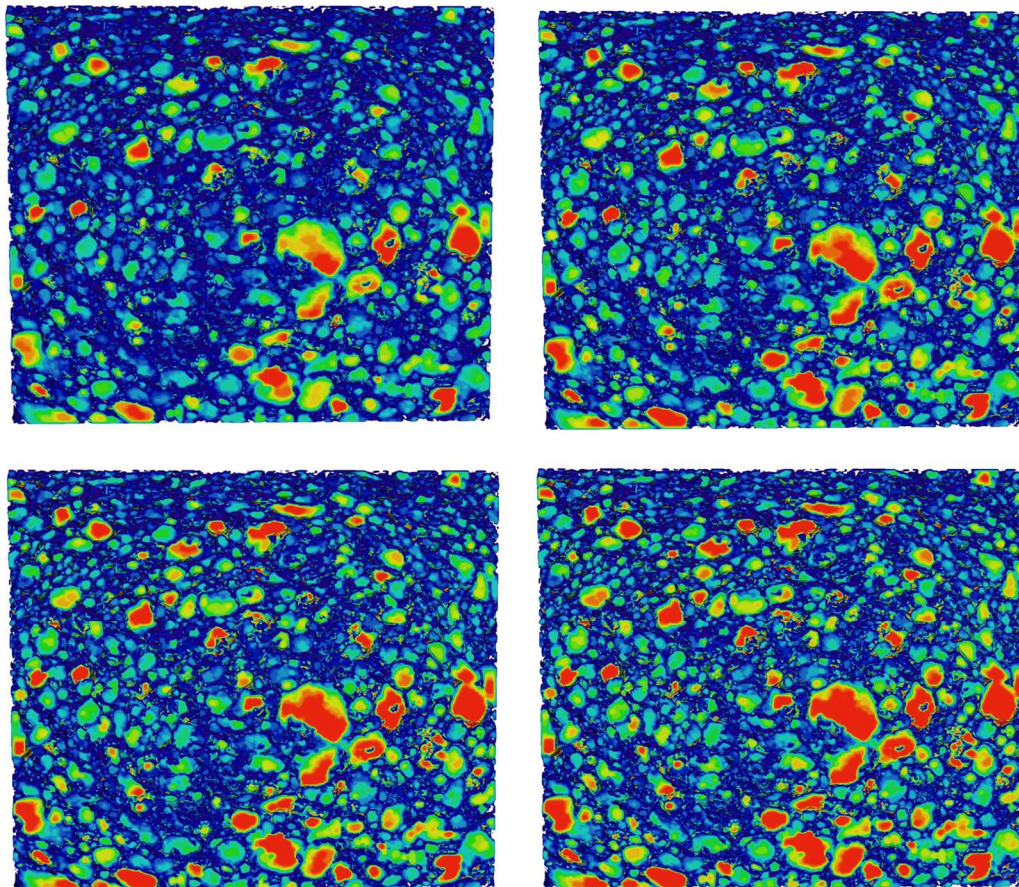
A relação da espessura da estrutura dos poros pode ser verificada por meio da Visualizações das mudanças microestruturais (profundidade de 2,025 mm) na amostra de Pão Industrializado Tradicional em Acondicionado em Geladeira (PIIAG - 12°C), que são demonstradas na figura 26 onde o código de cores está relacionado com a espessura das estruturas que destaca a perda de volume ao longo das semanas para as diferentes condições de armazenamento.



**Figura 26 – Amostra (PIIAG - 12°C), onde o código de cores está relacionado com a espessura das estruturas que destaca a perda de volume ao longo das semanas.**



As visualizações de mudanças microestruturais (profundidade de 2,025 mm), na amostra de Pão Industrializado integral Acondicionado em Geladeira (PIIAG - 12°C) ao longo das semanas de acondicionamento, podem ser observadas na figura 27, iniciando-se a observação pela imagem da linha um com coluna um, seguida da imagem da linha um com coluna dois, e ainda, da imagem da linha dois com coluna um e, por último, da imagem linha dois com coluna dois. Tem-se um aumento na cor vermelha, indicativo de mudanças nas suas microestruturas, conforme a escala gráfica do código de cores.



**Figura 27 - A figura mostra mudanças microestruturais no Pão Industrializado Integral Acondicionado em Geladeira (PIIAG - 12°C) ao longo das semanas de acondicionamento.**

### **5.1.5 Esquemas gráficos e análises das amostras em diferentes condições de armazenamento em função do tempo.**

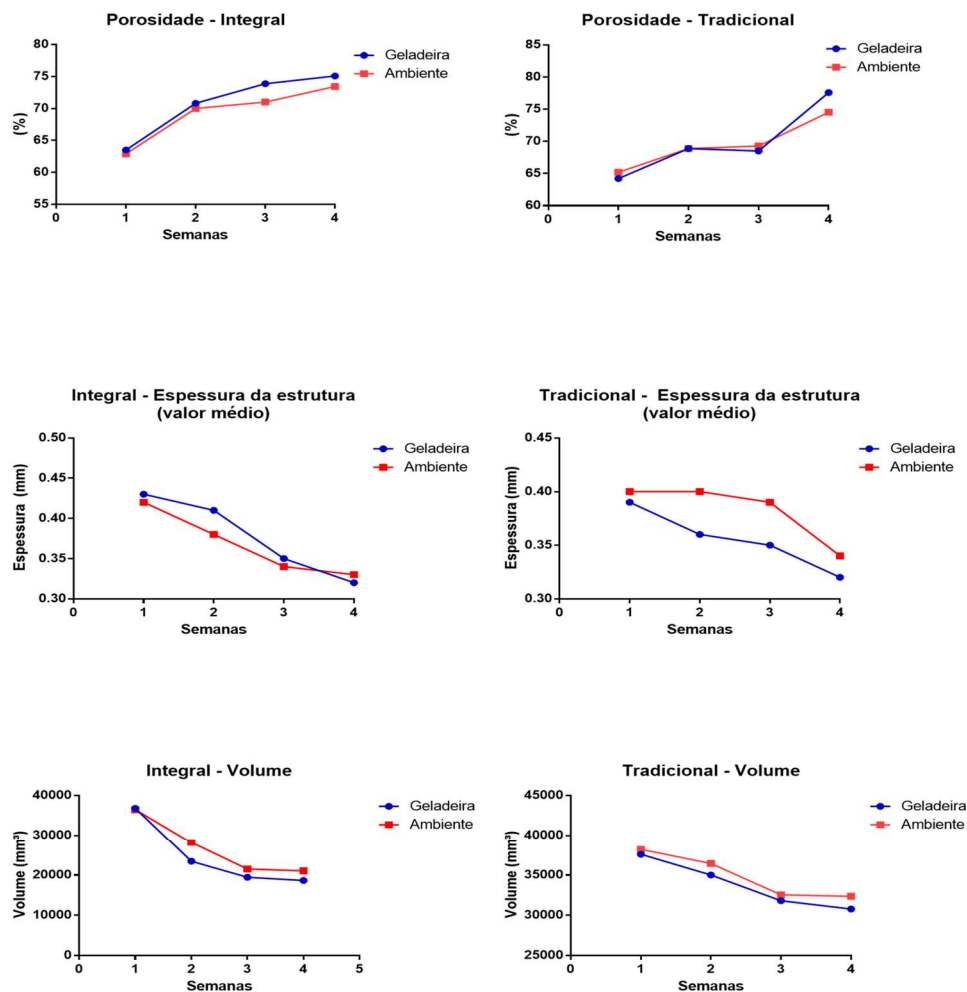
Após a aplicação da Técnica de MicroCT nas amostras a ela submetida, durante o período de quatro semanas, as mudanças ocorridas nas grandezas de porosidades, espessura das estruturas e nos seus volumes das amostras nas condições de armazenamento, podem ser comparadas através dos gráficos da figura 28.

Em análises às amostras de pães integral, acondicionado em geladeira e em temperatura ambiente, e, o tradicional, acondicionado em geladeira e em temperatura ambiente, constatamos que nas amostras (PIIAG - 12°C) e (PIITAC - 22°C) os seus percentuais de porosidade aumentaram, no decorrer das semanas, ocorrendo na amostra de pão integral acondicionado em geladeira (PIIAG - 12°C) um comportamento gráfico de curva ascendente, com tendência a uma inversão do crescimento e na amostra de pão integral a temperatura ambiente (PIITA - 22°C) os aumentos de percentuais mais inibidos e menores, com um comportamento gráfico de curva ascendente, mas com tendência à continuidade do crescimento, a partir da segunda semana. Quanto aos valores médios das espessuras das estruturas nas amostras ocorreu um decréscimo quase constante, sendo que na última semana na amostra de pão integral acondicionado em geladeira (PIIAG - 12°C) o seu decréscimo, foi mais expressivo do que na amostra de pão integral a temperatura ambiente (PIITA - 22°C), ocorrendo uma inversão da taxa dos decréscimos, pois a taxa de decréscimo nesta amostra de pão integral a temperatura ambiente (PIITA - 22°C), foi menor que na amostra de pão integral acondicionado em geladeira (PIIAG - 12°C). Quanto aos seus volumes houve, por consequência, uma redução. Sendo que esta foi maior na amostra de pão integral acondicionado em geladeira (PIIAG - 12°C).

