REVISTA DESIGN & TECNOLOGIA
ISSN: 2178-1974
2020, Vol. 10, No. 21
DOI 10.23972/det2020iss21pp33-42

PGDESIGN
www.pgdesign.ufrgs.br

Design, tecnologia e matérias-primas locais: uso da microtomografia na caracterização da microestrutura do porongo (*Lagenaria siceraria*)

Danieli M. Nejeliski[1]; Tatiana E. R. Lago[1]; Lauren C. Duarte[2]

1 *Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil*

2 *Programa de Pós-Graduação em Design, Departamento de Mineralogia e Petrologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil*

RESUMO

O porongo (*Lagenaria siceraria*) é um fruto da família das cucurbitáceas, da qual também fazem parte a abóbora, a melancia e outros. Após a colheita e o processo de secagem, o fruto torna-se oco, com o mesocarpo poroso e o exocarpo impermeável. A planta se disseminou por todos os continentes antes do homem e foi uma das primeiras domesticadas, se adapta facilmente a qualquer clima, tem alta produtividade e ciclo produtivo anual, configurando-se como uma alternativa de matéria-prima renovável. Diferentes povos utilizam o fruto na confecção de recipientes, instrumentos musicais, boias e máscaras, no sul do Brasil é matéria-prima para a fabricação da cuia, recipiente para o chimarrão. O porongo é utilizado empiricamente e sua aplicação no design de novos produtos depende do estudo da sua estrutura e das suas propriedades. Nesse contexto, o objetivo do trabalho é potencializar o uso do porongo como matéria-prima no design de produtos, a partir da caracterização de sua microestrutura com o auxílio da microtomografia (µCT). Os frutos utilizados foram coletados em Santa Maria, RS. A µCT foi desenvolvida em equipamento da Skyscan, modelo 1172, no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas do Departamento de Geologia da UFPR. Através da análise dos dados gerados pela análise por µCT observou-se que o mesocarpo é formado pelo parênquima, com células que aumentam de tamanho progressivamente em direção ao centro do fruto, caracterizadas por grandes espaços vazios, os poros. Já o exocarpo é constituído por uma camada micrométrica de células compactas, tornando-o impermeável. Identificou-se que 54% de volume total do fruto é constituído por poros, sendo a grande maioria poros abertos, o que configura permeabilidade ao material. A partir da análise dos resultados, conclui-se que o porongo é um material com alta absorção de água, baixa densidade e baixa condutibilidade térmica. No design de produtos, pode-se direcionar sua aplicação como matéria-prima para a produção recipientes para alimentos e bebidas, produtos e revestimentos isolantes e filtros.

PALAVRAS-CHAVE
Lagenaria siceraria;
Caracterização;
Microestrutura;
Microtomografia

Design, technology and local raw materials: characterization of the bottle gourd (*Lagenaria siceraria*) microstructure using microtomography

ABSTRACT

Bottle gourd (*Lagenaria siceraria*) is a fruit of the cucurbitaceae family, alongside pumpkin, watermelon and others. After harvesting and drying, the fruit becomes hollow, with porous mesocarp and impermeable exocarp. It spread to all continents before human beings and was one of the first domestic plants, adapts easily to any climate, presenting high productivity and its annual production cycle configures it as a renewable raw material alternative. Different peoples use it as vessels, musical instruments, buoys and masks, in the South of Brazil it is raw material for the manufacture of *cuia*, container for *chimarrão*. Bottle gourd is used empirically and its application in the design of new products depends on the study of its structure and properties. In this context, the objective of the work is to enhance the use of bottle gourd as raw material in product design, starting with the characterization of its microstructure through the aid of microtomography (µCT). The samples used were collected in Santa Maria, RS. A µCT was developed on the Skyscan equipment, model 1172, in the Minerals and Rocks Analysis Laboratory of the UFPR Geology Department. Through the analysis of data generated by µCT, it can be observed that the mesocarp is formed by the parenchyma, with cells that gradually increase in size towards the center of the fruit, characterized by large empty spaces or pores. The exocarp consists of a micrometric layer of compact cells, making it impermeable. It was identified that 54% of the bottle gourd total volume is made up of pores and a large majority of them are open, which indicates the permeability of the material. From the analysis of the results, it can be concluded that this material has high water absorption, low density and low thermal conductivity. In product design, it can be used as raw material for the production of food and beverage containers, insulating products and coatings, besides using it as filters.

KEYWORDS
Lagenaria siceraria;
Characterization;
Microstructure;
Microtomography

CONTATO: Danieli M. Nejeliski – *danielinejeliski@gmail.com*

© 2020 – Revista Design & Tecnologia

1. INTRODUÇÃO

O porongo (*Lagenaria siceraria*) é o fruto de uma planta da família das cucurbitáceas, da qual também fazem parte a abóbora, o melão, a melancia e outros frutos utilizados na alimentação. As estruturas das plantas desta família são muito semelhantes, com folhas grandes e hábito rasteiro. Entretanto, com relação aos frutos, o porongo possui características muito peculiares. Quando colhidos e deixados na sombra por alguns meses, o endocarpo com as sementes seca e os frutos tornam-se ocos. O mesocarpo adquire características similares à madeira e o exocarpo, extremamente fino e liso, torna-se impermeável. Em função da casca dura, é conhecido como cabaça em várias regiões do Brasil, sendo o termo porongo mais utilizado na região sul do país.

O fruto disseminou-se no estado do Rio Grande do Sul como matéria-prima para a produção de cuias para o preparo do chimarrão, bebida típica da região, com função semelhante na Argentina e no Uruguai. Existem muitos registros da sua utilização como recipiente para alimentos e bebidas, desde tempos remotos, em países de todos os continentes (BISOGNIN, 2002; BURTENSHAW, 2003; KISTLER *et al*., 2014). Este fato remete à máxima do design instituída pela Bauhaus – a forma segue a função – talvez uma das explicações da sua utilização intuitiva para a mesma função em uma época em que povos não tinham nenhum tipo de contato ou comunicação. Chama a atenção pela peculiaridade das suas características morfológicas e, sob a ótica do design, induz a imaginar quantos artefatos poderiam ser desenvolvidos a partir da matéria-prima.

Além da fabricação de cuias, uma pequena parcela dos frutos colhidos é utilizada na produção de artesanato, convertendo-se em fonte de renda para as famílias envolvidas. Apesar de fazer parte do dia-a-dia do povo gaúcho e ser um cultivo representativo na agricultura familiar do estado, o aproveitamento dos frutos é pontual e limitado no Brasil. Em relação ao território brasileiro, permanece desconhecido à maioria da população. Por ser uma planta de hábito tropical, adapta-se facilmente em ambientes distintos, prova disso são as evidências de sua utilização em diversos países e em épocas variadas. Desde os primeiros indícios encontrados até os dias atuais é utilizado mundo afora como matéria-prima para a produção artesanal de recipientes para alimentos, instrumentos musicais, boias para embarcações, máscaras (BURTENSHAW, 2003), aplicações que exploram as características intrínsecas do fruto que propiciam a confecção destes artefatos.

Para Krucken (2009) a busca por agregar valor a produtos, fortalecendo e estimulando a identidade local, é um forte impulsionador do investimento em design. A partir da análise, síntese e aplicação, o design possibilita a identificação de potenciais locais latentes e a transferência para o processo de projeto, resultando em produtos com maior qualidade percebida pelo usuário. Nesse sentido, o design não pode ser considerado isoladamente, pois depende de todos os atores envolvidos no processo, é um fenômeno social. O porongo como matéria-prima de origem local está indissoluvelmente vinculado ao território onde é cultivado, carrega em si a história do local e do povo. Nesse processo, é fonte de trabalho e renda para os produtores que o cultivaram e para aqueles que o transformam em artefatos, sendo o centro de uma rede de interdependências. No conceito de design sistêmico o produto não é o fim, mas o meio a partir do qual todos os agentes envolvidos participam do processo e se beneficiam.

