



PGDESIGN | Programa de Pós-Graduação
Mestrado | Doutorado



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

Gabriel Barbieri

OBTENÇÃO DE MODELOS 3D COM PRECISÃO MICROMÉTRICA POR FOTOGRAMETRIA
A PARTIR DE IMAGENS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2016

GABRIEL BARBIERI

**Obtenção de modelos 3D com precisão micrométrica por Fotogrametria
a partir de imagens de microscopia eletrônica de varredura**

Dissertação de Mestrado submetida ao programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para a obtenção do grau de Mestre em Design.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva

Porto Alegre

2016

Gabriel Barbieri

**OBTENÇÃO DE MODELOS 3D COM PRECISÃO MICROMÉTRICA POR FOTOGRAMETRIA
A PARTIR DE IMAGENS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, vinte e oito de junho de dois mil e dezesseis.

Prof. Dr. Régio Pierre da Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

Banca Examinadora:

Orientador: **Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva**

Departamento de Design e Expressão Gráfica (DEG)

Prof. Dr. Mário Luiz Lopes Reiss

Departamento de Geodésia – Examinador Externo

Prof.^a Dr.^a Lauren da Cunha Duarte

Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) – Examinador Interno

Prof. Dr. Luís Henrique Alves Cândido

Departamento de Design e Expressão Gráfica (DEG) – Examinador Interno

AGRADECIMENTOS

A meus pais, por todo apoio, compreensão, dedicação e sábios conselhos, vocês são especiais, obrigado por tudo!

Ao meu orientador Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva, por toda a atenção e paciência no decorrer do mestrado, muito obrigado!

A todos os professores que direta ou indiretamente contribuíram dedicando seu tempo, dividindo seus conhecimentos e me fortalecendo a cada etapa, e em especial aos professores do Laboratório de Design e Seleção de Materiais Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva, Prof. Dr. Luís Henrique Alves Cândido, Prof.^a Dr.^a Lauren da Cunha Duarte, Prof.^a Dr.^a Liane Roldo e o Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior, pelas aulas, convívio, conselhos e orientações, agradeço imensamente por estarem presentes na minha trajetória!

Aos colegas do LdSM em especial ao João Rogério Machado Pereira, Luciano Santos da Silva, Jaqueline Dilly e Yuri Walter.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Design e em especial ao LdSM por todo o apoio construtivo durante essa etapa.

Ao Centro Tecnológico de Pedras Gemas e Joias do Rio grande do Sul – Soledade/RS por disponibilizar equipamento e estrutura para a realização desse trabalho.

Ao Núcleo de Experimentação Tridimensional (NEXT) da PUC-Rio, em especial a Natascha Scagliusi e ao Prof. Dr. Jorge Lopes, por disponibilizar equipamento, tempo e estrutura para realização desse trabalho.

À CAPES e CNPq, pelo auxílio e pela bolsa concedida.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão dessa etapa.

Muito obrigado!

RESUMO

BARBIERI, G. **Obtenção de modelos 3D com precisão micrométrica por Fotogrametria a partir de imagens de microscopia eletrônica de varredura.** Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

A obtenção de modelos 3D em escala micrométrica vem sendo cada vez mais aprimorada e uma das principais técnicas utilizadas é a microtomografia (microCT). Ocorre que o uso de um equipamento de microCT é mais restrito, se comparado a um equipamento de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Uma vez que a saída de dados do MEV são imagens, percebeu-se a possibilidade de aliar essa técnica à Fotogrametria, a qual utiliza fotografias de diversos ângulos de um objeto para gerar modelos 3D. Neste contexto, o objetivo desse trabalho foi desenvolver um método para obter modelos tridimensionais por Fotogrametria a partir de imagens adquiridas por microscopia eletrônica de varredura. O método proposto tem por base os procedimentos adotados para Fotogrametria, porém, sua principal diferença se dá pela utilização de um equipamento que emite um feixe de elétrons e que não pode ser inclinado como normalmente faz-se com uma câmera fotográfica. Após investigar o sistema de aquisição de imagens por MEV, foi necessário desenvolver um dispositivo capaz de fornecer controle automatizado de rotação e inclinação da amostra a ser digitalizada. Como amostra, utilizou-se um fragmento de quartzo, com dimensões de aproximadamente 2,0 x 2,5 x 1,5 mm. Com o dispositivo desenvolvido, foi possível adquirir 40 imagens por rotação da amostra (a cada 9°), uma por minuto, as quais foram processadas por Fotogrametria. Para o processamento, foram utilizadas diferentes combinações de imagens, buscando determinar uma relação entre a precisão dos modelos 3D obtidos e o ângulo entre aquisições. Para validar o método proposto, utilizou-se um modelo 3D obtido por microCT como referência. Neste sentido, as malhas obtidas por Fotogrametria foram sobrepostas à malha de referência para realização de análises de inspeção dimensional. Os resultados demonstraram que quanto maior o ângulo entre rotações da amostra, menor é a precisão do modelo 3D gerado, pois há um menor número de imagens para o processamento. Com a obtenção de uma imagem a cada 9°, obtiveram-se erros médios de 0,007 mm, menores que 0,5% do comprimento do modelo. Assim, considera-se que o método proposto, com auxílio do dispositivo desenvolvido, é uma interessante alternativa para a geração de modelos 3D de amostras com tamanho na ordem de milímetros e detalhes superficiais micrométricos.

Palavras chave: Fotogrametria; Microfotogrametria; Microscopia Eletrônica de Varredura; Microtomografia; Digitalização 3D; Inspeção Digital.

ABSTRACT

BARBIERI,G. **Acquiring of micrometric 3D models by Photogrammetry from images obtained by Scanning Electron Microscopy.** Master Thesis (Master of Design) - School of Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

The 3D model acquiring in micrometer scale has been improved and increasingly one of the main techniques used microtomography (microCT). What happens is that the use of a microCT equipment is more restricted, if compared to a scanning electron microscopy (SEM). Once the data output of the SEM are images, realized the possibility of combining this technique to Photogrammetry, which uses photographs from various angles of an object to generate 3D models. Therefore, the objective of this work is to develop a method for 3D models by Photogrammetry from images obtained by scanning electron microscopy. The proposed method is based on the procedures adopted for Photogrammetry, but the main difference is given by the use of a device that emits a beam of electrons, which can not be tilted as usually done with a camera. After investigating the image acquisition system by SEM, it was necessary to develop a device capable of providing automated control of rotation and inclination of the sample being scanned. As a sample, a fragment of quartz, with dimensions of approximately 2.0 x 2.5 x 1.5 mm. In this way, it was possible to acquire 40 frames per rotation of the sample (every 9°), a per minute, which were processed by Photogrammetry. For this, used were different combinations of pictures and to determine a relationship between the accuracy of the obtained 3D models and the angle between acquisitions. To validate the method was used a 3D model as a reference, obtained by microCT. Thus, the meshes obtained by photogrammetry were superimposed on the grid reference for performing dimensional inspection analysis. The results showed that the larger the angle between rotation of the sample, the lower the accuracy of the generated 3D model, because there is a smaller number of images for processing. With getting an image every 9°, was obtained average errors of 0.007 mm, less than 0.5% of the length model. Therefore, it is considered that the proposed method with the help of the developed device is an interesting alternative for the generation of 3D models of samples with size in millimeters and order of micrometric surface details.

Keywords: Photogrammetry; Microphotogrammetry; Scanning Electron Microscopy; Microtomography; 3D Scanning; Digital Inspection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Método de aquisição fotogramétrica de curto alcance.	18
Figura 2. Princípio da digitalização baseada em Fotogrametria	20
Figura 3: Microscópio Eletrônico de Varredura – LdSM/UFRGS	24
Figura 4. Esquema interno do sistema de aquisição de dados MEV.....	25
Figura 5. Esquema interno de lentes do MEV	26
Figura 6: Método de aquisição no microtomógrafo	31
Figura 7: Microtomógrafo parte interna	32
Figura 8. Plataformas Inclínadas e Plataforma plana para a aquisição de dados no MEV.	35
Figura 9. As 8 posições a partir das rotações de 45°	35
Figura 10: Movimento de rotação amostra para mapeamento completo	35
Figura 11: Modelo esquemático do MEV: plataforma para fixação da amostra e tela de captura da imagem.....	36
Figura 12 Processo fotogramétrico do software 123D Catch®	37
Figura 13. Foto do dispositivo eletrônico no suporte do MEV.....	38
Figura 14. Foto do relógio de pulso no suporte do MEV	38
Figura 15. Comparativo entre varredura estática (A) e varredura em movimento	39
Figura 16. Método proposto para a aquisição de dados.....	40
Figura 17. Preparação da amostra	41
Figura 18. Recorte das barras informativas após aquisições em MEV.....	41
Figura 19. Aquisições em inclinação de 60° no MEV e sequenciamento de passos.	42
Figura 20. Parâmetros utilizados para a aquisição da microCT.....	43
Figura 21. Equipamento ZEISS Xradia 510 Versa	43
Figura 22. Parâmetros de aquisição de dados da microtomografia no equipamento X-Radia 510 Versa.	44
Figura 23. Modelo gerado a partir do upload das aquisições em MEV	47
Figura 24. Alinhamento manual de pontos no 123D Catch®	47
Figura 25. Modelos 3D gerados a partir da Fotogrametria em MEV	48
Figura 26. Registro manual de 2 malhas no Geomagic	49

Figura 27. Registro global das 5 malhas no software Geomagic Studio®	49
Figura 28. Ensaio 1 realizado via microtomografia no CTPEDRAS	50
Figura 29. Imagens (fatias) ilustrativas da microCT.....	50
Figura 30. Software 3D Slicer® e arquivo microtomografado em um modelo 3D.....	51
Figura 31. Resultado da Microtomografia realizada no equipamento XRadia 510 Versa após reconstrução da malha 3D.	52
Figura 32. Esquema do dispositivo para o MEV	53
Figura 33. Protótipo do Dispositivo	53
Figura 34. Aquisições em MEV	55
Figura 35. Comparação das malhas obtidas por Fotogrametria e microtomografia (μ CT)	56
Figura 36. Modelo 3D com textura indicando falhas na reconstrução do modelo	57
Figura 37. Avaliação do número de triângulos em cada malha	58
Figura 38. Alinhamento, no Geomagic Studio®, das malhas dos quatro lados obtidas por Fotogrametria.....	59
Figura 39. Malha triangular obtida por digitalização a laser no equipamento Digimill 3D	59
Figura 40. Comparação da malha de digitalização a laser com a microCT	60
Figura 41. Análise das malhas obtidas por Fotogrametria.....	61
Figura 42. Erros de escala dos modelos obtidos por Fotogrametria em relação à microCT. ..	62
Figura 43. Média dos erros em função do ângulo de rotação	64
Figura 44. Desvio quadrático médio (RMS) em função do ângulo de rotação	64
Figura 45. Comparativo entre média dos erros e desvio quadrático médio (RMS) para os Lados a 9°	65
Figura 46. Análise dimensional dos modelos 3D obtidos por Fotogrametria.....	65
Figura 47. Erros médios e desvio quadrático médio RMS das malhas geradas por Fotogrametria.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estatísticas calculadas pelo software Geomagic Qualify®.....	63
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
BSE	<i>Backscattering Electron</i> (BSE)
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
DSM	<i>Dense surface modeling</i>
LdSM	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MicroCT	Microtomografia
SIFT	<i>Scale Invariant Feature Transform</i>
SURF	<i>Speeded Up Roubust Features</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
XuM	Ultra Microscopia de raios-X

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 PROBLEMA	13
1.2 JUSTIFICATIVA	13
1.3 OBJETIVO GERAL	13
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL	15
2.1.1 FOTOGRAMETRIA.....	16
2.1.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	22
2.1.3 MICROTOMOGRAFIA	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1 ENSAIOS PRELIMINARES.....	34
3.2 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO DE ROTAÇÃO	37
3.3 AQUISIÇÃO NO MEV E GERAÇÃO DE MODELOS 3D	39
3.4 OBTENÇÃO DE MODELO 3D POR MICROTOMOGRAFIA.....	42
3.5 OBTENÇÃO DE MODELO 3D POR DIGITALIZAÇÃO A LASER.....	44
3.6 INSPEÇÃO DIGITAL.....	45
4. RESULTADOS.....	46
4.1 ENSAIOS PRELIMINARES.....	46
4.2 OBTENÇÃO DE MODELO 3D POR MICROTOMOGRAFIA.....	50
4.3 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO DE ROTAÇÃO	52
4.4 AQUISIÇÕES NO MEV E GERAÇÃO DE MODELOS 3D	54
4.5 OBTENÇÃO DE MODELO 3D POR DIGITALIZAÇÃO A LASER.....	59
4.6 INSPEÇÃO DIGITAL.....	60
5. CONCLUSÃO	67
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

A forma de adquirir modelos tridimensionais é constantemente renovada por equipamentos e processos, sendo possível digitalizar desde amostras nanométricas até grandes edificações ou terrenos. O aprimoramento tecnológico dos métodos de digitalização 3D, oportunizado pelo aperfeiçoamento dos mecanismos de captura, bem como pelo melhoramento computacional, vem permitindo desenvolver modelos 3D virtuais cada vez mais próximo ao mundo real.

Uma das tecnologias de digitalização tridimensional que vem se popularizando é a Fotogrametria, a qual parte do mapeamento de um objeto por meio de uma sequência fotográfica e, com o auxílio de softwares, permite reconstruir modelos 3D. A técnica vem sendo constantemente aprimorada e, apesar de possuir maior aplicação na área de mapeamento topográfico, com o fácil acesso a equipamentos fotográficos e softwares específicos, seu uso se espalhou por diferentes áreas.

O acesso a equipamentos com a capacidade de digitalizar em 3D objetos menores que 10mm, por exemplo via microtomografia (microCT), é mais restrito se comparado a um equipamento de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Nesse sentido, uma vez que a saída do microscópio é uma imagem, há a possibilidade de realizar a digitalização 3D de uma amostra por meio do MEV aliado à Fotogrametria. Essa técnica pode ser muito efetiva para a aquisição de dados externos de modelos micrométricos, a fim de investigar a superfície ou o volume da amostra em um ambiente tridimensional. Porém, como a forma de adquirir imagens é diferente da convencional, é necessário desenvolver um método para adquirir os dados 2D em MEV e para posterior reconstrução de um modelo 3D por Fotogrametria.

Nesse contexto, a proposta deste trabalho é desenvolver um método de digitalização tridimensional via imagens de MEV. O processo a ser desenvolvido nesse trabalho permitirá que o usuário possa criar um modelo 3D da superfície de uma amostra utilizando a Fotogrametria. Ainda, pretende-se avaliar a qualidade dos modelos 3D a serem obtidos, utilizando técnicas já consagradas para comparação, tais como a microCT.

1.1 PROBLEMA

Devido a limitações dos equipamentos de digitalização, geralmente concebidos para geometrias em escala milimétrica, pequenos detalhes não são adquiridos com uma boa qualidade. Nesse sentido, para pequenas amostras ou a nível micrométrico, uma das técnicas mais indicadas é a microtomografia (microCT). Esse método permite a reconstrução tridimensional de superfícies internas e externas do modelo analisado. Porém, o uso dessa tecnologia é muitas vezes restrito, devido ao alto valor do equipamento e da hora técnica, bem como à falta de parâmetros de processo para aquisição de dados em diferentes materiais e posterior reconstrução 3D em softwares específicos. Nesse caso, quando se pretende a visualização da superfície externa da amostra, o processo via MEV apresenta-se como um importante candidato. O problema consiste então em definir um método de obtenção de modelos 3D utilizando a Fotogrametria aplicada a imagens no MEV.

1.2 JUSTIFICATIVA

A carência de métodos para obtenção de dados 3D micrométricos justifica a escolha do tema. Permitir a visualização tridimensional de um modelo, a partir de um equipamento que está disponível em boa parte das universidades, pode ser uma proposta de grande importância para diversas áreas do conhecimento.

A aquisição de dados por MEV é uma técnica já consagrada, porém a imagem 2D muitas vezes não revela toda estrutura analisada. Isso pode ser suprido com auxílio da Fotogrametria, permitindo gerar o volume do objeto, tornando-o 3D, e, assim, mais próximo à amostra real. A reconstrução de um modelo em 3D é uma etapa essencial na análise estrutural. Assim, a possibilidade de explorar a Fotogrametria por MEV e comparar a eficiência com uma técnica consagrada, como a microCT, coloca esta pesquisa em uma das atuais fronteiras da digitalização 3D.

1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um método para obter modelos tridimensionais por Fotogrametria a partir de imagens adquiridas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender o sistema de aquisição de imagens por MEV;
- Investigar as semelhanças e diferenças em relação à fotografia convencional;
- Avaliar a aplicabilidade da Fotogrametria a partir das imagens de MEV;
- Definir um método de aquisição com MEV para processamento 3D;
- Desenvolver um dispositivo para facilitar o posicionamento da amostra;
- Aperfeiçoar o tempo de aquisição (posições da amostra e número de imagens);
- Validar o método proposto com o auxílio de técnicas já conhecidas de digitalização 3D, como a microtomografia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo são apresentados tópicos sobre digitalização tridimensional, abordando em especial a Fotogrametria como técnica para aquisição de dados por meio de fotografias. São também abordadas as principais características do MEV, bem como o funcionamento de suas lentes e de seu sistema de captura de imagens. Por fim, buscando um padrão de comparação entre modelos micrométricos, é também abordado o processo de aquisição de dados via microtomografia.

2.1 DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL

A digitalização tridimensional consiste basicamente em adquirir nuvens de pontos 3D, e com auxílio de ferramentas computacionais, permite obter com grande precisão detalhes de superfícies, texturas e até mesmo objetos inteiros (SILVA, 2006). Em outras palavras, trata-se de um método de captura de informações por meio de equipamentos e softwares com a capacidade de digitalizar pontos no espaço, ou seja, nas coordenadas X, Y e Z (FREITAS, 2006). A digitalização 3D tem sido aplicada em diversos campos do conhecimento, tais como: engenharia reversa (SENO, 2015; GALANTUCCI, 2008), ergonomia (STEWART et al., 2015; PSIKUTA et al., 2015), medicina (BERTOL et al., 2010; REECE et al., 2015; VAN DEN HERREWEGEN, et al., 2014), odontologia (PARK, 2015; DAVIS, 2015), tecnologia assistiva (SILVA, 2011; AVILA, 2013), preservação de patrimônio histórico (GOMES, 2014; FLORES, 2012), estudos arquitetônicos (LEONOV, et al., 2015; KEDZIERSKI e FRYSKOWSKA, 2015; MAHDJOUBI et al., 2013) e arqueologia (HAKONEN et al., 2015).

Os equipamentos de digitalização tridimensional são providos com diferentes métodos de aquisição, como: laser, luz branca ou estruturada, infravermelho, sensores de contato, fotografia ou mesmo raios-X (SILVA, 2011). Sistemas de luz branca costumam ser rápidos e um dos equipamentos que se pode destacar é o da marca ARTEC (KONGEVOLD, 2013). Já equipamentos a laser costumam ser mais precisos, em especial os que trabalham com varredura por ponto focal, como, por exemplo, o DIGIMIL 3D que opera por holografia conoscópica (FREITAS, 2006). Também é possível a partir de um investimento relativamente

pequeno possuir um digitalizador como o Kinect da Microsoft que funciona por infravermelho (BUENO et al., 2015). E ainda o tomógrafo e o microtomógrafo, que possuem alto custo, mas que permitem obter dados do interior de uma amostra, por meio de raios-X (STOCK, 2008; LANDIS e KEANE, 2010). O método de digitalização abordado nesse trabalho é a Fotogrametria, que utiliza fotografias para obter modelos 3D.

2.1.1 FOTOGAMETRIA

Fotogrametria é uma palavra constituída por radicais de origem grega: *photos* = luz, *gramm* = desenho e *metron* = medições, ou seja, que significa medições executadas por meio de fotografia (TOMMASSELLI et al., 1990). A Fotogrametria determina informações de um objeto 3D em coordenadas de uma sequência de imagens 2D (MASS, 1997).

Fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informações confiáveis sobre os objetos físicos e o meio ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões da energia eletromagnética radiante e outros fenômenos (ASPRS, 1980).

A partir dessa definição, é possível adquirir imagens bidimensionais de determinado objeto e, com o auxílio de fundamentos matemáticos, metodológicos e computacionais, reconstruir um modelo tridimensional. Essa técnica digital é conhecida por ser um método de desenvolvimento de modelos 3D a partir de uma série de imagens com áreas de sobreposição de um objeto. Essa série de imagens é obtida ao redor da amostra, em forma de fotografias convencionais, em que pelo menos duas imagens tenham pontos de referência entre si para facilitar o referenciamento no momento da sobreposição (PIAZZESI, 1972; EULITZ et al., 2015; MIKHAIL et al., 2001).

Normalmente, a técnica exige a utilização de mais do que duas imagens do objeto, a fim de garantir a redundância necessária. Mas para ser chamado de fotogramétrico, o sistema necessita seguir os seguintes requerimentos (GRUEN, 1994): “flexibilidade respeitando a dimensão da reconstrução do modelo 3D; alta precisão e confiabilidade; capacidade de autodiagnostico (controle da qualidade das medições e resultados)”.

Historicamente a Fotogrametria se subdividiu em quatro áreas do conhecimento tecnológico, conforme Silva (1990): A Fotogrametria Geométrica trata os aspectos geométricos do uso de fotografias, de modo a obter valores de comprimento, altura e

formas. A Fotogrametria Analógica foi uma técnica responsável pela maior parte dos mapas topográficos existentes, com a redução dos cálculos por aparelhos ópticos mecânicos, proporcionou-se o mapeamento de extensas áreas. A Fotogrametria Analítica surge com o desenvolvimento computacional, o qual proporciona aumento de velocidade, e o melhoramento de softwares de triangulação, tornando o método mais eficiente. Já na Fotogrametria Digital trabalha-se com fotos ou imagens no formato digital, obtidas por equipamentos fotográficos de alta definição e maior precisão.

A principal vantagem das câmeras digitais em relação às câmeras analógicas é a facilidade de manipulação, processamento e análise de dados (SCHENK, 2005). Com a evolução da tecnologia e substituição de filmes fotográficos por métodos de aquisições digitais com sensores CCD (*charge coupled device*) proporcionaram-se maneiras de captura mais eficientes sem a necessidade de aquisições adicionais como, por exemplo, pancromática, multiespectral e modos de infravermelho. Além disso, o recurso do formato digital permite a manipulação e edição de dados equilibrando erros que podem distorcer o resultado desejado (MATTHEWS e NOBLE, 2008).

Existem dois principais eixos da técnica que são amplamente explorados: A Fotogrametria aérea (*aerial Photogrammetry*), característica de um mapeamento topográfico; e a Fotogrametria de curto alcance (*close-range Photogrammetry*), que se configura como uma técnica na qual o objeto fica próximo à câmera, sendo possível obter informações por diversos ângulos. Alguns autores (PERCOCO et al., 2015; GONZÁLEZ et al., 2015) ainda utilizam o termo Microfotogrametria para se referir ao processamento de modelos com precisão micrométrica, mesmo que tais modelos possuam dimensões na ordem de milímetros. Nesse sentido, a Microfotogrametria é um caso da fotogrametria de curto alcance, com alta precisão.

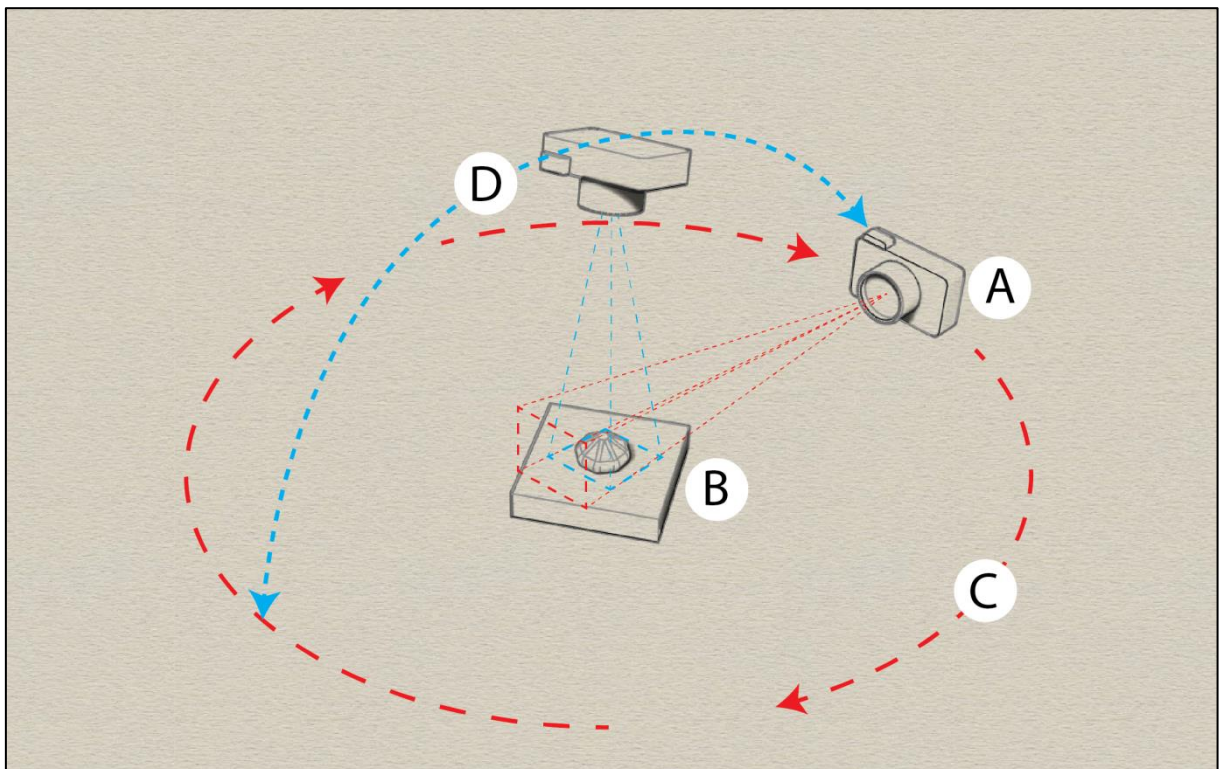
A Fotogrametria aérea tem seu principal objetivo no mapeamento de áreas terrestres com auxílio de aeronaves e equipamentos fotográficos, tais como a câmera aerofotogramétrica, que é definida como uma câmera métrica digital, desenvolvida para mapeamento com baixa distorção de lente e alta estabilidade (JUBANSKI et al., 2010).

A Fotogrametria de curto alcance é uma técnica para medir e ou interpretar com precisão objetos diretamente de fotografias ou imagens digitais capturadas com câmeras de curto alcance (YAKAR e YILMAZ 2008). Uma vantagem nesse método é que as imagens para

um projeto pequeno podem ser adquiridas com equipamentos de menor custo (MATTHEWS e NOBLE, 2008).

Na aquisição fotogramétrica de curto alcance, o movimento de rotação da câmera deve ser realizado com foco na amostra que não deve ser movimentada, pois o software de reconstrução baseado em fotografia mapeia o ambiente e identifica pontos de referência, para a sobreposição das aquisições. A Figura 1 mostra a movimentação comum da técnica.

Figura 1. Método de aquisição fotogramétrica de curto alcance.



A câmera fotográfica (A) contorna a amostra (B) em sentido circular (C ou D). Podem existir diferentes sentidos de movimentação conforme a complexidade do modelo. Fonte: Autor

Um pré-requisito para a determinação das coordenadas do objeto 3D é a detecção de pontos homólogos nas imagens. Se o número de pontos é detectado anteriormente, esta tarefa torna-se trivial. Por outro lado, com um grande número de alvos não identificados, a tarefa pode tornar o processamento de dados fotogramétrico muito complexo (MASS, 1997).