Quanto as amostras (PITAG - 12°C) e (PITTA - 22°C) os seus percentuais de porosidade também aumentaram, no decorrer das semanas, mas ocorrendo um comportamento gráfico diferente, quase simétrico em relação aos gráficos das amostras de pão integral acondicionado em geladeira (PIIAG - 12°C) e (PIITAC - 22°C), também de curvas ascendentes, com tendências a um crescimento.

Quanto aos valores médios das espessuras das estruturas nestas amostras, também ocorreram decréscimos, sendo na amostra de pão tradicional acondicionado em geladeira (PITAG-12°C), como na amostra de pão integral acondicionado em geladeira (PIIAG - 12°C),

o decréscimo foi maior que na amostra de pão tradicional temperatura ambiente (PITTA - 22°C). Quanto aos seus volumes, tiveram comportamentos decrescentes sendo mais acentuado na amostra de pão tradicional acondicionado em geladeira (PITAG - 12°C) do que no de pão tradicional temperatura ambiente (PITTA - 22°C). Como ocorreu nas amostras do pão integral tanto o acondicionado em geladeira, quanto o a temperatura ambiente, (PIIAG - 12°C) e (PIITAC - 22°C), respectivamente.

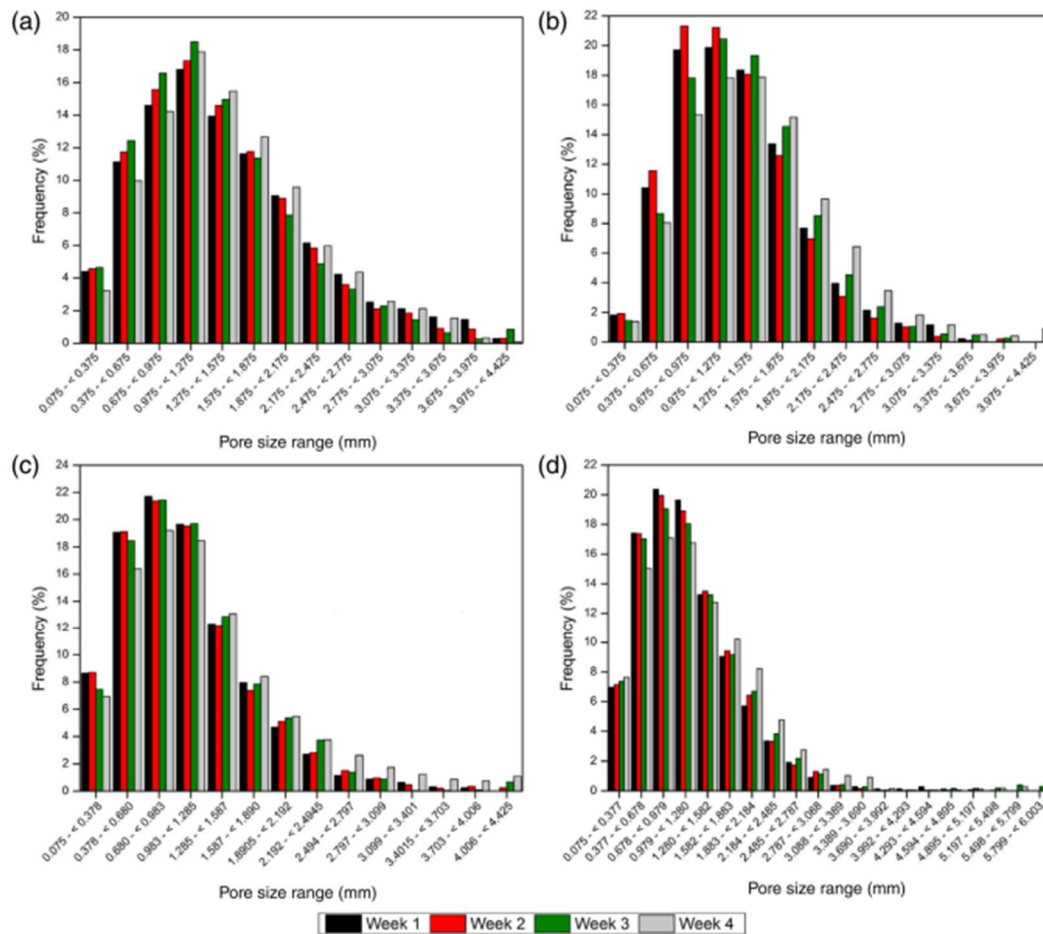


**Figura 28:** gráficos dos resultados quantitativos das grandezas de porosidades, espessura das estruturas e seus volumes das amostras dos dois tipos de pães nas duas condições de armazenamento que foram acondicionadas por quatro semanas.

Os aspectos das estruturas são visualmente diferentes, entre pão industrializado integral (PII) e o pão industrializado tradicional (PIT). O primeiro, amostra (PII), devido à sua composição, é mais densa com estruturas ligeiramente mais espessas em comparação com o segundo, amostra (PIT). Esta, tem estruturas mais finas, demonstrando uma aparência de ser mais suave, que àquela, (PII).

Com as informações obtidas, foi possível constatar que a morfologia e a microestrutura dos dois tipos de amostras de pães são diferentes. E, também, e os seus diferentes comportamentos. O que está apresentado na figura 29, através dos gráficos de barras, das figuras (a), (b), (c) e (d) em que são apresentados os resultados quantitativos das amostras durante seus acondicionamentos, do intervalo de tempo de quatro semanas. Em que temos as distribuições das faixas de tamanhos de poros ao longo das semanas na figura 29 (a), da amostra PITTA, em temperatura ambiente (22°C), na figura 29 (b) da amostra PITAG, acondicionada em geladeira (12°C), na figura 29 (c) da amostra PIITA, em temperatura ambiente (22°C), e na figura 29 (d) da amostra PIIAG, acondicionada em geladeira (12°C).

Dentre as variações observadas, às do volume de poros e induziram um aumento na conectividade dos poros. Para avaliar quantitativamente esse parâmetro, foi aplicado o algoritmo de densidade de conectividade, que avalia o quanto um poro está conectado aos circunvizinhos, como pode ser observado na Figura 31a. E na sequência, as diferenças são perceptíveis visualmente nas imagens, que denotam os comportamentos dos poros, aumentados, como mostrado na Figura 31(b) e 31(c), para as amostras PITTA e PITAG (WSB) e PIITA e PIIAG (WWB).



**Figura 29 – Distribuição da faixa de tamanho de poro ao longo das semanas para: (a) PIT em temperatura ambiente, (b) PIT para temperatura refrigerada, (c) PII em temperatura ambiente, e (d) PII para temperatura refrigerada.**

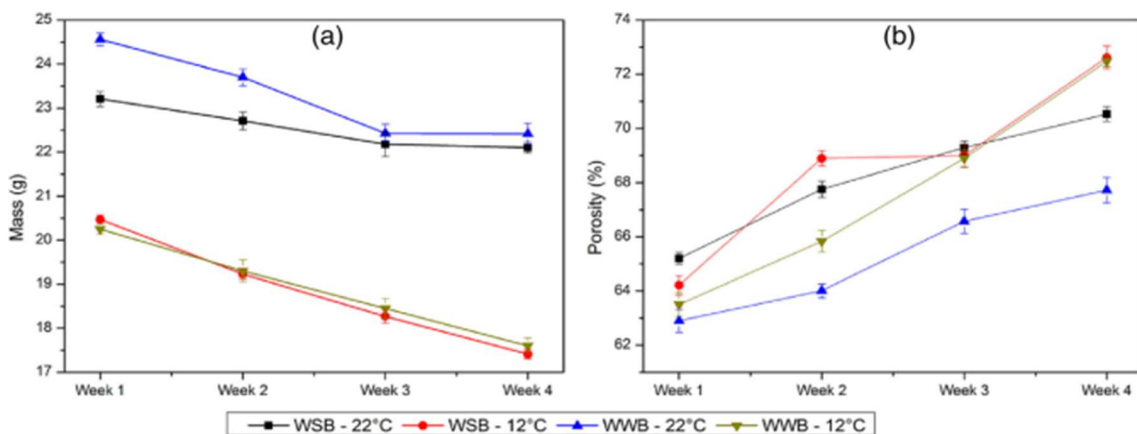
De acordo com (CAUVAIN, 1998), em um produto de panificação, a sua taxa de estabilização sofre uma interferência da temperatura de armazenamento, sendo complexos os seus fatores que controlam a sua estabilidade de armazenamento, associa-se a isto, também, o processo de congelamento que diminui a taxa de estabilização.