O papel do design na valorização de matérias-primas locais parte da caracterização e da definição das principais propriedades do material, para a partir dessas informações direcionar a aplicação em potenciais produtos. Cada material é único em suas características e essa individualidade se dá, basicamente, pela relação entre a estrutura e as propriedades. A estrutura de um material refere-se ao arranjo dos seus componentes internos e se apresenta em vários níveis, do macroscópico ao subatômico. Já as propriedades correspondem à reação dos elementos estruturais à um estímulo externo (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Quando se trata de materiais de origem vegetal, como é o caso do porongo, a análise da estrutura celular é fundamental para a compreensão do comportamento do material. A anatomia vegetal estuda, por meio de observação e interpretação, as características morfológicas da microestrutura da planta, e a partir dessas observações podem ser inferidas descrições sobre diversos aspectos funcionais da amostra (PALOMBINI *et al*., 2017).

Instrumentos como micrótomos e microscópios são amplamente utilizados no estudo da anatomia vegetal e a partir da geração de imagens bidimensionais é realizada a análise das informações sobre os tecidos e células (PALOMBINI *et al*., 2017). Recentemente, novas tecnologias estão sendo exploradas no estudo da anatomia vegetal, entre elas destacam-se as tecnologias tridimensionais (3D), onde as informações da amostra são capturadas, reconstruídas e reproduzidas com um nível de detalhamento muito próximo da amostra física. De acordo com Palombini e colaboradores (2018), a intermediação de tecnologias 3D pode significar mudanças nos meios de observar, analisar, descobrir ou reinterpretar resultados, e quando aplicadas por intermédio de designers, podem levar a inovações não apenas em termos de resultados, mas na condução da investigação em si. Nesse contexto, a microtomografia computadorizada (µCT) vem sendo utilizada como ferramenta em pesquisas de caracterização da microestrutura de matérias-primas de origem vegetal.

A µCT é uma técnica de análise tridimensional não invasiva, amplamente utilizada no setor mineral para a caracterização de carvão, minerais industriais e metais preciosos. Na indústria do petróleo, a técnica é utilizada para a caracterização de tamanho e distribuição de poros, permitindo simular o fluxo de óleo em rochas reservatório (ULIANA *et al*., 2014). De acordo com Palombini e colaboradores (2017), na µCT um objeto é mapeado internamente através de uma série de seções transversais obtidas por meio de raios X, através da interação física da radiação com a matéria. A medicina é outra área que vem impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento da tecnologia da tomografia computadorizada, a principal diferença entra a tomografia convencional e a microtomografia é a resolução espacial das imagens finais, sendo que na última, a resolução chega na casa de micrômetros (PALOMBINI *et al*., 2017). Na anatomia vegetal, em que os tecidos são delicados e as estruturas morfológicas interferem diretamente na interpretação das análises, a técnica amplia as possibilidades de investigação (PALOMBINI *et al*., 2018). Na área do design, a µCT vem sendo utilizada como ferramenta para o estudo da anatomia vegetal, especialmente em pesquisas na área da biônica (KAYAT; MAGALHÃES, 2017; PALOMBINI *et al*., 2017).

O porongo é uma matéria-prima de origem vegetal, com ciclo produtivo anual e altos índices de produtividade, adapta-se facilmente em diferentes solos e climas, é uma alternativa de diversificação para agricultura familiar, configurando-se assim como uma alternativa sustentável. É utilizado empiricamente e seu uso no design de novos produtos depende do estudo da sua estrutura e das suas propriedades. Para tanto, em um primeiro momento é fundamental a

realização de estudos de análise e caracterização da anatomia vegetal para a compreensão das características do material.

Nesse contexto, o objetivo do trabalho é potencializar o uso do porongo como matéria-prima no design de produtos, a partir da caracterização de sua microestrutura com o uso da microtomografia. A primeira parte do trabalho apresenta o referencial teórico sobre o histórico do uso do fruto como matéria-prima ao longo dos séculos e em diversos continentes e informações sobre as etapas de cultivo e beneficiamento. Já a segunda parte apresenta informações sobre a µCT, descrição das etapas do processo e exemplos em que a tecnologia é utilizada na área do design. A terceira parte do trabalho descreve os materiais e métodos utilizados na pesquisa e, por fim, a quarta e última parte descreve os resultados da µCT e a análise da microestrutura do porongo.

2. PORONGO (*LAGENARIA SICERARIA*)

O porongo é o fruto do porongueiro, planta que pertence à família das cucurbitáceas, uma das mais importantes utilizadas pelo homem, fornecendo alimentos e fibras. As cucurbitáceas estão relacionadas com a origem da agricultura e das civilizações humanas, estando entre as primeiras espécies de plantas a serem domesticadas (BISOGNIN, 2002). Seu nome científico é *Lagenaria siceraria*, sendo que *lagenaria* vem do latim *lagena* para "garrafa", e *siceraria* vem do latim *sicera*, que significa "vaso de beber" (BURTENSHAW, 2003). A origem do nome remete a uma das principais funções do fruto para os diversos povos que o utilizaram.

Disseminado em muitas regiões do mundo, o fruto tem inúmeros nomes vernáculos, a maioria dos quais dizem respeito às diferentes formas dos frutos. Evidências arqueológicas da sua utilização foram encontradas em diferentes continentes e relacionadas a várias civilizações. Exemplares que datam de 11.000 AC foram encontrados na Ásia Oriental. No continente americano os frutos eram utilizados desde, pelo menos, 10.000 AC (KISTLER *et al*., 2014). Com relação à América do Sul, mais especificamente, os registros datam de 6.000 a 5.000 AC. Entretanto, não há argumento seguro que possa resolver a questão da sua distribuição bi hemisférica incomum (BISOGNIN, 2002).

Com o intuito de esclarecer a disseminação e as origens da planta, um grupo de pesquisadores liderados por Logan Kistler (2014), reuniu exemplares de todos os continentes e sequenciaram 86.000 pares de bases de DNA. Um exemplar africano selvagem é a origem de tudo e surgiu a aproximadamente 250 mil anos atrás. A partir dele, a árvore genealógica se divide em duas linhagens principais: uma que inclui os espécimes africanos domesticados e outra que inclui os asiáticos. Os exemplares do continente americano compartilham um ancestral comum com os africanos entre 60.000 a 103.000 anos atrás, muito antes dos primeiros homens migrarem para as Américas, o que aconteceu cerca de 15.000 anos atrás. Ou seja, o porongo chegou ao continente americano sem a interferência do homem (KISTLER *et al*., 2014).

A teoria do transporte marítimo é uma das explicações para a disseminação da espécie. As sementes podem ter sido transportadas pelo mar, pois modelos computacionais das correntes marítimas indicam que levaria apenas alguns meses para que chegassem ao continente americano. A casca dura e impermeável conservaria as sementes que, ao saírem do oceano, teriam brotado. Enquanto o Alasca teria sido um lugar inóspito para as plantas crescerem, lugares com clima tropical como Flórida, México e Brasil teriam sido ideais (KISTLER *et al*., 2014).