Para uma aquisição de boa qualidade, é necessário que duas fotos tenham no mínimo 6 pontos em comum em aquisições fotográficas em vistas diferentes. Além disso, é importante que as imagens tenham uma variação da distância da câmera-objeto e a variação

da rotação entre as imagens eliminando a correlação entre os parâmetros calculados (GALLO, 1993). A técnica de Fotogrametria de curto alcance é melhor utilizada quando a sobreposição entre as imagens é subdividida em pequenos passos, o que permite uma redução da diferença de perspectiva e, conseqüentemente, produz resultados melhores (BARAZZETTI et al., 2011; EULITZ et al., 2015).

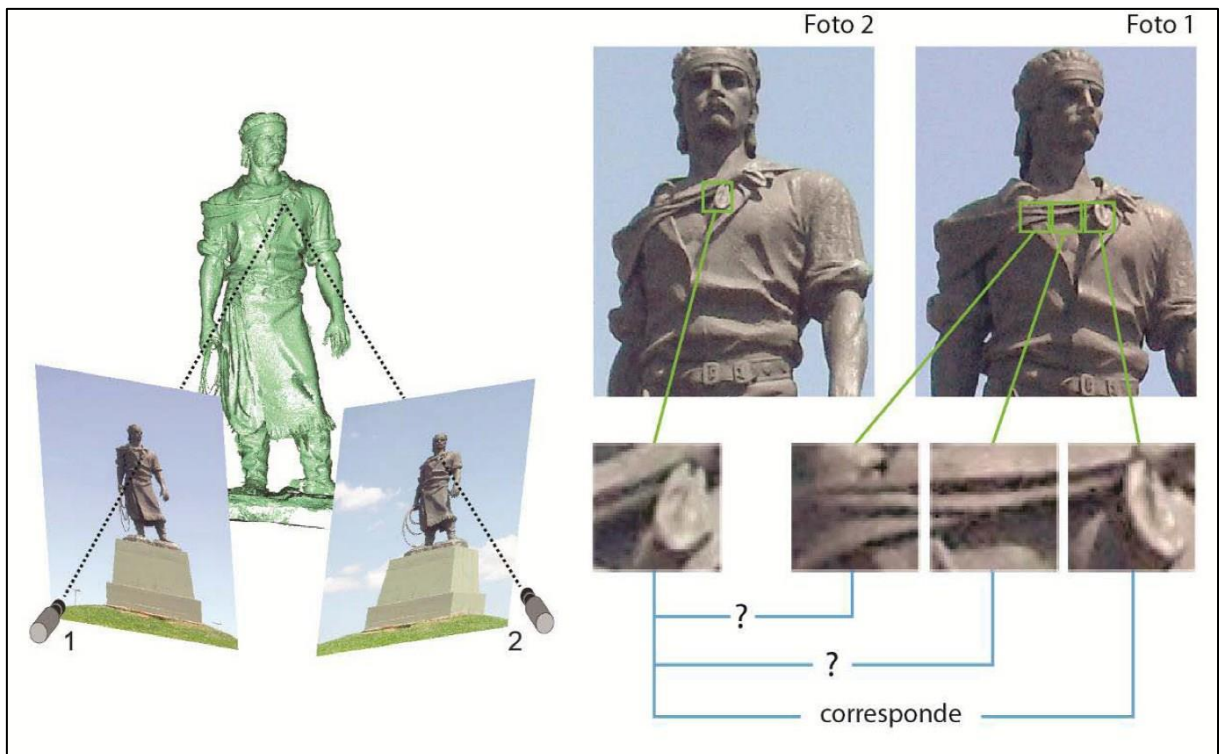
Os alvos (*targets*) são um sistema de referenciamento que auxiliam no processo de localização durante a digitalização fotográfica e também na manipulação dos dados digitais no software, no qual compara sequências de imagens a fim de orientá-las e sobrepô-las conforme semelhanças existentes entre as fotos.

Segundo Silva et al. (2014), os alvos codificados são um sistema de orientação que possui dados em sua própria geometria, pois tem suas dimensões e formato previamente conhecidos e padronizados, geralmente, são geométricos e circulares quando usados na digitalização 3D. Esse sistema de código é eficaz para a criação de superfícies que não possuem características distintas e para a determinação de pontos com maior precisão (PHOTOMODELER, 2015). Também existe a possibilidade de utilizar alvos naturais como, por exemplo, a textura de uma rocha, cascalho, ou mesmo pele humana (WALFORD, 2010).

Walford (2010) descreve que a digitalização por fotografia utilizada no software PhotoModeler é baseada no conceito da Fotogrametria, colocando que o sistema é capaz de calibrar as câmeras e de resolver com precisão a posição e orientação da câmera no momento em que as fotos foram tiradas. Um dos algoritmos presentes no software, o *Dense Surface Modeling* (DSM), o qual reconhece e identifica a posição e a orientação de câmeras no momento da captura, comparando duas fotos por marcas de contraste e definindo a melhor posição para o alinhamento. Após determinada a melhor correspondência entre as imagens, o resultado do processamento é uma nuvem de pontos 3D (Figura 2). (WALFORD, 2010; SILVA, 2011; EOSSYSTEM, 2012).

A digitalização 3D por fotografia, segundo Walford (2010), tem requisitos como: a textura do objeto a ser digitalizada; a iluminação do ambiente, evitando ambientes escuros; a necessidade de referenciamento no espaço (por alvos padronizados ou por elementos naturais); e obter duas ou mais fotografias, devido ao software operar pelo processo de comparação de múltiplas imagens.

Figura 2. Princípio da digitalização baseada em Fotogrametria



Em 1 e 2 São adquiridas imagens em diferentes ângulos, o algoritmo reconhece pontos em comuns entre as fotos e sobrepõe as imagens como observa-se nas Fotos 1 e 2, tendo como resultado uma nuvem de pontos. Modificado de: SILVA, 2011.

Um dos algoritmos mais utilizados, atualmente, é o SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*), proposto por Lowe (1999), o qual é capaz de reconhecer objetos em cenas, por meio da identificação de pontos, geração de descritores e equivalência entre os pontos de interesse. As características desse algoritmo o tornam de grande aplicação na área de visão computacional, podendo-se citar: localização e mapeamento por robôs, reconhecimento de gestos e facial, realidade aumentada e análise de imagens médicas (SILVEIRA, et al. 2011).

Vem sendo desenvolvidas variantes e otimizações do algoritmo SIFT, dentre as quais pode-se destacar o algoritmo SURF (*Speeded Up Robust Features*) que é mais rápido e mais robusto no processamento de dados (BAY et al., 2008).

Deve-se levar em consideração que, além de equipamentos para obter os dados por Fotogrametria, é fundamental um bom suporte computacional com grande capacidade de processamento, já que os resultados apresentam densas nuvens de pontos repletas de informações, o que geralmente torna demorado o processamento.

Por meio da constante evolução computacional e de softwares, muitos dos algoritmos fotogramétricos foram automatizados e a aquisição de dados pela Fotogrametria

de curto alcance obteve grande destaque (KONGEVOLD, 2013). Comercialmente, PhotoModeler® (PHOTOMODELER, 2015), Agisoft PhotoScan® (AGISOFT, 2015), Pix4D® (PIX4D, 2015), Australis® (PHOTOMETRIX), ContextCapture® (BENTLEY, 2015) e 123D Catch® (AUTODESK, 2015) são alguns dos principais softwares de Fotogrametria.

O 123D Catch®, utilizado neste trabalho, é um software gratuito disponibilizado pela AutoDesk®, o qual gera modelos a partir da combinação de múltiplas imagens com campos sobrepostos (*photo stitching*). A partir do software é possível fazer um upload de uma sequência de fotos que serão processadas na nuvem. Após o processamento faz-se o download de uma malha 3D. Há também versões do aplicativo para dispositivos móveis (AUTODESK, 2015).

Além de softwares e algoritmos desenvolvidos por empresas, existem centros de pesquisa que se empenham em criar esses produtos. Um exemplo é o algoritmo de estéreo Fotogrametria desenvolvido por Zolotukhin et al. (2013) o qual recebe duas imagens (par estereoscópico) obtidos por MEV, encontra os pontos correspondentes e constrói uma superfície 3D.

Observa-se que o método fotogramétrico com câmeras fotográficas convencionais é mais dominado e utilizado para objetos com um tamanho relativamente grande. Para uma aquisição de dados de uma amostra pequena, menor que 2mm, muitas vezes esbarra-se na distância focal e na qualidade da lente do equipamento convencional, o que compromete a qualidade da imagem.

Alguns dos recursos da fotografia convencional são observados no trabalho de Nguyen et al. (2014) no qual foi feita a digitalização de uma coleção de insetos do Museu de História Natural de Londres. O processo de aquisição por fotografia contou com dois sistemas para a aquisição de dados: uma câmera sem lente macro, para amostras com tamanho superior a 10 mm; e outra câmera com sistema de lente macro e com ajuste da posição focal por um sistema de trilhos para movimentação da câmera, para amostras menores que 10 mm. Os modelos 3D foram posicionados em uma plataforma giratória com alvos para auxiliar o processo de referenciamento. Alguns modelos foram digitalizados por método de Fotogrametria e alguns em microCT. A resolução e a malha 3D gerada pela microCT se mostrou superior a da Fotogrametria, porém, o objetivo dos autores era obter uma digitalização com cor e nesse aspecto a digitalização por fotografias é efetiva.

São ainda incipientes os trabalhos propondo o uso da Fotogrametria com imagens de MEV para a obtenção de modelos 3D. Eulitz e Reiss (2015) apresentam um estudo propondo uma adaptação no método de captura para obtenção desses modelos.

A maior diferença na aquisição de dados via MEV em relação à Fotogrametria convencional é que a amostra irá se movimentar e o sistema de captura é fixo. Ainda com a finalidade de melhorar a aquisição fotográfica, três recursos provenientes da fotografia são importantes na Fotogrametria: campo de visão, que define o quanto ele vê e é uma função da distância focal da lente e do tamanho/formato do sensor digital; o foco é a apuração da imagem, ou seja, a definição da profundidade de foco; e a exposição que consiste no controle da iluminação. Esses recursos combinados auxiliam no processo de aquisição fotográfico (CURTIN, 2004; APPLE, 2005).

A qualidade da malha 3D baseia-se na resolução das imagens captadas, correlacionados com lente e a distorção da lente, o tamanho do sensor fotométrico, e a distância focal em relação ao objeto (GOMES et al., 2014; ALBURNIO, 2012;). Nesse sentido é necessário investigar as semelhanças e diferenças entre a fotografia convencional e a captura de imagens por MEV, bem como propor uma metodologia para a adaptação do processo na Fotogrametria. Para tanto, é realizada uma revisão bibliográfica acerca de MEV, a fim de prover um maior entendimento da técnica.

2.1.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura é um equipamento com a capacidade de reproduzir imagens de alta ampliação e resolução. Seu princípio de funcionamento consiste na emissão de feixe de elétrons por um filamento de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30kV, o qual permite a variação da aceleração dos elétrons e também provoca o aquecimento do filamento. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio (eletrodo positivo) atrai fortemente os elétrons gerados, resultando numa aceleração em direção a ele. A correção do recurso dos feixes é realizada pelas lentes condensadoras que alinham os feixes em direção à abertura da objetiva. A objetiva ajusta o foco dos feixes de elétrons antes que eles atinjam a amostra analisada (DEDAVID et al., 2007; GOLDSTEIN et al., 2012). Em outras palavras, a aquisição ocorre a partir de um feixe de elétrons que varre a superfície da

amostra, onde os elétrons interagem com a superfície da amostra e um detector capta o sinal gerado pela interação (EULITZ e REISS, 2015).

O MEV é amplamente usado para imagens e análise em diferentes campos de pesquisa e técnicas industriais (JENSEN, 2012; SUN e XIA, 2002). O tamanho da amostra é condicionado pela câmera e os diferentes tipos de MEV existentes no mercado (KLEIN e ROMERO, 2007). A qualidade de imagem e de sua resolução espacial, ampliação, posição relativa dos detectores e ângulo de inclinação estão entre os parâmetros mais importantes que afetam a precisão da reconstrução da superfície no MEV 3D (TAFTI et al., 2015). Porém, apesar de um resultado aparentemente tridimensional, a aquisição é bidimensional.

A possibilidade de reconstruir um modelo 3D a partir de imagens 2D é uma ferramenta de grande valia para áreas de pesquisa como design, medicina, biologia, engenharias, entre outras. Ou seja, segundo Tafti et al. (2015) reproduzir modelos em 3D a partir de aquisições no MEV promove a visualização da verdadeira superfície da anatomia da amostra. O MEV 3D, no entanto é uma técnica promissora que promove uma aquisição de dados estruturais volumétricos quantitativos, porém uma desvantagem se comparado a outros métodos de aquisição é a limitação das informações apenas na superfície da amostra (WOODWARD et al., 2014).

A microscopia eletrônica é tipicamente realizada em condições de alto vácuo, a fim de minimizar a interferência com o feixe de elétrons primários e de imagem de elétrons emitidas a partir da superfície da amostra (WOODWARD, 2014). Na microscopia de elétrons a fonte de iluminação da amostra é proveniente de um feixe de elétrons (CHANDLER e ROBERTSON, 2009). Ainda em alguns casos para uma boa aquisição é importante que a amostra seja condutora, segundo Goldstein et al. (1992):

Devido à necessidade de interação do feixe eletrônico com a amostra, alguns elétrons são absorvidos pela amostra que deve conduzi-los para o fio terra, por isso, é preciso que as amostras sejam condutoras. Caso isto não ocorra, é possível torná-las condutoras por meio de vários processos físicos como evaporação ou a deposição de íons (sputtering). Outro motivo para o recobrimento das amostras, é que as camadas depositadas podem melhorar o nível de emissão de elétrons, pois emitem mais elétrons que o material da amostra, facilitando a construção da imagem.

De acordo com Dedavid *et al.* (2007), a formação das imagens em MEV é geralmente obtida por sinais de: elétrons secundários, que são resultados da interação do feixe eletrônico com o material da amostra, são de baixa energia (<50eV) e formam imagens

com alta resolução (3-5 nm); e de elétrons retroespalhados ou *backscattering electron* (BSE) que possuem um espalhamento elástico e formam a maior parte do sinal. O sinal de BSE é resultante de interações ocorridas na parte interior da amostra e proveniente de uma região de volume de interação abrangendo um diâmetro maior do que o do feixe primário.

O equipamento disponível no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM/UFRGS) é o HITACHI - TM3000 (Figura 3) em que a magnificação da imagem chega a ordem de 30.000 vezes e as condições analíticas para obtenção de imagem do tipo *backsattered electron* (BSE) de até 15kV.

Figura 3: Microscópio Eletrônico de Varredura – LdSM/UFRGS

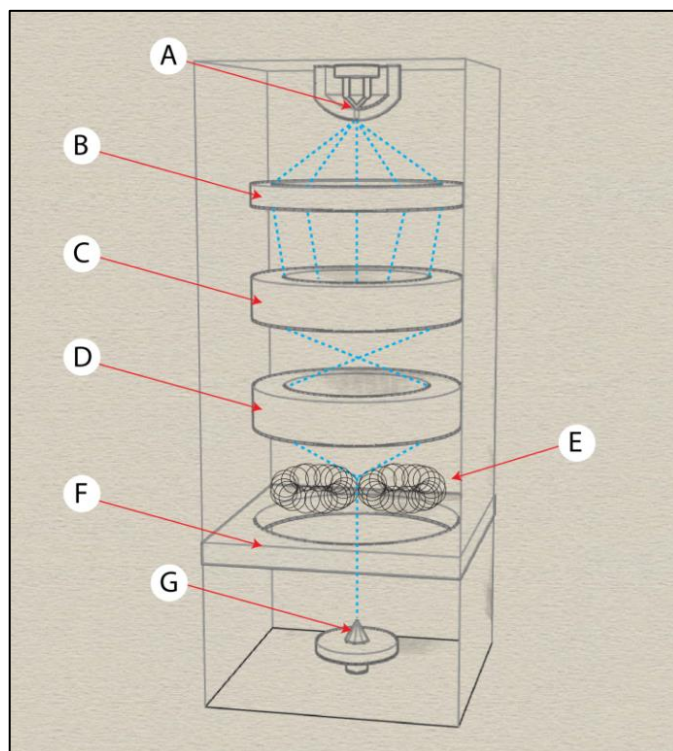


Equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura Hitachi TM3000 do LdSM – UFRGS. Fonte: Autor

De acordo com o manual do equipamento Hitachi (2010) e Dedavid et al. (2007), a formação da imagem no MEV é apresentada esquematicamente na Figura 4. O canhão de elétrons é constituído de um filamento de tungstênio, o qual é aquecido à alta temperatura, o calor excita os elétrons expulsando-os do filamento. O feixe de elétrons é atraído por um ânodo carregado positivamente (a força eletrostática acelera o feixe em direção ao ânodo), uma parte bate no ânodo e o restante passa pelo centro produzindo um feixe de elétrons de alta energia. O feixe de energia, ao passar pelo ânodo e chegar às lentes condensadoras, é colimado, ajustando o foco. Um eletroímã, preenchido com bobinas condutoras, produz um campo magnético que se dobra adequadamente ao feixe ajustando-o, bem como a intensidade do campo magnético. Este então é direcionado a pequenos eletroímãs que utilizam o campo magnético para mover o feixe em diferentes direções.

À medida que os elétrons entram em contato com a amostra, eles refletem ou são retroespalhados fora da superfície. A direção da retrodifusão de elétrons depende da forma da superfície, enquanto o impulso (a velocidade) dos elétrons depende da massa atômica dos átomos que ele atinge. Um detector de retrodifusão, composto por uma grade de pequenos cintiladores, detecta a direção dos elétrons retroespalhados e com qual quantidade de velocidade são emitidos. Estes dados permitem, assim, produzir uma escala de tons de cinzas precisos.

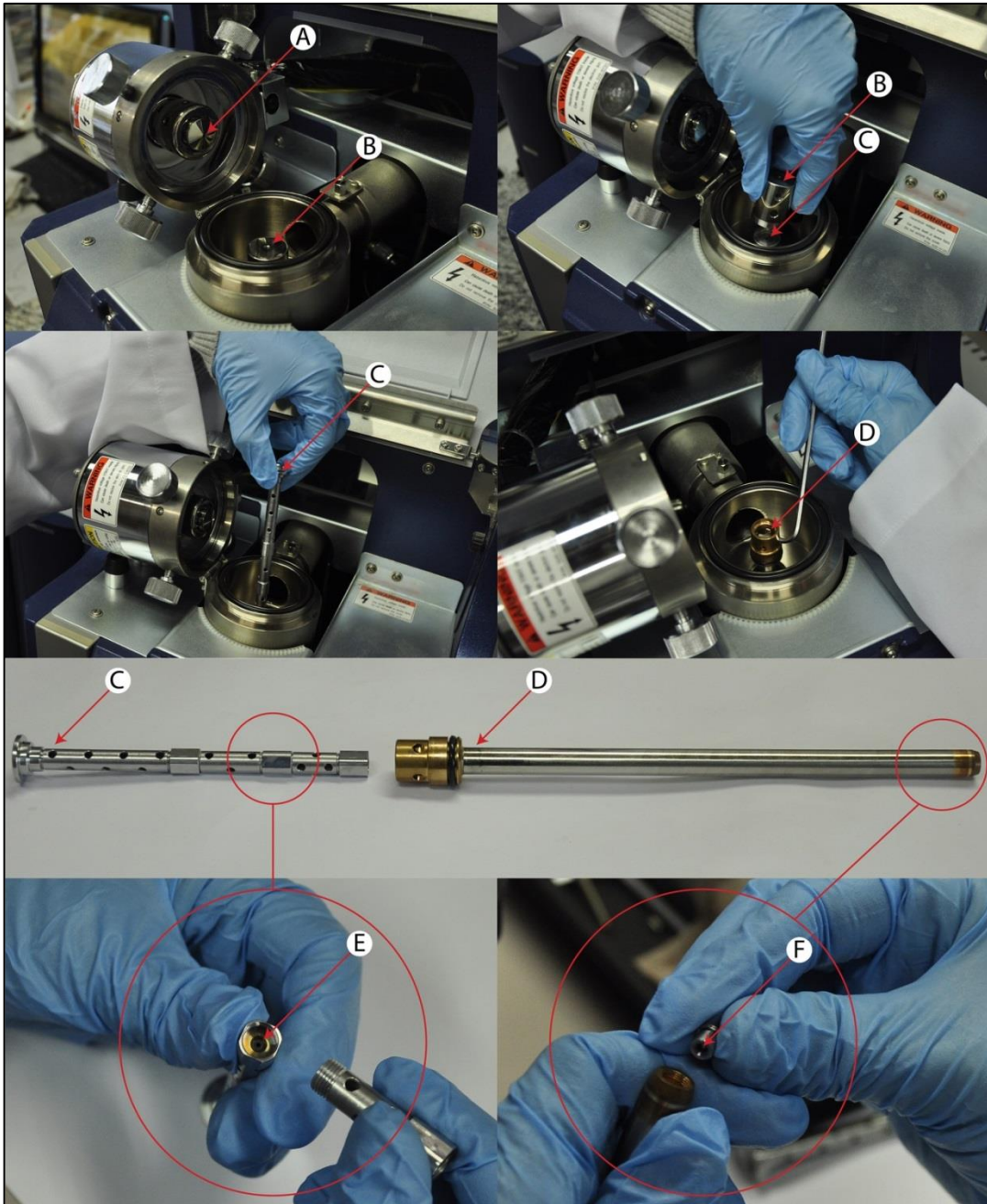
Figura 4. Esquema interno do sistema de aquisição de dados MEV



Canhão de elétrons (A), Anodo (B), Lentes condensadoras (C-D); Bobina digitalizadora (E); Detector de elétrons retroespalhados (F). Amostra (G). A linha em azul simula a ação do feixe de elétrons. Fonte: Autor

Ao entender o funcionamento básico de um sistema de MEV, cabe compreender a organização estrutural do sistema de lentes no equipamento a ser utilizado nessa pesquisa, que auxiliará no processo de aquisição tornando-o mais eficaz, nesse sentido, de forma a detalhar melhor essa etapa a Figura 5 mostra a configuração interna do equipamento Hitachi TM3000 disponível no LdSM.

Figura 5. Esquema interno de lentes do MEV



A figura mostra o esquema interno de funcionamento do MEV de bancada do LDSM. Sendo (A) canhão de elétrons que segue em direção ao (B) ânodo. Em (C) que consiste em um tubo linear onde estão as lentes condensadoras que alinham a direção dos elétrons, essas são 4 lentes ajustadas em cada elemento de fixação do tubo como observa-se em (E). No tubo (D) esta localizada a lente objetiva (F) que ajusta o foco do feixe de elétrons que atinjam a amostra analisada. Fonte: Autor

Existem pesquisas envolvendo reconstruções tridimensionais a partir de imagens obtidas no MEV, devido ao acesso mais facilitado ao equipamento, esse pode ser um recurso para gerar modelos volumétricos de forma a facilitar a visualização da amostra, justamente por extrapolar a ideia do bidimensional que o equipamento propõe. Nesse sentido, foi feita

uma pesquisa sobre o estado da arte de técnicas de microscopia aliada com a formação tridimensional da amostra analisada.

A técnica de estereoscopia adaptada para o MEV, utilizada por Zolotukhin et al. (2013), proporcionou a reconstrução de um modelo 3D a partir de pares estereoscópicos de imagens. A reconstrução desse modelo foi realizada a partir de um algoritmo desenvolvido pelos pesquisadores, o qual determina a localização mútua das imagens, a partir do conhecimento prévio do eixo de rotação. Isso pode não ser trivial, pois o MEV não apresenta essa informação, em regra, apenas o ângulo de rotação é conhecido. As imagens são adquiridas a partir de dois ângulos de câmera fornecidos pela inclinação da plataforma; o ângulo de inclinação é obtido a partir de MEV automaticamente. Assim obtendo um resultado tridimensional de uma superfície, por meio de duas imagens. O sistema é limitado a um par estereoscópico por processamento.

Na pesquisa Koster et al. (2000), com o uso de um equipamento de microscopia eletrônica de transmissão, que fornece projeções 2D da estrutura sólida, os autores obtiveram informações do resultado tridimensional em escala nanométrica do material zeólita. A tomografia eletrônica, referida no estudo como Microscopia de transmissão eletrônica, consiste em uma técnica em que uma série de projeções em 2D é subsequentemente gravada para calcular uma imagem 3D do objeto investigado. Essas projeções são obtidas por meio das capturas 2D em pequenos incrementos angulares ao inclinar a amostra sobre uma ampla gama angular (+ - 70°).

Eulitz e Reiss (2015) apresentam uma técnica diretamente relacionada com a pesquisa a ser desenvolvida. Os autores reconstruíram tridimensionalmente, a partir de aquisições bidimensionais do MEV auxiliado pela Fotogrametria, uma amostra de um glomérulo de rim de coelho. Foi utilizado um equipamento com formação de imagem por elétrons secundários. Assim, foi obtida uma superfície tridimensional do objeto analisado com 40 aquisições, em rotações de 9 em 9°, e com uma inclinação de 20°. Ao término das aquisições essas foram importadas para o software 123D Catch e o modelo 3D foi reconstruído. Um dos problemas da aplicação da técnica de Fotogrametria em objetos pequenos está na manipulação da amostra. Durante a aquisição no MEV, é necessário girar a amostra sem que ela se movimente em relação à plataforma, para evitar problemas no momento do referenciamento, quando os pontos em comum são comparados e alinhados para a reconstrução 3D. Para uma adequada aquisição, pode ser necessário desenvolver um

dispositivo que execute as ações de posicionamento e rotação, reduzindo ao máximo o manuseio da amostra.

Diversos outros métodos para obtenção de modelos 3D de objetos micrométricos vêm sendo propostos, em geral, baseados no fatiamento da amostra. Basicamente, são processos destrutivos de tomografia, nos quais são obtidas imagens de seções transversais do objeto de interesse.

Uma técnica explorada por Boughorbel et al. (2012) consiste na utilização de um MEV com um sistema com lâmina de corte de diamante. Essa técnica é conhecida como uma aquisição por *Serial Sectioning* ou *Serial Block Face*, a qual consiste em obter imagens 2D de amostras finamente fatiadas. A técnica funciona da seguinte forma: a cada microscopia gerada, por meio de uma lâmina de diamante e isso se repete até a finalização do processo. Nesse caso também é possível obter dados internos da amostra. Os autores, a partir de uma amostra de cérebro de um rato, obtiveram uma reconstrução de um modelo em 3D de aproximadamente 200nm, com 33 imagens e uma energia entre 0,7 keV até 5,0 keV.

A microscopia eletrônica de varredura por íon-abrasão (*Ion-abrasion scanning electron microscopy*) foi uma técnica utilizada por Heymann et al. (2009) para analisar organelas no interior de células eucarióticas de mamíferos. Após a amostra ser envolvida em resina, a técnica para a aquisição consiste em um feixe de íons abrasivos de gálio que é focado na superfície do bloco e secciona uma área de 40 μ m x 40 μ m em passos de 20nm. Cada superfície recém-exposta é submetida ao feixe de elétrons, com tempo de aquisição que varia de 60 a 160s por imagem. Depois de adquiridos, os dados 2D são submetidos à reconstrução tridimensional, no caso dessa pesquisa no software ImageJ e IMOD. Da mesma forma Murphy et al. (2011), auxiliados por microscopia óptica e eletrônica com a técnica de íon-abrasão reconstruíram em 3D uma célula de um mamífero infectada pelo vírus HIV.