As variações das massas das amostras, as reduções sofridas, em função do período e dos tipos de acondicionamentos a que foram submetidas, estão representadas figura 30 (a). A análise 3D da separação de estruturas mostrou um aumento da porosidade ao longo do tempo. Foi possível verificar que para ambos os tipos de pães, o acondicionamento em geladeira causou o aumento mais expressivo da porosidade. A porosidade apresentou um aumento de cerca de 14% para a WWB para condições refrigeradas, como está constatado na Figura 30 (b). Essa diferença no volume dos poros induziu, por consequência deste comportamento das



suas estruturas, um aumento na conectividade dos poros, como mencionado anteriormente. A perda de água do pão durante o armazenamento é a principal causa das alterações estruturais. A água no pão tende a migrar do miolo para o ambiente externo durante armazenar. Este processo é impulsionado pelas diferenças de pressão entre o miolo, a crosta e a atmosfera, que neste trabalho também avaliamos a influência da temperatura nesta fase.

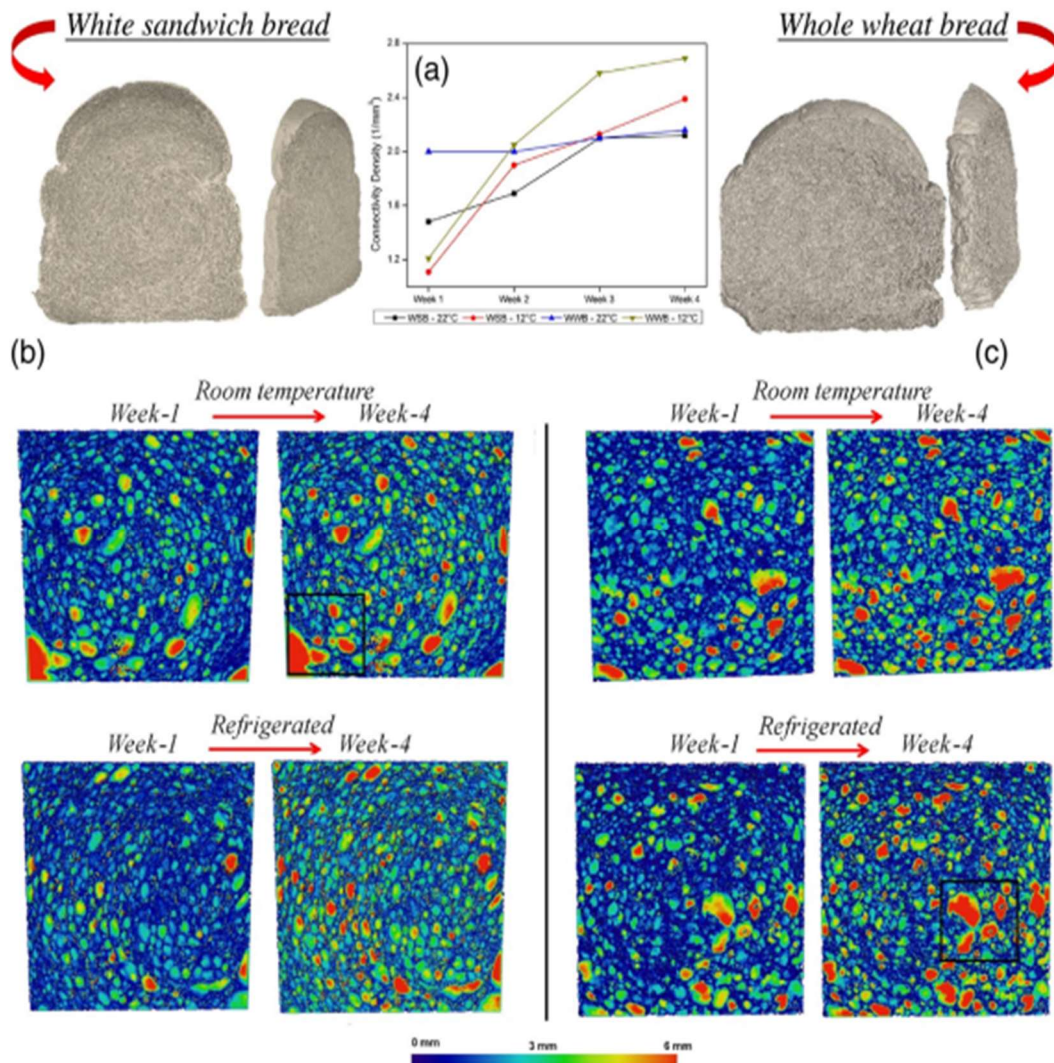
O processo de segmentação foi aplicado para converter as imagens em escala de cinza em imagens em preto e branco de acordo a um limite baseado em histograma, atribuindo o valor 1 para todos os pixels cuja intensidade estava abaixo do valor limite e zero para todos os outros. Mais informações sobre o processo de segmentação são encontradas na literatura específica, com todas as análises teóricas e etapas de todo o processo. Uma região de interesse (ROI) de 60 x 60 mm foi designada no plano transaxial de a imagem do miolo interno em um total de 100 fatias, resultando em um volume de análise de  $2,7 \times 10^3 \text{ mm}^3$ . Relevante parâmetros da estrutura 3D interna foram avaliados, como porosidade total (%), distribuição de tamanho de poros com código de cores, conectividade de poros, volume de pão ( $\text{mm}^3$ ) e espessura da estrutura (mm).



**Figura 30: Variação da massa (a) e da porosidade (b) para os dois tipos de pães ao longo das semanas e para diferentes condições de armazenamento (média  $\pm$  SD).**

Uma visão geral esquemática é apresentada nas figuras 31(a), (b) e (c) comparativa das mudanças ocorridas nos poros das amostras (PIT), que é o Pão Industrializado Tradicional, está identificada como “WSB”, do inglês, “White Sandwich Bread” e da amostra PII, que é o

Pão Industrializado Integral, está identificada como “WWB”, do inglês, “Whole Wheat Bread”, consequentemente, PITTA – 22°C = WSB – 22°C; PITAG -12°C = WSB – 12°; PIITA – 22°C = WWB – 22°C e PIIAG -12°C = WWB – 12°C), onde são apresentados os comportamentos das densidades de conectividade das amostras em função das semanas, graficamente, na figura 31 (a); e nas figuras 31 (b) e 31 (c), uma visualização dos poros com código de cores para diâmetro dentro da ROI, bem como o destaque nas regiões, destacadas pela área interna do retângulo assinalada na cor preta, onde houve uma alta do aumento da conectividade dos poros das amostras PITTA e PITAG, bem como, das amostras PIITA e PIIAG, respectivamente.



**Figura 31: (a) Densidade de conectividade ao longo das semanas, (b) imagens dos poros com código de cores para diâmetro dentro da ROI analisados para o pão de sanduíche branco, com uma região destacada pela área interna do retângulo assinalada na cor**

preta indicando o aumento da conectividade e (c) imagens dos poros analisados no pão integral, também, com uma região destacada pela área interna do retângulo assinalada na cor preta, indicando o aumento da conectividade.

## **5.2. Método de ajuste de esfera (“Sphere Fitting Method”)**

O Método Sphere Fitting foi usado para quantificar 3D estruturas onde as distâncias 3D são calculadas ajustando as esferas dentro da distribuição da estrutura, como mostrado na Figura 4, do Capítulo 3, no item 5. É essencial identificar o tamanho dos poros, geometria, bem como sua distribuição e conectividade, a fim de desenvolver pães com determinadas propriedades morfológicas e mecânicas responsáveis por propriedades físicas e sensoriais, pois essas informações podem ser aplicadas na saúde e indústria alimentar.

## **5.3. Mudanças na porosidade ao longo do tempo**

Nesse trabalho, o estado de equilíbrio foi alcançado após 28 dias de armazenamento. A amostra de pão industrializado tradicional armazenado em geladeira a 12°C (PITAG) perdeu um total de 30,4% de seu peso, e a amostra de pão industrializado integral, armazenado nessas mesmas condições, (PIIAG) perdeu um total de 29,6% de seu peso. Na temperatura ambiente, 22°C, as amostras de pão industrializado tradicional (PITTA) e pão industrializado integral (PIITA) perderam uma total de 11,6%, e 10,3%, de seus pesos, respectivamente.