A África foi provavelmente o primeiro lugar em que a planta foi domesticada. No continente, além de ser utilizado na produção de recipientes para alimentos e bebidas, suas excelentes propriedades acústicas são exploradas há milhares de anos na confecção de instrumentos musicais. Na Índia o fruto é utilizado na fabricação de uma gama de flautas, tambores e instrumentos de cordas, bem como câmara de ressonância para o sitar e outros instrumentos musicais (BURTENSHAW, 2003).

Com relação à disseminação na América do Sul, mais especificamente no sul do Brasil, sabe-se que já era conhecido pelos índios Guaranis no ano de 1580, quando os jesuítas de Manoel da Nóbrega chegaram no território que corresponde hoje ao estado do Rio Grande do Sul (LESSA, 1986). O próprio chimarrão era hábito dos nativos que os europeus assimilaram. Mas os índios e os primeiros imigrantes da região não utilizavam o porongo apenas para a confecção de cuias, aproveitavam-no para a produção de outros recipientes, conforme pode ser visualizado no acervo permanente do Museu do Parque Gaúcho, em Gramado/RS. O museu remonta as origens e os hábitos que formaram o povo gaúcho, e juntamente com o couro e a cerâmica, o porongo era um dos principais materiais utilizados na produção de artefatos do cotidiano, como recipientes para alimentos (Fig. 1a) e água (Fig. 1b).



Figura 1 Recipientes dos índios Guaranis confeccionados a partir do porongo: a) Recipientes com tampa para alimentos, frutos de formato arredondado, em corte transversal; b) Recipiente para água. Fonte: Acervo do Museu do Parque do Gaúcho, 2015.

O porongo faz parte da história e da evolução de inúmeros povos e culturas, manteve suas principais características estéticas e funcionais intactas ao longo de milhares de anos e continua servindo tão bem para o armazenamento de alimentos e bebidas hoje, quanto o fazia no início das civilizações. Entre as espécies domesticadas, apenas o cachorro se espalhou mais sobre o globo terrestre (KISTLER *et al*., 2014).

2.1 Do plantio ao fruto

O porongueiro possui um sistema radicular bem desenvolvido e ramificado, o caule é herbáceo firme, de onde se originam as folhas, brotações, inflorescências e gavinhas. Com relação

às folhas, são simples, onduladas e com margem inteira. O hábito de crescimento da planta é trepador e se mantém rasteiro na ausência de um tutor, o qual tem como vantagem um maior controle do formato final dos frutos (TREVISOL, 2013). O porongueiro é uma planta monoica em que os gametas masculinos e femininos estão separados. As flores apresentam uma corola de cor branca com cinco pétalas. O fruto é classificado como uma baga do tipo pepônio, por causa de seu casco duro e resistente, sendo que o termo cabaça refere-se à casca dura.

A forma e o tamanho dos frutos são variações morfológicas comuns à espécie (SILVA *et al*., 2002). Podem ser alongados, cilíndricos, curvados, oblongos, redondos ou mesmo cônicos (Figura 2). Existem seis espécies identificadas como pertencentes ao gênero *Lagenaria*, sendo cinco selvagens e apenas uma domesticada. Atualmente no estado do RS, duas variantes da espécie são cultivadas, uma de casco grosso e outra de casco fino. Em ambas, o formato do fruto geralmente é piriforme, em formato de pêra, ou octoforme, em formato do número oito, os mais utilizados para a produção de cuias. Segundo Bisognin, Marchesan e Aude (1992), o porongo do casco fino produz, em média, duas vezes mais do que o do casco grosso, o que justifica a preferência pelo primeiro para plantio e fabricação das cuias.



Figura 2 Variações morfológicas da espécie.

O posicionamento do fruto no solo, ainda pequeno, deve ser na vertical, de modo a formar a base da cuia na forma correta. Frutos mantidos na posição horizontal podem entortar e perder a qualidade para cuia (TREVISOL, 2013). A colheita é realizada após a senescência natural da planta, em que os frutos são colhidos e amontoados à sombra para secar lentamente. O processo de secagem pode demorar mais de seis meses para alcançar a cura do material. O verde da epiderme exterior irá desaparecer e o fruto perderá 90% do seu peso com a evaporação da água. Quando estiver totalmente seco, as sementes irão chacoalhar e a polpa se desgrudará do mesocarpo. Neste estágio, os restos da epiderme podem ser lavados e a casca externa pode ser escovada (BURTENSHAW, 2003).

Com o fruto aberto em corte longitudinal, após o processo de secagem, pode-se observar sua constituição. No interior do fruto, o endocarpo perde quase a totalidade da água de que é composto e torna-se uma membrana ressecada e com coloração clara (Fig. 3-1). A função do endocarpo é envolver e proteger as sementes, que podem ser observadas como elementos de coloração escura (Fig. 3-2). O mesocarpo é a camada rígida que dá forma ao fruto (Fig. 3-3). Trata-se de uma camada porosa e de cor clara, é a matéria-prima em si. O exocarpo é a camada externa do fruto, é composto por uma camada de espessura micrométrica, lisa e homogênea e de coloração mais escura (Fig. 3-4).



Figura 3 Corte longitudinal de um porongo após o processo de secagem: 1) Endocarpo; 2) Sementes; 3) Mesocarpo; 4) Exocarpo.

A época correta da colheita tem relação direta com a qualidade final do fruto, pois a permanência na lavoura após esta fase aumenta o risco de necrose causada pelos fungos, com o escurecimento do mesocarpo e do exocarpo. Na pesquisa realizada por Trevisol (2013) o fim do ciclo deu-se em 195 dias. O autor desenvolveu uma técnica que relaciona o ponto de colheita com a cor do pedicelo ou talo do fruto. A mudança da cor verde escura para a cor parda e, depois, parda-escura é o atributo morfológico que indica o ponto de colheita. A colheita nessa fase diminui o risco de manchas escuras, porque evita a decomposição microbiana da massa de semente e da placenta, no interior do fruto (TREVISOL, 2013).

Segundo Bisognin *et al*. (1992), a produtividade média do porongo de casco fino chega a 12.000 frutos por hectare (ha) e o do casco grosso a 6.000 frutos/ha, o que justifica a preferência dos produtores e dos fabricantes de cuias pela variante do casco fino. A pesquisa realizada por Trevisol (2013) teve por objetivo a orientação do manejo da cultura a fim de aumentar a produtividade e a qualidade do fruto. Ao final da pesquisa o autor concluiu que o baixo rendimento dos frutos comercializáveis está relacionado com a grande variabilidade genética da espécie.

No experimento realizado pelo autor, o número de frutos por hectare variou conforme a densidade de plantas, ficando entre 9.000 e 10.000 exemplares. A morfologia do fruto não foi prejudicada pelo aumento da densidade de plantas e manteve a qualidade comercial. Do total de frutos formados, 66% tinham qualidade comercial para a produção de cuias. A média da espessura da casca foi de 12 mm; do diâmetro maior do fruto foi de 14 cm; do diâmetro da cuia foi de 7,4 cm; do comprimento do fruto foi de 24 cm; e, por fim, do diâmetro da constrição do fruto foi de 6,7 cm (TREVISOL, 2013).

3. MICROTOMOGRAFIA (µCT)

A µCT é uma tomografia computadorizada de alta resolução, sendo um avanço nas técnicas de inspeção por raios X por ser um procedimento não destrutivo e que não necessita de tratamento prévio das amostras. Essa tecnologia mede as diferenças de densidade do material e permite a análise de centenas de seções microtomográficas, a visualização tridimensional interna das amostras, além de quantificações automatizadas de área e volume (FERNANDES *et al*., 2009). Além disso, a partir da análise das imagens são fornecidos dados qualitativos e quantitativos relacionados ao tamanho, formato, distribuição, área e volume da estrutura do material, em microescala (REIS NETO *et al*., 2011).

