



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

INSTITUTO POLITÉCNICO DE LISBOA

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA DA SAÚDE DE LISBOA

RECONSTRUÇÃO 3D BIOMÉDICA: FOTOGRAMETRIA VERSUS VARRIMENTO POR LASER

(Final)

Vasco Miguel Nogueira Simões de Varennes e Mendonça

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Biomédica

Orientadores:

Professor Doutor João Milho (ISEL)

Professora Doutora Amélia Loja (ISEL)

MESTRADO EM ENGENHARIA BIOMÉDICA

Lisboa, setembro 2017

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
INSTITUTO POLITÉCNICO DE LISBOA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA DA SAÚDE DE LISBOA

RECONSTRUÇÃO 3D BIOMÉDICA: FOTOGRAMETRIA VERSUS VARRIMENTO POR LASER

(Final)

Vasco Miguel Nogueira Simões de Varennes e Mendonça

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Biomédica

Orientadores:

Professor Doutor João Milho (ISEL)
Professora Doutora Amélia Loja (ISEL)

MESTRADO EM ENGENHARIA BIOMÉDICA

Lisboa, setembro 2017

Direitos de Autor

RECONSTRUÇÃO 3D BIOMÉDICA: FOTOGRAMETRIA VERSUS VARRIMENTO POR LASER

Copyright© 2017 - Todos os direitos reservados: a Vasco Miguel Nogueira Simões de Varennes e Mendonça; Instituto Superior de Engenharia de Lisboa e Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa.

O Instituto Superior de Engenharia de Lisboa e a Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Durante este trabalho tive o apoio e a ajuda de diversas pessoas, sem os quais não teria sido possível realizar a minha tese de mestrado.

Agradeço imenso ao meu orientador, o professor João Milho, por todo o apoio ao longo da realização deste tese e opiniões para desbloquear certos impasses ao longo do processo. Obrigado por toda a confiança no meu trabalho, disponibilidade e apoio em todas as fases desta tese.

A professora Amelia Loja, co-orientadora desta tese, agradeço a sua disponibilidade e apoio na requisição do modelo do sacro, que foi fundamental para o estudo realizado.

Agradeço também a ESTSEL por ter facultado o fantoma físico do sacro e aos monitores Diogo Costa e Nuno Beites do laboratório M 1.21 do ISEL por toda a disponibilidade e ajuda.

A todos os meus colegas e amigos, João Cruz, Miguel Dias, Vanessa Mota, Mariana Melo, Ana Ramos e Daniela Caseiro, que sempre estiveram ao meu lado, o meu obrigado.

Sou muito grato a todos os meus familiares pelos incentivos recebidos ao longo dos anos e por todo o carinho demonstrado. Em especial, agradeço à minha tia Cândida, que me ofereceu um manual de fotografia essencial para a escrita de um capítulo; e à minha tia Ângela que se voluntariou para me ajudar na correção ortográfica de toda a tese.

Agradeço, também, à minha namorada Margarida por toda a sua dedicação e ajuda ao longo deste mestrado. Pelo seu amor incondicional, toda a partilha, por todas as conversas, conselhos e momentos de diversão. Que os últimos 2 anos sejam apenas o começo.

Por último, aos meus Pais, Pedro e Gabriela, e à minha irmã Mariana, obrigado por me motivarem sempre para atingir os meus objetivos, até mesmo aqueles que à partida, pensava não serem possíveis. Obrigada por toda a compreensão e amor, e por me proporcionarem os melhores momentos.

A todos, bem hajam.

Vasco Mendonça

Abstract

The main objective of this thesis is to study photogrammetry as a technique, and compare it to the laser scanning. A theoretical study of the two techniques as well as a practical study of photogrammetry was carried out. After these studies were carried out in order to check how they all worked, it was time to make some experiments with photogrammetry, and to take several groups of photos, with diverse setups and definitions. The objects used were a cube and a sacrum. With those photos and the help of a programme (Autodesk ReMake), models of the objects in the photos were extracted with photogrammetry algorithms.

For the conclusions, a reference model was obtained by means of a laser scanner, and all the other models were adjusted spatially to it, using a best fit method by getting hold of a programme (Geomagic) to allow the comparison between the models. The best result had a standard deviation of 0.289 mm. The main conclusion was that the models obtained by using photogrammetry maintain the proportions but do not maintain the scale 1:1 in relation to the real model. In theory, photogrammetry has potential for biomedical application, because it is a passive method and its data acquisition time can be close to zero, and the post processing can be done without the presence of the patients.

Key-words:

Three-dimensional scanning

Laser scanning

photogrammetry

Resumo

A comparação da digitalização 3D por fotogrametria com a digitalização 3D por varrimento por LASER permite avaliar a sua precisão relativa, visando concluir a possibilidade de aplicação em biomédica ou outras aplicações em que a precisão e rapidez de aquisição são necessárias. Para tal foi feito um estudo sobre estas duas tecnologias, após o qual foram realizados alguns testes práticos.