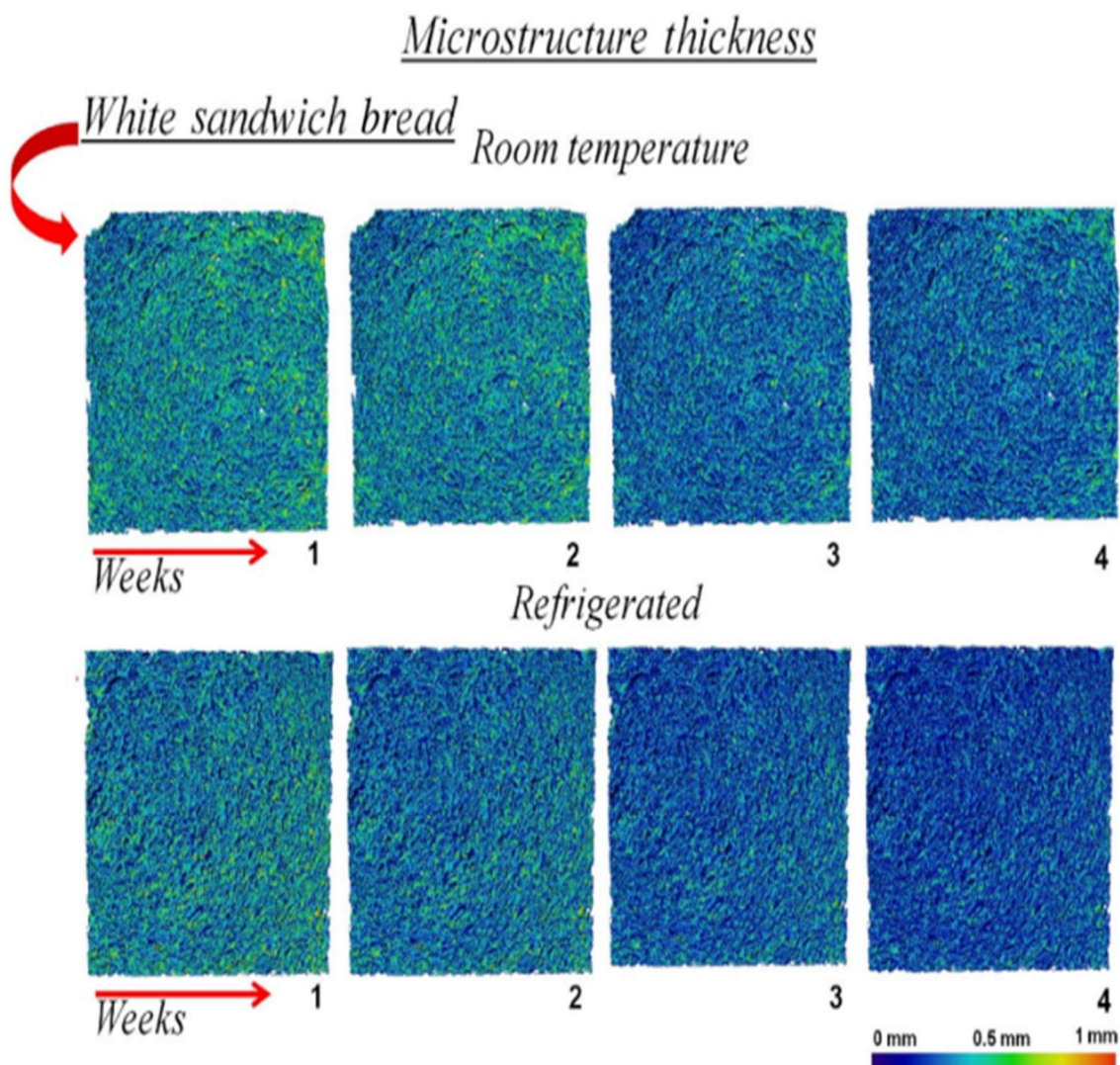
A ocorrência deste processo de redução das massas das amostras, ao longo do tempo, e consequentemente, dos seus pesos, nesta etapa do processo das análises, pode ser constatada através da representação gráfica da figura 30(a). As análises 3D da separação das estruturas mostraram um aumento da porosidade ao longo do tempo. Foi possível verificar que para ambos os tipos de pães, que o procedimento de armazenamento em geladeira, nas condições já descritas, causou o aumento mais expressivo da porosidade. Pois, ela apresentou um aumento de cerca de 14% para a amostra de pão industrializado integral armazenado na geladeira (PIIAG), figura 30(b). Essa diferença no volume dos poros induziu um aumento na conectividade dos poros, conforme mencionado anteriormente. Para avaliar esse parâmetro, foi aplicado o algoritmo de densidade de conectividade, que avalia o quanto um poro é ligado aos que o rodeiam, como se pode ver em Figura 31(a). Como consequência, os poros tornam-se maiores, como mostrado nas figuras 31 (b) e (c), para as amostras dos pães industrializado integrais (PII) e dos pães industrializado tradicional (PIT), nas condições de armazenamentos.

Durante o processo de armazenamento, as moléculas de água são imobilizadas devido às suas incorporações nas estruturas cristalinas do amido, que são formadas pela recristalização de amilopectina (molécula componente do amido) após o preparo do pão. Portanto, a taxa de desidratação do pão diminui ao longo do tempo e atinge um estado de equilíbrio, indicando que não há mais nenhuma perda adicional de estrutura.

Conforme relatado na literatura, a resposta glicêmica é relacionada com a estrutura do pão, já que mais compactas estruturas resultam em um baixo índice glicêmico. Por outro lado, a sensação na boca está relacionada com as propriedades celulares, como pão mais poroso (e consequentemente, com menor espessura da estrutura), produz uma textura mais aberta, resultando em um miolo mais macio e melhor qualidade sensorial. Além disso, manter o pão em condições de refrigeração faz com que as moléculas de amido recristalizem muito rapidamente e o pão fica desidratado. Como resultado, desenvolverá um sabor e textura rançosos.

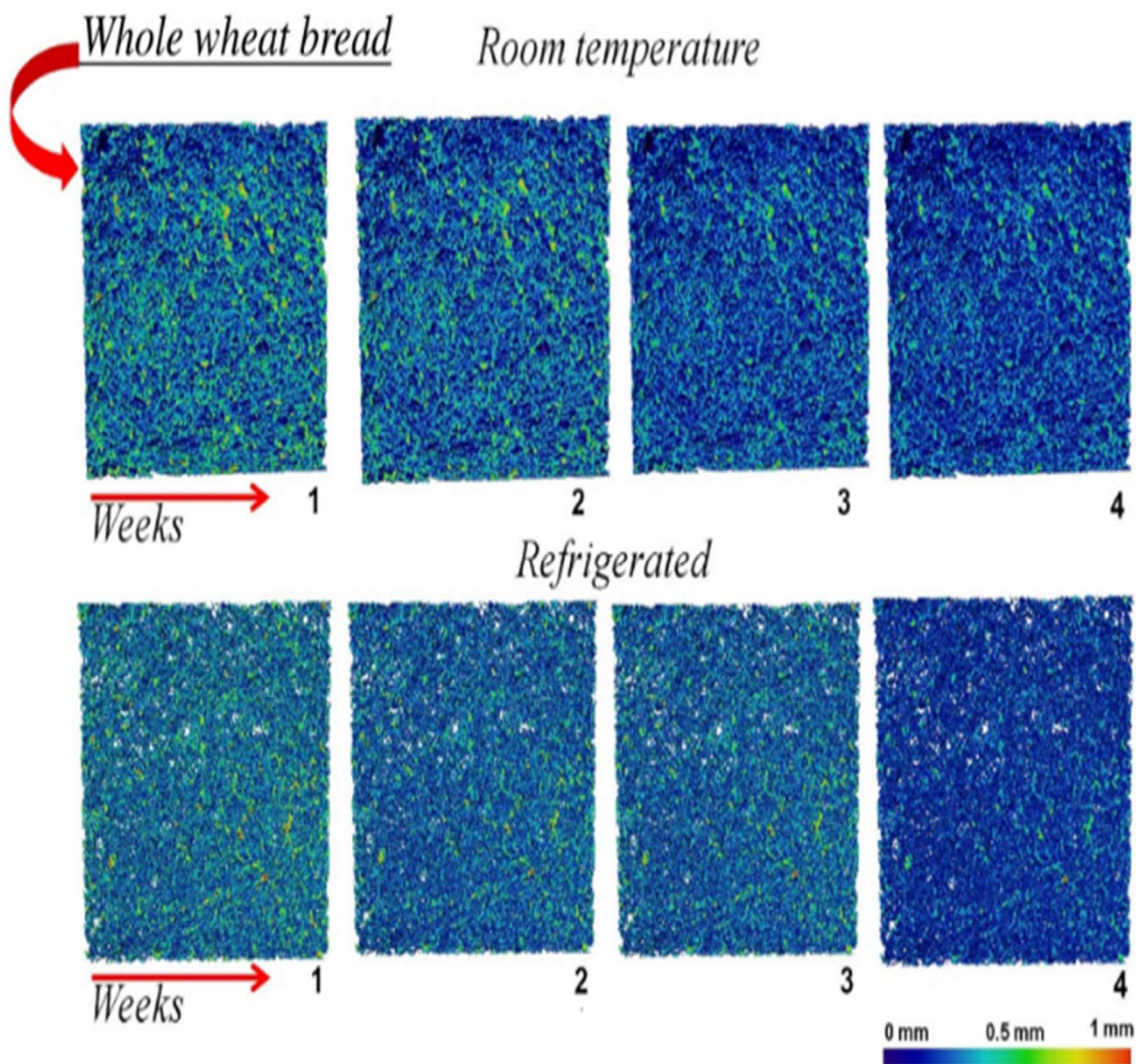
#### **5.4. Mudanças na microestrutura ao longo do tempo.**

As análises das imagens MicroCT mostram que o pão sofre uma perda de estrutura ao longo das semanas, mais evidentemente na terceira semana após a produção. Desta forma, foi possível demonstrar a evolução das características estruturais do pão antes, durante e após a desidratação como uma análise dependente do tempo, conforme mostrado nas figuras 32 e figura 33, em que um código de cores está relacionado com a espessura das estruturas que destaca a perda de volume ao longo das semanas para as diferentes condições de armazenamento.