De acordo com Fernandes e colaboradores (2009), o processo pode ser dividido em quatros etapas (fig. 4): (1)

aquisição das imagens de raios X no microtomógrafo, (2) reconstituição das seções microtomográficas, (3) seleção da região de interesse para binarização e análise dos dados, (4) construção do volume virtual 3D. A figura 4 apresenta um fluxograma com as etapas do processo. Na µCT a radiação é transmitida através do objeto para um detector, a amostra é posicionada entre as fontes de raios X e o detector, sendo então rotacionada para a aquisição de projeções em várias posições (ULIANA *et al*., 2014).

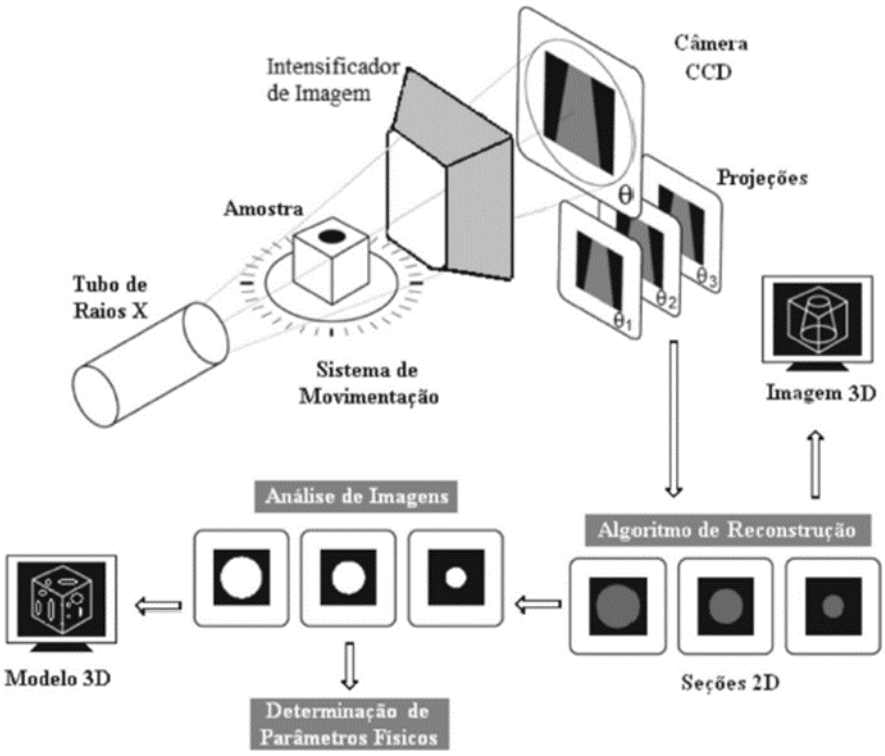


Figura 4 Esquema de uma análise por microtomografia computadorizada. Fonte: FERNANDES *et al*, 2009.

Na primeira etapa, a amostra é rotacionada em 360˚ com movimentos randomizados, nos quais são adquiridas projeções bidimensionais, paralelas ao eixo vertical da mesma. Um dos principais resultados do processo de digitalização é a obtenção de um modelo com grande fidelidade morfológica tanto em sua superfície quanto em seu interior, permitindo a validação de análises posteriores (CIDADE; PALOMBINI; KINDLEIN JÚNIOR, 2015). Um atributo desejado para as tecnologias de digitalização é a capacidade de obter um modelo de alta resolução, na anatomia vegetal, os detalhes da microestrutura da planta são essenciais (PALOMBINI *et al*., 2018). A aquisição das imagens é a única etapa realizada no microtomógrafo, sendo o tempo do processo extremamente variável (de minutos a horas), dependendo do tamanho das amostras e dos parâmetros escolhidos.

Na segunda etapa é realizada a reconstituição das seções microtomográficas. O objetivo desta etapa é ajustar os dados capturados, corrigir as falhas e melhorar a qualidade geral (PALOMBINI *et al*., 2018). A µCT trabalha com arquivos sequenciais de imagens brutas, em formatos sem compactação. Os arquivos precisam ser ajustados quanto ao contraste e ao ruído com algoritmos de reconstrução. Para a visualização da amostra digitalizada, é requerida a combinação da pilha de imagens de modo a gerar um modelo 3D virtual (PALOMBINI *et al*., 2018).

Na sequência é realizada a seleção de uma região de interesse (ROI), um conjunto formado por um número de imagens sequenciais, a fim de diminuir o tamanho dos arquivos, facilitando a continuidade do processamento de dados. O processo é baseado em uma escala de cinza e a binarização é utilizada para definir as diferentes fases do material analisado, e a partir disso gerar um arquivo com o volume de cada porção. O processo de binarização ocorre por comparação das imagens, selecionando em branco o que é volume do sólido e, em um segundo arquivo, em preto o que representa os espaços vazios. Entre os extremos, os diferentes tons de cinza representam as diferenças de densidade do material. A binarização definida pela comparação das imagens é aplicada a todas as fatias da ROI. Essa seleção das fases permite a construção e a análise tridimensional de cada amostra, gera informações quantitativas como, por exemplo, número, volume, área e perímetro da porosidade total.

Por fim, a quarta etapa é a construção do volume virtual 3D. Esta etapa é fundamental para a visualização da amostra digitalizada. Para as análises quantitativas e qualitativas e para a segmentação entre diferentes regiões, as imagens precisam ser convertidas em arquivos volumétricos. Ainda, a utilização de modelos digitalizados permite uma análise de grande precisão, maior do que comparada com a amostra original (PALOMBINI *et al*., 2018). De todas as etapas do processo da µCT, a de modelagem tridimensional é a que os designers estão mais familiarizados e onde a colaboração dos mesmos é essencial.

A tecnologia da µCT vem sendo utilizada como ferramenta em pesquisas de design, sobretudo na área da biônica. Kayat e Magalhães (2017) analisaram a interferência do uso da µCT e da impressão 3D no projeto de embalagens. Observaram se abordagens para o projeto de embalagens por meio da biônica podem ser potencializadas por estas tecnologias. O estudo se deu a partir da análise da vagem do amendoim como referência na busca de elementos para o design de novas embalagens. Foram realizados dois experimentos, o primeiro sem o uso de tecnologias e o segundo com o uso das mesmas. Como resultado, o uso da

µCT e da impressão 3D contribuiu para o refinamento das abstrações das estratégias biológicas.

Palombini e colaboradores (2017) analisaram a microestrutura de uma espécie de bambu (*B. tuldoides*), utilizaram as técnicas de µCT e modelagem por deposição de material fundido, uma técnica de impressão 3D, para a geração de modelos virtuais e físicos da microestrutura da planta. Como resultado das imagens da microtomografia, observou-se que o bambu é um material compósito, com duas fases distintas, a matriz é o tecido parenquimático e o reforço são os feixes longitudinais lignificados. Os autores concluem que a combinação de técnicas de µCT e impressão 3D permitiu estudar o bambu sobre o ponto de vista da anatomia vegetal, bem como avaliá-lo estruturalmente para fins de projeto que utilizam a biônica como método.

Na seleção de materiais, a µCT pode auxiliar na análise do comportamento do material quando submetido à determinados processos de beneficiamento. Cidade e colaboradores (2018) estudaram os efeitos do laser na ágata. Foi realizada uma análise tridimensional e de alta resolução de uma amostra de ágata gravada, por meio de análises qualitativas e quantitativas, baseadas em µCT. Os resultados mostraram os efeitos do laser na geração de de porosidade secundária, trincas e fraturas de expansão térmica. Esse nível de análise, extremamente refinado e aprofundado, só é possível com o uso de tecnologias que possibilitam a reconstrução minuciosa da amostra, como é o caso da microtomografia.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi baseada nas etapas propostas por Fernandes *et al*. (2009), dividida em cinco etapas: produção das amostras, aquisição das imagens, reconstituição das imagens, seleção da região de interesse e construção do volume 3D e análise.