Há uma técnica não destrutiva chamada MEV3D (3DSEM) que conforme Mayo et al. (2010) consiste em um equipamento de microscopia eletrônica que hospeda também o sistema de microCT. Um protótipo foi desenvolvido em colaboração entre CSIRO e XRT Ltd, chamado de Ultra Microscopia de raios-X (XuM). Com esse equipamento foi possível gerar modelos volumétricos da microestrutura de uma amostra de madeira. Basicamente, esse equipamento funciona a partir de uma fonte de raios-X de tamanho 0,1lm que é gerado pelo feixe de elétrons do MEV. O feixe incide contra um alvo de metal, que gera uma fonte de

sub-mícron de raios-X, os quais são detectados em um sensor que capta as imagens (MAYO et al., 2003).

Woodward (2014) interpreta que “o MEV3D é uma técnica distinta dos mais antigos algoritmos de reconstrução em MEV, como a Fotogrametria (PIAZZESI, 1973) e relevo da superfície reconstrução (SMITH, 1980), que produzem mapas digitais de elevação”. Essa nova abordagem produz volume 3D completo por volta de projeção de dados de entrada ruidosos, podendo adquirir imagens a partir de uma única inclinação sendo possível uma comparação com a tomografia computadorizada (WOODWARD et al., 2014).

Conforme já exposto, a microtomografia é uma referência para a obtenção de modelos 3D volumétricos e pretende-se utilizá-la para comparação dos resultados obtidos. Assim, uma revisão bibliográfica à respeito dessa técnica também se faz necessária.

2.1.3 MICROTOMOGRAFIA

A microCT consiste em uma tecnologia que, a partir da atenuação ocorrida em ondas de raios-X ao atravessar um material, permite a visualização e reconstrução do objeto analisado sem destruir a amostra (STOCK, 2008; BECKERS et al. 2014; RUECKEL, et al. 2014). A microCT por cone focal pode atingir resoluções abaixo de 10 μ m, essa limitada pela geometria do cone focal de raios-X (LANDIS e KEANE, 2010), diferentemente da tomografia computadorizada, que tipicamente alcança uma resolução de 250 μ m (CNUdde e BOONE, 2013).

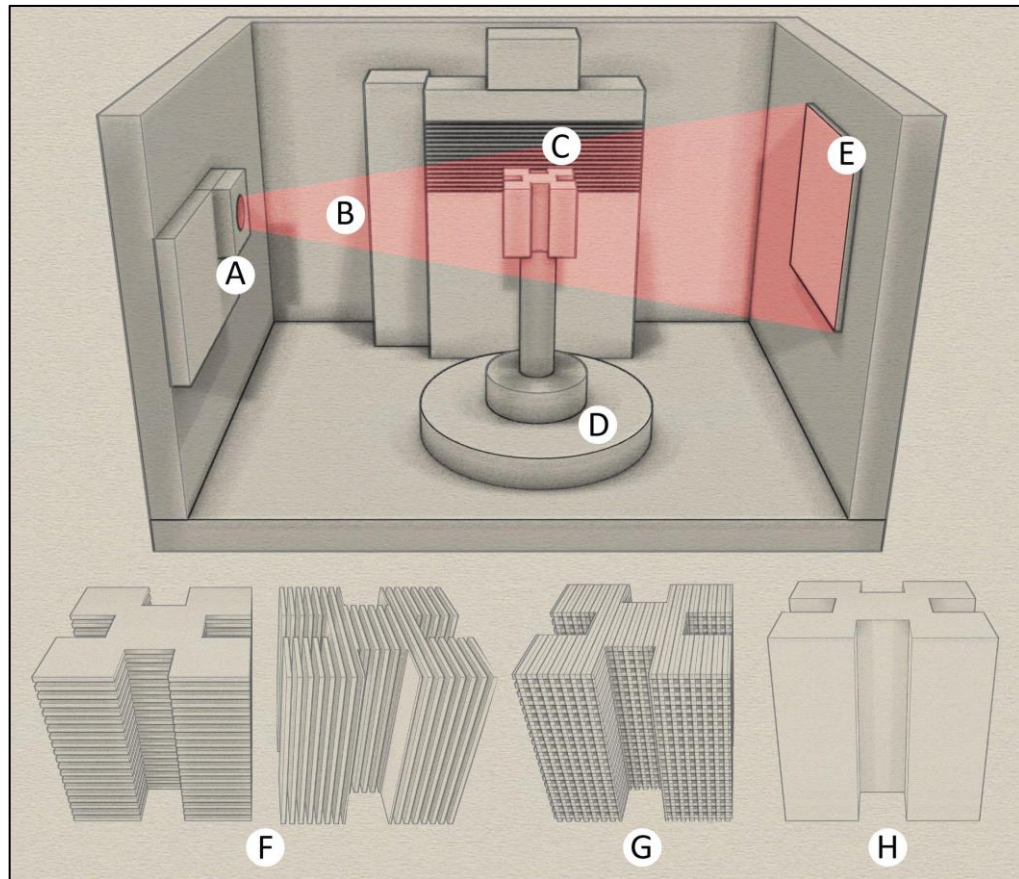
A técnica de raios-X é utilizada para adquirir imagens com uma alta densidade estrutural e com significativa atenuação dos raios-X. A baixa densidade de alguns materiais biológicos, tecidos finos, entre outros, tem sua visualização comprometida devido à baixa absorção e ao contraste da estrutura investigada (MIZUTANI, 2012). Cabe a partir disso, definir parâmetros que proporcionem uma visualização aproximada com um nível de ruído mínimo. Em termos práticos, uma imagem de qualidade dependerá das propriedades dos materiais, como densidade e estrutura atômica, e da relação sinal-ruído do espectro de raios-X (STOCK, 2008). A transmissão da intensidade de raios-X depende da variação do coeficiente que está relacionado com as propriedades do material, densidade, o número atômico e a energia de incidência do feixe de luz (ATTIX e ROESCH, 1968; LANDIS e KEANE,

2010). Por meio da técnica de microCT é possível obter a média ou propriedades individuais e quantitativas da microestrutura do objeto (LANDIS e KEANE, 2010).

Conforme Landis e Keane (2010), a técnica de microCT consiste em uma série de varreduras de imagens 2D obtidas através da irradiação de raios-X em uma amostra. Seus dados são calculados e a partir disso desenvolvido um mapa de pixel, cada um desses pixels representa um valor correspondente à atenuação média correlacionada com a densidade do material. A reconstrução do volume tridimensional (*voxel*, pixel 3D) é correlacionada com os dados obtidos na aquisição de diversas fatias bidimensionais (plano XY), as quais são empilhadas no eixo Z. O contraste da imagem é característico da densidade da amostra e principalmente pela detecção da variação da amplitude dos raios-X transmitidas através da amostra. A região com maior brilho corresponde a de maior densidade e as mais escuras de menor densidade.

O funcionamento básico de um microtomógrafo, segundo Landis e Keane (2010), consiste em uma projeção de raios-X que são filtrados em um cintilador e convertidos em luz visível, fotodetectores convertem a luz visível em imagens digitais. Essa série de imagens é obtida em diversos ângulos em forma de fatias (2D) e após reconstruídas em uma versão 3D, por meio do “empilhamento” das imagens 2D. Esquemáticamente, conforme a Figura 6, um típico equipamento consiste em um emissor de raios-X (A), que projeta um feixe normalmente cônico (B), o qual atravessa a amostra de material (C) que se encontra fixada em uma plataforma giratória (D). O feixe então incide em um detector (E), o qual processa os raios-x, transformando-os finalmente em uma imagem digital bidimensional. Conforme a plataforma (D) rotaciona, uma sequência de imagens é obtida (F). No processamento por softwares, as fatias são empilhadas (G) e, então, é processada a reconstrução do modelo digital em 3D (H).

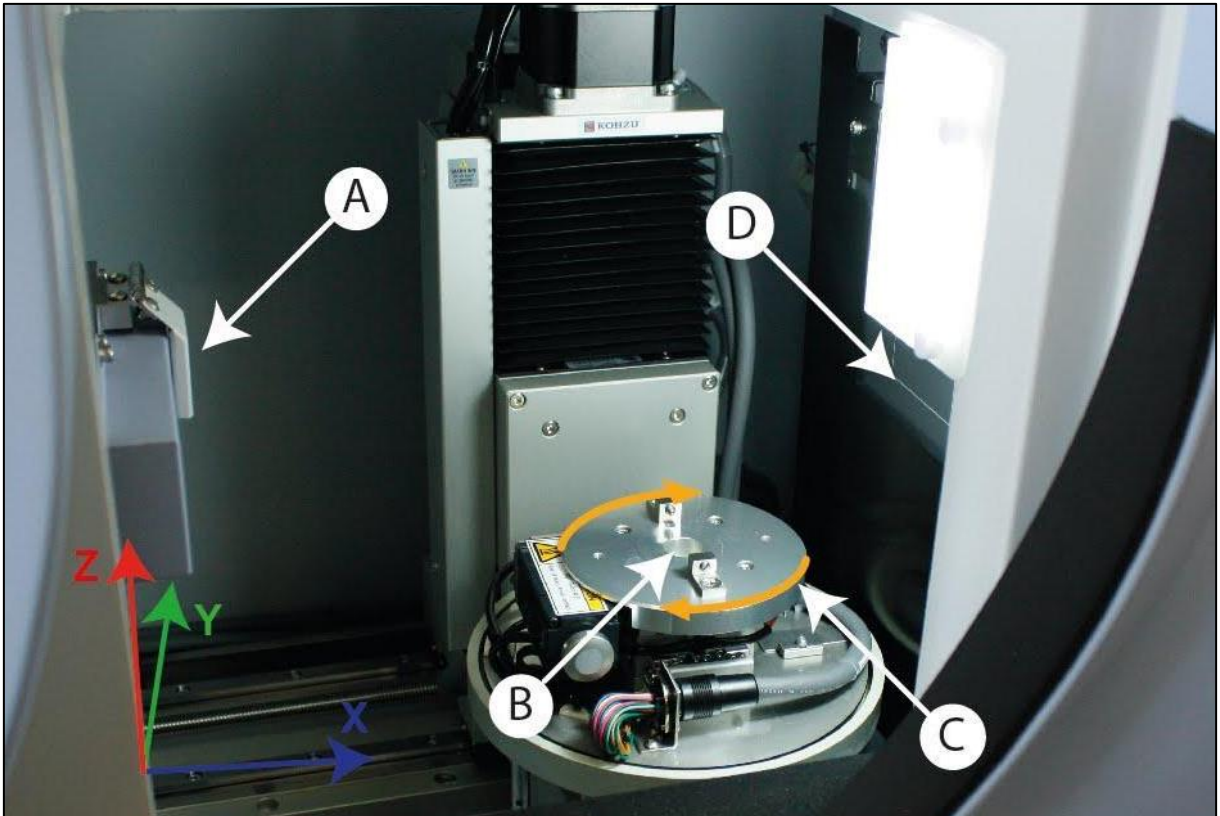
Figura 6: Método de aquisição no microtomógrafo



Esquema de funcionamento do microtomógrafo e reconstrução 3D a partir de imagens 2D. A) Emissor de raios-X; B) Feixe de raios-X; C) Amostra; D) Plataforma giratória; E) Detector de raios-X; F) Série de projeções 2D; G) Empilhamento de fatias; H) Reconstrução 3D. Fonte: Autor

Um microtomógrafo utilizado para o uso nesta pesquisa foi o Shimadzu Inspecio SMX-90CT, do CTPEDRAS em Soledade / RS, o qual atinge uma resolução de até aproximadamente $20 \mu\text{m}$. Na Figura 7 é possível verificar a configuração interna desse equipamento da seguinte forma: (A) Emissor de raios-X, esse então emite as ondas eletromagnéticas que incidem contra a amostra que deve ser posicionada no encaixe (B) da plataforma giratória (C) ao girar no sentido horário a plataforma permite que os raios-X incidam contra a amostra em todos os ângulos, permitindo que o detector (D) capte a maior quantidade de informações. Outro equipamento utilizado foi o ZEISS Xradia 510 Versa, da PUC-Rio / RJ, o qual possui um kit opcional de lentes que permite melhorar a qualidade da aquisição, atingindo uma resolução de até $0,7 \mu\text{m}$ (ZEISS, 2016).

Figura 7: Microtomógrafo parte interna



Equipamento de microtomografia internamente. Emissor de raios-X (A) que incidem contra uma amostra que deve ser posicionada no encaixe (B), a plataforma (C) orbita em um eixo x-y, nesse orbita os raios-X que incidem contra a amostra atravessam em diferentes direções e finalizam no detector de raios-X(D), que capta as informações referentes aos eixos X, Y e Z, convertendo em imagem. Fonte: Autor

A microCT, é aplicada em diversas áreas de conhecimento, como: em estudos de solos (TRACY et al., 2015), plantas e germinação (STUPPY, 2003; DHONDT, 2010) em tecidos animais mineralizados, como dentes, cartilagens e ossos (BURGHARDET et al., 2010; ATWOOD et al., 2010; LILJE et al., 2013) em fósseis (SKINNER 2013; MEYER, 2014), minerais e rochas (NETO et al., 2011; BAKER, 2010; FUSSEIS, 2014; JUSSIANI, 2015), alimentos (CANTRE, 2013; ISAAC et al., 2013), madeiras (BADEL, 2008).

Uma aplicação predominante de microCT é na área de medicina, o exemplo no estudo de Li et al. (2007) demonstra parâmetros da técnica para a aquisição de ossos e tecido mole de uma amostra de um roedor. Schambach, (2010) utilizou uma amostra de roedor, tendo como resultados informações tridimensionais de órgãos internos Aoyagi et al. (2015) da mesma forma, obteve resultados do músculo da língua de um roedor.

Na área de compósitos, Feng et al. (2011), caracterizaram a porosidade presente na amostra da estrutura da fibra de carbono. Na representação volumétrica desse ensaio foi

possível distinguir as fibras de carbono, carbetos de silício e a porosidade. Também Madra et al. (2014) analisaram qualitativamente e quantitativamente a porosidade presente na estrutura do compósito de fibra de vidro.

A microtomografia é uma técnica que vem sendo amplamente explorada em outros campos de pesquisa, por exemplo, Skinner et al. (2013) digitalizaram com o auxílio de um microtomógrafo um fóssil homínido, que está presente no *The Ditsong National Museum of Natural History*, tendo como objetivo desenvolver material digital para visualização na web. Nessa pesquisa, a microCT tem foco na reconstrução tridimensional de amostras, com alta precisão, visando validar o método proposto de Fotogrametria em MEV.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa deste estudo consistiu em uma revisão bibliográfica para compreensão de fundamentos da digitalização 3D por Fotogrametria, de microscopia eletrônica de varredura e microtomografia, bem como para levantamento do estado da arte em técnicas de obtenção de modelos 3D micrométricos. Constatou-se a necessidade de uma adaptação para o uso da técnica de Fotogrametria em MEV, principalmente devido à configuração fixa do conjunto de lentes do equipamento, o que torna necessária a movimentação da amostra.

Buscou-se relacionar os parâmetros da fotografia convencional com a aquisição de dados em MEV. Uma grande vantagem a ser explorada no presente trabalho refere-se à profundidade focal no MEV, a qual é bastante elevada se comparada com lentes para máquina fotográfica convencional.

3.1 ENSAIOS PRELIMINARES

Para verificar a aplicabilidade da técnica, foi realizado um ensaio piloto com o MEV Hitachi TM3000, do LdSM. Para tanto, se definiu o maior tamanho da amostra que o equipamento utilizado proporciona em todo o campo de visão, cerca de 2 mm. Também optou-se pela escolha de um material resistente para que pudesse ser manuseado em vários ensaios, nesse sentido utilizou-se um fragmento de quartzo. Para a aquisição desse ensaio, foi desenvolvido um processo manual de posicionamento da amostra no MEV, que consiste em duas plataformas com inclinações diferentes. Os ângulos das plataformas foram estabelecidos visualmente e, posteriormente, foram estimados a partir de fotografia, sendo de aproximadamente 60° e 30° (Figura 8-A). Sobre as plataformas, foi utilizada uma chapa plana para fixar a amostra e rotacioná-la. A base plana foi então rotacionada em passos de aproximadamente 45°. Para cada passo foi adquirida uma imagem pelo MEV (8 imagens por plataforma). Esse processo foi repetido na segunda plataforma e finalizado com uma aquisição de topo na base plana. A Figura 8-B ilustra as plataformas e ângulos utilizados no processo. A Figura 9 mostra a rotação e posições de imagens adquiridas nessa etapa. Para

evitar problemas de referenciamento das imagens, é fundamental que durante o processo de aquisição a amostra não se movimente em relação à base plana.

Figura 8. Plataformas Inclinadas e Plataforma plana para a aquisição de dados no MEV.

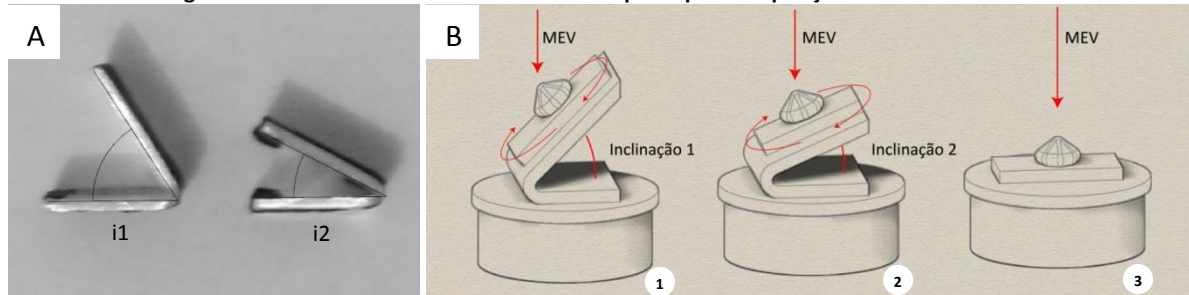
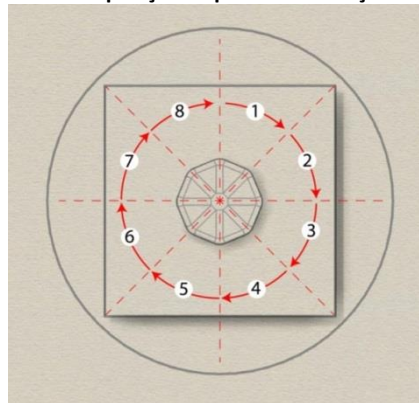


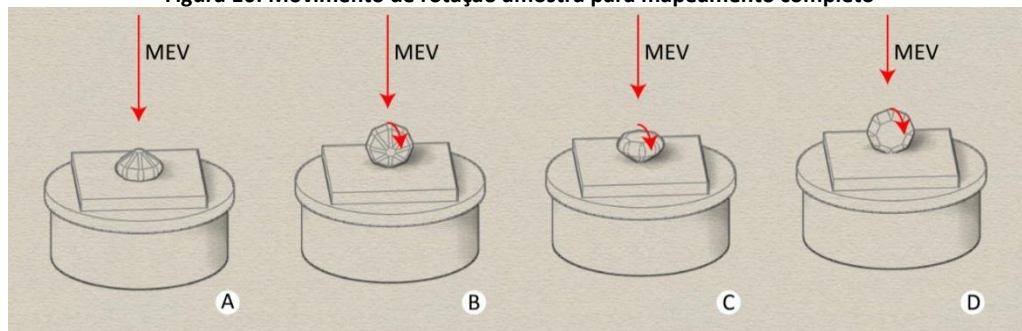
Figura 9. As 8 posições a partir das rotações de 45°



Sequência (de 1 a 8) do método de aquisições e o posicionamento da plataforma. Fonte: Autor

O processo de captura de cada imagem no MEV demandou em torno de 10 minutos entre a abertura/fechamento da porta da câmara, o processo do vácuo e a captura da imagem. Finalizado o mapeamento de um dos lados da amostra, a próxima etapa foi o giro da amostra para obtenção de um lado diferente (Figura 10). Com aproximadamente 4 posições, em ciclos de giro diferentes foi possível mapear todo o objeto.

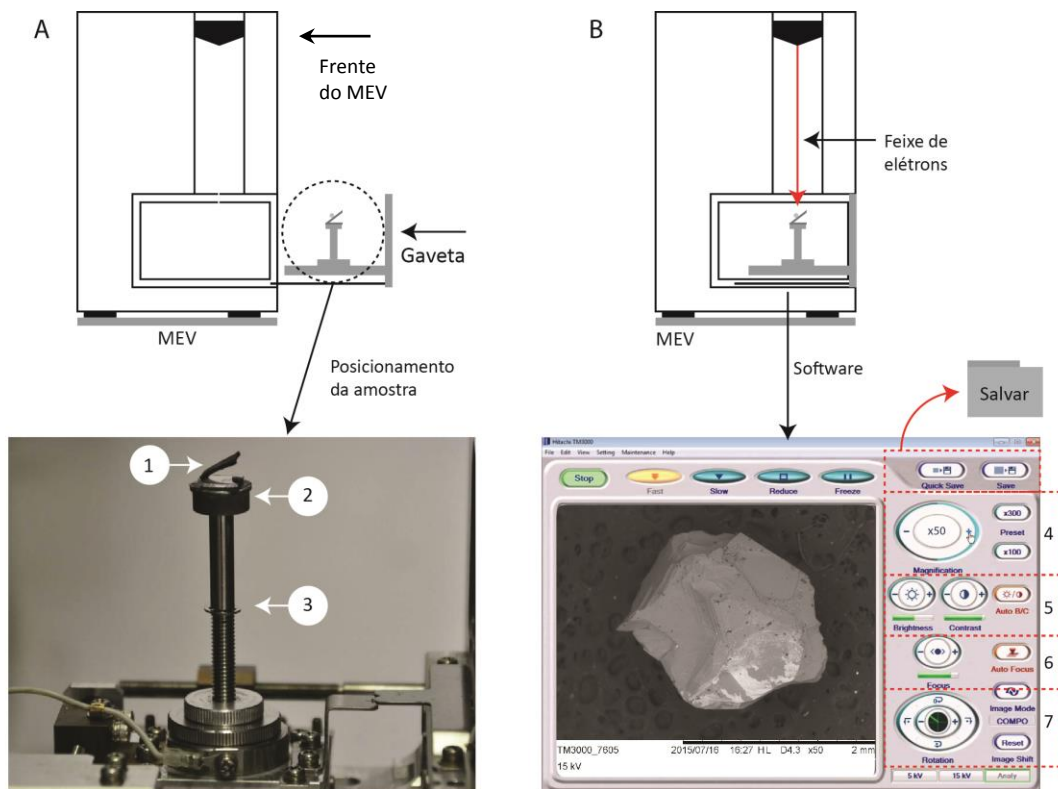
Figura 10: Movimento de rotação amostra para mapeamento completo



Sentido da rotação da amostra, de forma a mapear todos os lados durante a aquisição em MEV. Fonte: Autor

O procedimento para a aquisição de dados consistiu em: preparar a amostra sobre a plataforma, a qual foi fixada em um *stub* padrão do MEV utilizado, definir a altura da haste de fixação e submeter à câmara ao vácuo (Figura 11 A). Ao fechar a gaveta, o MEV é inicializado e o feixe de elétrons atinge a amostra, os dados são enviados ao computador e no software de aquisição é gerada a imagem. Com o processo de varredura da imagem iniciado, ajustou-se o posicionamento da plataforma no plano XY para visualizar todo o comprimento da amostra. Utilizaram-se os procedimentos de autofoco, foram ajustados brilho e contraste e, por fim, a imagem resultante foi salva no computador (Figura 11 B).

Figura 11: Modelo esquemático do MEV: plataforma para fixação da amostra e tela de captura da imagem

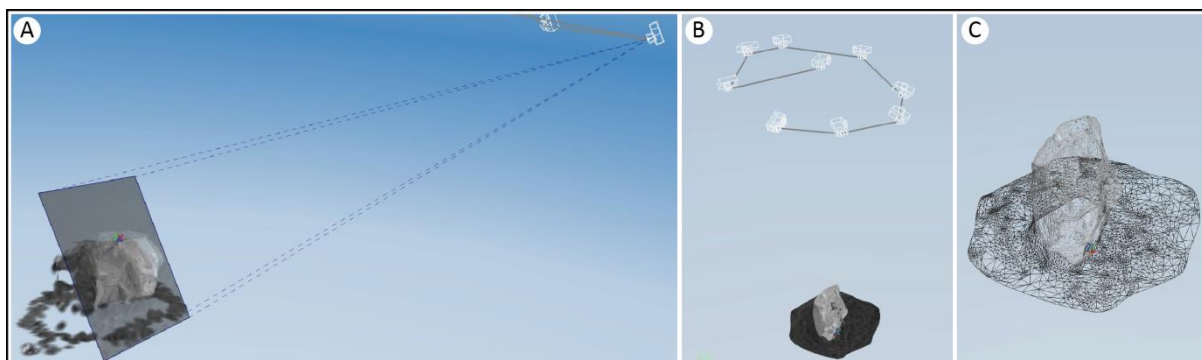


(A) Gaveta de acesso aberta para inserção da amostra: (1) Plataforma Inclined onde a amostra deve ser fixada; (2) Stub; e (3) haste para determinar a altura e fixação o stub. (B) Gaveta fechada e feixe de elétrons incidindo sobre a amostra. No software são ajustados os parâmetros: (4) magnificação, que pode alcançar um aumento de até trinta mil vezes; (5) brilho e contraste; (6) foco manual ou autofoco; e (7) rotação da tela e tipo de formato da imagem. Fonte: Autor

Para reconstruir um modelo 3D utilizou-se o software *123D Catch da Autodesk*. O software automaticamente identifica pontos em comum e sobrepõe imagens a fim de construir o modelo. Caso o programa não reconheça pontos em comum, é possível interferir manualmente mapeando-o novamente. Por meio do software foi executado o *upload* dos arquivos de imagens e, após a finalização do processamento, fez-se o *download* do arquivo

resultante em um formato OBJ. Na Figura 12 observa-se a interface do software utilizado e uma das malhas triangulares obtidas.

Figura 12 Processo fotogramétrico do software 123D Catch®



Em (A) é visualizada a posição da câmera em relação à aquisição fotográfica. Em (B) observa-se a sequência de captura de imagens e o modelo 3D. Em (C) observa-se a malha poligonal do modelo 3D. Fonte: Autor

Após a verificação da viabilidade da técnica, por meio dos ensaios preliminares, o processo para a aquisição dos dados em MEV foi sistematizado da seguinte maneira:

- a. Desenvolvimento de um dispositivo de rotação da amostra;
- b. Aquisição de dados no MEV e geração de modelos 3D;
- c. Digitalização da amostra por outros processos (microCT e digitalização a laser);
- d. Comparação das malhas obtidas por Fotogrametria com as de outros processos.