**Figura 32- Mudanças microestruturais (profundidade de 2,025 mm), (PITTA) e (PITAG).**



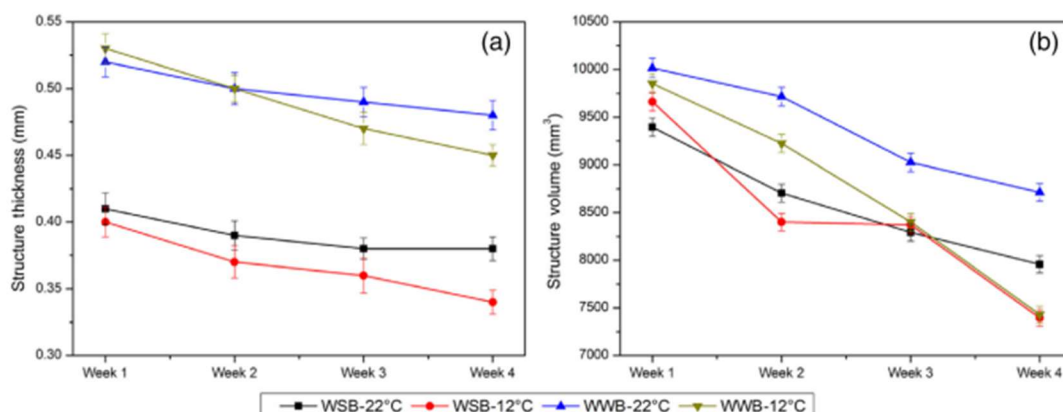


**Figura 33- Mudanças microestruturais (profundidade de 2,025 mm), (PIITA) e (PIIAG)**

As amostras de Pão Industrializado Integral (PII), identificadas como “WWB” (do inglês, “Whole Wheat Bread”), nas figuras 34 (a) e 34 (b), nas duas condições de armazenamento, mostram maiores valores de espessura da estrutura, em relação com as amostras de Pão Industrializado Tradicional (PIT), identificadas como “WSB” (do inglês, “White Sandwich Bread”), também, nas duas condições de armazenamento, figura 34 (a), uma vez que tem uma estrutura mais densa, de acordo com o mencionado anteriormente. E os resultados comparativos do volume da estrutura das amostras de Pão Industrializado Integral (PII), identificadas como “WWB” (do inglês, “Whole Wheat Bread”), nas duas condições de

armazenamento, figura 34 (b), também se apresentaram maiores do que os das amostras de Pão Industrializado Integral (PIT), identificadas como “WSB” (do inglês, “White Sandwich Bread”), também, nas duas condições de armazenamento.

Após 1 semana de armazenamento, uma maior concentração de estrutural espessura é observada entre 0,37 e 0,43 mm (em torno de 40%). Enquanto que, durante 4 semanas de armazenamento, esta concentração máxima sobe para cerca de 55% e se desloca para uma faixa de espessura estrutural menor, entre 0,22 e 0,37 mm. Os resultados relativos à espessura da estrutura e volume das amostras (PITTA) e (PITAG) e das amostras (PIITA) e (PIIAG) podem ser vistos na figura 34.



**Figura 34 - Resultados comparativos de (a) espessura da estrutura em função do tempo (as semanas) e (b) volume da estrutura em função do tempo (as semanas) (média  $\pm$  SD).**

## 6. Conclusões

É a MicroCT uma técnica não destrutiva e de grande potencial para análises, que permite uma visualização de estruturas em 2D e 3D. Porém, os parâmetros a serem utilizados na aquisição promovem influência direta nos resultados qualitativos e quantitativos na exploração e caracterização determinados aspectos nas estruturas das amostras, no resultado final com a resolução da imagem a ser obtida. Os resultados demonstram que o tamanho do pixel e a matriz do detector são os principais parâmetros que influenciam na resolução e a necessidade do uso de filtros adicionais para a qualidade da imagem. A microtomografia foi considerada uma excelente técnica de caracterização com a melhor resolução de imagem possível.

Com a técnica de microtomografia computadorizada por raios X, empregada nesta pesquisa, na análise de pão industrializado, e, com os parâmetros utilizados na aquisição, acertadamente, foi possível acessar informações da ordem de micrômetros nas amostras de pão industrializado, após às análises. Para avaliar microestruturas porosas, das amostras, a análise de imagens é uma das etapas necessária. Pois, com as imagens geradas, com excelentes resoluções, foi possível concluir que o emprego da técnica permite a obtenção de bons resultados qualitativos e quantitativos no estudo das microestruturas porosas das amostras. Assim sendo a análise de imagens, com este recurso, torna-se não apenas uma etapa do processo de investigação, mas, também, uma estratégia fundamental na caracterização dos parâmetros das amostras, em quaisquer condições que se encontrem e que possam ser submetidas à MicroCT.

Tal viabilidade de análise, das imagens, teve a contribuição direta do uso adequado do tamanho do pixel e da matriz do detector. Os resultados do trabalho mostraram que massas de pães têm estrutura complexa, mas que podem ser bem caracterizadas detalhadamente através de imagens por MicroCT, que mostram a existência de conexões entre essas estruturas porosas, demarcando seus arranjos.

As análises das imagens, reconstruídas, nesta pesquisa, mostraram que o pão sofreu perda de estrutura ao longo das semanas, mais evidentemente a partir da terceira semana após a produção, como pode ser observado através da figura 34.

Constatamos que manter o pão refrigerado acelera sua perda de líquido, num processo de desidratação havendo a remoção da umidade do pão, ocasionando uma mudança na sua configuração estrutural, devido ao processo de diminuição da presença de água, nas amostras



e, aumentando assim a perda de sua estrutura inicial. E o valor máximo de degradação estrutural dos pães foi encontrado para as condições de armazenamento em refrigeração, ao longo do tempo, no Pão Industrializado Tradicional (PIT) e no Pão Industrializado Integral (PII).

Sabemos da importância de melhorias na qualidade das variedades de tipos de pães industrializados, devido aos parâmetros voltados às demandas ao consumo destes pães, tais como: estética visual, consistência, sensação na boca e o valor nutricional, que envolvem a preocupação com as propriedades reológicas dos pães. A análise da microCT nos dois tipos de pães industrializados, submetidos às diversas condições de armazenamentos em função das temperaturas e do intervalo de tempo, permitiu encontrar informações que certamente outras técnicas empregadas, até então, não permitiram, com tanta clareza, a exemplo detalhes na produção de imagens em 3D com tamanha precisão, nitidez e beleza das modificações sofridas nas microestruturas das amostras. Foi possível acompanhar visualmente as evoluções estruturais e realizar análises para evidenciar a propagação desses poros.

Com uma visão no aperfeiçoamento e diversificação das ofertas de pães industrializados, com garantias para a qualidade assegurada, o emprego da Técnica da MicroCT é eficaz às pesquisas da produção e aperfeiçoamento dos mesmos. Trazendo benefícios em suas formas estruturais, tipos de poros, dos elementos de sua constituição (tipos de massas) e finalidades, bem como, as importâncias de seu manuseio e condições de acondicionamentos para o seu consumo final.

Portanto, o conhecimento da caracterização da microestrutura de um certo material, tem papel essencial na compreensão dos comportamentos de suas microestruturas e no desenvolvimento de produtos com parâmetros estruturais que atendam a fins específicos e com características desejadas. E com os estudos desses parâmetros são viáveis às reformulações para melhorias na fabricação de pães, quando julgar-se necessário, afim de promover melhorias na sua degustação e estabilidade durante o armazenamento antes do consumo, que ficarão em função de fatores e/ou características dos tipos de pães e suas constituições.

Assim, os estudos realizados durante a pesquisa, do Pão Industrializado Tradicional e Integral, com a aplicação da Técnica de Microtomografia Computadorizada de Raios X, trouxe-nos informações da dinâmica do comportamento das suas microestruturas, em função das condições de armazenamentos, associadas as temperaturas e aos intervalos de tempo do armazenamento, que auxiliam a compreendê-los e, conseqüentemente, nos cuidados de manuseio e de conservação, afim de manter as suas características de qualidade para o seu

consumo. E que favorecem nos aperfeiçoamentos e no desenvolvimento de pães industrializadas e podem ser de grande benefício na aplicação aos estudos de massas, em geral, comestíveis ou não, que apresentem nos seus arranjos estruturais configurações semelhantes, próximas ou até mesmo diferentes, daquelas aqui pesquisadas.