Em termos práticos foram realizados vários conjuntos de fotografias em condições diferentes e foram também efetuadas digitalizações 3D através de varrimento por laser para obter um modelo de referência. Os objetos digitalizados foram um cubo e um modelo anatómico de um sacro. Com o auxílio de uma aplicação de reconstrução utilizada em fotogrametria (Autodesk ReMake), foram obtidos modelos com base nos conjuntos de fotografias realizados. Adicionalmente foram feitas medições com um paquímetro no cubo utilizado como modelo. As restantes medições foram feitas através de programa de manipulação de modelos 3D (Geomagic versão trial e Autodesk ReMake).

Foi concluído que sem qualquer máquina dedicada para o auxílio no processo de fotogrametria e, por consequência, uma situação em que nem todas as condições foram controladas da melhor forma possível, obteve-se, nos casos mais favoráveis do sacro, um desvio padrão de 0,289 mm. Conclui-se, ainda, que modelos obtidos por fotogrametria mantêm as proporções, mas não mantêm a escala 1:1, em relação ao modelo real. Esta tecnologia tem um grande potencial em diferentes aplicações incluindo na engenharia Biomédica, na medida em que permite separar a etapa de aquisição da etapa de processamento das fotografias para uma fase posterior sem necessitar da presença dos pacientes.

Palavras-chave:

Digitalização tridimensional

Varrimento por Laser

Fotogrametria

Índice

Direitos de Autor.....	v
Agradecimentos	vii
Abstract.....	ix
Resumo.....	xi
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tabelas.....	xvii
Lista de Abreviaturas.....	xix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivação.....	1
1.2 Objetivos e Estrutura.....	5
2 Varrimento por LASER.....	7
2.1 Introdução	7
2.2 Aplicações.....	8
2.3 Princípios de funcionamento do varrimento por LASER	9
2.3.1 Tempo de voo	9
2.3.2 Diferença de fase	10
2.3.3 Triangulação	11
3 Fotogrametria.....	13
3.1 Introdução	13
3.2 Aplicações.....	14
3.3 Princípio de funcionamento.....	15
3.4 Câmaras digitais	19
4 Materiais e Métodos	23
4.1 Materiais	23
4.2 Métodos e resultados intermédios.....	24
5 Resultados e Discussão	41

5.1	Limitações e comparações.....	47
5.2	Protocolo digitalização e obtenção de modelo CAD fotogrametria	49
6	Conclusão	51
7	Bibliografia	53
8	Anexos	57
	Anexo 1	57
	Anexo 2	59
	Anexo 3	65
	Anexo 4	69
	Anexo 5	71
	Anexo 6	73
	Anexo 7	75
	Anexo 8	77
	Anexo 9	79
	Anexo 10	81
	Anexo 11	83
	Anexo 12	87
	Anexo 13	91
	Anexo 14	95
	Anexo 15	99
	Anexo 16	103
	Anexo 17	107
	Anexo 18	111
	Anexo 19	113
	Anexo 20	119
	Anexo 21	123
	Anexo 22	129
	Anexo 23	135
	Anexo 24	139
	Anexo 25	143
	Anexo 26	147
	Anexo 27	151
	Anexo 28	153

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Esquema representativo da metodologia.....	5
Figura 2.1 - Esquema comportamento raios Laser e fonte normal de luz, retirado e adaptado de [9].....	8
Figura 2.2 - Esquema da medição de distância por tempo de voo. Retirado e adaptado de [7]	9
Figura 2.3 - Esquema de medição por diferença de fase com laser retirado e adaptado de [7] nota: imagem não real, e apenas representativa, as ondas sinusoidais são o sinal laser, a parte vermelha no fundo é apenas uma representação para enquadramento do cenário.....	10
Figura 2.4 - Esquema triangulação – esquema adaptado de [13].....	12
Figura 3.1- Histograma Gerações fotogrametria, retirado e adaptado de [14] e [15].....	13
Figura 3.2 - Captação de 3 fotografias, múltiplos pontos de vista.....	16
Figura 3.3 – Marcadores (pontos) no cubo representativos do que face é vista por cada foto	17
Figura 3.4 - Pontos selecionados por algoritmo.....	17
Figura 3.5 - Reconstrução através de pontos encontrados.....	18
Figura 3.6 - Esquema abertura e relação com a luz. Imagem traduzida e retirada de [21] ...	19
Figura 3.7 - Esquema profundidade de campo, retirado e adaptado de [24].....	20
Figura 3.8 - distorções mais comuns, retirado e adaptado de [26].....	21
Figura 5.1 - cubo real de madeira com o fundo recortado, retirado do conjunto C 14.....	24
Figura 5.2 - cubo de madeira com base colorida, retirado do conjunto C 14.	27
Figura 5.3 - Esquema das condições de tiragem dos conjuntos com máquina fixa.	28
Figura 5.4 - Cubo com legendas indicativas do que foi considerado a altura, largura e comprimento. Estes foram os mesmos pontos posteriormente usados para medir no modelo 3D do varrimento por laser.	29
Figura 5.5 - Exemplos de modelo tratado, com cubo 3 e cubo 13, reconstruído por fotogrametria.	32
Figura 5.6 – Fotografias do modelo do sacro retiradas do conjunto S 10 c	33
Figura 5.7 - Fotografia do conjunto S 8, com barra fixa na lateral no lado direito.....	35