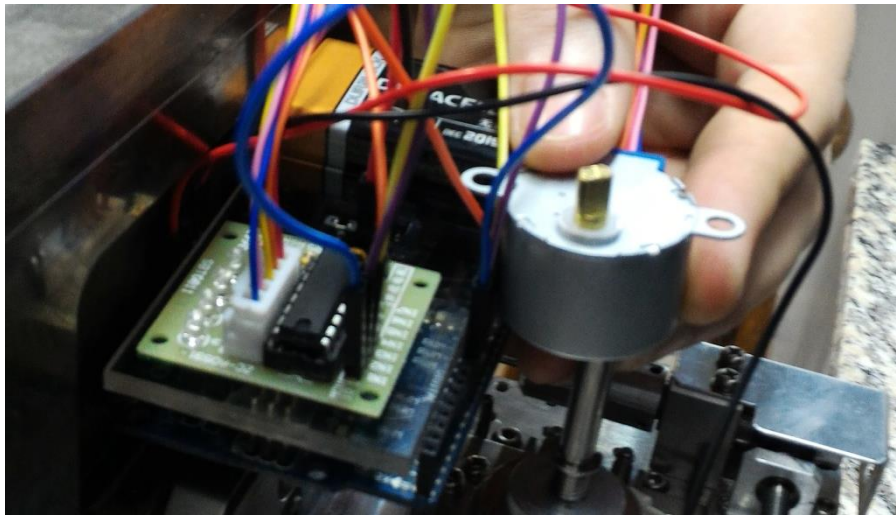
3.2 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO DE ROTAÇÃO

Ao compreender o método necessário para aquisição de imagens em MEV, percebeu-se uma dificuldade atribuída à operação manual. O ciclo de desativar o vácuo da câmara, abrir a gaveta, posicionar a amostra, fechar a gaveta e ativar o vácuo novamente, para só então fazer uma aquisição, torna o processo muito lento. Nesse sentido, foi necessário desenvolver um dispositivo capaz de rotacionar automaticamente a amostra no interior da câmara de vácuo do MEV.

No primeiro momento, pensou-se em um dispositivo eletrônico (Figura 13), composto por um motor de passo controlado por Arduino. Um protótipo chegou a ser desenvolvido, porém, não foi possível garantir uma blindagem eletromagnética adequada. Equipamentos que geram campos eletromagnéticos no interior da câmara de vácuo podem

interferir na aquisição das imagens, mas, além disso, segundo o fabricante, também há o risco de desalinhar o conjunto de bobinas do MEV. Assim, optou-se por desenvolver um dispositivo totalmente mecânico.

Figura 13. Foto do dispositivo eletrônico no suporte do MEV



Fonte: Autor

O mecanismo proposto foi baseado em sistemas de relógios à corda. Inicialmente, foi utilizado um relógio de pulso com a amostra posicionada sobre o ponteiro dos segundos (segundeiro). O relógio precisa estar inclinado sobre a plataforma para simular a angulação necessária para a aquisição, a Figura 14 mostra o experimento realizado.

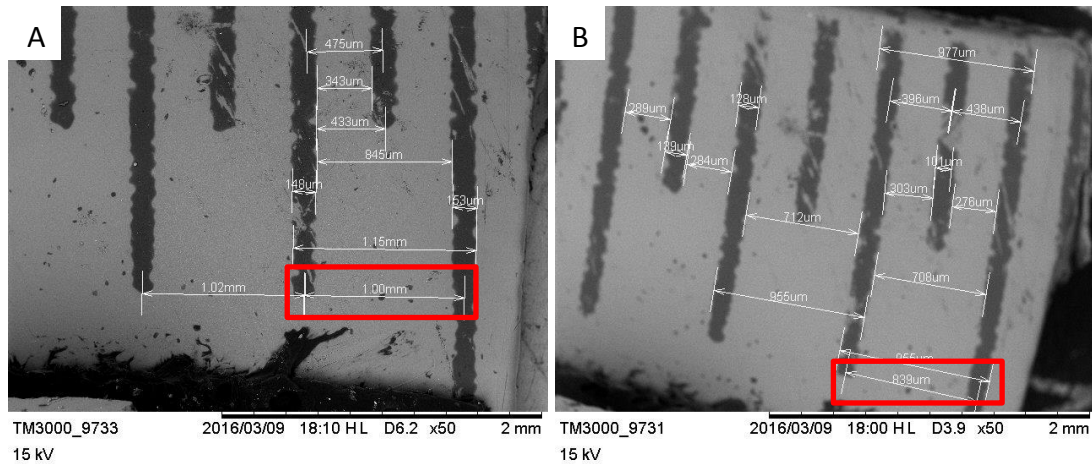
Figura 14. Foto do relógio de pulso no suporte do MEV



Fonte: Autor

Ao analisar as imagens, foi detectado um arrastamento que compromete o processamento por Fotogrametria, pois a amostra estava em movimento durante a aquisição. A Figura 15 apresenta a comparação da imagem obtida de uma régua estática com a imagem obtida da mesma régua sobre o ponteiro em movimento.

Figura 15. Comparativo entre varredura estática (A) e varredura em movimento



A – Varredura estática no MEV sem movimentação do relógio. B – Varredura em movimento no MEV com o relógio em movimento. Foi detectado erros em escala micrométrica (entre 160 a 170 μm) que comprometem a aquisição e o conceito da técnica de Fotogrametria. Fonte: Autor

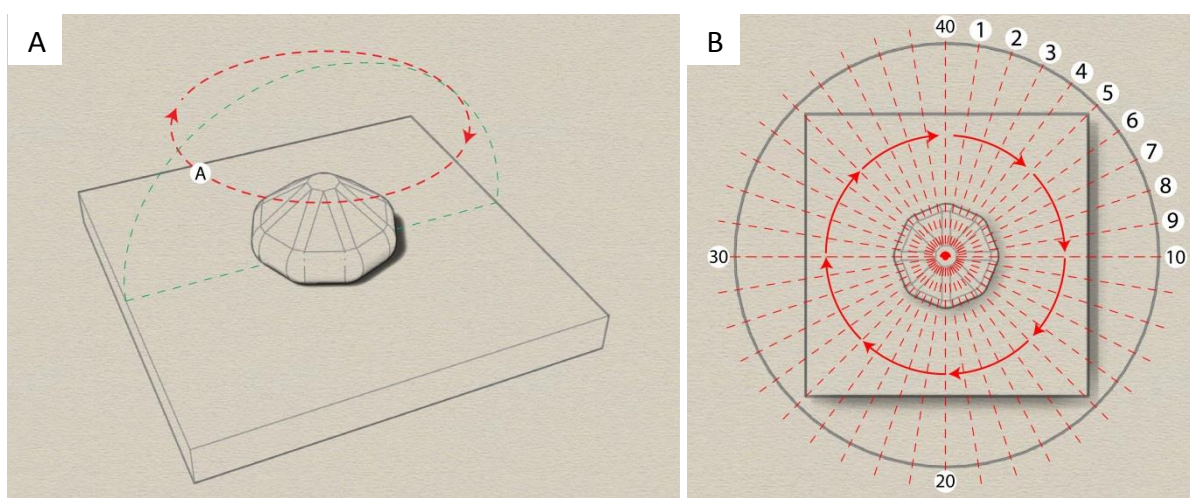
Com base no experimento realizado, foram propostos ajustes para desenvolver um mecanismo que pudesse ser adaptado no eixo do ponteiro dos segundos de relógios mecânicos. Assim, foi escolhido um relógio à corda, marca Herweg® (REF 2245), para ser o motor do dispositivo. Delimitou-se que o sistema mecânico a ser projetado deveria fornecer uma rotação completa (360°) em passos de 9°, com um tempo de parada de aproximadamente 32 segundos a cada passo (média de tempo necessário para fazer uma aquisição padrão no MEV utilizado nessa pesquisa). Ainda, o eixo de rotação deveria possuir uma inclinação de 60° para a fixação da amostra.

3.3 AQUISIÇÃO NO MEV E GERAÇÃO DE MODELOS 3D

O método de aquisição de dados por Fotogrametria em MEV utilizado por Eulitz e Reiss (2015) foi realizado com 40 imagens obtidas em passos de 9° (um giro de 360°) no entorno de uma amostra, fixada em uma plataforma com 20° de inclinação. Segundo os

autores, com um passo curto, a sobreposição das imagens é eficiente, reduzindo erros de diferença de profundidade. Destaca-se que os ensaios preliminares indicaram ser possível gerar um modelo 3D com menos fotografias. O método proposto pelos autores em questão foi modificado de forma que simulando o deslocamento da câmera foi adotada uma angulação base de 60° (Figura 16-A) e os ensaios foram realizados em uma rotação de 360° , sequenciado em aquisições individuais a cada 9° (Figura 16-B), totalizando 40 aquisições.

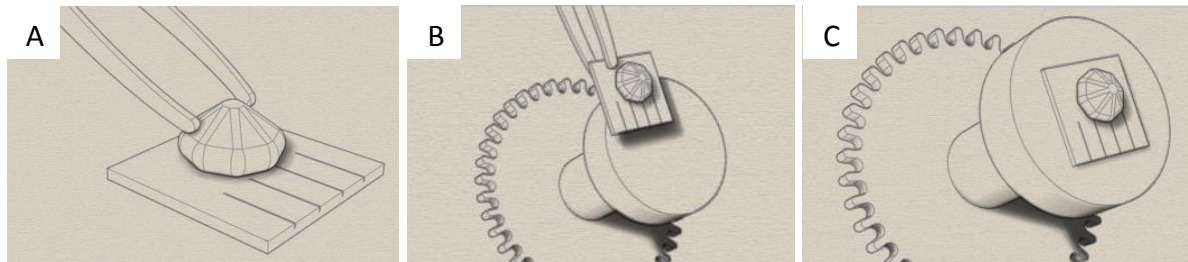
Figura 16. Método proposto para a aquisição de dados



A Figura 16 A. Mostra à inclinação utilizada na sequência de fotos. A linha pontilhada em vermelha (A) indica a inclinação de 60° . A Figura 16 B mostra o número de aquisições 40 fotografias em incrementos de 9° . Fonte: Autor

A Figura 17 mostra a preparação da amostra. Como a amostra é pequena, deve ser manuseada cuidadosamente. Em (A) é mostrado o manuseio da amostra de quartzo, que deve ser fixada em uma escala milimétrica (no caso, utilizou-se uma parte de uma régua). Em (B) a amostra e a escala são fixadas no porta amostra, como ilustra a imagem (C). Para iniciar o procedimento no MEV, o disposto foi inserido na gaveta do equipamento, acionado o vácuo e inicializados os procedimentos no software para adquirir a imagem. Conforme planejado, o dispositivo se movimenta a cada 9° por minuto, permitindo durante 36s de parada a aquisição da imagem. Esse procedimento é repetido durante 40 minutos, até concluir um ciclo de rotação. Para digitalizar um novo lado do modelo, é necessário desativar o vácuo, repetir o processo de manuseio da amostra e reiniciar o procedimento de aquisição. Isto pode ser realizado quantas vezes forem necessárias para fechar o volume do modelo, para essa amostra, foram feitas 4 digitalizações e padronizadas como: Lado 1, Lado 2, Lado 3 e Lado 4.

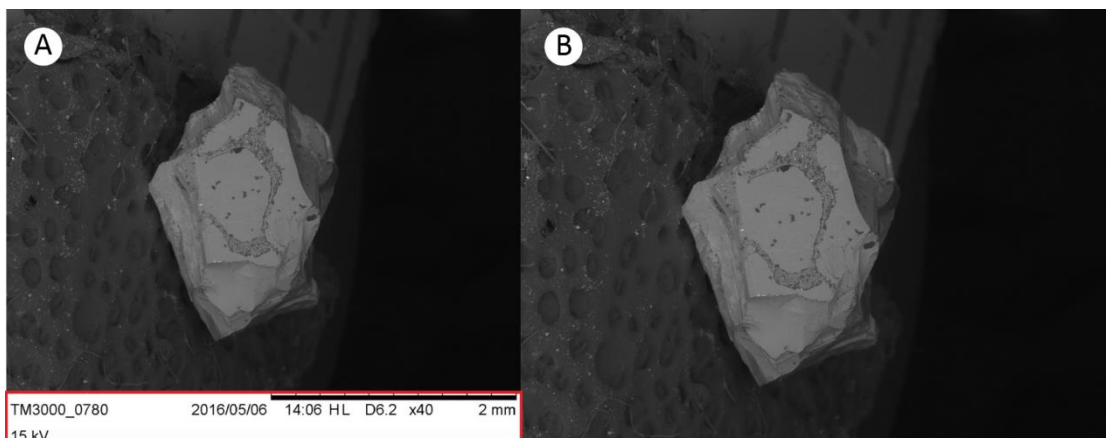
Figura 17. Preparação da amostra



Fonte: Autor

As 40 aquisições obtidas no MEV foram enviadas para um software gráfico (Adobe Photoshop®), para um tratamento nas imagens, de forma que a escala e dados informativos foram recortadas do modelo (Figura 18). Essa etapa é fundamental e pode ser realizada em qualquer software de edição de imagens, porém, deve ser observado um corte idêntico em todas as imagens. Nesse caso, orienta-se o uso de ferramentas que permitam executar ações repetitivas, como, por exemplo, o comando *Action* do Adobe Photoshop®. Dessa forma, o corte da primeira imagem foi repetido nas mesmas condições para as 39 aquisições seguintes, garantindo o tamanho de pixels idêntico por foto. Caso o recorte das imagens não seja executado, o software de Fotogrametria não reconhece automaticamente as imagens e apresenta erro, isso devido aos dados informativos não representarem a imagem.

Figura 18. Recorte das barras informativas após aquisições em MEV.



(A) área a ser eliminada destacada em um retângulo vermelho. Em (B) o resultado da imagem sem a barra de informações.

Fonte: Autor

Removida a barra informativa de cada imagem, foi feito o upload dessa sequência de arquivos para o *123D Catch da Autodesk*. O software identifica pontos em comum e

sobreposições imagens a fim de construir um modelo 3D. Esse procedimento é repetido para todas as aquisições. Diferente dos ensaios preliminares, a sequência obtida foi alinhada automaticamente pelo software, não sendo necessário ajuste manual.

Obtido o modelo com 40 fotografias, foi feito um novo processamento no software 123D Catch®, gerando um modelo com 20 fotografias e outro modelo com 13 fotografias, correspondente a 18° e 27°. Também foram ensaiadas com 10 e 8 fotografias (36° e 45°). Dada a diferença geométrica entre as amostras a serem ensaiadas, busca-se definir um valor ótimo de imagens para cada caso. Nesse sentido, utilizando as mesmas aquisições, são várias as combinações possíveis a serem testadas, conforme a Figura 19.

Figura 19. Aquisições em inclinação de 60° no MEV e sequenciamento de passos.



Passos de: (A) 9°, (B) 18°, (C) 27°, (D) 36° e (E) 45°. Fonte: Autor

3.4 OBTENÇÃO DE MODELO 3D POR MICROTOMOGRAFIA

Para validar o processo de aquisição de modelos 3D a partir do MEV, a microCT foi definida como referência por um ser uma técnica consagrada na obtenção de modelos tridimensionais micrométricos.

A primeira aquisição dos modelos 3D por microCT foi executada no equipamento Shimadzu Inspecio SMX-90CT, disponível no Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul (CTPedras) em Soledade – RS. O software inspeXio, que acompanha o equipamento, permite adquirir imagens em dois tamanhos de saída, 512x512 pixels ou 1024x1024 pixels. Visou-se nos primeiros ensaios uma aquisição mais rápida, optou-se pela resolução de 512x512 pixels. Os parâmetros do equipamento foram definidos em: *Number of views* = 3600, *Average* = 4, *Scan count* = 1, *Scaling coefficient* = 100 e *Slice width* = 1. Para

a tensão foi ajustado o valor de 90kV e para a corrente de 100 μ A, como observa-se na Figura 20. A microtomografia realizada nessa amostra de quartzo utilizou alguns dos parâmetros sugeridos por Machado et al. (2014); Jussiani et al. (2014); Agbogun et al. (2012).

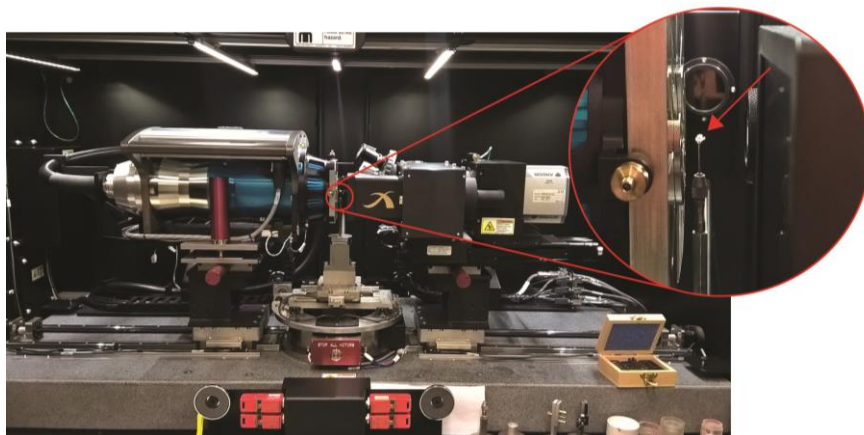
Figura 20. Parâmetros utilizados para a aquisição da microCT



Tela do software do microtomógrafo. Nessa tela é possível ajustar os parâmetros para a aquisição de dados. Como tensão, corrente, posicionamento da amostra, número de fatias entre outros. A seta indica o número de fatias. Fonte: Autor

Mesmo ajustando os parâmetros no limite do equipamento, a máxima resolução possível, para a amostra em questão, foi na ordem de 20 μ m, obtendo 52 fatias. Devido à resolução do equipamento bem como ao tamanho e à geometria complexa da peça, foi necessária uma aquisição de dados em outro equipamento com maior capacidade de resolução, criando um maior número de camadas. Nesse sentido, em parceria com a PUC-Rio, por meio do laboratório NEXT (Núcleo de Experimentação Tridimensional), foi realizada a microtomografia com o equipamento ZEISS Xradia 510 Versa (Figura 21).

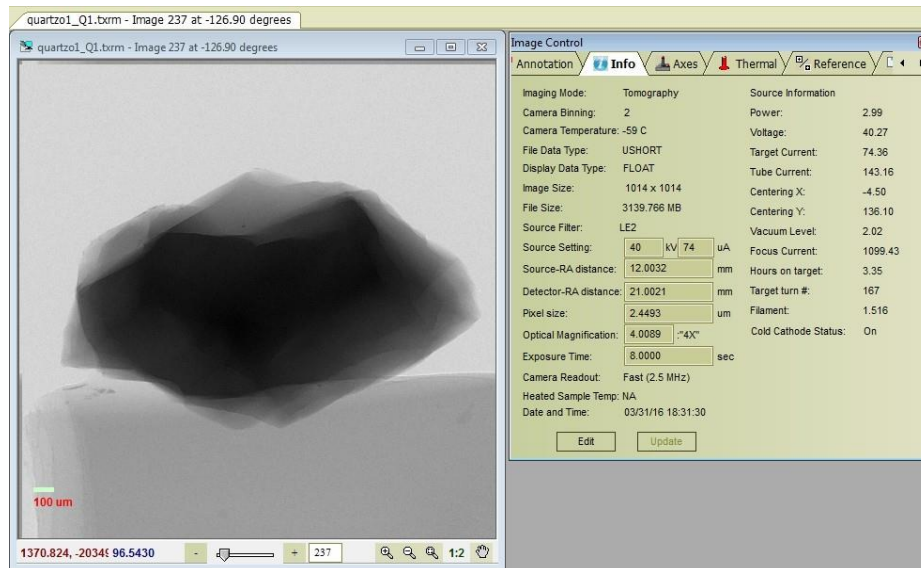
Figura 21. Equipamento ZEISS Xradia 510 Versa



A ampliação em um círculo vermelho mostra a posição da amostra. A seta indica a amostra. Fonte: Autor

Os parâmetros de aquisição definidos para o quartzo foram de tensão de 40kV e corrente de 74 μ A. Com o uso de uma lente para aumento de 4x, foi possível atingir uma resolução de aproximadamente 2,45 μ m. O tempo foi estimado em cerca de 3 horas e meia de aquisição, obtendo 996 fatias de 992x1014 pixels cada, conforme Figura 22.

Figura 22. Parâmetros de aquisição de dados da microtomografia no equipamento X-Radia 510 Versa.



Fonte: Laboratório de experimentação visual (NEXT)

O modelo de microtomografia foi reconstruído a partir de uma sequência de imagens no formato TIFF, no 3D SLICER® que é um software gratuito de análise e visualização de imagens médicas. Ele suporta múltiplas modalidades de arquivos como, por exemplo, CT, μ CT, microscopia, ressonância (MRI) e pode ser abastecido por plug-ins. Os recursos presentes no software permitiram gerar um modelo de visualização 3D da amostra analisada e a partir disso reconstruir uma malha triangular.

3.5 OBTENÇÃO DE MODELO 3D POR DIGITALIZAÇÃO A LASER

Para auxiliar o procedimento de verificação das dimensões obtidas nas malhas 3D, realizou-se também uma digitalização a laser. O procedimento de digitalização da amostra foi feito no LdSM com o equipamento Digimill 3D da empresa TECNODRILL®. Os parâmetros para a digitalização foram pré-definidos conforme Silva (2011): lente de 25mm, com uma precisão em Z de 0,003 mm; e resolução entre pontos e entre linhas de 0,002 mm. Para

evitar problemas de reflexão e refração, à amostra foi metalizada com uma camada nanométrica de ouro. O processo demandou aproximadamente 4 horas de digitalização.

3.6 INSPEÇÃO DIGITAL

Nessa etapa, para o ajuste das malhas foi utilizado o software Geomagic Studio® e para alinhamento e inspeção o Geomagic Qualify®. No primeiro, o tamanho do modelo 3D gerado pela Fotogrametria foi ajustado, manualmente, por meio da escala (régua) presente nas aquisições.

Ajustadas as proporções de escala, as malhas foram inseridas no Geomagic Qualify®, para alinhar o modelo a ser testado (Lados 1, 2, 3 e 4) em relação à referência (microCT). Para tanto, foi utilizado o comando *best fit alignment* com o tamanho máximo de amostra permitido, de 100.000 pontos. Alinhados os dados, cada malha teste foi analisada com a referência, por meio do comando *3D compare*, o qual calcula as discrepâncias existentes entre os modelos e gera um espectro de cores. A principal característica do software ao sobrepor as malhas é inspecionar e comparar com precisão diferenças existentes entre os modelos digitais (POHLMANN, 2012). Dessa forma, as malhas geradas pelos processos de microCT e MEV foram comparadas e analisadas em forma de gráfico, visando determinar o modelo obtido por Fotogrametria com a maior precisão. Ainda, o software gera dados estatísticos, como média e desvio-padrão, que foram tabelados para auxiliar na análise do processo.

4. RESULTADOS

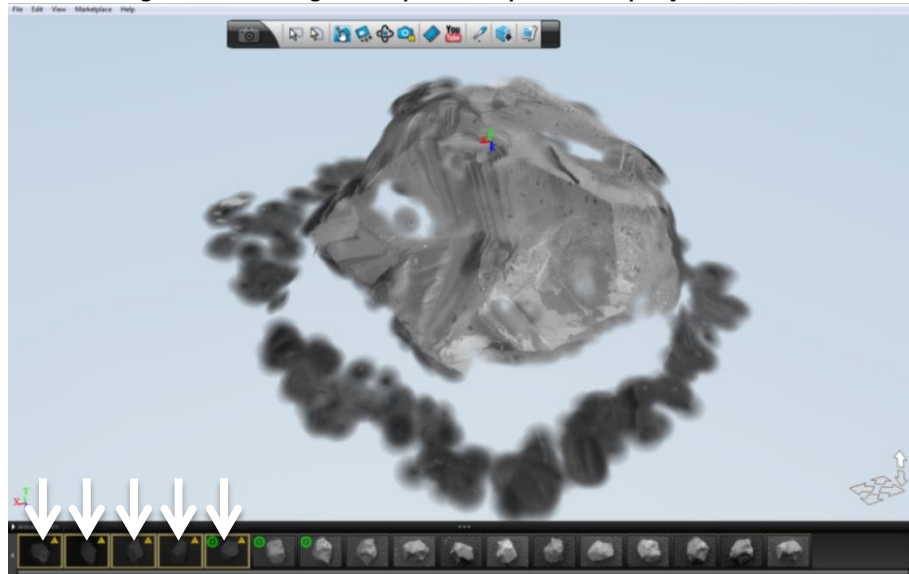
Os resultados permitiram analisar a relação da qualidade de malhas obtidas por Fotogrametria em MEV em relação à malha obtida por microtomografia, indicando a melhor e mais eficiente quantidade de imagens para a reconstrução do modelo 3D. Ainda, os resultados permitiram avaliar e validar o processo de Fotogrametria em MEV. Os resultados são apresentados em etapas conforme previsto na metodologia em: Ensaios preliminares; Desenvolvimento do dispositivo; Aquisições em MEV; Aquisições por microCT; Digitalização a laser; e Inspeção digital.

4.1 ENSAIOS PRELIMINARES

Devido aos experimentos realizados previamente foi possível detectar a viabilidade da proposta e o método de Fotogrametria foi adaptado ao equipamento de MEV, inicialmente, o processo foi feito mesmo sem a utilização de um dispositivo adequado que proporcionasse maior controle do manuseio da amostra em relação à plataforma. O tempo necessário somente de configurações, para cada amostra, foi de aproximadamente 8 minutos, sendo cerca de 5 minutos para abertura e fechamento da câmara de vácuo, 3 minutos para ajustes da amostra na plataforma e 1 minuto para operações no software do MEV. Após a configuração, o tempo efetivo de aquisição e salvamento de cada arquivo foi de 32 segundos. Assim, o tempo total para um ciclo completo de aquisição em uma das faces do fragmento de quartzo, para adquirir as 17 imagens (8 imagens x 2 inclinações + 1 imagem de topo) foi de aproximadamente 2 horas e meia.

A partir do MEV disponível no LdSM, foram obtidas 17 imagens de cada face do quartzo e, então, foi gerada uma malha poligonal no software 123D Catch®. A sequência de imagens e a respectiva malha podem ser visualizadas no Apêndice A. Geralmente o software identifica automaticamente os pontos homólogos entre as imagens, porém no decorrer do processo algumas imagens não foram orientadas pelo algoritmo (Figura 23).

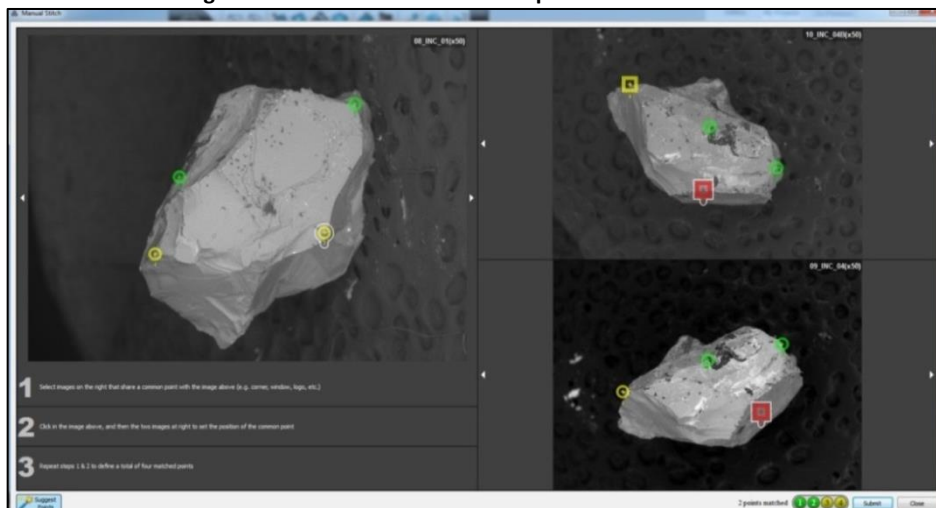
Figura 23. Modelo gerado a partir do upload das aquisições em MEV



Modelo 3D da primeira etapa de aquisição dos dados com 17 imagens. As setas indicam imagens não alinhadas. Fonte: Autor

Devido à falta de referência entre as imagens, foi necessário interferir manualmente conforme se observa na Figura 24. Dessa forma, no software 123D Catch®, 4 pontos em comum devem ser identificados em pelo menos 3 fotos. Os pontos em verde indicam o referenciamento considerado adequado pelo software, o qual grifa em amarelo os pontos considerados de baixa qualidade e em vermelho os pontos considerados não adequados. No processo de ajuste manual, ao determinar-se 2 pontos (verdes) comuns a duas fotos, será gerado automaticamente um quadrado amarelo com uma sugestão aproximada do posicionamento do ponto na terceira foto, sendo necessário realizar um ajuste fino para que o ponto seja considerado referenciado. Após todos os pontos serem referenciados, enviam-se novamente os dados para o servidor reprocessar a malha 3D.