## 7. Referências Bibliográficas

- AL-KHULAIFI, Y., Lin, Q., Blunt, M. J., & Bijeljic, B. (2018). Reservoir-condition pore-scale imaging of dolomite reaction with supercritical CO<sub>2</sub> acidified brine: Effect of pore-structure on reaction rate using velocity distribution analysis. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 68, 99-111.
- ALMEIDA, B. C. De; Ormiga, F.; De Araújo, M. C. P., et al., 2015, “Influence of Heat Treatment of Nickel-Titanium Rotary Endodontic Instruments on Apical Preparation: A Micro-Computed Tomographic Study”, *Journal of Endodontics*, v. 41, pp. 2031-2035.
- ALTAMIRANO-FORTOUL, R., A. Le-Bail, S. Chevallier, C.M. Rosell. Effect of the amount of team during baking on bread crust features and water diffusion. *Journal of Food Engineering*, Volume 108, Issue 1, 2012, Pages 128-134.
- ARAÚJO, Olga Maria Oliveira de. Metodologia para Análise de Rochas por Meio Digital Utilizando MicroCT e Simulações de Fluxo de Fluidos. Tese (doutorado) - UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2019.
- ARRANZ-OTAEGUI, A., CARRETERO, L. G., RAMSEY, M. N., FULLER, D. Q., & RICHTER, T. (2018). Archaeobotanical evidence reveals the origins of bread 14,400 years ago in northeastern Jordan. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(31), 7925-7930.
- BABIN, P. et al. (2006). Fast X-ray tomography analysis of bubble growth and foam setting during breadmaking, *Journal of Cereal Science*, 43, 393-397.
- BABIN, P., et al. X-ray tomography study of the cellular structure of extruded starches and its relations with expansion phenomenon and foam mechanical properties. *Carbohydrate Polymers*, v.68, p. 329-340, 2007.
- BADEA, C. T.; DRANGOVA, M.; HOLDWORTH, D. W.; JOHNSON, G. A. In vivo small animal imaging using micro-CT and digital subtraction angiography. *Physics in medicine and biology*, v. 53, n. 19, p. 319-350, 2008.

- BAVEYE, Philippe, et al. Effect of sampling volume on the measurement of soil physical properties: simulation with X-ray tomography data. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13.5: 775.
- BELLIDO, G.B., SCANLON, M.G., PAGE, J.H. & HALLGRIMSSON, B. The bubbles size distribution in wheat flour dough. *Food Research International*, v. 39, p. 1058-1066, 2006.
- BOERCKEL, Joel D., et al. "Microcomputed tomography: approaches and applications in bioengineering." *Stem Cell Research & Therapy*, vol. 5, no. 6, 29 Dec. 2014. Gale Academic.
- BULL, J., et al. (1980). The History of Computed Tomography. In: Caillé, JM., Salamon, G. Computerized Tomography. Conference paper. Springer Berlin Heidelberg, 1980. p. 3-6.
- BUSHBERG, J. T., SEIBERT, J. A., LEIDHOLDT, E. M., BOONE, J. M., "Computed Tomography". In: John, J, Snyder, A., George, T. (eds), *The Essential Physics of Medical Imaging*. 2. ed., Chapter 13, Philadelphia, USA, Lippincott Williams & Wilkins, 2002.
- BUZUG, Thorsten M., *Computed tomography: from photon statistics to modern cone-beam CT*. Springer Science & Business Media, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2008.
- CARVALHO, Antonio Carlos Pires et al. História da tomografia computadorizada. *Revista Imagem*, v. 29, n. 2, p. 61-66, 2007.
- CAUVAIN, S. P. Improving the control of staling in frozen bakery products. *Trends in Food Science & Technology*, v. 9, n. 2, p. 56-61, 1998.
- CAUVAIN, Stanley P. (Ed.). *Breadmaking: improving quality*. 2. Ed., N.229, Cambridge, UK, Woodhead Publishing Series in Food Science, Tecnology and Nutrition, 2012.
- CHAKRABARTI-BELL, S., Shuo Wang, Kadambot H.M. Siddique. Flour quality and disproportionation of bubbles in bread doughs. *Food Research International*, Volume 64, 2014, Pages 587-597.
- CHEN, Y., Annapaola Parrilli, Florian Jaedig, Adrian Fuhrmann, Christian Staedeli, Peter Fischer, Erich J. Windhab. Micro-computed tomography study on bread dehydration and structural changes during ambient storage. *Journal of Food Engineering*, Volume 296, 2021.

- CLARK, D. P.; BADEA, C. T. Micro-CT of rodents: state of the art and future perspectives. *Physica medica*, v. 30, n. 6, p. 619-634, 2014.
- CORMACK, A., (1963). Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. *Journal of Applied Physics*, 34(9), pp. 2722-2727.
- CUNHA, A. C.; Marquezan, M.; Lima, I., et al., 2015, “Influence of bone architecture on the primary stability of different mini-implant designs”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, v. 147, pp. 45-51.
- DALEN, G. Van, P. Notenboom, L. J. Van Vliet, L. Voortman, E. Esveld. *Imagem 3-D, análise e modelagem de produtos de cereais porosos usando microtomografia de raios-X*. *Image Analysis Stereology*, 26 (2007), pp. 169-177.
- DE-DEUS, G.; Belladonna, F. G.; Silva, E. J. N. L. et al, 2015, “Micro-CT Evaluation of Non-instrumented Canal Areas with Different Enlargements Performed by NiTi Systems”, *Brazilian Dental Journal*, v. 26, pp. 624-629.
- DE-DEUS, G.; Belladonna, F. G.; Simões'Carvalho, M., et al., 2019, “Shaping efficiency as a function of time of a new heat-treated instrument”, *International Endodontic Journal*, v. 52, pp. 337-342.
- DE-DEUS, G.; Belladonna, F. G.; Souza, E. M., et al., 2015, “Micro-computed Tomographic Assessment on the Effect of ProTaper Next and Twisted File Adaptive Systems on Dentinal Cracks”, *Journal of Endodontics*, v. 41, pp. 1116-1119.
- DE-DEUS, G.; Belladonna, F. G.; Zuolo, A. S., et al., 2019, “XP-endo Finisher R instrument optimizes the removal of root filling remnants in oval-shaped canals”, *International Endodontic Journal*, v. 52, pp. 899-907.
- DE-DEUS, G.; Cardoso, M. L.; Belladonna, F. G., et al, 2019, “Performance of Reciproc Blue R25 Instruments in Shaping the Canal Space without Glide Path”, *Journal of Endodontics*, v. 45, pp. 194-198.
- DE-DEUS, G.; Carvalhal, J. C. de A.; Belladonna, F. G., et al., 2017, “Dentinal Microcrack Development after Canal Preparation: A Longitudinal in Situ Micro-computed Tomography Study Using a Cadaver Model”, *Journal of Endodontics*, v. 43, pp. 1553-1558.

- DE-DEUS, G.; Marins, J.; Silva, E. J. N. L., et al., 2015, “Accumulated Hard Tissue Debris Produced during Reciprocating and Rotary Nickel-Titanium Canal Preparation”, *Journal of Endodontics*, v. 41, pp. 676-681.
- EISBERG, R., RESNICK, R., Física Quântica. 4. Ed., Capítulo 2, Rio de Janeiro, Brasil, Campus, 1986.
- ELSNER, RF, et al. (2005), raios X Chandra simultâneos, ultravioleta do Telescópio Espacial Hubble e observações de rádio Ulysses da aurora de Júpiter, *J. Geophys. Res.*, 110, A01207, doi: 10.1029/2004JA010717 .
- ERIC N. Landis, Denis T. Keane. X-ray microtomography, *Materials Characterization*, Volume 61, Issue 12, 2010, Pages 1305-1316,
- FALCONE, P. M., Baiano, A., Conte, A., Mancini, L., Tromba, G., Zanini, F., & Del Nobile, M. A. (2006). Imaging techniques for the study of food microstructure: a review. *Advances in food and nutrition research*, 51, 205-263. 51(06), 205–263.
- FILIZ, Koksel, Serdar Arıtan, Anatoliy Strybulevych, John H. Page, Martin G. Scanlon. The bubble size distribution and its evolution in non-yeasted wheat flour doughs investigated by synchrotron X-ray microtomography. *Food Research International*, Volume 80, 2016, Pages 12-18.
- FRISULLO, P., LAVERSE, J. & DEL NOBILE, M.A. (2009). X-ray computed tomography to study processed meat microstructure. *Journal of Food Engineering*, 94, 283-289.
- GOMEZ, W.; Sales, E.; Lopes, R. T., et al., 2013, “A comparative study of automatic thresholding approaches for 3D x-ray microtomography of trabecular bone”. *Medical Physics*, 40: 091903.
- GUILLERMIC, R.M., F. Koksel, X. Sun, D.W. Hatcher, M.T. Nickerson, G.S. Belev, M.A. Webb, J.H. Page, M.G. Scanlon. Bubbles in noodle dough: Characterization by X-ray microtomography. *Food Research International*, Volume 105, 2018, Pages 548-555.
- HOUNSFIELD, G. (1973). Computerized transverse axial scanning (tomography). Part I. Description of a system. *British Journal of Radiology*, 46, p. 1016.