Figura 5.8 - Condições em que foram tirados os conjuntos de fotografias S 1 até S 7, com câmara fixa.....	37
Figura 5.9 - Fotografia real das condições de captação das fotografias referentes ao esquema da figura 5.8	37
Figura 5.10 - Condições em que foram tirados os conjuntos de fotografias S 8 até S 12.	38
Figura 6.1 - Ampliação do modelo do sacro obtido por varrimento, que demonstra as falhas na superfície. Modelo observado no Geomagic trial.	44
Figura 6.2 - Ampliação da base do modelo Sacro 6, obtido por fotogrametria. Modelo observado no Geomagic trial.....	45
Figura 6.3 - Resultado do teste de comparação entre o modelo obtido por varrimento por laser e o sacro 6. Todas as unidades são expressas em milímetros. Obtido no Geomagic trial....	46

Índice de Tabelas

Tabela 5.1 - Nome e características dos conjuntos. nota: resolução pixéis, é a resolução de cada fotografia tirada no conjunto, logo o número do pixéis dos conjuntos seria o número de fotografias multiplicado por a resolução de pixéis.....	25
Tabela 5.2 – Condições em que os conjuntos foram tirados e observações das fotografias obtidas.	26
Tabela 5.3 - Medições lados cubo de madeira real com paquímetro	28
Tabela 5.4 – Dados do Modelo 3D obtido através da digitalização usando varrimento por laser. As medições representadas na tabela contem o erro de operador, são distâncias medidas entre dois pontos selecionados manualmente.	29
Tabela 5.5 - Dados dos modelos 3D obtidos por fotogrametria, sem tratamento.....	30
Tabela 5.6 - Nome e características dos conjuntos de fotografias tiradas do sacro.....	34
Tabela 5.7 - Condições em que foram tiradas as fotografias do sacro	36
Tabela 5.8 – Dados das reconstruções por fotogrametria dos conjuntos de fotografias do sacro.	39
Tabela 5.9 - Dados do modelo 3D do sacro obtido por varrimento por laser	40
Tabela 6.1 - Resultados de comparações entre modelos do Cubo obtidos por fotogrametria e varrimento por laser. A tolerância máxima de desvio predefinida é de 1 mm.	42
Tabela 6.2 - Resultados de comparações entre modelos do Sacro obtidos por fotogrametria e varrimento por laser	43

Lista de Abreviaturas

3D – Tridimensional

LASER - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

CAD - *Computer-Aided Design*

STEP - *Standard for the Exchange of Product Data*

2D – Bidimensional

TOF – *Time of Flight*

INS - *Inertial Navigation System*

GPS - *Global Positioning System*

Lidar - *Light Detection And Ranging*

DVD - *Digital Video Disc*

BD - *Blu-ray Disc*

DSLR - *Digital Single-Lens Reflex camera*

CPU - *Central Processing Unit*

GPU - *Graphics Processing Unit*

1 Introdução

1.1 Enquadramento e motivação

O processo de digitalização representa uma das etapas mais importantes na engenharia inversa biomédica, na qual é realizada a recolha da informação, que permitirá a reconstrução geométrica 3D que caracteriza o objeto de estudo (dispositivo, órgão, etc.). A digitalização pode ser realizada, por exemplo, por varrimento por laser ou por fotogrametria. O varrimento por laser requer equipamento específico (digitalizador 3D) de custo mais elevado, quando comparado com a fotogrametria que requer apenas câmaras fotográficas de menor custo. Para que a fotogrametria possa representar uma solução viável na reconstrução 3D biomédica é da maior importância caracterizar a sua fiabilidade face ao varrimento por laser.

O varrimento por laser e a fotogrametria são duas técnicas que permitem recolher informação relativa à geometria, cor e texturas de objetos existentes e são utilizadas pela engenharia inversa. A engenharia inversa, referida neste trabalho, tem em vista obter modelos CAD (*Computer-Aided Design*). O interesse destes modelos digitais é o facto de poderem ser replicados, modificados ou analisados, sem interferir com o objeto original [1]. Processos de aquisição de dados, como o varrimento por laser e a fotogrametria, são considerados não intrusivos, mantendo a integridade dos objetos, e, neste contexto, podem também ser usadas como técnicas não destrutivas de análise.