Figura 24. Alinhamento manual de pontos no 123D Catch®

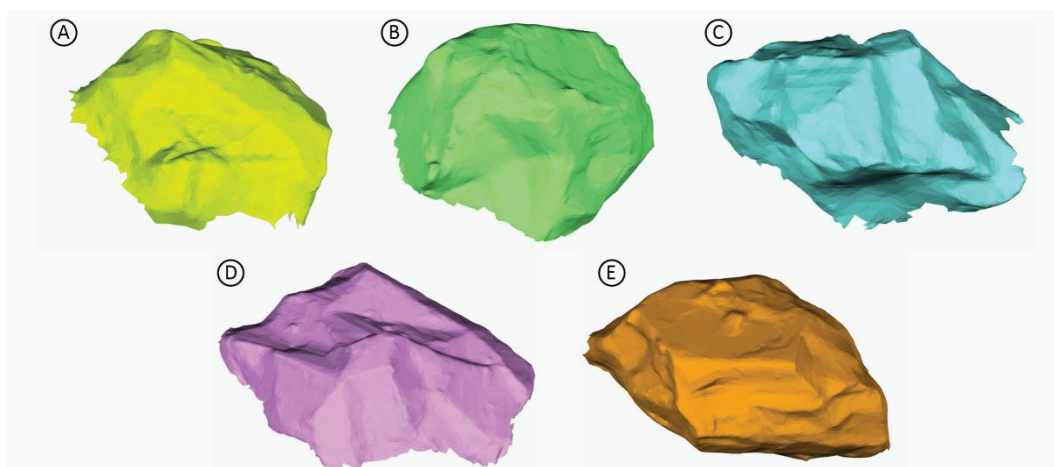


Fonte: Autor

Ao término do alinhamento e com o modelo 3D reconstruído, é possível exportar a malha tridimensional em formato OBJ. Para a obtenção de um modelo 3D sólido, ou seja, com todas as vistas da amostra, o procedimento foi repetido mais quatro vezes em outras faces da amostra (conforme sequência proposta nos métodos, Figuras 8, 9 e 10).

Com todos os modelos gerados pelo 123D Catch®, as malhas foram importadas para o software Geomagic Studio® de forma que as correções e alinhamentos foram ajustados, porém ao encaminhar esses modelos para o software observou-se a falta de coerência entre as escalas dos modelos. A técnica de Fotogrametria necessita para escalar os modelos precisamente, alguma referência de tamanho conhecido nas fotos. Dessa forma nos ensaios seguintes foi necessário adaptar uma escala na aquisição dos dados, para, posteriormente, escalar o modelo 3D resultante. As malhas geradas para cada uma das cinco faces da amostra podem ser visualizadas na Figura 25.

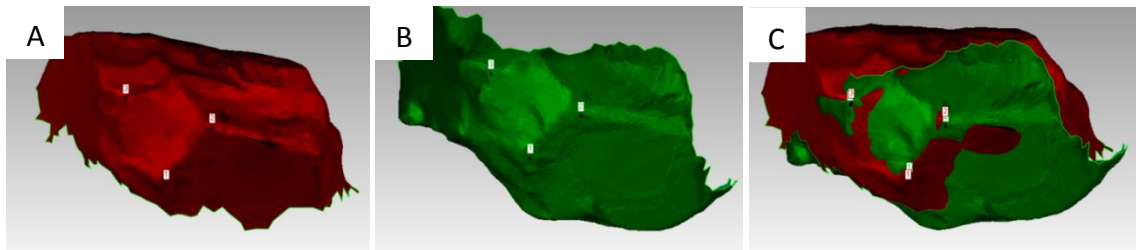
Figura 25. Modelos 3D gerados a partir da Fotogrametria em MEV



Aquisições obtidas em MEV das faces do modelo analisado, bem como a reconstrução das imagens em um modelo 3D (A - E) gerada pelo software 123D Catch®. Fonte: Autor

Finalizadas as 5 digitalizações por Fotogrametria, as malhas obtidas podem ser manipuladas e analisadas em softwares de modelagem 3D. Nesse caso, elas foram importadas para o Geomagic Studio®. Foram removidas as bordas de cada malha, correspondentes à plataforma de fixação, e foram corrigidas pequenas imperfeições, como furos e intersecção de triângulos. Posteriormente, elas foram alinhadas partindo de 3 pontos em comum e utilizando o algoritmo de registro manual do software que realizou um cálculo utilizando todos os vértices da malha (Figura 26).

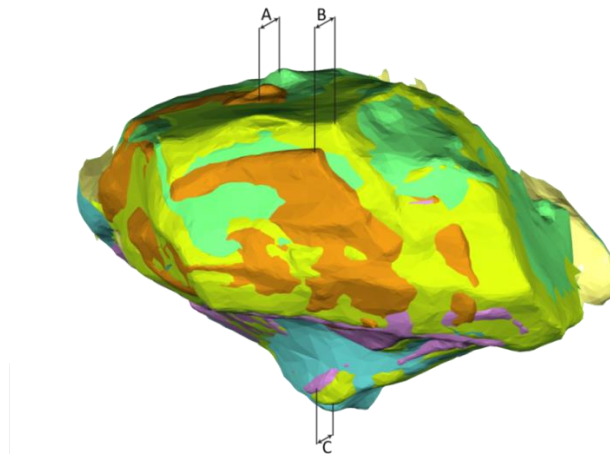
Figura 26. Registro manual de 2 malhas no Geomagic



As Figuras A e B indicam os 3 pontos em comum utilizados para o alinhamento das duas malhas. A Figura C corresponde ao resultado do alinhamento manual para o posterior cálculo no software Geomagic Studio®. Fonte: Autor

Após o registro manual de cada malha, foi utilizado o algoritmo de registro global do software, o qual realiza iterações com amostragem de até 50.000 pontos, movendo simultaneamente todas as malhas para obter o melhor ajuste. O resultado preliminar não foi considerado satisfatório, conforme observa-se na Figura 27. A imprecisão no registro das malhas é atribuída a erros de escala entre elas.

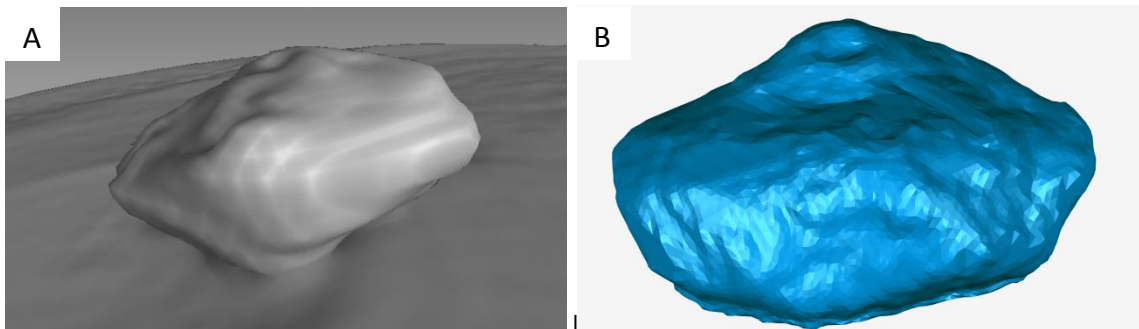
Figura 27. Registro global das 5 malhas no software Geomagic Studio®



Cada cor corresponde à malha de uma das faces da amostra e as distâncias A, B e C apontam erros geométricos. Fonte: Autor

Assim, como foi gerado preliminarmente um modelo 3D a partir do MEV, também foi obtido um modelo via microtomografia. No primeiro ensaio realizado, no Shimadzu Inspecio SMX-90CT, as fatias ficaram demasiadamente espaçadas e o software do microtomógrafo fez uma grande suavização da malha, conforme observa-se na Figura 28. Mesmo com ajustes nos parâmetros do equipamento, a máxima resolução obtida foi de $20\mu\text{m}$, com a qual não foi possível reconstruir um modelo de qualidade, resultando em muitas suavizações que distorceram a geometria do modelo.

Figura 28. Ensaio 1 realizado via microtomografia no CTPEDRAS



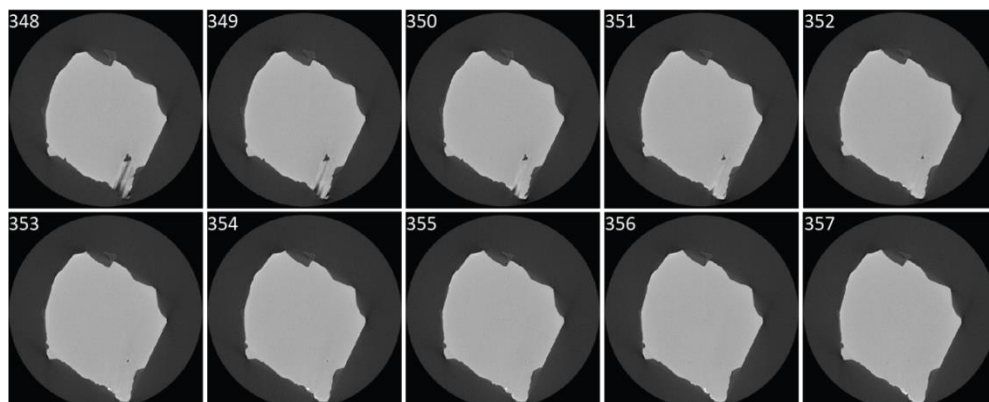
(A) Reconstrução do modelo no microtomógrafo. (B) Modelo 3D digital no Geomagic Studio®. Fonte: Autor.

Assim, além da importância para a sistematização dos procedimentos no MEV, os ensaios preliminares também foram fundamentais para a definição do modelo de referência a ser obtido via microCT. Neste sentido, foi necessário buscar um equipamento de microtomografia com resolução maior.

4.2 OBTENÇÃO DE MODELO 3D POR MICROTOMOGRAFIA

Para o modelo da microCT poder ser utilizado como referência, optou-se por realizar o ensaio na PUC-Rio, com o equipamento ZEISS Xradia 510 Versa. Para tanto, a amostra foi posicionada à 12 mm do emissor de raios-X, a 21 mm do detector e com a lente de magnificação óptica de 4X. Nessas configurações, a resolução da camada foi de aproximadamente 2,4 μm . Foram obtidas 996 fatias, em formato TIFF, com um tamanho de imagem de 992x1014pixels. A Figura 29 mostra uma sequência do fatiamento, no tempo de aquisição de aproximadamente 3 horas e meia.

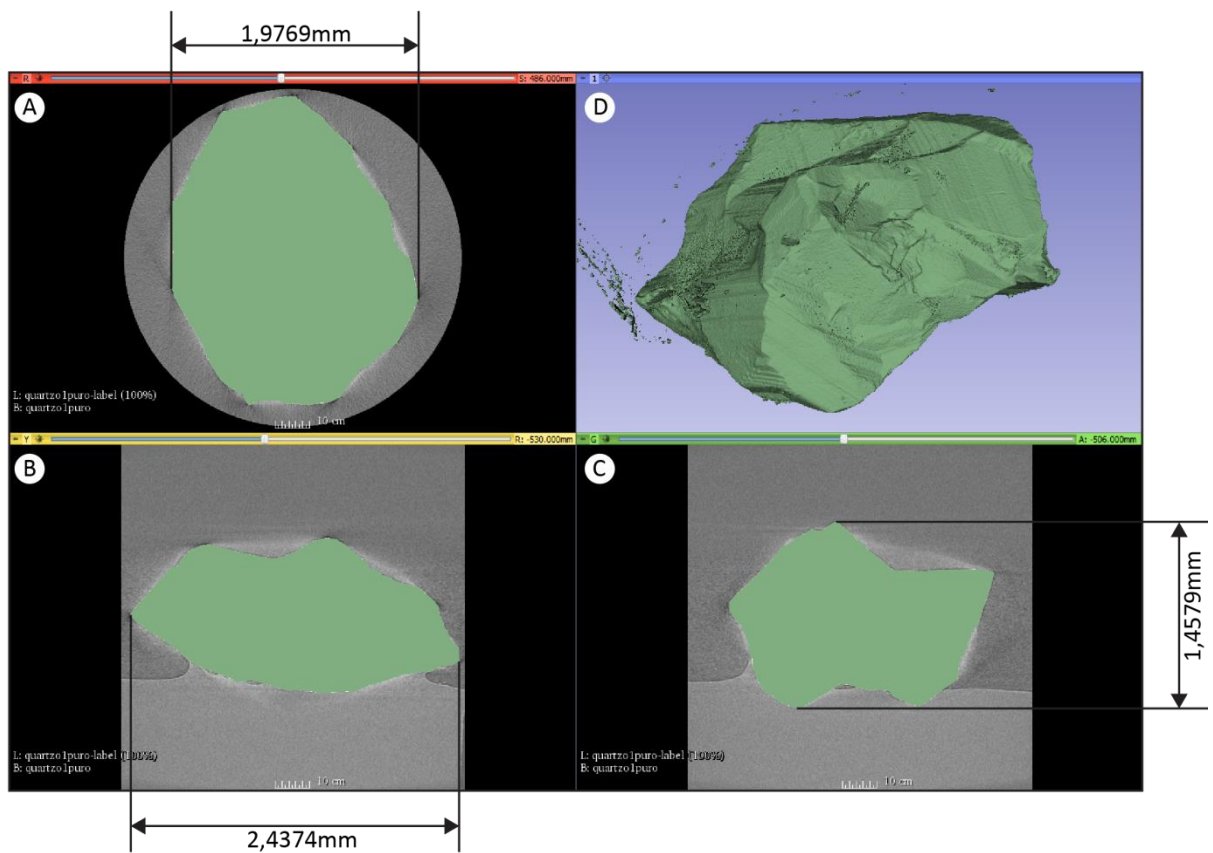
Figura 29. Imagens (fatias) ilustrativas da microCT



Os números correspondem à identificação das fatias de 348 a 357 do total de 996. Fonte: Autor

Com as imagens da microtomografia, foi gerado um modelo 3D no software 3D Slicer®. Ainda, foi possível determinar com precisão as dimensões da amostra utilizada nos ensaios: X = 1,977 mm, Y = 2,437 mm e Z = 1,458 mm (medidas utilizadas como referência). A Figura 30 ilustra as projeções axial, sagital e coronal, bem como uma visualização em perspectiva do modelo 3D obtido. O arquivo gerado foi uma malha com 4.149.242 triângulos, o qual foi salvo no formato STL.

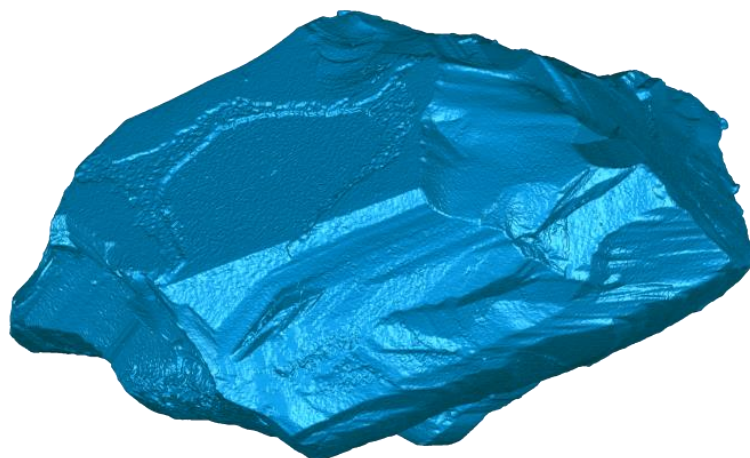
Figura 30. Software 3D Slicer® e arquivo microtomografado em um modelo 3D.



Projeções Axial (A), Sagital (B), Coronal (C) e Visualização 3D (D). Fonte: Autor

O arquivo STL foi importado no Geomagic Studio® para avaliação e correções na malha. Foi utilizado um filtro de ruído e foram excluídos alguns polígonos desconectados (como observa-se na Figura 30), bem como foram eliminadas intersecções de triângulos. Optou-se por não reduzir a malha, para não alterar ou suavizar o modelo 3D, visto que ele seria o padrão de referência para todas as análises comparativas. O resultado do modelo 3D da microtomografia é mostrado na Figura 31.

Figura 31. Resultado da Microtomografia realizada no equipamento XRadia 510 Versa após reconstrução da malha 3D.

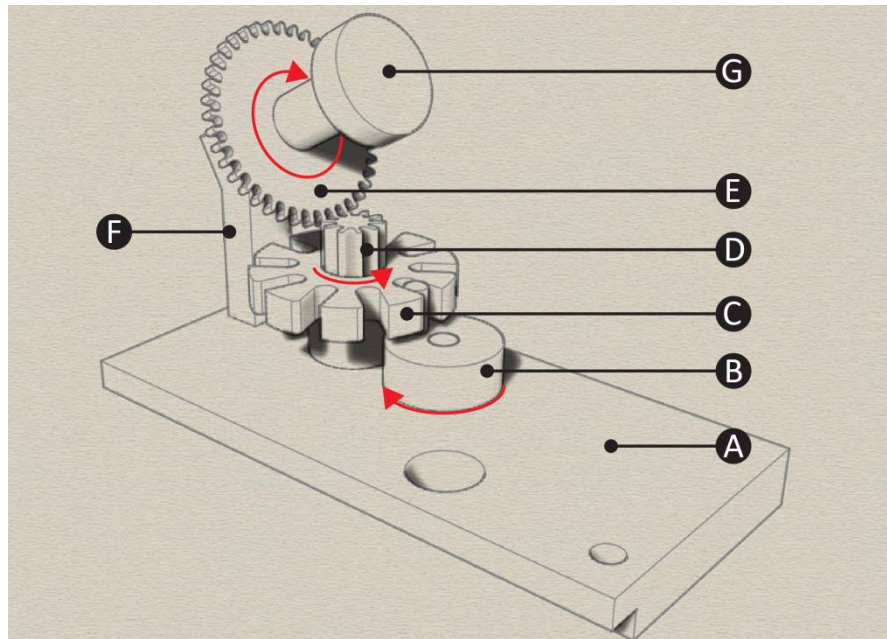


Fonte: Autor

4.3 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO DE ROTAÇÃO

Conforme descrito na metodologia, a partir dos ensaios preliminares supracitados, a melhor alternativa para o desenvolvimento do dispositivo foi um sistema mecânico que utiliza um relógio à corda como motor. O dispositivo projetado (Figura 32) é fixado em uma placa (A), que é fixa na base do relógio. O movimento é acionado pelo eixo do ponteiro dos segundos, que é acoplado em uma roda com eixo excêntrico (B). Para, a partir do movimento contínuo, fazer paradas com tempos constantes, foi recorrido a um sistema baseado no mecanismo da cruz de malta ou roda de Genebra, com 10 posições. A principal característica desse mecanismo é um eixo excêntrico (B) que gira continuamente (a uma rotação por minuto) e que, durante 1/10 do tempo de uma rotação (24 s), arrasta a roda de Genebra (C) fazendo-a girar 36° (1/10 de volta). Ao girar, a roda de Genebra transfere a movimentação a uma engrenagem de 10 dentes (D) que está acoplada em seu eixo. Essa engrenagem (D) direciona o movimento para uma engrenagem com 40 dentes (E), que está fixa em uma haste inclinada (F), com 60° . Dessa forma, devido à redução de 1:4, a engrenagem (E) gira a cada 9° , conforme especificado no detalhamento do projeto. No eixo da engrenagem (E) é instalado o porta amostra (G). Assim, durante o funcionamento do mecanismo, a cada minuto, o porta amostra gira 9° durante 24 segundos e permanece parado por 36 segundos para a aquisição da imagem.

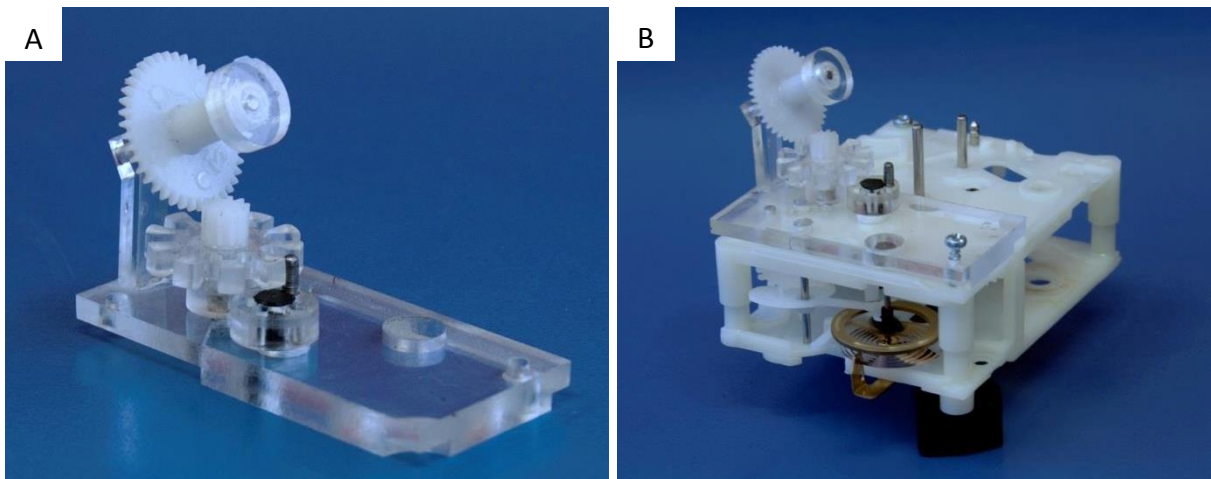
Figura 32. Esquema do dispositivo para o MEV



(A) Suporte para fixar amostra; (B) Engrenagem 40 dentes (giro de 9°); (C) engrenagem diâmetro externo de 5 mm e 10 dentes. (D) Cruz de malta. (E) Eixo excêntrico. (F) Base em acrílico. (G) Haste inclinada (60°) do suporte da amostra. Fonte: Autor

Para a construção do dispositivo, utilizou-se um conjunto de redução 1:4 padrão, composto pelas engrenagens de 10 (D) e 40 (E) dentes. As demais peças, a base (A), o eixo excêntrico (B), a roda de Genebra (C), a haste de inclinação (F) e o porta amostra (G), foram projetados em software CAD e usinados no material polimetil-metacrilato (acrílico), conforme mostra a Figura 33. Destaca-se que foi solicitado um pedido de proteção intelectual deste dispositivo.

Figura 33. Protótipo do Dispositivo



(A) Protótipo. (B) Protótipo encaixado no relógio. Fonte: Autor

O tempo estimado de configuração para o uso do dispositivo desenvolvido foi de cerca de 10 minutos, sendo aproximadamente 5 minutos para abertura e fechamento da câmara de vácuo, 2 minutos para posicionamento da amostra na plataforma, 2 minutos para alinhamento do dispositivo com o eixo central do MEV e 1 minuto para operações no software. O tempo de configuração e aquisição de cada imagem ficou em exatamente 1 minuto (uma volta completa do ponteiro dos segundos do relógio). Nesse 1 minuto, deve-se aguardar 24 segundos para o posicionamento da amostra e tem-se 36 segundos para a aquisição (tempo em que o sistema do relógio continua em movimento, mas o porta amostra fica parado). Cabe destacar que, de acordo com os ensaios preliminares, exige-se 32 segundos para fazer a aquisição no MEV e salvar o arquivo. Neste sentido, depois de configurado o dispositivo, demanda-se um tempo exato de 40 minutos para um giro completo da amostra, obtendo 40 imagens, uma a cada 9°. O processo ainda pode ser totalmente automatizado, utilizando softwares que realizam cliques de mouse automaticamente, como o "Free Mouse Auto Clicker", bem como escrevendo um script específico para tal fim.

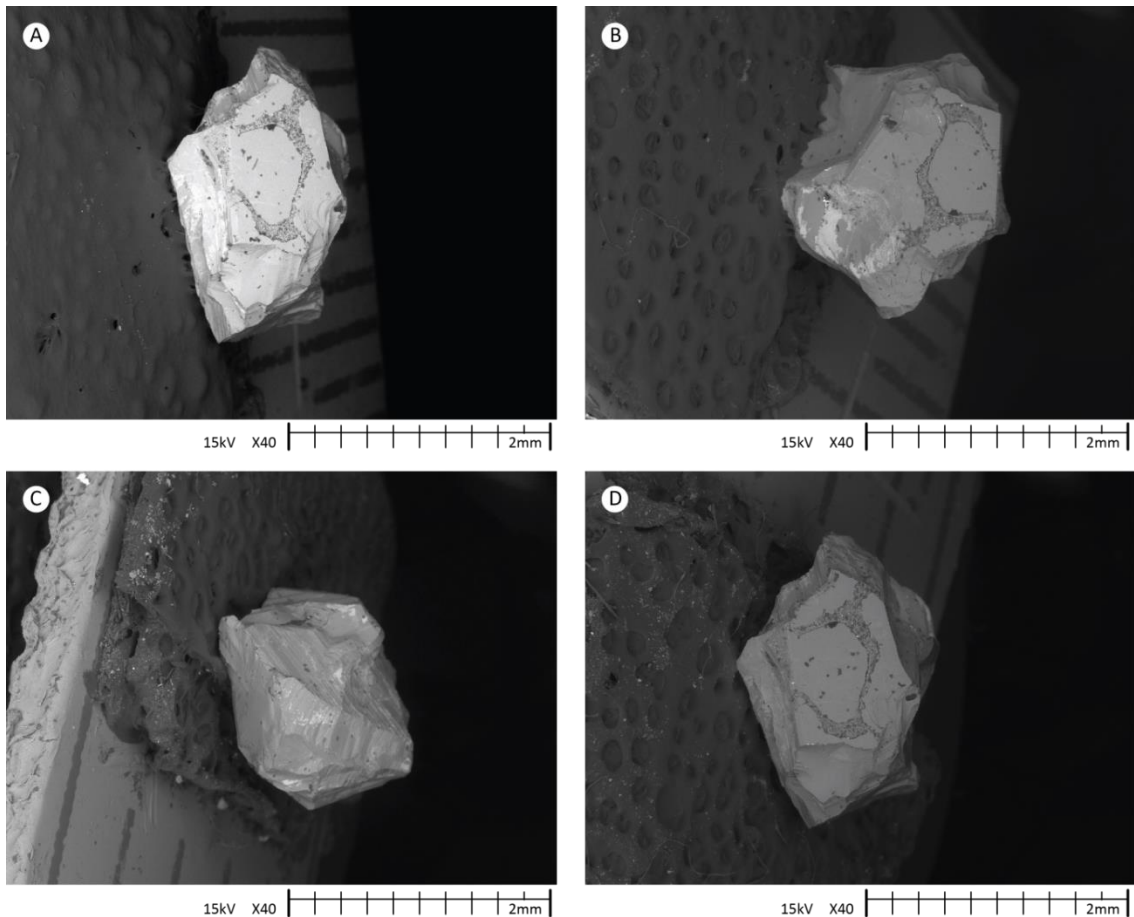
A título de comparação, nos ensaios preliminares foi possível obter 17 imagens em 2 horas e meia. Neste sentido, em relação ao processo manual, o dispositivo permite obter mais que o dobro de imagens em um tempo três vezes menor, ou seja, pode-se dizer que houve um ganho de seis vezes em eficiência. Além disso, elimina-se a dificuldade de manusear amostras muito pequenas e a necessidade de ficar abrindo e fechando a gaveta, bem como acionando e desacionando o vácuo, favorecendo a vida útil de componentes do MEV. Assim, o dispositivo projetado supre o objetivo específico, otimizando o processo de aquisição das imagens em MEV, visto que proporciona precisão e controle do giro e da inclinação da amostra, com redução significativa de tempo, viabilizando a obtenção de modelos 3D por Fotogrametria.