4.1 Produção das amostras

Os frutos utilizados nesta pesquisa foram coletados em Santa Maria, RS, fornecidos pela Fábrica de Cuias Pires. Para o processo de digitalização foram retiradas quatro amostras dos porongos, com dimensões de 15 x 15 mm e com espessura do mesocarpo de ±10 mm. Foram extraídas amostras de diferentes regiões dos frutos, sendo que duas amostras foram extraídas da parte superior dos frutos (A1 e A2) e duas amostras extraídas da parte inferior (B1 e B2), a fim de comparar a estrutura morfológica nas duas regiões.

As amostras foram extraídas dos frutos por corte a laser, com o uso de um equipamento da marca Automatisa® modelo Mira, no Laboratório de Design e Seleção de Materiais – LdSM/UFRGS. Após a extração das amostras, o acabamento foi realizado com o uso de lixas com numeração 320 e 600.

4.2 Aquisição das imagens

A microtomografia das amostras foi realizada em um equipamento da Skyscan, modelo 1172, no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná – UFPR. O equipamento é composto por uma fonte de raios X de 20-100kV com potência máxima de 10W, um porta amostra com sistema de rotação de 360˚ e um detector de raios X que consiste em uma câmera de 11 megapixels (4000 x 2300) com CCD (dispositivo de carga acoplado) de 12 bits e cintilador por fibra ótica. Esse equipamento permite o escaneamento de objetos de até 50 mm de diâmetro, com detecção de detalhes < 0.8 µm na maior resolução (REIS NETO *et al*., 2011).

No presente trabalho foi utilizada a resolução de aproximadamente 5 µm, resultando em um tempo de aquisição de aproximadamente 1 hora e 30 minutos. O processo foi comandado pelo software Skyscan 1172 Control Program. Para aquisição das imagens foi utilizado um cluster com quatros computadores, com 4 gigabytes de memória RAM cada. O resultado desta etapa gerou centenas de arquivos em formato TIFF.

4.3 Reconstituição das imagens

Na sequência, foi realizada a terceira etapa que consiste na reconstituição das seções microtomográficas adquiridas. A reconstituição foi feita pelo software NRecon, baseado em um algorítmico matemático. Esse processo durou cerca de 1 hora e seu resultado gerou em média 2000 fatias (arquivos .BMP em escala de cinza) para cada amostra. O trabalho de reconstituição foi processado no cluster do Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da UFPR, uma vez que os arquivos de fatias são muito pesados, cerca de 30 Gb para cada amostra.

4.4 Seleção da região de interesse

A partir das imagens em escala de cinza foi realizada a escolha da região de interesse (ROI) utilizado o software da SkyScan: CTAnalyser – CTAn. Todas as fatias de uma amostra foram abertas no programa e uma sequência de 300 fatias foi escolhida entre as 2000 reconstituídas (Fig. 5A).

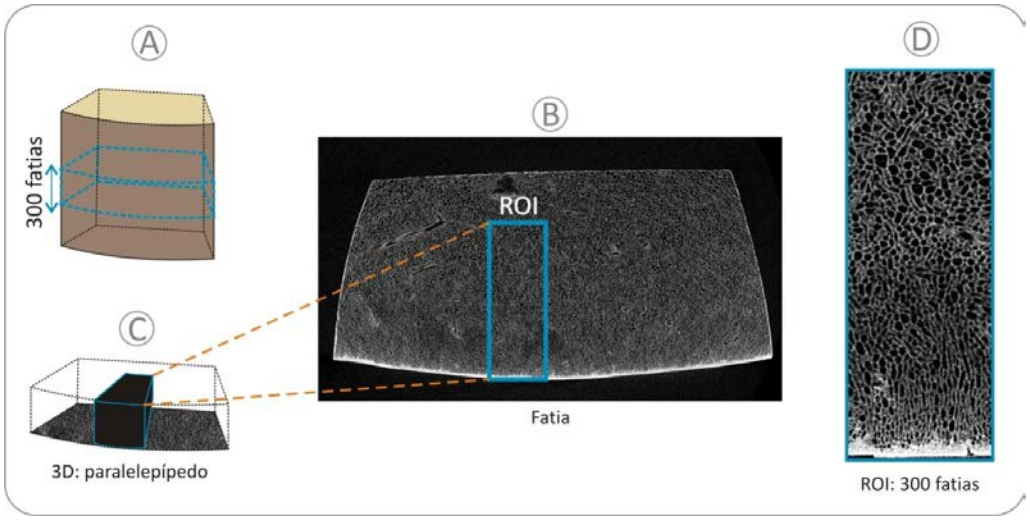


Figura 5 Seleção da ROI. (A) possível seleção das 300 fatias da ROI; (B) possível posicionamento do retângulo de seleção e (C) paralelepípedo do volume da ROI e (D) exemplo de uma fatia da ROI.

Neste recorte foi realizada uma nova seleção retangular de 4000 µm de altura e 1500 µm de largura (Fig. 5B), padrão utilizado em todas as amostras apenas variando o posicionamento do retângulo conforme interesse.

4.5 Construção do volume 3D e análise

Com a escolha da ROI de 300 fatias, foi formado um paralelepípedo de 4000 x 1500 x 1500 µm a partir de cada amostra, a fim de gerar o volume virtual 3D da região escolhida (Fig. 5C). Com a seleção pronta, partiu-se para binarização que também foi realizada no software da SkyScan: CTAnalyser – CTAn. No caso das amostras de porongo, a divisão foi realizada em duas fases: uma sólida e outra porosa. Ainda no software Ctan foram gerados dois arquivos com os modelos 3D para cada amostra que, baseados na binarização, dividiram o volume dos poros e do sólido. Estes arquivos foram abertos no software CTVol que permitiu desenvolver a análise qualitativa dos dados por meio da atribuição de cores e alterações de posicionamento nos volumes das amostras.

5. RESULTADOS

Nos frutos das angiospermas, a parede do ovário fecundado transforma-se durante o desenvolvimento em pericarpo do fruto maduro, o qual normalmente se desenvolve em três camadas distintas: exo-, meso- e endocarpo (ROTH, 1977). O exocarpo é a camada mais externa, enquanto que o mesocarpo se desenvolve em uma camada carnosa e o endocarpo tem a função da proteção das sementes. No porongo, o exocarpo é a camada mais externa, a casca, o mesocarpo é a parte porosa dominante, e o endocarpo é a camada mais interna, que envolve e protege as sementes (figura 3). No preparo das amostras para a aquisição das imagens, bem como no processo de beneficiamento para a produção de cuias, o endocarpo e as sementes são removidos.

Segundo Roth (1977), o mesocarpo frequentemente desenvolve-se como um tecido parenquimatoso carnoso, sendo o parênquima constituído de grandes células isodiamétricas com paredes mais ou menos finas e grandes vacúolos. No caso do porongo, o que visualizamos como poros no mesocarpo são as células do parênquima do fruto (figura 6). Em frutos jovens, o parênquima periférico é geralmente rico em clorofila e realiza a fotossíntese. Quando o fruto é colhido e passa pelo processo de secagem, as células do parênquima morrem, salientando suas paredes lignificadas e seu conteúdo interno aparentemente vazio.