- JEKLE, M., Andreas Fuchs, Thomas Becker. A normalized texture profile analysis approach to evaluate firming kinetics of bread crumbs independent from its initial texture. *Journal of Cereal Science*, Volume 81, 2018, Pages 147-152.
- KAPLAN, I. Física Nuclear. 2. ed., Capítulos 4,15, Cambridge, Massa., USA, 1978.
- KOCER, D., Zeynep Hicsasmaz, Alev Bayindirli, Sinan Katnas. Bubble and pore formation of the high-ratio cake formulation with polydextrose as a sugar- and fat-replacer. *Journal of Food Engineering*, Volume 78, Issue 3, 2007, Pages 953-964.
- KOKSEL, F., Arıtan, S., Strybulevych, A., Page, J., & Scanlon, M. (2016a). The bubble size distribution and its evolution in non-yeasted wheat flour doughs investigated by synchrotron X-ray microtomography. *Food Research International*, 80, 12–18.
- KOKSEL, F., Scanlon, M. G., & Page, J. H. (2016b). Ultrasound as a tool to study bubbles in dough and dough mechanical properties: A review. *Food Research International*, 89, 74-89.
- LAMPIGNANO, V., J. Laverse, M. Mastromatteo, M.A. Del Nobile. Microstructure, textural and sensorial properties of durum wheat bread as affected by yeast content. *Food Research International*, Volume 50, Issue 1, 2013, Pages 369-376.
- LAPE, A.D.; Jensen, S.; Jeor, V. L. St., et al., 2008, “Use of X-ray Micro Computed Tomography in the Evaluation of Bread Crumb Structure”, *Microscopy and Microanalysis*, v.14, n. S2, pp. 700-701.
- LIM, K.S. & BARIGOU, M. (2004). X-ray tomography of cellular food products. *Food Research International*, 37, 1001-1012.
- LIM, KS, M. Barigou. Microtomografia computadorizada de raios-X de produtos alimentícios celulares, *Food Research International*, 37 (2004), pp. 1001-1012.
- LIMA, Adriana de Souza, 2014, “Fortificação de pão de forma com cálcio e avaliação do consumo alimentar deste nutriente em mulheres adultas”. Tese (Doutorado), UFPB/CT, João Pessoa, PB, 2014.



- LIMA, I.; Taam, P.; Da Costa, V., et al., 2011, “Study of strontium ranelate bone issues by X-ray microtomography”, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, v. 652, pp. 779-782.
- LIMA, L.S., (2013) *Lei de Lambert–Beer*, *Rev. Ciência Elem.*, V1(1), 47.
- LIU, X. S., E. M. Stein, B. Zhou, C. A. Zhang, T. L. Nickolas, A. Cohen, V. Thomas, D. J. McMahon, F. Cosman, J. Nieves et al., “Individual trabecula segmentation (ITS)-based morphological analyses and microfinite element analysis of hr-pqct images discriminate postmenopausal fragility fractures independent of dxa measurements”, *Journal of Bone and Mineral Research*, vol. 27, no. 2, pp. 263-272, 2012.
- LIU, X. Sherry et al. Individual trabecula segmentation (ITS)-based morphological analyses and microfinite element analysis of HR-pQCT images discriminate postmenopausal fragility fractures independent of DXA measurements. *Journal of Bone and Mineral Research*, v. 27, n. 2, p. 263-272, 2012.
- LOMOLINO, G., et al. Investigating the einkorn (*Triticum monococcum*) and common wheat (*Triticum aestivum*) bread crumb structure with X-ray microtomography: effects on rheological and sensory properties. *Int J Food Sci Technol*, v. 52, p. 1498-1507, 2017.
- LOPES, A. P.; FIORI A. P.; REIS NETO, J. M.; MARCHESE, C.; VASCONCELLOS, E. M. G. et al. Analise tridimensional de rochas por meio de microtomografia computadorizada de raios X integrada a petrografia. *Geociências*, v. 31, n. 1, p. 129-142, 2012.
- MACHADO, Alessandra Silveira, 2015, “Caracterização Geológica de Rochas Carbonáticas Através da Técnica de Microtomografia Computadorizada de Raios X”, Tese (Doutorado), Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE.
- MARCELIANO-ALVES, M. F.; Lima, C. O.; Bastos, L. G. do P. M. N., et al, 2019, “Mandibular mesial root canal morphology using micro-computed tomography in a Brazilian population”, *Australian Endodontic Journal*, v. 45, pp. 51-56.
- MARTÍNEZ-REINA, M., Eliseo Amado-González. Historia y didáctica de la Química a través de sellos postales: un ejemplo con Marie Curie, *Educación Química*, Volume 24, Issue 1, 2013, Pages 71-78,

- MASTROMATTEO, M., Danza, A., Lecce, L., Spinelli, S., Lampignano, V., Laverse, J., Contò, F. and Del Nobile, M.A. (2014), Effect of durum wheat varieties on bread quality. *Int J Food Sci Technol*, 49: 72-81.
- MORAES, R. dos R.; Santos, T. M. P. dos, et al, 2019, “Reciprocating instrumentation in a maxillary primary central incisor: A protocol tested in a 3D printed prototype”, *International Journal of Paediatric Dentistry*, v. 29, p. 50-57.
- MOUSSAWI, Ali, et al. Volume digital image correlation to assess displacement field in compression loaded bread crumb under X-ray microtomography. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 25, p. 78-87, 2014.
- NEVES, A. A.; Lourenço, R. A.; Alves, H. D., et al., 2015, “Caries-removal effectiveness of a papain-based chemo-mechanical agent: A quantitative micro-CT study”, *Scanning*, v. 37, p. 258-264.
- NEVES, A. A.; SILVA, E. J. ; ROTHER, J. M.; BELLADONA, F. G. ; ALVES, H. D. ; LOPES, R. T. ; PACIORNIK, S. ; DE-DEUS, G. A. . Exploiting the potential of free software to evaluate root canal biomechanical preparation outcomes through micro-CT images. *International Endodontic Journal*, v. 48, p. 1033-1042, 2015.
- ODGAARD, A., & GUNDERSEN, H. J. G. (1993). Quantification of connectivity in cancellous bone, with special emphasis on 3-D reconstructions. *Bone*, 14(2), 173-182.
- PEREIRA, G.R.; Rocha, H.S.; Calza, C., et al., 2011, “3D elemental distribution images in biological samples by XRF CT”, *X-Ray Spectrometry*, v. 40, pp. 206-264.
- PIMENTA, M. A.; Frasca, L. C.; Lopes, R. T., et al., 2015, “Evaluation of marginal and internal fit of ceramic and metallic crown copings using x-ray microtomography (micro-CT) technology”, *The Journal of Prosthetic Dentistry*, v. 114, pp. 223-228.
- PRIMO-MARTÍN, C., et al. (2010). Bread crispness and morphology can be controlled by proving conditions. *Food Research International*, 43, 207-217.
- QUEIROZ, P. J., et al. Microtomografia Computadorizada: Princípios de funcionamento e utilização em amostras biológicas. *ENCICLOPEDIA BIOSFERA*, v. 16, n. 29, 2019.

- RATHNAYAKE, H. A., S. B. Navaratne, C. M. Navaratne. "Porous Crumb Structure of Leavened Baked Products", *International Journal of Food Science*, vol. 2018, 2018.
- RÉMY, Éric; THIEL, Édouard. Medial axis for chamfer distances: computing look-up tables and neighborhoods in 2D or 3D. *Pattern Recognition Letters*, 2002, 23.6: 649-661.
- RZIGUE, A., Jean-Yves Monteau, Khadidja Marmi, Alain Le Bail, Sylvie Chevallier, Anne-Laure Réguerre, Vanessa Jury, Bread collapse. Causes of the technological defect and impact of depanning time on bread quality, *Journal of Food Engineering*, Volume 182, 2016, Pages 72-80.
- SCANLON, M. G.; ZGHAL, M. C. Bread properties and crumb structure. *Food research international*, v. 34, n. 10, p. 841-864, 2001.
- SCHAMBACH, S. J.; BAG, S.; GRODEN, C.; SCHILING, L.; BROCKMANN, M. A. Vascular imaging in small rodents using micro-CT. *Methods*, v. 50, n. 1, p. 26-35,
- SHARMA, K. V., de Araujo, O. M., Nicolini, J. V., Straka, R., Ferraz, H. C., Lopes, R. T., & Tavares, F. W. (2018). Laser-induced alteration of microstructural and microscopic transport properties in porous materials: experiment, modeling and analysis. *Materials & Design*, 155, 307-316
- SHEHZAD, A., H. Chiron, G. Della Valle, K. Kansou, A. Ndiaye, A.L. Réguerre. Porosity and stability of bread dough during proofing determined by video image analysis for different compositions and mixing conditions. *Food Research International*. Volume 43, Issue 8, 2010, Pages 1999-2005.
- SOFIANE, Guessasma, Hedi Nouri. Compression behaviour of bread crumb up to densification investigated using X-ray tomography and finite element computation, *Food Research International*. Volume 72, 2015, Pages 140-148.
- SP Cauvain, SS Salmon, LS Young (Eds.), *Usando a ciência e tecnologia de cereais para o benefício dos consumidores*. Woodhead Publishing, Cambridge, Reino Unido (2004), p. 221 – 231.
- STOCK, S. R. X-ray microtomography of materials. *International Materials Reviews*, v. 44, n. 4, p. 141-164, 1999.