4.4 AQUISIÇÕES NO MEV E GERAÇÃO DE MODELOS 3D

Foram realizadas quatro sequências de aquisições no MEV, para a mesma amostra de quartzo, com auxílio do dispositivo projetado. Para tanto, a amostra foi posicionada em quatro orientações (lados) diferentes (Figura 34), buscando cobrir todo o seu volume. Nesse sentido, para cada sequência, foram feitas 40 aquisições, com variação de 9° entre elas, em

uma única inclinação (60°). As imagens obtidas foram enviadas ao software 123D Catch® para realizar a reconstrução dos modelos 3D. No Apêndice B, podem ser observadas, na íntegra, as sequências de imagens produzidas.

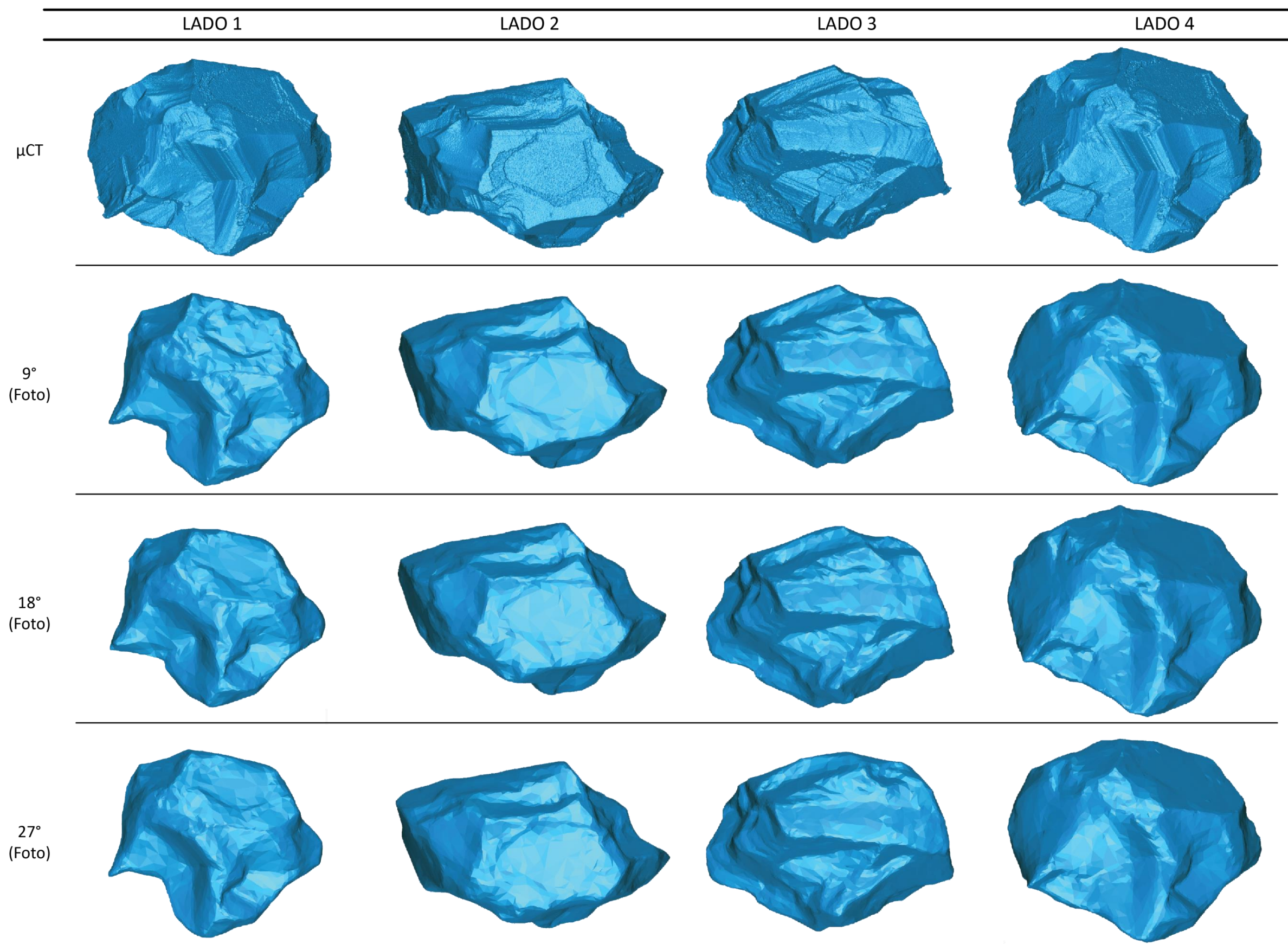
Figura 34. Aquisições em MEV



(A) Lado 1. (B) Lado 2. (C) Lado 3. (D) Lado 4. Fonte: Autor

Quatro modelos 3D resultaram do processo de Fotogrametria em MEV, um de cada orientação da amostra. A partir das mesmas imagens, conforme proposto na metodologia (Figura 19, página 42), novos modelos 3D foram obtidos ao reduzir o número de imagens para 20, 13, 10 e 8, ou seja, aumentar o ângulo entre elas para 18° , 27° , 36° e 45° .

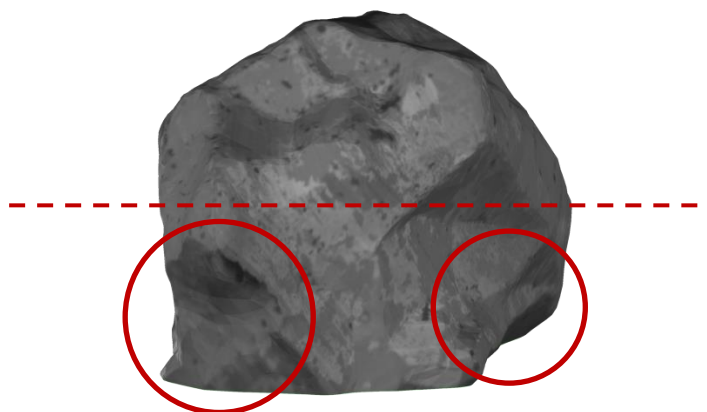
Para os ângulos de 18° e 27° , o software fez a identificação e a localização de pontos homólogos entre as imagens automaticamente. Assim, no total, foram geradas 12 malhas, quatro para cada ângulo (9° , 18° e 27°), as quais foram comparadas visualmente com o modelo de referência obtido por microCT (Figura 35).

Figura 35. Comparação das malhas obtidas por Fotogrametria e microtomografia (μ CT)

Ao processar as imagens equivalentes aos ângulos de 36° e 45°, o software não foi capaz de reconhecer pontos homólogos, forçando a utilização do processo de alinhamento manual. O processo manual foi pouco efetivo, devido ao baixo número de imagens para a complexidade do modelo. Conseqüentemente, houve grande distorção da geometria e as malhas reconstruídas nessas condições foram consideradas insatisfatórias e descartadas.

Ainda no 123D Catch®, foi possível visualizar imperfeições nos modelos obtidos, especialmente nas regiões em que há oclusões em algumas das vistas. Para a amostra em questão, tais regiões ocorreram próximo à base onde estava colada, ou seja, nas áreas obstruídas pela maior largura do modelo. Nessa situação, há um menor número de imagens que representam a área de oclusão e o software realiza interpolações que distorcem a malha (parece haver uma fusão da base do modelo com a plataforma). Um exemplo desse erro é destacado na Figura 36. Para minimizar os efeitos desses erros, as malhas foram cortadas acima da região de oclusão, visto que geralmente nas bordas da digitalização o erro é maior.

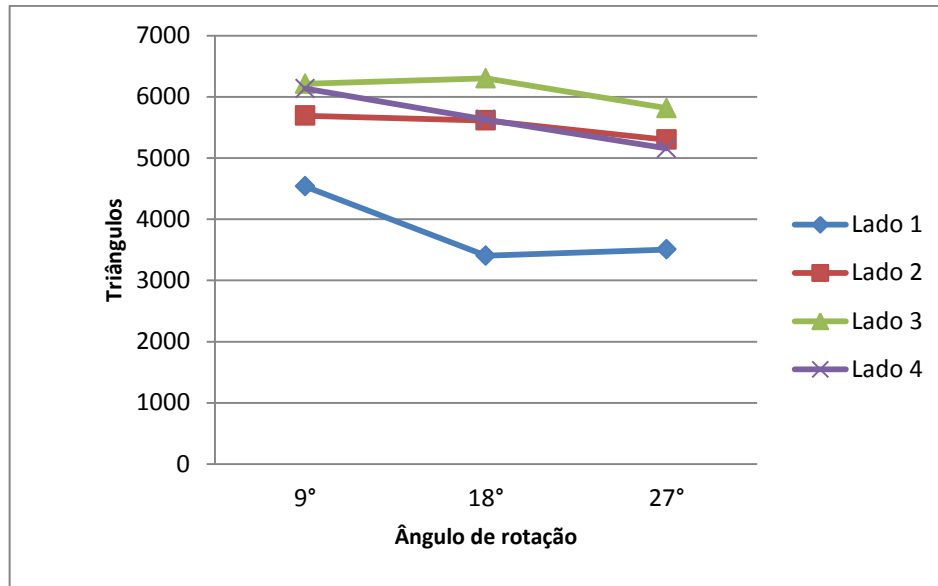
Figura 36. Modelo 3D com textura indicando falhas na reconstrução do modelo



Os círculos indicam áreas de oclusão na malha e a linha tracejada indica o plano usado para corte. Fonte: Autor

Os resultados de uma inspeção visual indicam que as quatro malhas reconstruídas com maior número de imagens (9°) são mais detalhadas (com arestas mais definidas) em relação às malhas geradas com menor número de imagens (18° e 27°). Isso se comprova ao analisar o número de polígonos gerado para cada malha. Os modelos adquiridos em passos de 9° apresentam um número de triângulos maior, quando comparados a seus respectivos modelos de 18° e 27°, conforme pode ser avaliado na Figura 37.

Figura 37. Avaliação do número de triângulos em cada malha

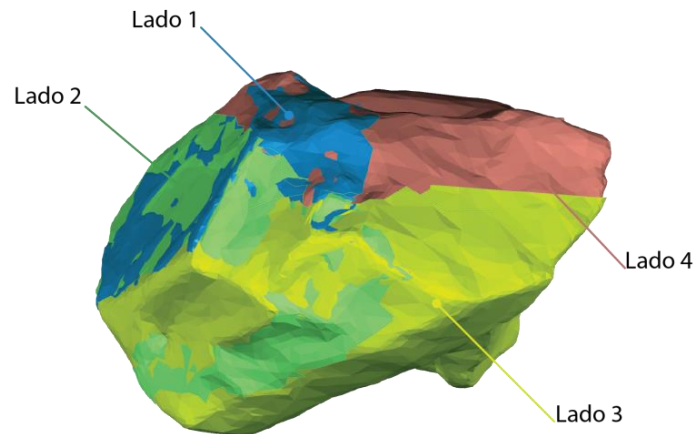


Fonte: Autor

Ainda na comparação dos dados obtidos pela análise do número de triângulos, observa-se que, embora haja uma tendência de redução de triângulos com o aumento do ângulo entre imagens, não há um comportamento definido. Por exemplo, nos Lados 2 e 3 (entre 9 e 18°) e no Lado 1 (entre 18 e 27°) não houve variação expressiva do número de triângulos.

Após a avaliação individual das malhas, decidiu-se fundir os conjuntos de quatro lados e gerar uma malha fechada para cada uma das três angulações estudadas (9, 18 e 27°). Nesse sentido, fez um registro manual de cada malha do conjunto e, posteriormente, foi utilizado o algoritmo de registro global do software Geomagic Studio®. Para tanto, utilizou-se o tamanho máximo de amostragem (de até 50.000 pontos), permitindo mover simultaneamente as quatro malhas na busca do melhor ajuste entre elas. O alinhamento resultante desse processo foi considerado satisfatório, conforme pode se observar na Figura 38. Para efeito de visualização, ocultou-se a textura das malhas e foi aplicada uma cor sólida diferente a cada uma delas. Cabe destacar que a imprecisão de escala, que existia nos ensaios preliminares, foi corrigida por meio do uso de uma régua na base de fixação da amostra no dispositivo.

Figura 38. Alinhamento, no Geomagic Studio®, das malhas dos quatro lados obtidas por Fotogrametria.

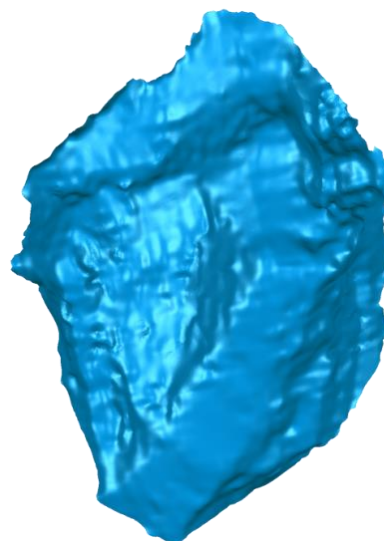


Fonte: Autor

4.5 OBTENÇÃO DE MODELO 3D POR DIGITALIZAÇÃO A LASER

Com o intuito de confirmar as medidas dos modelos obtidos, foi utilizado mais um processo consagrado como referência. Nesse sentido, realizou-se a digitalização 3D a laser de uma face aleatória da amostra de quartzo, com o scanner Digimill 3D, conforme descrito na metodologia. Assim, foi obtida uma nuvem de pontos, a qual foi processada no Geomagic Studio®. No software, foram feitas correções na nuvem (filtro de ruído) e gerada uma malha com 541.621 triângulos, conforme observado na Figura 39.

Figura 39. Malha triangular obtida por digitalização a laser no equipamento Digimill 3D



Fonte: Autor

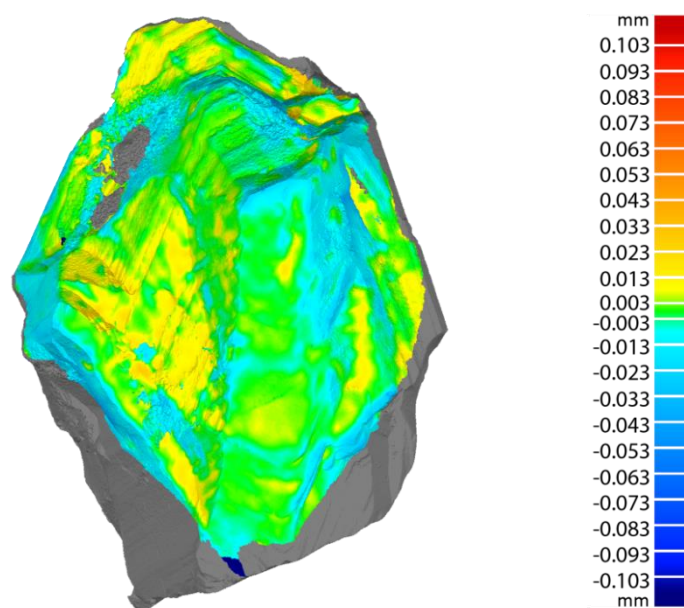
4.6 INSPEÇÃO DIGITAL

Obtidas as malhas pelos diferentes processos de digitalização 3D, foram feitas análises de inspeção digital, de forma a avaliar o dimensionamento de cada uma delas em relação às medidas do modelo de referência. As análises foram realizadas no software Geomagic Qualify®, sendo a microtomografia utilizada como o modelo referência para todas elas. Nesse sentido, cada malha foi sobreposta com o modelo da microtomografia e, assim, realizadas análises de diferenças entre os modelos.

As análises de comparação 3D apresentam os resultados em um espectro de cores, que pode variar positivamente (áreas do modelo maiores que a referência, na cor vermelha) ou negativamente (áreas do modelo menores que a referência, na cor azul). A região central da escala indica uma faixa de tolerância (áreas do modelo consideradas iguais à referência, na cor verde). Neste trabalho, considerando-se a resolução do modelo obtido por microCT, para efeito de geração das figuras, adotou-se uma tolerância de 3 μm (0,003 mm).

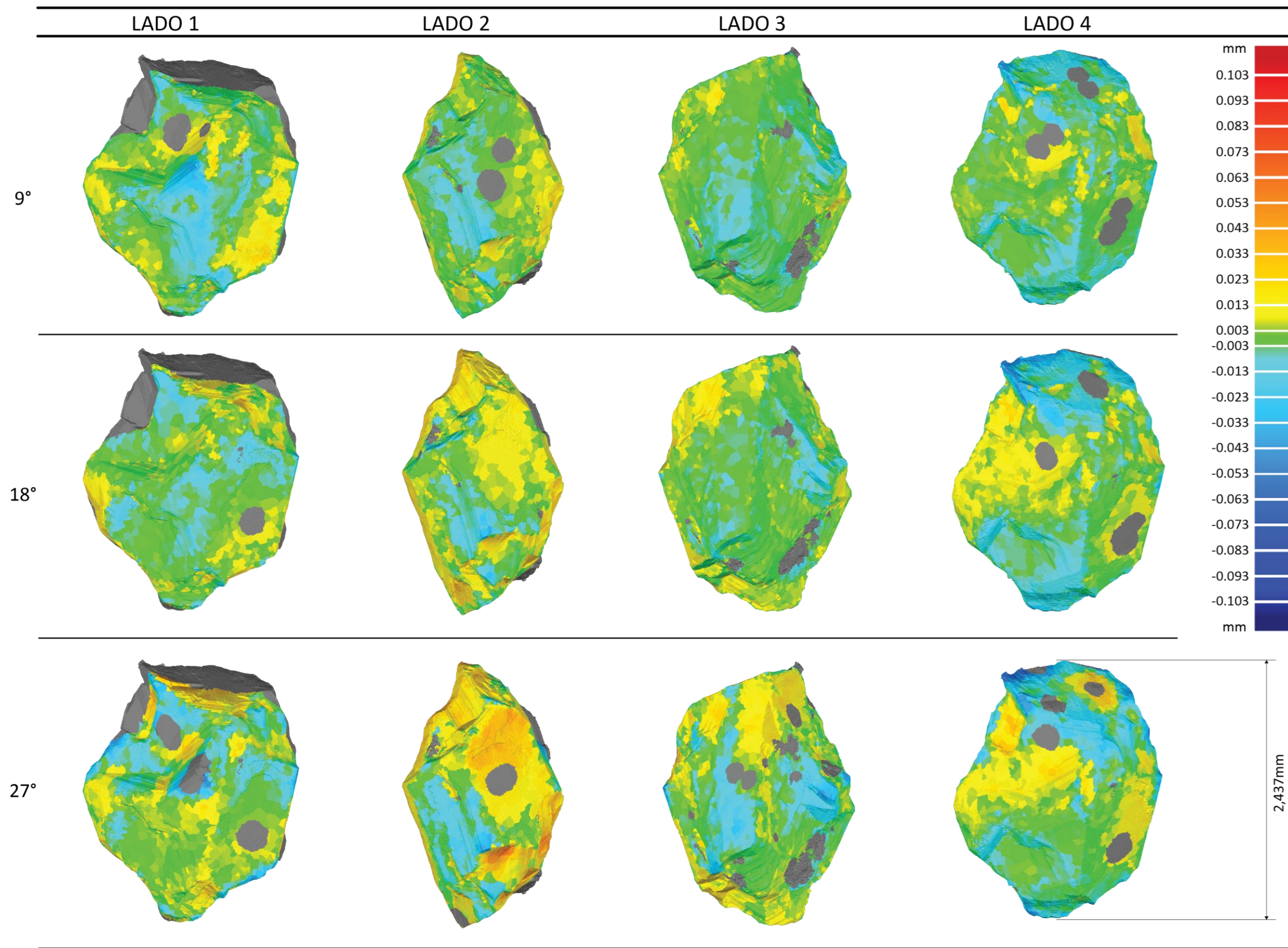
A primeira análise realizada foi a da digitalização 3D a laser com a microtomografia, duas técnicas consagradas, visando validar o uso da segunda como referência. Na Figura 40, observa-se o resultado, o qual indica erros dimensionais médios de 0,006 mm com desvio-padrão de 0,008 mm. Considerando a diferença aceitável, o mesmo procedimento foi utilizado para avaliação das malhas obtidas por Fotogrametria. Os dados gerados podem ser analisados na Figura 41.

Figura 40. Comparação da malha de digitalização a laser com a microCT



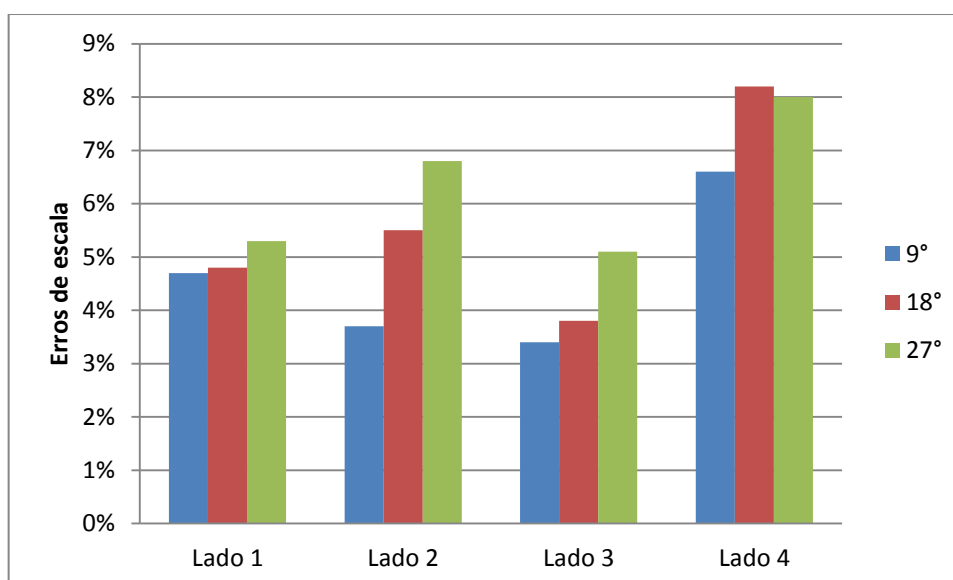
Fonte: Autor

Figura 41. Análise das malhas obtidas por Fotogrametria



Com base nos arquivos reconstruídos por Fotogrametria, foi possível identificar erros de escala em relação ao modelo obtido por microtomografia. Nesse sentido, antes de iniciar o processo de avaliação, optou-se por escalar os modelos em relação à referência. Tais erros são atribuídos ao procedimento manual de escalar os modelos clicando nos pontos conhecidos de uma imagem (escala da régua). No caso, a escala da régua é próxima à escala do modelo, o que pode favorecer a ordem de grandeza do erro. Ainda assim, os erros ficaram abaixo de 10%. Neste quesito, o maior número de imagens (com menor ângulo entre elas) também tendeu a apresentar melhores resultados. A Figura 42 mostra o erro de escala (percentual) para cada malha.

Figura 42. Erros de escala dos modelos obtidos por Fotogrametria em relação à microCT.



Fonte: Autor

As análises das malhas obtidas por Fotogrametria confirmam o esperado e vão ao encontro dos resultados de Eulitz e Reiss (2015), os quais constataram que com uma sobreposição maior de fotos (com uma angulação menor entre elas) o detalhamento do modelo 3D tende a ser mais próximo ao original. Isso é claramente observado nos modelos obtidos a 9°, conforme visualizado na Figura 41.. Nesse caso, são notáveis as áreas em verde, as quais indicam uma proximidade com o modelo original, bem como observam-se poucos erros, tanto para o lado positivo quanto negativo. Nas malhas a 18°, com uma diminuição de 50% das fotografias, foi possível perceber que as áreas dentro da tolerância diminuíram, e que áreas com erro maior, tanto positivo quanto negativo, aumentaram. Já nos modelos

reconstruídos a 27°, as áreas em verde diminuiriam ainda mais, se comparadas com as outras angulações. Nessas condições, houve uma menor sobreposição das imagens, aumentando o erro de malha, visto que o software 123D Catch® busca interpolar dados, o que muitas vezes não condiz precisamente com a geometria da amostra. Cabe salientar que modelos mais complexos demandam mais informações para uma reconstrução adequada.

A Tabela 1 sintetiza o processamento estatístico realizado pelo software Geomagic Qualify®. Nela, são apresentados os valores de média dos erros, desvio-padrão e desvio quadrático médio (RMS), calculados para as malhas obtidas por Fotogrametria, bem como para a obtida por digitalização a laser (Digimill).

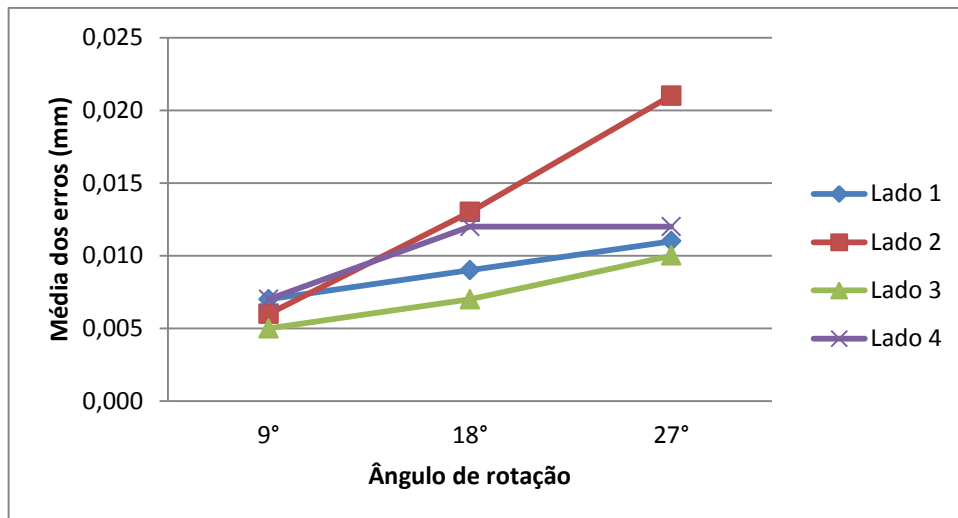
Tabela 1. Estatísticas calculadas pelo software Geomagic Qualify®.

Amostras		Média dos erros	Desvio-padrão	RMS
Foto 9°	Lado 1	0,007	0,009	0,009
	Lado 2	0,006	0,006	0,007
	Lado 3	0,005	0,007	0,007
	Lado 4	0,007	0,008	0,008
Foto 18°	Lado 1	0,009	0,009	0,010
	Lado 2	0,013	0,010	0,014
	Lado 3	0,007	0,008	0,008
	Lado 4	0,012	0,011	0,013
Foto 27°	Lado 1	0,011	0,014	0,014
	Lado 2	0,021	0,018	0,024
	Lado 3	0,010	0,012	0,012
	Lado 4	0,012	0,017	0,017
Laser	Digimill	0,006	0,008	0,008

Fonte: Autor

A partir da Tabela 1, foram gerados gráficos para facilitar a visualização e interpretação dos dados. Na Figura 43, a média de erros é mostrada em um gráfico que apresenta um comportamento bastante similar para todas as malhas. Observa-se que na angulação de 9° a média de erros é bem menor, se comparada a malhas com 18° e 27°, fato que ocorre devido à presença de um número maior de imagens por modelo.