A figura 6 apresenta as imagens da digitalização antes do processo de binarização, pode-se observar que conforme as células se interiorizam, as dimensões das células do parênquima e a densidade de espaços vazios aumentam. Na porção mais externa do exocarpo há uma camada muito compacta de células, onde não se visualiza espaços intercelulares, são células muito densas e próximas, o que justifica a impermeabilidade do exocarpo. Esta situação vai sendo modificada conforme se adentra em direção ao mesocarpo, com o progressivo aumento das dimensões das células, com diferentes orientações. Por se tratar de um material de origem vegetal, as dimensões dos poros não seguem um padrão uniforme de tamanhos em todas as amostras. Neste sentido, foram identificadas três zonas com tamanhos de poros semelhantes entre si, visando a determinação de alguns diâmetros. O processo foi realizado no software CTAn, em duas amostras retiradas da parte superior do fruto: A1 e A2 (figura 6).

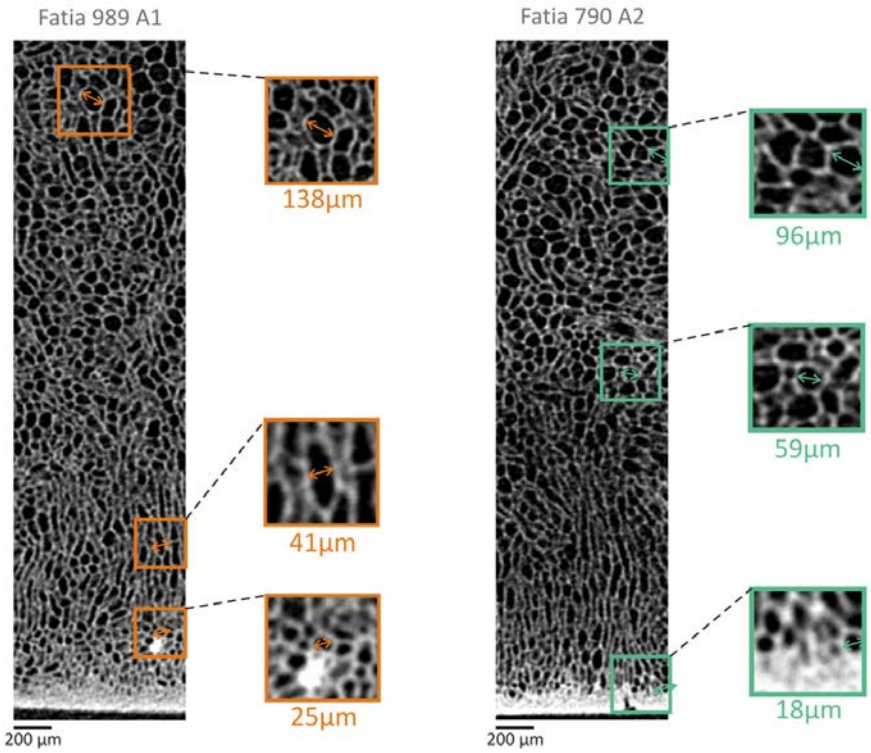


Figura 6 Fatias das amostras A1 e A2 com detalhes da mensuração dos poros no software CTAn.

A porosidade é gerada pela presença de espaços vazios, chamados de poros, entre as partículas que formam qualquer tipo de matéria. Esses poros variam de tamanho, tornando a matéria mais ou menos densa (SILVA, 2015). A variação nas dimensões das células e, consequentemente, nos espaços vazios na parte interna das mesmas, configura-se em quantidades relativas distintas entre massa de material celular e volumes vazios em cada setor analisado. Esta razão está diretamente relacionada com a densidade do material, que pode ser considerado como um material de densidade

heterogênea. De acordo com Nejeliski e Duarte (2019), o porongo possui densidade aparente média extremamente baixa, na ordem de 0,124 g/cm³, similar a algumas espumas poliméricas.

Dadas as observações, percebe-se então que quanto mais próximo do exocarpo mais denso é o material e conforme vai adentrando, as dimensões das células aumentam, reduzindo então a densidade do material. O diâmetro das unidades celulares na porção mais externa, mais próxima do exocarpo, variaram entre 18 e 25 µm, na parte central do mesocarpo ficaram entre 41 e 59 µm, e os valores de dimensões para os poros localizados na parte mais interna do mesocarpo ficaram entre 96 e 138 µm (Figura 6).

Na sequência, foi realizada a binarização de uma fatia de cada amostra, determinando por seleção de tons de cinza os volumes da ROI selecionada, com isso, foi possível obter dois volumes tridimensionais de cada amaostra. A figura 7 apresenta os volumes virtuais 3D construídos no software CTVol, sendo que as imagens da linha superior (A1, A2, B1 e B2) correspondem à massa sólida total, onde os poros apresentam coloração mais escura e a parte sólida, coloração mais clara. Já as imagens da linha inferior (A1', A2', B1' e B2'), correspondem apenas ao volume total da parte sólida. Pode-se observar nessa análise qualitativa que as amostras retiradas das partes superiores (A1 e A2) e inferiores (B1 e B2) dos frutos não possuem significativa distinção entre si. Em todas as amostras é possível observar que o exocarpo é uma camada mais compacta que o mesocarpo. Essa característica reforça as conclusões da teoria do transporte marítimo (KISTLER et al., 2014), de que os frutos teriam se espalhado pelos continentes através das correntes marítimas, e a parte interna dos frutos manteve-se intacta em função do exocarpo ser impermeável.