- SUMANA, Chakrabarti-Bell, Shuo Wang, Kadambot H.M. Siddique. Flour quality and disproportionation of bubbles in bread doughs. *Food Research International*. Volume 64, 2014, Pages 587-597,
- SUN, Xinyang, et al. The effects of sodium reduction on the gas phase of bread doughs using synchrotron X-ray microtomography. *Food Research International*, v. 130, 2020.
- TAN, M.C., N.L. Chin, Y.A. Yusof, J. Abdullah. Novel 2D and 3D imaging of internal aerated structure of ultrasonically treated foams and cakes using X-ray tomography and X-ray microtomography. *Journal of Food Engineering*, Volume 183, 2016, Pages 9-15.
- TRATER, A.M., ALAVI, S. & RIZVI, S.S.H. (2005). Use of non-invasive X-ray microtomography for characterizing microstructure of extruded biopolymer foams. *Food Research International*, 38, 709-719.
- TURBIN-ORGER, A., Babin, P., Boller, E., Chaunier, L., Chiron, H., Della Valle, G., Salvo, L. (2015). Growth and setting of gas bubbles in a viscoelastic matrix imaged by X-ray microtomography: The evolution of cellular structures in fermenting wheat flour dough. *Soft Matter*, 11, 3373-3384.
- VAN DYCK, T., P. Verboven, E. Herremans, T. Defraeye, L. Van Campenhout, M. Wevers, J. Claes, B. Nicolai. Characterisation of structural patterns in bread as evaluated by X-ray computer tomography. *Journal of Food Engineering*, Volume 123, 2014, Pages 67-77.
- VIDAL, F.; De Assis, J.T.; Lopes, R.T., et al, 2013, "2D/3D Quantification of bone morphometric parameter changes using X-ray microtomography with different pixel sizes", *Radiation Physics and Chemistry*, v. 95, pp. 227-229.
- VILAR, A. B.; Dos Santos, T. M. P.; Machado, A. S., et al., 2017, "X-ray microtomography system for small and light samples using a flat panel detector", *Review of Scientific Instruments*, v. 88, pp. 105-112.
- WANG, S. et al., It's a maze: The pore structure of bread crumbs. *Journal of cereal science*. 54, 203-210.

WESTERTERP, M., Pruim, J., Oyen, W., *et al.* Quantification of FDG PET studies using standardised uptake values in multi-centre trials: effects of image reconstruction, resolution and ROI definition parameters. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 34, 392–404 2007.








YI CHEN, Annapaola Parrilli, Florian Jaedig, Adrian Fuhrmann, Christian Staedeli, Peter Fischer, Erich J. Windhab. Micro-computed tomography study on bread dehydration and structural changes during ambient storage. *Journal of Food Engineering*, Volume 296, 2021, 110462.

ZUOLO, M. L.; De-Deus, G.; Belladonna, F. G., et al., 2017, “Micro-computed Tomography Assessment of Dentinal Micro-cracks after Root Canal Preparation with TRUShape and Self-adjusting File Systems”, *Journal of Endodontics*, v. 43, pp. 619-622.

# Anexo

Nesta seção apresento o trabalho científico desenvolvido ao longo do curso relacionados ao tema da Tese, entre os anos de 2021 até a presente data. E as referências das Leis e Resoluções, sobre a fabricação e disponibilização de pães industrializados, para a sua comercialização, fornecidas pela Empresa “Wickbold & Pão Indústrias Alimentícias Ltda.”, produtora das amostras estudadas.

# X-ray computed microtomography time-dependent analysis of sandwich bread in different storage conditions

João Carlos R. de Lima  | Olga M. O. de Araújo  | Aline S. de Sá Silva  |  
Luan F. Bastos  | Alessandra S. Machado  | Davi F. Oliveira  |  
Ricardo T. Lopes 

Nuclear Instrumentation Laboratory,  
Nuclear Engineering Program/COPPE,  
Federal University of Rio de Janeiro  
(UFRJ), Rio de Janeiro, Brazil

## Correspondence

Aline S. de Sá Silva, Federal University of  
Rio de Janeiro (UFRJ), Nuclear  
Instrumentation Laboratory, Nuclear  
Engineering Program/COPPE, Rio de  
Janeiro, Av. Horácio Macedo, Cidade  
Universitária, 21941-450, Brazil.  
Email: [aline.saddock@coppe.ufrj.br](mailto:aline.saddock@coppe.ufrj.br)

## Funding information

Conselho Nacional de Desenvolvimento  
Científico e Tecnológico; Coordenação de  
Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível  
Superior; Fundação Coordenação de  
Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos

## Abstract

Bread is one of the oldest foods of mankind, and among them, the sandwich bread is worldwide known and used. In this study we used the non-destructive computed microtomography technique (microCT) to evaluate the behavior of bread structure over weeks after the production. In addition, the influence of the storage location of the sandwich bread, we performed a comparative analysis between storage at ambient temperature and refrigerated conditions. The analysis of the reconstructed images shows that the bread suffers loss of structure over the weeks. We also have found that keeping the bread refrigerated loses liquid, drying the bread, and thus increasing the loss of its structure. In addition, the porous structure of the bread was evaluated, and a complete characterization of the microstructural changes was performed over time.

## KEYWORDS

microCT, microstructural characterization, sandwich bread, storage conditions

## 1 | INTRODUCTION

Bread is one of the oldest foods of mankind; among them, the sandwich bread is well-known and used worldwide. In the last few years, many analyses of loaf structures and their components have been carried out. Studies have been developed to evaluate the mechanical quality of breads and relate to oral processing for different kinds of bread in cereal science. Despite the great variations in bread types, their structures are generally described as a cellular solid. More specifically, bread-crumbs are an open-cell solid comprising a solid phase containing the cell walls and a fluid phase containing air.<sup>[1–3]</sup> Due to various processing steps occurring during bread preparation, fermentation, and the interactions between different ingredients, pores within bread demonstrate anisotropic shapes and sizes as well as heterogeneous orientations and connectivity<sup>[4,5]</sup> which makes only porosity

not enough to describe their structure and turn bread-crumbs a difficult characterization sample.<sup>[6]</sup>

A better understanding of the relationship between the mechanical characteristics of bread and oral processing can be applied to make it more attractive to a certain group. For example, increasing the consumption of whole-grain breads is an effective technique to reduce obesity in children. Jervis et al. (2014)<sup>[7]</sup> found that the perceived tastes of those in this group for bread products have an inverse relationship to the content of whole grains versus refined grains. The children like soft breads with a light-colored crumb and crust and no fillings or toppings. However, in the case of bread making, control of processing conditions has been proven to be an effective way of manipulating structure formation and oral processing.<sup>[8–10]</sup> Another effort evaluated the performance of incorporating chia (*Salvia hispanica* L.) as a potential ingredient to be used in bread products. The



## **B- Legislações e Resoluções Referentes às Produções das Amostras**

Legislações e Resoluções referentes a fabricação e preparo dos pães industrializados de forma, para comercialização.

- a) “RESOLUÇÃO DE DIRETORIA COLEGIADA - RDC Nº 12, DE 02 DE JANEIRO DE 20019 (Ministério da Saúde - Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA)”.
- b) “RESOLUÇÃO - RDC Nº 259, DE 20 DE SETEMBRO DE 2002 (Ministério da Saúde - Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA)”.
- c) “LEI Nº 10.674, DE 16 DE MAIO DE 2003 (Legislação citada anexada pela Coordenação de Estudos Legislativos - CEDI - Presidência da República)”.
- d) “LEI Nº 8.543, DE 23 DE DEZEMBRO DE 1992 (Legislação citada anexada pela Coordenação de Estudos Legislativos - CEDI - Presidência da República)”.
- e) “RESOLUÇÃO-RDC Nº 360, DE 23 DE DEZEMBRO DE 2003 (Ministério da Saúde - Agência Nacional de Vigilância Sanitária - Diretoria Colegiada)”.
- f) “RESOLUÇÃO Nº 54, DE 12 DE NOVEMBRO DE 2012 (Ministério da Saúde - Agência Nacional de Vigilância Sanitária - Diretoria Colegiada)”.
- g) “RESOLUÇÃO DA DIRETORIA COLEGIADA - RDC Nº 14, DE 28 DE MARÇO DE 2014 (Ministério da Saúde - Agência Nacional de Vigilância Sanitária - Diretoria Colegiada)”.
- h) “RESOLUÇÃO - RDC Nº 26, DE 2 DE JULHO DE 2015 (Ministério da Saúde - Agência Nacional de Vigilância Sanitária - Diretoria Colegiada)”.