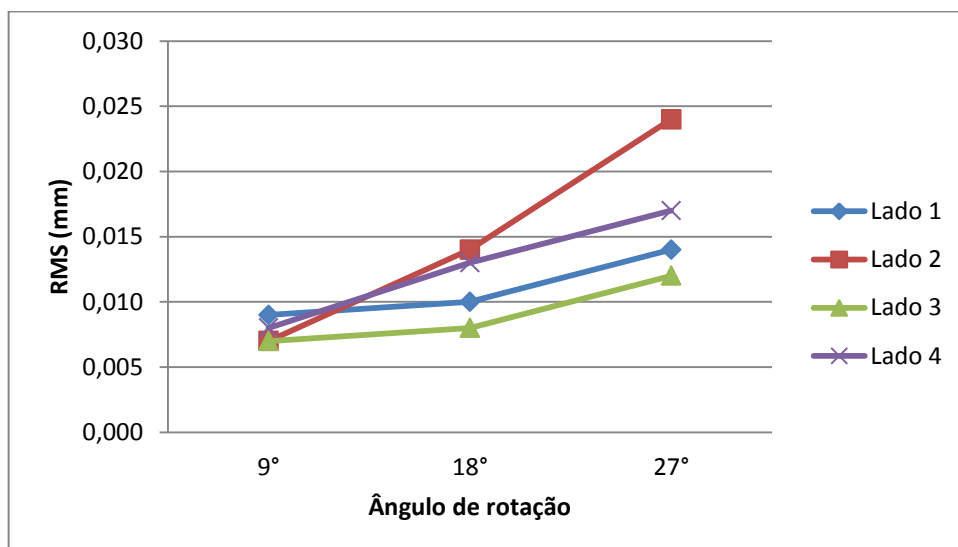
Figura 43. Média dos erros em função do ângulo de rotação



Fonte: Autor

O software ainda permite calcular o desvio quadrático médio (RMS) de cada modelo, em relação à referência. Nesse sentido, o comportamento da Figura 44 também foi de acordo com o esperado, ou seja, ao diminuir o número de imagens, o valor RMS aumenta, elevando o índice de erros gradativamente para as aquisições a 18° e 27°.

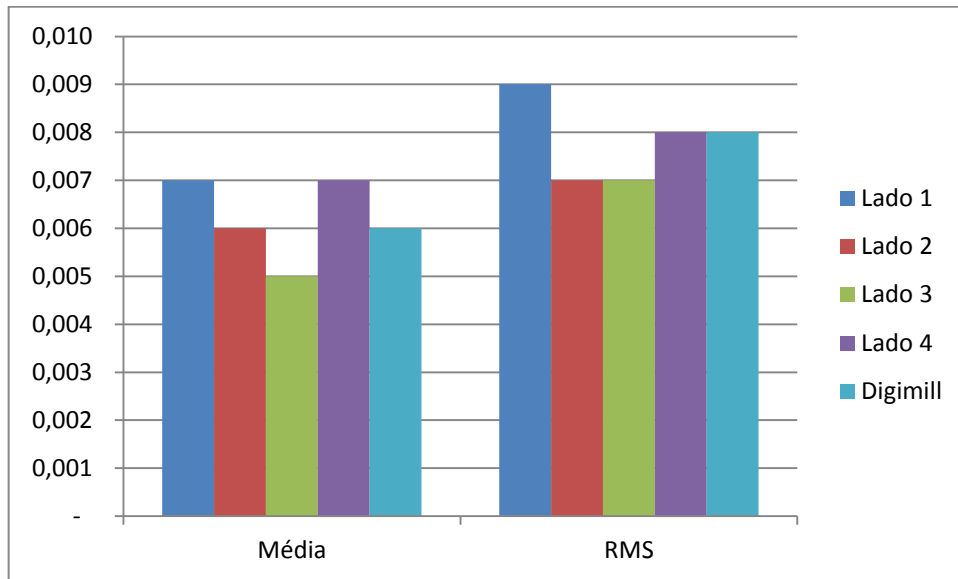
Figura 44. Desvio quadrático médio (RMS) em função do ângulo de rotação



Fonte: Autor

Observou-se que, na melhor condição, com 40 imagens (9°), os resultados obtidos pela Fotogrametria são equivalentes aos obtidos pela digitalização tridimensional a laser. A Figura 45 permite comparar as diferenças entre a média e o desvio quadrático médio (RMS) dos quatro Lados a 9° com a digitalização a laser (Digimill).

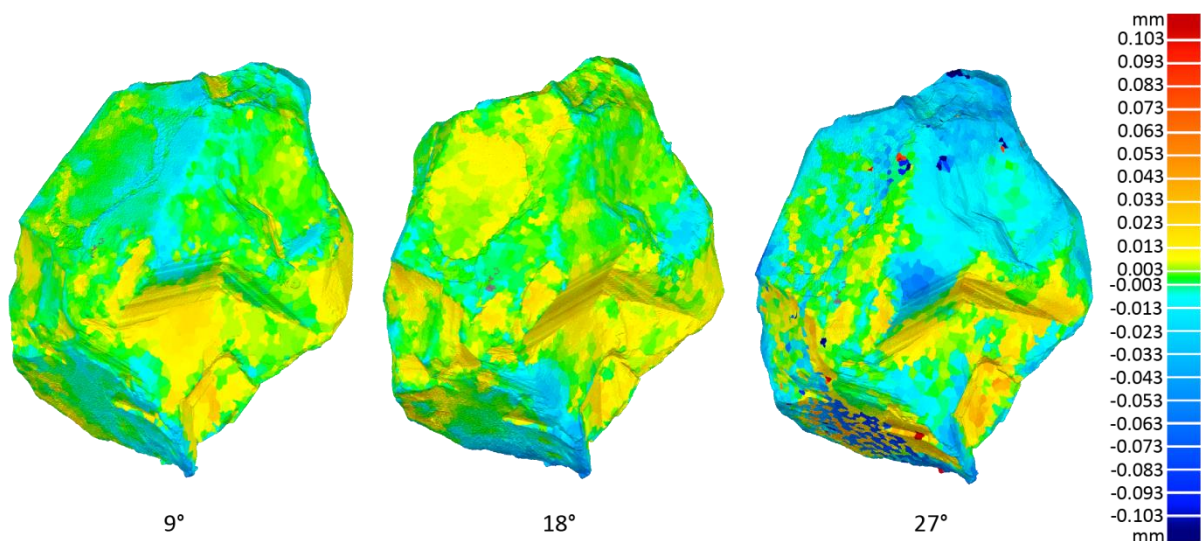
Figura 45. Comparativo entre média dos erros e desvio quadrático médio (RMS) para os Lados a 9°



Fonte: Autor

Por fim, conforme descrito na metodologia, os quatro Lados, para cada angulação, foram fundidos em uma única malha fechada, a qual foi submetida à mesma avaliação. A Figura 46 apresenta a análise gráfica, indicando que com 9° a precisão do modelo 3D é próxima a da microtomografia, sendo ligeiramente menor com 18°. Já para 27°, há uma perda mais visível de precisão, surgindo pontos escuros, que remetem a erros localizados na ordem de 0,1 mm.

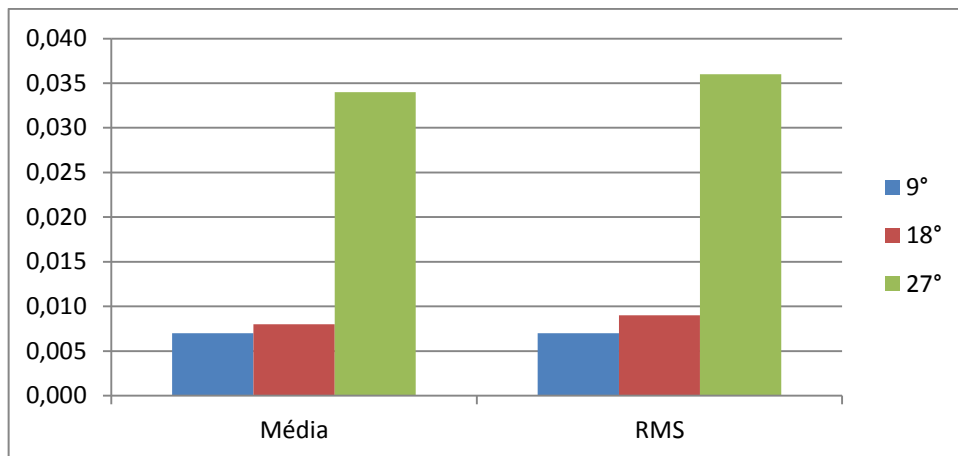
Figura 46. Análise dimensional dos modelos 3D obtidos por Fotogrametria



Fonte: Autor

A mesma leitura feita na análise gráfica tridimensional pode ser aplicada aos dados estatísticos. Conforme a Figura 47, a média dos erros e o desvio quadrático médio (RMS) dos modelos 3D reconstruídos por Fotogrametria comprovam que o resultado mais preciso ocorre com o ângulo de 9°, sendo ligeiramente menor para o ângulo de 18°. A visível perda de precisão do modelo 3D obtido com ângulo de 27° é destacada pelos erros médios que superam 0,03 mm (mais de quatro vezes maior que os demais).

Figura 47. Erros médios e desvio quadrático médio RMS das malhas geradas por Fotogrametria



Fonte: Autor

Os resultados encontrados estão de acordo com o trabalho de Eulitz e Reiss (2015), pois com um maior número de fotos (com uma angulação menor entre elas) foi obtida a maior precisão do modelo 3D. Essa última análise indicou que o modelo 3D obtido com passos de 27° apresenta importantes distorções geométricas e, dessa forma, mesmo sendo possível reconstruí-lo com poucas imagens (13), o resultado não é preciso. Por outro lado, o modelo 3D obtido com 18° apresentou resultados bastante semelhantes ao do obtido com 9°, mesmo com a metade das imagens (20) em relação a este. Embora o modelo 3D das aquisições a 9°, obtido com todas as imagens geradas (40), tenha apresentado a maior precisão, não se pode afirmar que este é um ângulo ideal. Deve-se considerar que um menor número de imagens exige um menor tempo de aquisição e de posterior processamento, bem como que a quantidade de imagens necessária será dependente da complexidade da amostra. Tendo em vista que o dispositivo desenvolvido permite obter 40 imagens de maneira praticamente automática, acredita-se que sua utilização é capaz de atender à maioria dos casos que demandem a geração de um modelo 3D com tamanho de poucos milímetros e detalhes micrométricos.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposto um método para obter modelos tridimensionais por Fotogrametria, a partir de imagens adquiridas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A principal vantagem da aplicação desse método é que o uso de modelos 3D proporciona diferentes técnicas de investigação e análises, o que muitas vezes não é possível apenas com as imagens (2D) adquiridas pelo processo tradicional.

Os ensaios preliminares foram fundamentais na execução deste trabalho. Foi a partir da dificuldade em adquirir os dados, que surgiu a necessidade de desenvolver um dispositivo que automatizasse o processo. Dessa forma, projetou-se um dispositivo capaz de realizar a rotação da amostra no interior da câmara de vácuo, eliminando a necessidade de abertura e fechamento da gaveta, bem como de manuseio da amostra, reduzindo em até três vezes o tempo de aquisição das imagens. Com o dispositivo em questão, é possível adquirir uma imagem por minuto e a cada 9°, ou seja, em uma rotação completa da amostra obtém-se 40 imagens em 40 minutos. Constatou-se também a importância da presença de uma escala de referência durante as aquisições no MEV.

Para escalar os modelos, foi utilizada uma régua milimétrica que gerou erros próximos a 5% do comprimento da amostra. Tais erros foram corrigidos a partir das medidas de comprimento do modelo de referência obtido por microCT. Destaca-se que a utilização de uma escala mais precisa, de ordem micrométrica, pode minimizar este problema.

Na reconstrução por Fotogrametria, foi observado que na parte central das malhas o resultado é mais preciso, devido à maior sobreposição das imagens. Nas bordas, acontece o inverso, ou seja, com uma menor sobreposição de imagens, ou ainda com oclusões parciais em áreas da amostra, há uma interpolação de dados e consequente perda de precisão. Tais áreas são visíveis por meio de uma textura mais escura, bem como de um forte arredondamento da malha, devido à interpolação. Neste sentido, é possível remover as bordas das malhas e utilizar a parte central para gerar modelos 3D com maior precisão.

Das propostas de reconstrução de malha com incrementos do ângulo de rotação da amostra (ângulo entre imagens), foi possível gerar malhas com 9, 18 e 27°. Para 36 e 45° o número de imagens foi insuficiente para reconstruir a geometria da amostra. Apesar de ser

possível gerar malhas com passos de 27°, houve pouca precisão no processo, o que limita a aplicação de um modelo 3D assim gerado. Os modelos 3D obtidos com imagens a cada 9 e 18° ficaram com precisão semelhantes, com erros médios abaixo de 0,01mm. O modelo 3D de maior precisão obtido, com rotações de 9°, teve erros médios de 0,007mm, o que representa menos do que 0,5% do maior comprimento da amostra.

Ainda foi possível tomar algumas conclusões quanto à microtomografia. Notou-se que, apesar de ser uma técnica consagrada na literatura, há uma diversidade de equipamentos com resoluções diferentes os quais podem não representar detalhes micrométricos das amostras. O uso desses equipamentos, que já é mais restrito em relação aos MEVs, pode ser ainda mais dificultado quando houver a necessidade de obter detalhes desta ordem de grandeza. Ainda, o tempo de aquisição de imagens é maior na microCT do que o tempo que foi atingido com o método proposto. A desvantagem do processamento de imagens de MEV por Fotogrametria reside na impossibilidade de obter detalhes internos das amostras e na necessidade de intervenção nas malhas para gerar um modelo 3D com o volume completo da amostra.

Assim, conclui-se que o método proposto, com auxílio do dispositivo desenvolvido, é uma interessante alternativa para a geração de modelos 3D de amostras com tamanho na ordem de milímetros e detalhes superficiais micrométricos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Otimizar o dispositivo de rotação da amostra e desenvolver um mecanismo para acionamento próprio (eliminar a dependência do relógio);
- Estudar um sistema de precisão para ajustar a escala dos modelos 3D, por exemplo, um objeto de referência ou a utilização da escala gráfica gerada nas imagens pelo MEV;
- Ensaiair outras amostras, com diferentes níveis de complexidade e detalhes superficiais, tais como elementos da natureza (insetos, folhas, etc.) para o estudo da biônica;
- Adaptar o método para amostras de menor ordem de grandeza, como, de comprimento micrométrico, visto que o MEV utilizado permite aumentos de até 30.000 vezes.
- Avaliar o uso de outros softwares fotogramétricos que permitam o maior controle sobre os resultados obtidos, bem como os parâmetros de calibração da câmara;
- Avaliar o uso do dispositivo em outros MEVs, inclusive de elétrons secundários.

REFERÊNCIAS

- 3D SLICER. Software 3D SLICER. Disponível em <<http://wiki.slicer.org/slicerWiki/index.php/Documentation/4.5/Announcements>> Acesso em 06/04/2016
- ACUTED3D. Software ContexCapture. Disponível em <www.acute3d.com>. Acesso em 05/10/2015
- AGBOGUN H.M.D., AL T.A., HUSSEIN E.M.A. Three dimensional imaging of porosity and tracer concentration distributions in a dolostone sample during diffusion experiments using X-ray micro-CT. **Journal of Contaminant Hydrology. Elsevier**. 2013.
- AGISOFT. Software Agisoft PhotoScan. Disponível em <www.agisoft.com>. Acesso em 05/10/2015
- ALBURNIO, R.S. **Métodos passivos de reconstrução 3D voltados à preservação digital de acervos culturais**. 2012.
- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS). **Manual of Photogrammetry**, 4ª edição de 1980.
- AOYAGI, H; IWASAKI, S; NAKAMURA, K. Three-dimensional observation of mouse tongue muscles using micro-computed tomography. **Odontology**, v. 103, n. 1, p. 1-8, 2015.
- APPLE. **Aperture digital photography fundamentals**. Aple Computer, Inc. 2005
- ATTIX, F.H.R., ROESCH, W.C., 1968. **Radiation Dosimetry**. Academic Press, New York
- ATWOOD R.C; JONES J.R., LEE P.D. **Analysis of pore interconnectivity in bioactive glass foams using X-ray microtomography**. Doi. 10.1016/j.scriptamat.2004.08.014
- AUTODESK. 123D Catch. Disponível em: < <http://www.123dapp.com/catch>> Acesso em 04/06/2015

AVILA, B. **Diagnósticos sobre acessibilidade e tecnologia assistiva na rede municipal de ensino de Porto Alegre**. Dissertação de mestrado - UFRGS. 2013

BADEL, E; DELISEE, C; LUX, J. 3D structural characterisation, deformation measurements and assessment of low-density wood fibreboard under compression: The use of X-ray microtomography. **Composites Science and Technology**, v. 68, n. 7, p. 1654-1663, 2008.

BAKER, D.R. MANCINI, L. POLACCI, M. HIGGINS, M.D. GUALDA, G.A.R. HILL, R.J. RIVERS, M.L.. An introduction to the application of X-ray microtomography to the three-dimensional study of igneous rocks. **Lithos**, v. 148, p. 262-276, 2012.

BARAZZETTI, L. FORLANI, G. REMONDINO, F. RONCELLA, R. SCAIONI, M. Experiences and achievements in automated image sequence orientation for close-range photogrammetric projects. **In:SPIE Optical Metrology. International Society for Optics and Photonics**, 2011. p. 80850F-80850F-13.

BAY, H. ESS, A. TUTELAARS, T. VAN GOOL, L. Speeded-up robust features (SURF). **Computer vision and image understanding**, v. 110, n. 3, p. 346-359, 2008.

BECKERS, E. PLOUGONVEN, E. ROISIN, C. HAPCA, S. LÉONARD, A. DEGRE, A. X-ray microtomography: A porosity-based thresholding method to improve soil pore network characterization. **Geoderma**. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.01.004. 2014.

BERTOL L.S. KINDLEIN W.J. SILVA F.P. AUMUND-KOPP C. Medical design: Direct metal laser sintering of Ti-6Al-4V. **Materials and Design** 31. **Elsevier** 2010

BOUGHORBEL, F. ZHUGE, X. POTOCEK, P. LICH, B. SEM 3D Reconstruction of Stained Bulk Samples using Landing Energy Variation and Deconvolution. **Microscopy and Microanalysis**, v. 18, n. S2, p. 560-561, 2012.

BUENO, M. DÍAZ-VILARIÑO, L. MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J. GONZÁLEZ-JORGE, H. LORENZO, H. ARIAS, P. Metrological evaluation of Kinect Fusion and its comparison with Microsoft Kinect sensor. **Measurement**, 2015.

CANTRE, D., HERREMANS, E., VERBOVEN, P., AMPOFO-ASIAMA, J., NICOLAÏ, B., 2014. Characterization of the 3-D microstructure of mango (*Mangifera indica* L. cv. Carabao) during

ripening using X-ray computed microtomography. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 24,28-39
DOI: 10.1016/j.ifset.2013.12.008

CHANDLER, D.E., ROBERTSON, R.W., 2009. **Bioimaging: Current Concepts in Light and Electron Microscopy**. Jones and Bartlett, USA.

CNUUDE, V; BOONE, M. N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. *Earth-Science Reviews*, v. 123, p. 1-17, 2013.

CURTIN, D.P. **The textbook of digital photography**. ShortCourses.com, 2004

DAVIS, G. R. FEARNE, J.M. SABEL, N. NÓREN, S.G. Microscopic study of dental hard tissues in primary teeth with Dentinogenesis Imperfecta Type II: Correlation of 3D imaging using X-ray microtomography and polarising microscopy. *Archives of oral biology*, v. 60, n. 7, p. 1013-1020, 2015.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura : aplicações e preparação de amostras : materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. – Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. ISBN: 978-85-7430-702-2

DHONDT, S. VANHAEREN, H. VAN LOO, D. CNUUDE, V. INZÉ, D. Plant structure visualization by high-resolution X-ray computed tomography. *Trends in plant science*, v. 15, n. 8, p. 419-422, 2010.

EOSSYSTEMS. **Quantifying the accuracy of dense surface modeling within PhotoModeler Scanner**. Eos Systems Inc. 2012

EULITZ, M; REISS, G. 3D reconstruction of SEM images by use of optical photogrammetry software. *Journal of structural biology*, v. 191, n. 2, p. 190-196, 2015.

FENG,Y. FENG, Z. LI, S. ZHANG, W. LUAN, X. LIU, Y. CHENG, L. ZHANG, L. Micro-CT characterization on porosity structure of 3D C f/SiC m composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 42, n. 11, p. 1645-1650, 2011.

FLORES, A. B. H. **Design, território e tecnologia 3D na preservação cultural em suporte material sustentável : estudo de caso do monumento "O Laçador"**. Dissertação (Mestrado) - UFRGS. 2012.

FREITAS, G. **Metodologia e aplicabilidade da digitalização 3D a laser no desenvolvimento de moldes para calçados e componentes**. Dissertação (Mestrado) – UFRGS 2006.

FUSSEIS, F. XIAO, X. SCHRANK, C. DE CARLO, F. A brief guide to synchrotron radiation-based microtomography in (structural) geology and rock mechanics. **Journal of Structural Geology**, v. 65, p. 1-16, 2014.

GALANTUCCI, L. M.; PESCE, M.; LAVECCHIA, F. A powerful scanning methodology for 3D measurements of small parts with complex surfaces and sub millimeter-sized features, based on close range photogrammetry. **Precision Engineering**, 2015

GOLDSTEIN, J. NEWBURY, D.E. ECHLIN, P. JOY, D. C. ROMING, Jr. A.D. LYMAN, C.E. FIORI, C. LIFSHIN, E. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis: a text for biologists, materials scientists, and geologists. **Springer Science & Susiness Media**, 2012.

GOMES, L; BELLON, O. R. P.; SILVA, L. 3D reconstruction methods for digital preservation of cultural heritage: A survey. **Pattern Recognition Letters**, v. 50, p. 3-14, 2014.

GONZÁLEZ, M. Á. M., YRAVEDRA, J., GONZÁLEZ-AGUILERA, D., PALOMEQUE-GONZÁLEZ, J. F., DOMÍNGUEZ-RODRIGO, M. (2015). Micro-photogrammetric characterization of cut marks on bones. **Journal of Archaeological Science**,62, 128-142.

GRUEN, A. **Digital close range photogrammetry: Progress through automation**. IAPRS 30, Part 5. 1994.

HAKONEN, A; KUUSELA, J-M; OKKONEN, J. Assessing the application of laser scanning and 3D inspection in the study of prehistoric cairn sites: The case study of Tahkokangas, Northern Finland. **Journal of Archaeological Science: Reports**, v. 2, p. 227-234, 2015.

HEYMANN, J. A., SHI, D., KIM, S., BLISS, D., MILNE, J. L., & SUBRAMANIAM, S., J. A. W et al. 3D imaging of mammalian cells with ion-abrasion scanning electron microscopy. **Journal of structural biology**, v. 166, n. 1, p. 1-7, 2009.

HITACHI. **Instruction manual for model TM3000 tabletop microscope**. Hitachi high-Technologies Corporation. 2010.

ISAAC A. SKET F., DRIEMEIER C., ROCHA G.J.M. 3D imaging of sugarcane baste using X-ray microtomography. *Industrial Crops and Products*. **Elsevier** 2013

JENSEN, E.C., 2012. Types of imaging, part 1: electron microscopy. **Anat. Rec.** 295,716–721.

JUBANSKI, J; ALIXANDRINI, M; BÄHR, H. H-P. Câmeras Aerofotogramétricas Digitais: Novos Conceitos e Normas. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 61/1, 2009.

JUSSIANI E.I., APPOLONI C.R. Effective atomic number and density determination of rocks by X-ray microtomography. **Micron**. Elsevier 2014

KEDZIERSKI, M; FRYSKOWSKA, A. Methods of laser scanning point clouds integration in precise 3D building modelling. **Measurement**, v. 74, p. 221-232, 2015.

KLEIN, M. ROMERO, A. Evolution of SEM specimen chamber geometries driven by sample and interior characteristics. **Microsc Microanal** 13. 2007. DOI:10.1017/S1431927607077380.

KONGEVOLD, D. **Merging Meshes from Different 3D Scanners**. 2013.

KOSTER, A. J. ZIESE, U. VERKLEIJ, A. J. JANSSE, A. H. JONG, K. P. Three-dimensional transmission electron microscopy: a novel imaging and characterization technique with nanometer scale resolution for materials science. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 104, n. 40, p. 9368-9370, 2000.

LANDIS, E. N., KEANE, D. T. X-ray microtomography. **Mater. Charact.** 61, 1305–1316. doi:10.1016/j.matchar.2010.09.012 – 2010.

LEONOV, A. V. ANIKUSHKIN, M. N. IVANOV, A. V. OVCHAROV, S. V. BOBKOV, A. E. BATURIN, Y. M. Laser scanning and 3D modeling of the Shukhov hyperboloid tower in Moscow. **Journal of Cultural Heritage**, 2014.

LILJE, O., LILJE, E., MARANO, A.V., GLEASON, F.H., 2013. Three dimensional quantification of biological samples using micro-computer aided tomography (microCT). **J. Microbiol. Methods** 92, 33–41. doi:10.1016/j.mimet.2012.10.006

LOWE, D.G. **Object recognition from local scale-invariant features**. In: Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conference on. Ieee, 1999. p. 1150-1157.

MACHADO A. C. OLIVEIRA T.J.L., CRUZ F.B., LOPES R.T., LIMA I. X-ray microtomography of hydrochloric acid propagation in carbonate rocks. **Applied radiation and isotopes**. Elsevier. 2014

MADRA, A; EL HAJJ, N; BENZEGGAGH, M. X-ray microtomography applications for quantitative and qualitative analysis of porosity in woven glass fiber reinforced thermoplastic. **Composites Science and Technology**, v. 95, p. 50-58, 2014.

MAHDJOUBI, L., MOOBELA, C., LAING, R. Providing real-estate services through the integration of 3D laser scanning and building information modelling. **Computers in Industry**, v. 64, n. 9, p. 1272-1281, 2013.

MASS. H.-G. **Concepts of real-time photogrammetry**. Human Movement Science. 1997.

MATTHEWS, N. A.; NOBLE, T. **Aerial and close-range photogrammetric technology: providing resource documentation, interpretation, and preservation**. Technical Note, v. 428, p. 42, 2008.

MAYO, S. C.; CHEN, F.; EVANS, R. Micron-scale 3D imaging of wood and plant microstructure using high-resolution X-ray phase-contrast microtomography. **Journal of structural biology**, v. 171, n. 2, p. 182-188, 2010.

MAYO, S.C., D, T.J., GUREYEV, T.E., MILLER, P.R., PAGANIN, D., POGANY, A., STEVENSON, A.W., WILKINS, S.W. X-ray phase-contrast microscopy and microtomography. **Opt. Expr.** 11, 2289–2302. 2003.

MEYER, M., ELLIOTT, D., WOOD, A. D., POLYS, N. F., COLBERT, M., MAISANO, J. A., XIAO, S. Three-dimensional microCT analysis of the Ediacara fossil *Pteridinium simplex* sheds new light on its ecology and phylogenetic affinity. **Precambrian Research**, v. 249, p. 79-87, 2014.

MIKHAIL, E. M. BETHEL, J. S. McGLONE, J.C. **Introduction to modern photogrammetry**. ISBN 0-471-30924-9. USA 2001.