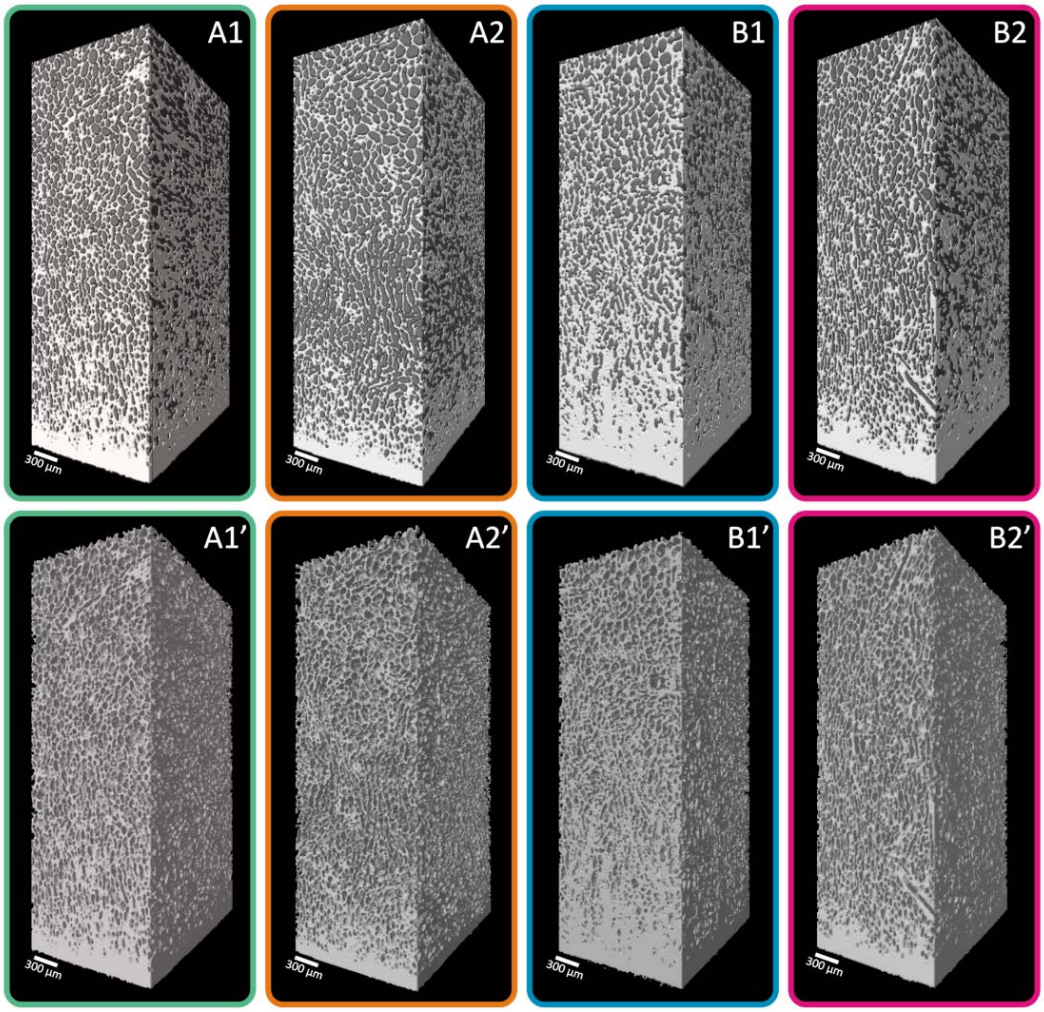


Figura 7 Volume virtual 3D da Região de Interesse (ROI) das amostras A1, A2, B1 e B2. As quatro imagens superiores representam os poros das amostras em cinza escuro e a porção sólida em cinza claro. Enquanto que as imagens inferiores (A1', A2', B1' e B2') simulam o volume sólido das amostras.

A análise da porosidade é uma importante aplicação na ciência dos materiais, na caracterização de solos, minerais e cerâmicos. Várias propriedades dos materiais dependem da estrutura dos poros e da conectividade dos mesmos (ULIANA *et al*., 2014). A porosidade pode ser caracterizada pela sua fração volumétrica e seu tamanho, forma e distribuição comparada com outras fases. Por exemplo, nos materiais cerâmicos, a porosidade tem influência drástica na condutividade térmica, o aumento do volume dos poros irá resultar em uma redução dessa propriedade.

De acordo com Silva (2015), a porosidade pode ser aberta ou fechada. Ela é aberta quando está conectada à superfície e permite a absorção de água e gases. Já os poros fechados podem ser causados pelo fechamento de poros abertos em processos como a sinterização, em materiais cerâmicos, ou podem ser causados pela evolução de gases que não conseguiram sair da estrutura. Os poros fechados tendem a assumir forma esférica. Na fabricação de materiais isolantes é importante ter um grande número de poros fechados (SILVA, 2015).

A partir da µCT foi possível obter um percentual quanto às porosidades total, fechada e aberta, determinadas por quantificações automatizadas de área e volume no software CTAn. A média entre as quatro amostras indica que o porongo possui mais volume de espaços vazios (54%) do que sólidos. Os dados da Tabela 1 sugerem que praticamente todos os poros estão interconectados entre si, ou seja, possuem porosidade aberta conferindo permeabilidade ao material.

Tabela 1 Média das porosidades de quatro amostras: A1, A2, B1, B2.

Porosidade	A1	A2	B1	B2	Média (%)
Total	48.1%	57.71%	58.69%	51.62%	54,01%
Aberta	47.9%	57.61%	58.58%	51.52%	53,90%
Fechada	0.51%	0.22%	0.26%	0.19%	0,29%

A partir da amostra B1, foram selecionadas três ROI's a fim de serem submetidas à quantificação das porosidades separadamente (Figura 8). Na porção mais interna da amostra (Fig. 8A), a porosidade aberta (PA) corresponde praticamente à totalidade do volume, uma vez que os valores para porosidade fechada (PF) são iguais a 0,0006%. Na porção média da amostra B1 (Fig. 8B) a porosidade total (PT) indica 39,71%, sendo que os valores da PA são muito próximos a esta. Desse modo, as duas regiões mais distantes do exocarpo do porongo possuem significativa permeabilidade. Por fim, na porção que abrange o exocarpo foram encontrados percentuais menores de porosidade, iguais a 17,47% e destes 15,06% são abertos.

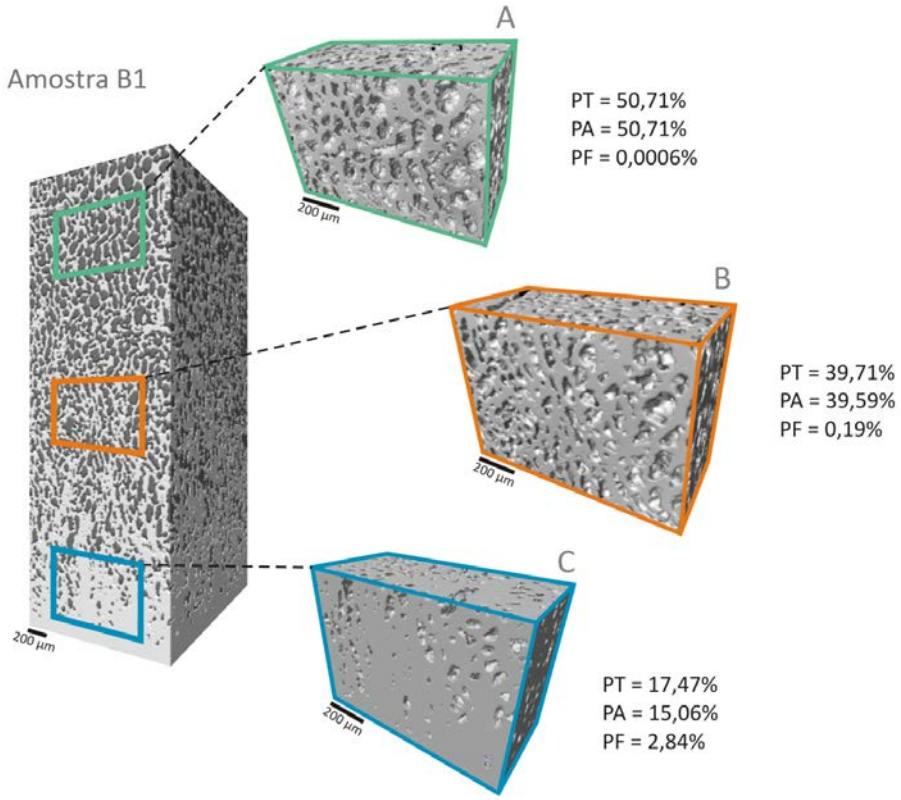


Figura 8 Quantificação das porosidades total (PT), aberta (PA) e fechada (PF) para as três diferentes regiões da amostra B1 utilizando o software CTAn

A partir da análise das imagens bi e tridimensionais adquiridas através da µCT pode-se observar que o porongo é um material poroso, composto majoritariamente por poros abertos. Entretanto, sua microestrutura é heterogênena, com maior concentração de poros na região próxima ao centro do fruto e menor concentração na região próxima ao exocarpo, este último, uma camada milimétrica densa e sem poros. Essa característica específica da sua microsestrutura faz com que tenha um comportamento dúbio com relação à permeabilidade à líquidos e gases: se comporta como um material pérmeavel nas faces do mesocarpo e impermeável na face do exocarpo. Isso explica o fato de ser utilizado empiricamente como isolante térmico, o que pode ser observado no uso das cuias, em que a áqua quente é colocada no interior do fruto, mas o exocarpo impede a transferência de calor até a superfície.

De uma forma geral, de acordo com Silva (2015), quanto maior a porosidade do material, maior a absorção de água e menor a massa específica, a condutibilidade térmica, a resistência à abrasão e à corrosão e a resistência mecânica. Em ensaio de absorção de água, amostras do fruto tiveram um ganho de massa de cerca de 150% de peso até o ponto de saturação (NEJELISKI; DUARTE, 2019). Com base na análise da microestrutura e das propriedades de materiais porosos, pode-se direcionar a aplicação do porongo como matéria-prima para a produção recipientes para alimentos e bebidas, produtos e revestimentos isolantes e filtros. Por ser altamente permeável nas faces do mesocarpo, para usos em contato com intempéries, torna-se necessária a aplicação de um impermeabilizante, a fim de conservar o material e estender a sua vida útil.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O porongueiro é uma planta de hábito tropical e adapta-se muito bem em qualquer clima, possui ciclo produtivo anual e alta produtividade, entre 9.000 e 10.000 frutos/ha. Com relação ao manejo de matérias-primas vegetais, um dos percalços é o tempo de desenvolvimento da planta até adquirir as características necessárias para se transformar em matéria-prima aproveitável. A maioria das madeiras demora mais de vinte anos para maturar, com exceção do eucalipto e do pinus plantados. O bambu, que é considerado uma planta

de maturação rápida, leva cerca de três anos para estar em condições de ser utilizado. Já a colheita do porongo é anual, ou seja, seu ciclo é ainda mais curto que o do bambu, o que faz com que seja uma interessante alternativa de matéria-prima natural de fonte renovável de ciclo rápido.

Pelas suas características peculiares de forma, estrutura e superfície, o porongo é um material natural diferenciado. Apesar de ser um cultivo extremamente antigo existem poucas pesquisas científicas sobre as propriedades do material. Os artefatos oriundos do fruto são confeccionados artesanalmente, a partir de conhecimentos empíricos. Nos locais onde é cultivado e beneficiado é fonte de geração de renda para pequenos agricultores e artesãos. A partir de um estudo sistemático do material e da identificação de suas principais propriedades podem surgir novas aplicações, bem como uma qualificação do que já é produzido. Com um melhor aproveitamento do fruto na confecção de outros artefatos, toda a cadeia produtiva aumenta, assim como o número de pessoas beneficiadas com o processo.

A µCT mostrou-se eficiente para a observação da morfologia interna do material em escala micrométrica. A partir da análise das imagens e dos volumes tridimensionais gerados, pode-se observar que a estrutura celular do porongo configura-se em um tecido poroso, composto por células com dimensões que aumentam progressivamente em direção ao centro do fruto. A maioria dos poros é interconectada, são poros abertos. Entretanto, o exocarpo, mais denso e com menos poros, impede o contato dos poros abertos com a superfície, isolando a camada do mesocarpo.

A partir da análise da microestrutura do porongo foi possível compreender o comportamento do material em diferentes situações. Dois fatores são fundamentais para a definição das principais propriedades do material: a diferença de densidade entre o exocarpo e o mesocarpo e a complexa rede de vascularização que forma a estrutura do mesmo. A compacta organização das células do exocarpo explica a impermeabilidade da casca, ao passo que as grandes células vazias do parênquima justificam a elevada porosidade do mesocarpo, altamente hidrofílico, bem como a densidade reduzida da parte interna do fruto.

REFERÊNCIAS

1. BISOGNIN, D. A.; MARCHESAN, E.; AUDE, M. I. DA S. Densidade de semeadura e produtividade do porongo. Ciência Rural, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 15 – 19, 1992.
2. BISOGNIN, Dilson A. Origin and evolution of cultivated cucurbits. Revista Ciência Rural: Santa Maria, v. 32, n. 5, p. 715 – 723, 2002.
3. BURTENSHAW, Mike. The first horticultural plant propagated from seed in New Zealand: Lagenaria siceraria. New Zealand Garden Journal, 2003.
4. CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
5. CIDADE, M. K.; PALOMBINI, F. L.; KINDLEIN JÚNIOR, W. Biônica como processo criativo: microestrutura do bambu como metáfora gráfica no design de joias contemporâneas. Educação Gráfica (Online), v. 19, n. 1, p. 91–103, 2015.
6. CIDADE, M. K.; PALOMBINI, F. L.; DUARTE, L. C.; PACIORNIK, S. Investigation of the thermal microstructural of CO^2 laser engraving on agate via X-ray microtomography. Optics & Laser Technology, v. 104, p. 56-64, 2018.
7. FERNANDES, Jaquiel Salvi; APPOLONI, Carlos Alberto; FERNANDES, Celso Peres. Determinação de parâmetros microestruturais e reconstrução de imagens 3-D de rocha de reservatório por microtomografia de raios X. Revista Ciências Exatas e Naturais, v. 11 nº 1, Jan/Jun 2009.
8. KAYAT, C.; MAGALHÃES, C. Experimentos biomiméticos e novas tecnologias digitais para o design de embalagem. DATJournal, v. 2, n. 2, p. 122-143, 2017.
9. KISTLER, Logan; et al. Transoceanic drift and the domestication of African bottle gourds in the Americas. PNAS, vol. 111, nº 8, 2014.
10. KRUCKEN, Lia. Design e território: valorização de identidades e produtos locais. São Paulo: Studio Nobel, 2009.
11. LESSA, Barbosa. História do chimarrão. Porto Alegre: Sulina, 1986.
12. NEJELISKI, Danieli; DUARTE, Lauren da C. Caracterização do porongo (*Lagenaria siceraria*): análise termogravimétrica, determinação do teor de umidade, da densidade básica e da densidade aparente. DATJournal, v. 4, n. 1, p. 14-26, 2019.
13. PALOMBINI, F. L.; KINDLEIN JR., W.; SILVA, F. P.; MARIATH, J. E. A. Design, biônica e novos paradigmas: uso de tecnologias 3D para análise e caracterização aplicadas em anatomia vegetal. Design & Tecnologia, v. 13, p. 46-56, 2017.
14. PALOMBINI, F. L.; VAN DER LINDEN, J. C. de S.; MARIATH, J. E. de A.; DE OLIVEIRA, B. F. Design-aided Science: o designer como promotor de tecnologias 3D para inovação em pesquisa científica. Educação Gráfica, v. 22, n. 3, p. 169-186, 2018.
15. REIS NETO, José Manoel dos; FIORI, Alberto Pio; LOPES, Angela Pacheco; MARCHESE, Clarice; PINTO-COELHO, Cristina Valle; VASCONCELLOS, Eleonora Maria Gouvea; SILVA, Gabriel Fischer da; SECCHI, Rodrigo. A microtomografia computadorizada de raios X integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas. Revista Brasileira de Geociências, v. 41(3), p. 498-508, Set 2011.
16. ROTH, Ingrid. Fruits of angiosperms: encyclopedia of plant anatomy. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 1977.
17. SILVA, André L. L.; et al. Coleta e caracterização morfológica de populações de porongo – Lagenaria siceraria (Mol.) Standl. – Cucurbitaceae. Revista Ciência & Natura: Santa Maria, p. 91 – 100, 2002.
18. SILVA, Vinício Coelho da. Medida de porosidade em SiC através de processamento digital de imagens. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, 2015.
19. TREVISOL, Wolmar. Morfologia e fenologia do porongo: produtividade e qualidade da cuia. Tese (Doutor em Ciências). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2013.
20. ULIANA, D.; KAHN, H.; CONTESSOTTO, R.; ANTONIASSI, J. J. Microtomografia de alta resolução no setor mineral. Holos, v. 30, n. 3, p. 11-19, 2014.