MIZUTANI, R., SUZUKI, Y. X-ray microtomography in biology. 2011. **Elsevier** Ltd. doi:10.1016/j.micron.2011.10.002

MURPHY, G. E., NARAYAN, K., LOWEKAMP, B. C., HARTNELL, L. M., HEYMANN, J. A., FU, J., & SUBRAMANIAM, S. Correlative 3D imaging of whole mammalian cells with light and electron microscopy. **Journal of structural biology**, v. 176, n. 3, p. 268-278, 2011.

NETO, J.M. dos R., FIORI, A.P., LOPES, A.P., MARCHESE, C., PINTO-COELHO, C.V., VASCONCELLOS, E.M.G., SILVA, G.F. da, SECCHI, R., 2011. A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas. **Rev. Bras. Geociências** 41, 498–508

NGUYEN, C. V., LOVELL, D. R., ADCOCK, M., LA SALLE, J. Capturing natural-colour 3D models of insects for species discovery and diagnostics. **PloS one**, v. 9, n. 4, p. e94346, 2014.

PARK, S., KANG, H. C., LEE, J., SHIN, J., SHIN, Y. G. An enhanced method for registration of dental surfaces partially scanned by a 3D dental laser scanning. **Computer methods and programs in biomedicine**, v. 118, n. 1, p. 11-22, 2015.

PERCOCO, G; LAVECCHIA, F; SALMERÓN, A. J. S. Preliminary study on the 3D digitization of millimeter scale products by means of photogrammetry. **Procedia CIRP**, v. 33, p. 257-262, 2015.

PHOTOMETRIX. Software Australis V8. Disponível em <www.photometrix.com.au> 05/10/2015

PIAZZESI, G. Photogrammetry with the scanning electron microscope. 1972. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**

POHLMANN, M. **Contribuição ao estudo de materiais, processos e modelos utilizados na fabricação de joias em larga escala**. Dissertação (Mestrado). UFRGS. 2012.

PSIKUTA, A., FRACKIEWICZ-KACZMAREK, J., MERT, E., BUENO, M. A., ROSSI, R. M. Validation of a novel 3D scanning method for determination of the air gap in clothing. **Measurement**, v. 67, p. 61-70, 2015.

REECE, G. P., MERCHANT, F., ANDON, J., KHATAM, H., RAVI-CHANDAR, K., WESTON, J., MARKEY, M. K. 3D surface imaging of the human female torso in upright to supine positions. **Medical engineering & physics**, v. 37, n. 4, p. 375-383, 2015.

RUECKEL, J., STOCKMAR, M., PFEIFFER, F., HERZEN, J. **Spatial resolution characterization of a X-ray microCT system**. DOI: 10.1016/j.apradiso.2014.08.014. 2014

SCHAMBACH, S. J., BAG, S., SCHILLING, L., GRODEN, C., BROCKMANN, M. A. . Application of micro-CT in small animal imaging. **Methods**, v. 50, n. 1, p. 2-13, 2010.

SCHENK, T. **Introduction to photogrammetry**. The Ohio State University, Columbus, 2005.

SENO, T., OHTAKE, Y., KIKUCHI, Y., SAITO, N., SUZUKI, H., & NAGAI, Y. 3D scanning based mold correction for planar and cylindrical parts in aluminum die casting. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 2, n. 2, p. 96-104, 2015.

SHIMADZU. **Shimadzu microfocus X-ray CT system Instruction Manual Advanced OPERATIONS**. JAPAN 2005.

SILVA I.D. **Methodologie pour le lissage et le filtrage des donnees altimetriques derivees de la correlation d'images**. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne. These No 887 (1990)

SILVA, F. P da. **O uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos**. Dissertação (Mestrado). UFRGS. 2006.

SILVA, F. P da. **Usinagem de espumas de poliuretano e digitalização tridimensional para fabricação de assentos personalizados para pessoas com deficiência**. Tese (Doutorado). UFRGS. 2011

SILVEIRA, M.T. FEITOSA, R.Q. BRITO, J.L.N.S. JACOBSEN, K. Correspondência eficiente de descritores sift para construção de mapas densos de pontos homólogos em imagens de sensoriamento remoto. **Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos**, v. 17, n. 1, p. 130-160, 2011.

SKINNER, M. M., KIVELL, T. L., POTZE, S., HUBLIN, J. J. Microtomographic archive of fossil hominin specimens from Kromdraai B, South Africa. **Journal of human evolution**, v. 64, n. 5, p. 434-447, 2013.

SMITH P R, IVANOV I.E., Surface reliefs computed from micrographs of isolated heavy metal shadowed particles. **J.Ultrastruct. Res.**71(1)(1980)25–36.

STEWART, A., LEDINGHAM, R., FURNACE, G., NEVILL, A. Body size and ability to pass through a restricted space: Observations from 3D scanning of 210 male UK offshore workers. **Applied ergonomics**, v. 51, p. 358-362, 2015.

STOCK, S.R., 2008. Recent advances in X-ray microtomography applied to materials. **Int. Mater. Rev.** 53, 129–181. doi:10.1179/174328008X277803

SUN, Y., XIA, Y., 2002. Shape-controlled synthesis of gold and silver nanoparticles. **Science** 298, 2176–2179.

TAFTI, A. P. KIRKPATRICK, A.B. ALAVI, Z. OWEN, A. YU. A. Recent advances in 3D SEM surface reconstruction. **Elsevier Micron**. 2015. DOI:10.1016/j.micron.2015.07.005

TOMMASELLI, A M G et al. **Fotogrametria: aplicações a curta distância**. In: FCT. 1999. p. 147-59.

TRACY, S.R., BLACK, C.R., ROBERTS, J.A., DODD, I.C., MOONEY, S.J., 2015. Using X-ray Computed Tomography to explore the role of abscisic acid in moderating the impact of soil compaction on root system architecture. **Environ. Exp. Bot.** 110, 11–18. doi:10.1016/j.envexpbot.2014.09.003

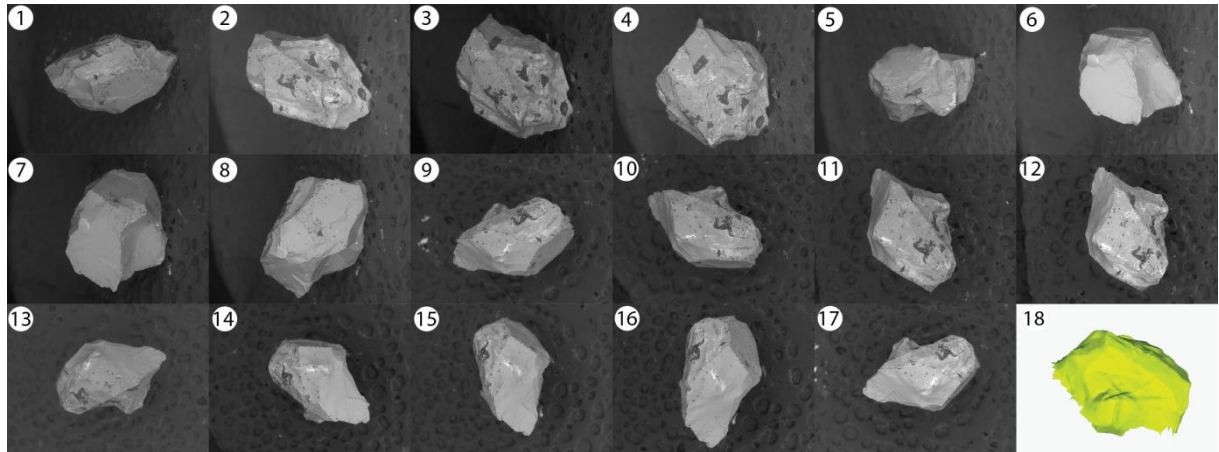
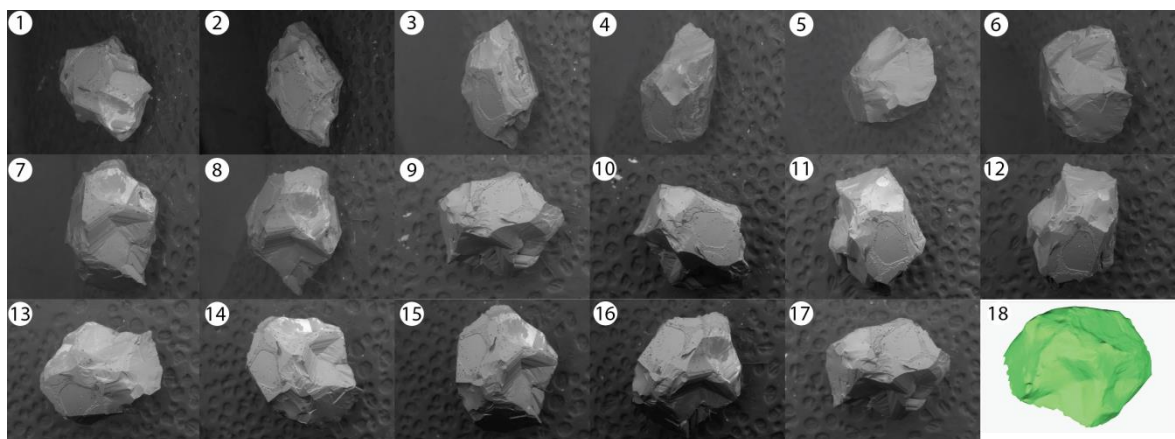
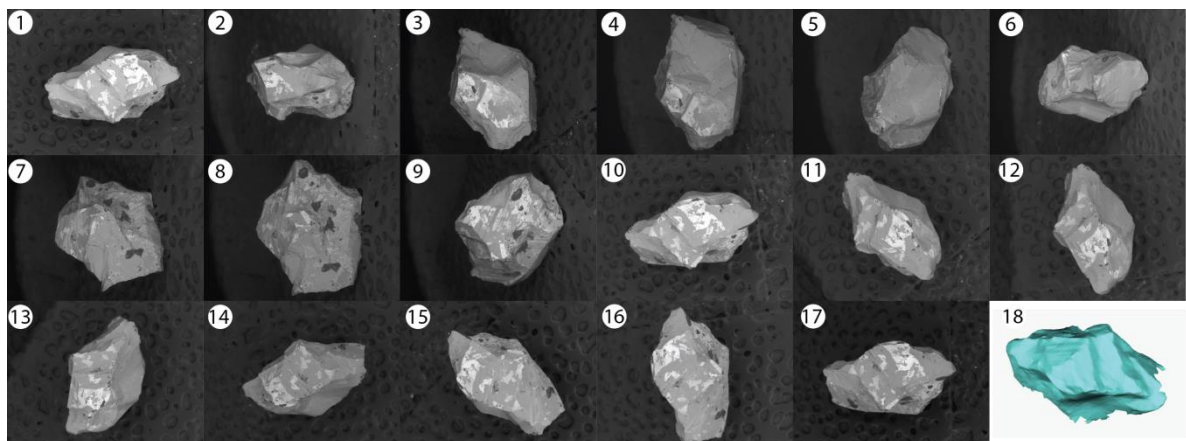
VAN DEN HERREWEGEN, I., CUPPENS, K., BROECKX, M., BARISCH-FRITZ, B., VANDER SLOTEN, J., LEARDINI, A., PEERAER, L.. Dynamic 3D scanning as a markerless method to calculate multi-segment foot kinematics during stance phase: Methodology and first application. **Journal of biomechanics**, v. 47, n. 11, p. 2531-2539, 2014.

WOODWARD, J. D.; WEPF, R. A. Macromolecular 3D SEM reconstruction strategies: Signal to noise ratio and resolution. **Ultramicroscopy**, v. 144, p. 43-49, 2014.

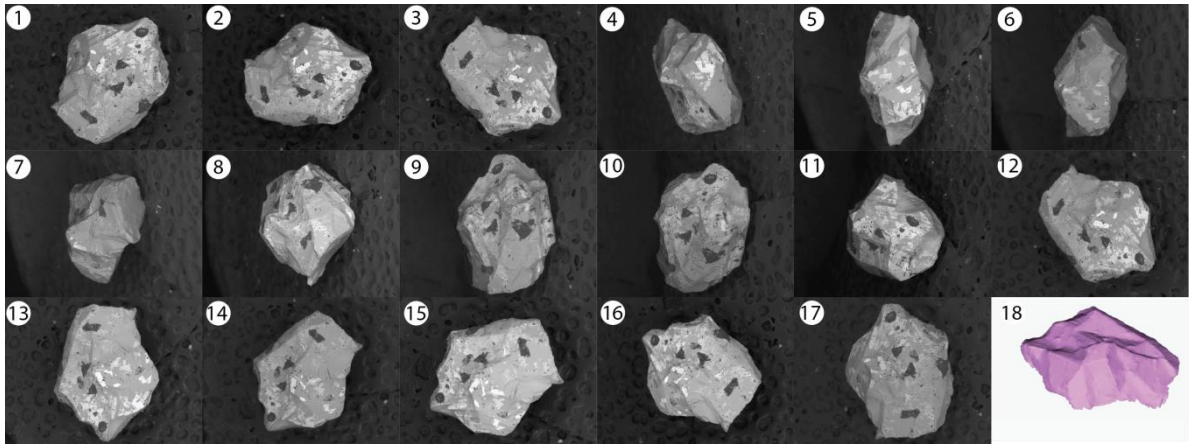
ZEHBE, Rolf et al. Going beyond histology. Synchrotron micro-computed tomography as a methodology for biological tissue characterization: from tissue morphology to individual cells. **Journal of The Royal Society Interface**, v. 7, n. 42, p. 49-59, 2010.

ZEISS. XRadia 510 Versa. Disponível em: <
http://www.zeiss.com/microscopy/en_de/products/x-ray-microscopy/zeiss-xradia-510-versa.html>. Acesso em 04/03/2016

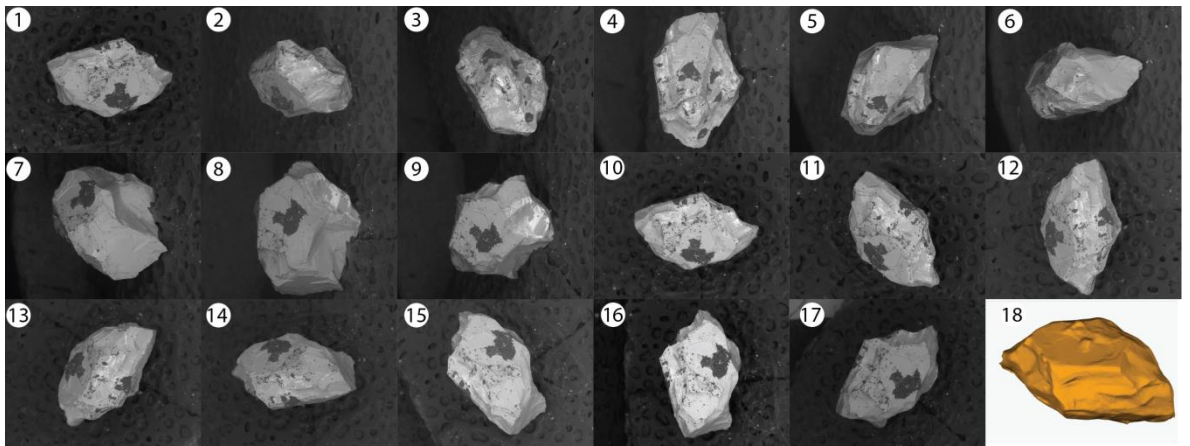
ZOLOTUKHIN, A. A. SAFONOV, I. V. KRYZHANOVSKII, K. A. 3D Reconstruction for a Scanning Electron Microscope. **Pattern Recognition and Image Analysis**, 2013, Vol. 23, No. 1, pp. 168–174. DOI: 10.1134/S105466181301015X

APÊNDICE A – AQUISIÇÕES PRELIMINARES EM MEV E RESPECTIVO MODELO 3D**FACE 1****FACE 2****FACE 3**

FACE 4

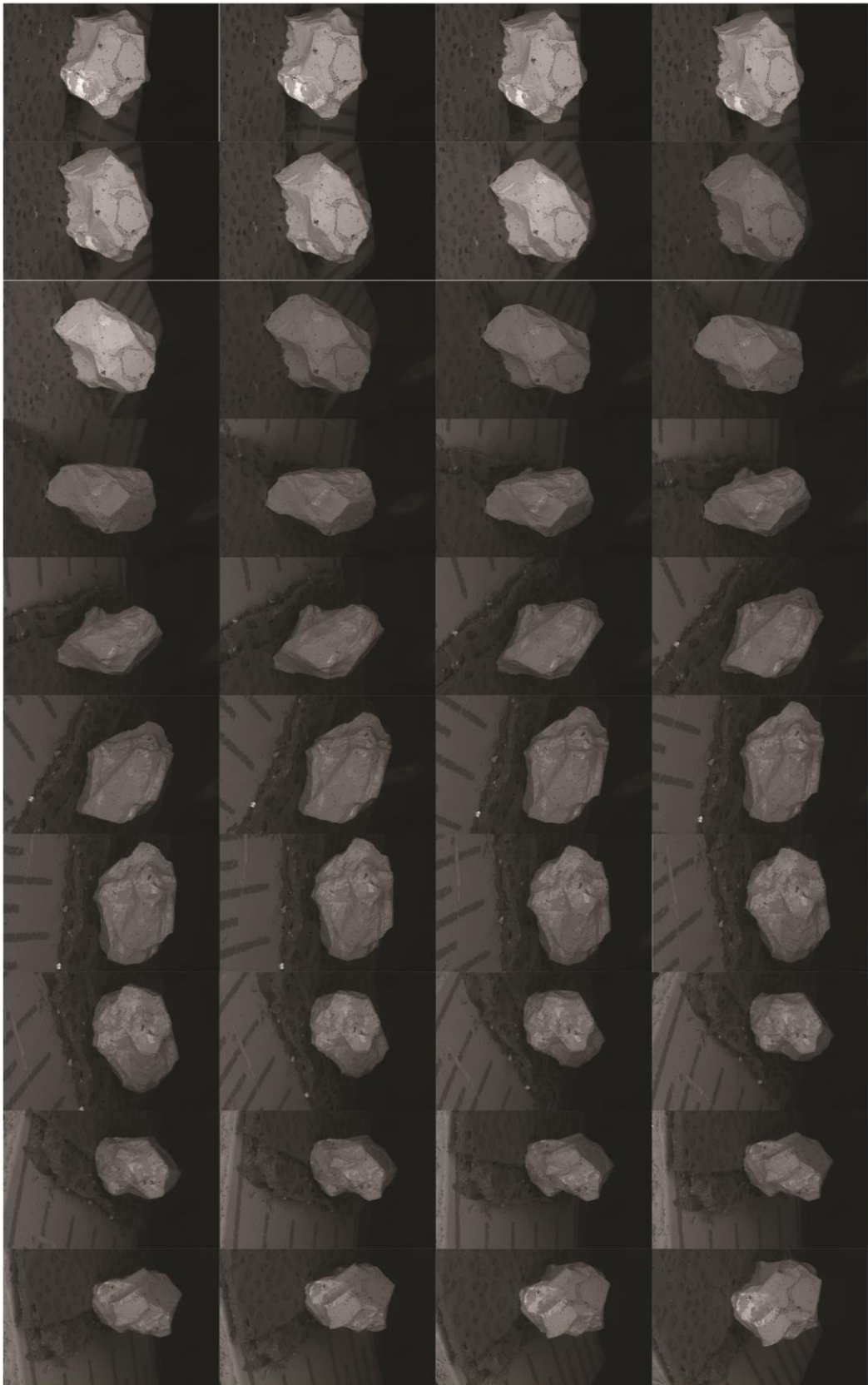


FACE 5

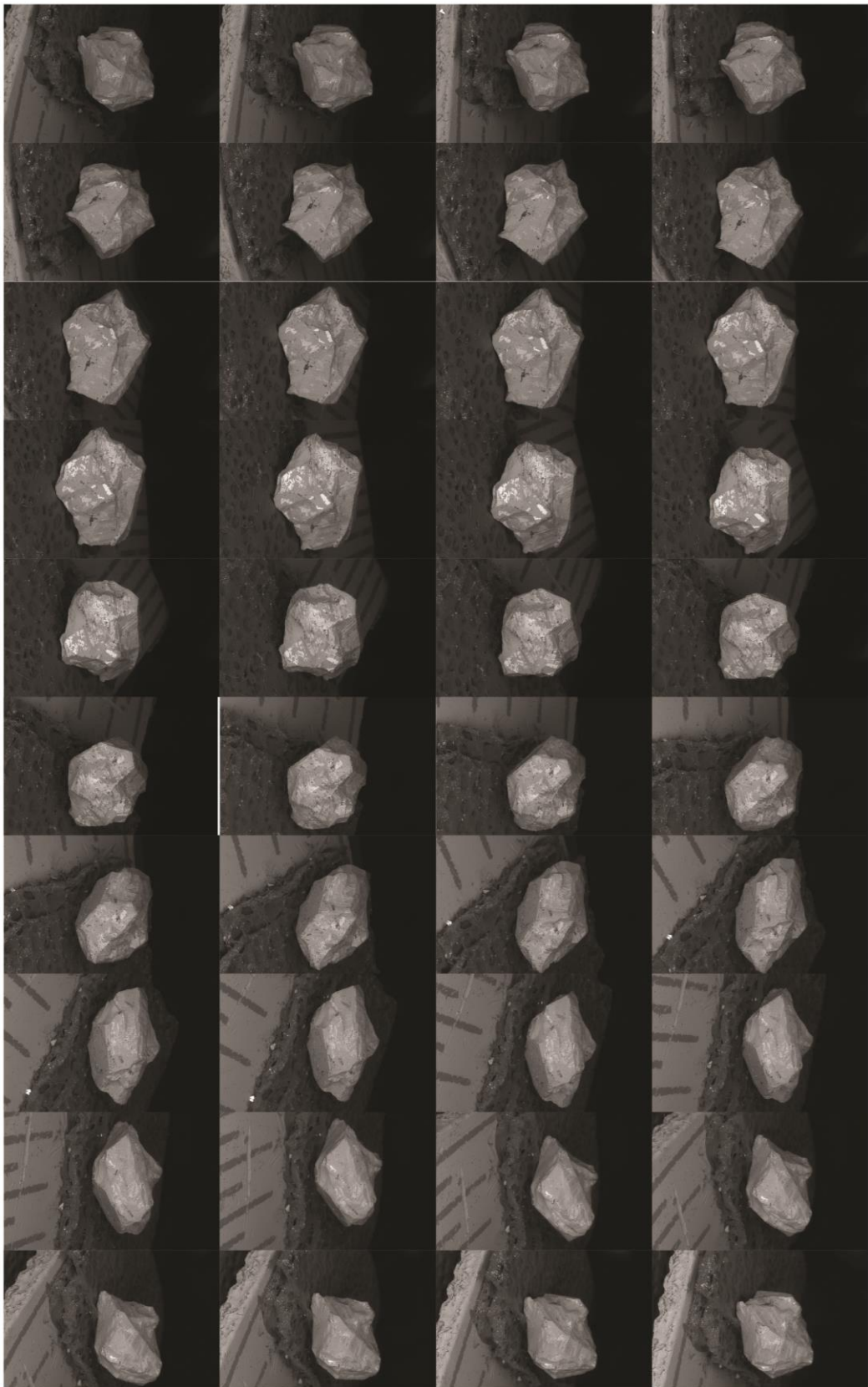


APÊNDICE B – AQUISIÇÕES EM MEV COM USO DO DISPOSITIVO

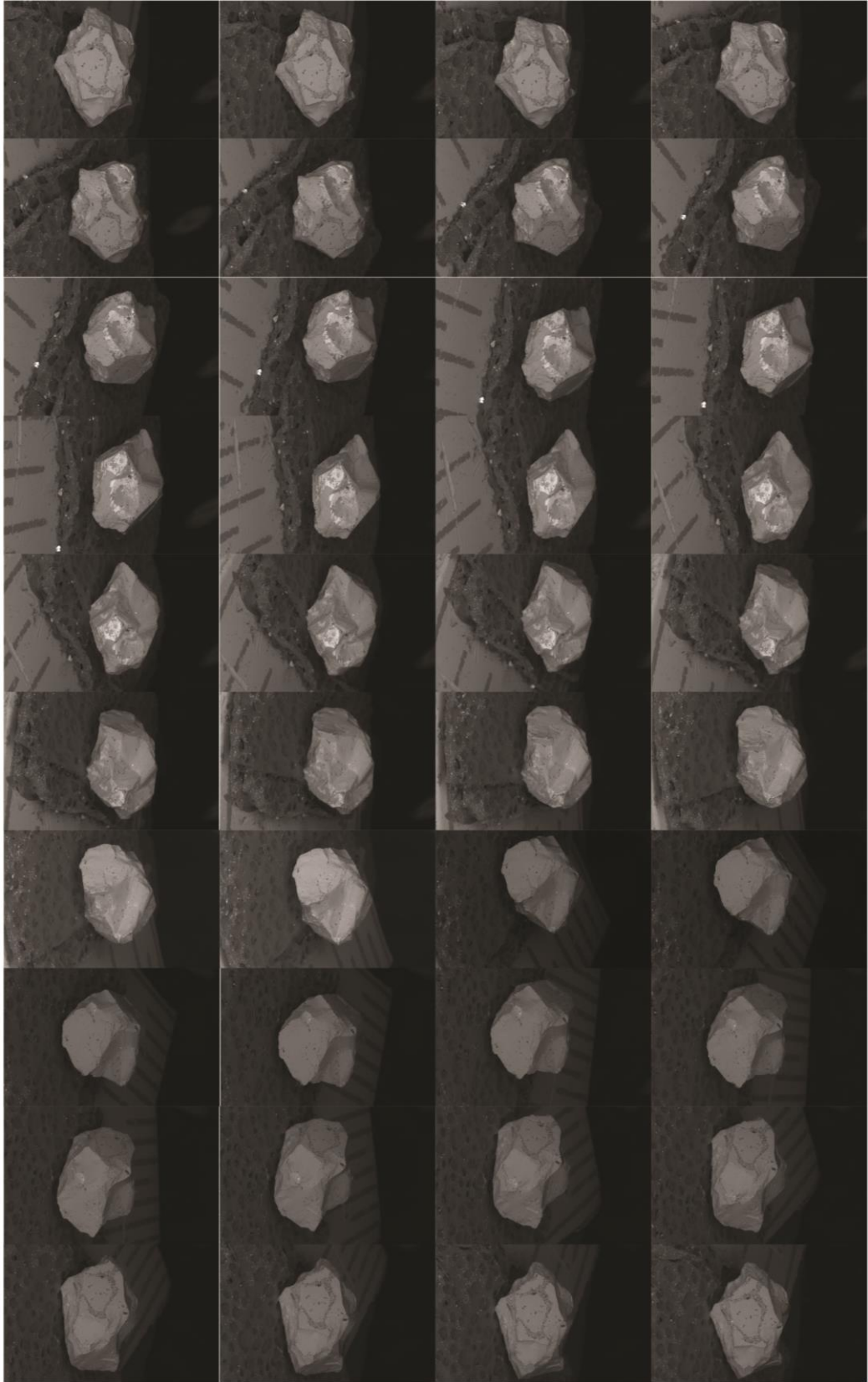
Lado 1 – 40 aquisições obtidas no MEV para a sequência da Fotogrametria



Lado 2 – 40 aquisições obtidas no MEV para a sequência da Fotogrametria



Lado 3 – 40 aquisições obtidas no MEV para a sequência da Fotogrametria



Lado 4 – 40 aquisições obtidas no MEV para a sequência da Fotogrametria