Sendo um modelo CAD 3D uma representação digital de um objeto real, é possível efetuar diversos estudos, como interações com outros objetos, ou ser possível manipulação e impressão destes. Os modelos CAD 3D são complexos e podem representar os objetos de diversas formas, nomeadamente como sendo sólidos, superfícies ou nuvens de pontos. O alto sucesso e utilidade dos modelos CAD fez com que fosse implementado um protocolo STEP (**S**tandard for the **E**xchange of **P**roduct **D**ata) para a uniformização deste formato, permitindo, assim, que estes modelos possam ser abertos em diversos *softwares* de manipulação de modelos [2]. A tecnologia tem tido uma grande influência nos modelos CAD 3D, pois para a manipulação destes modelos 3D e análise dos mesmos é necessário um *hardware* capaz de efetuar os cálculos computacionais necessários.

Na medicina os modelos CAD 3D, são usados para, designadamente, para planeamento pré-operatório e criação de próteses. Na engenharia Biomédica os modelos CAD 3D proporcionam uma grande ajuda e facilitam o desenvolvimento de produtos ligados à medicina, como, por exemplo, produtos para implantes cirúrgicos. Estes modelos

possibilitam realizar uma prototipagem rápida, que consiste na impressão 3D de um modelo com que se possa interagir fisicamente. Estes modelos geralmente não contem a estrutura final nem a resistência final do objeto que se quer obter, mas são um passo intermédio para a criação de um protótipo final [2].

Os modelos CAD 3D podem ser criados de raiz ou serem obtidos através de digitalizações. Na medicina podemos obter modelos CAD através de imagens médicas, como as obtidas através de raio-X, tomografia computadorizada ou ressonância magnética. Estas imagens médicas são obtidas através de radiações ionizadas e conseguem obter informação do interior do corpo humano sem serem invasivas. Contudo, também é possível obter modelos CAD 3D através de métodos sem radiação ionizada, como é o caso do varrimento por LASER e da fotogrametria, no entanto, a informação do corpo humano obtida através destes métodos diz respeito apenas ao exterior do corpo humano, pois para obter informações do seu interior seriam necessárias intervenções invasivas.

Num cenário ideal, a transformação dos objetos reais em modelos CAD, teria o mínimo de intervenção humana e captaria na totalidade o objeto real. A meta final da engenharia inversa será obter uma máquina inteligente capaz de se adaptar a todos os cenários de digitalização, no entanto, a situação atual ainda se encontra longe disso [1].

Atualmente, existem diferentes tipos de digitalizadores que tiram partido do varrimento por laser. Nestes sistemas, os feixes LASER são usados para obter as distâncias necessárias para caracterizar geometrias e construir um modelo 3D de um determinado objeto, independentemente das suas dimensões [3]. As principais técnicas de aquisição dos pontos da superfície do objeto através de varrimento são: o tempo de voo, a triangulação ou a diferença de fase [4].

A fotogrametria utiliza fotografias de um objeto para obter um modelo 3D do mesmo e tem evoluído exponencialmente com a tecnologia. A qualidade dos equipamentos de captação, como uma câmara digital (sensor ótico, lente), e a capacidade de processamento da informação captada são os dois pontos base da fotogrametria [5]. A qualidade das fotografias tiradas depende das características da máquina digital, mas também depende, grandemente, de um conjunto de regras que garantem que haja referências e pontos que permitam a correlação entre fotografias. Uma fotografia isolada não tem significância, pois estas representações bidimensionais (2D) da realidade não contêm informação necessária para a extração de modelos 3D. Contudo, um conjunto de fotografias com correlações entre si pode ser usado por algoritmos que extraem modelos 3D através destas fotografias.

A digitalização é o processo de tornar uma pintura, imagem, texto, objeto ou sinal analógico num código digital, sendo que o produto da digitalização é uma representação digital de algo real.

Quando se trata de objetos, os processos são baseados na medição de distâncias, de modo a recriar de forma discreta a superfície do objeto alvo. Estas digitalizações são, normalmente, representadas por uma nuvem de pontos ou por uma superfície formada por polígonos triangulares, sendo os vértices destes os pontos da nuvem.

Classificação dos métodos de digitalização ou medição de distâncias:

O varrimento por laser e a fotogrametria são métodos de medição óticos. Estes podem ser classificados e organizados de diversas formas [6].

Métodos passivos ou ativos:

- Passivos - não possuem uma fonte de luz própria, e usam a luz do ambiente para adquirir informações do objeto. Estes métodos são seguros e não intrusivos.
- Ativos - tem uma fonte de luz própria usada para iluminar o objeto. Nesta classificação, os métodos mais importantes são os métodos de diferença de fase, geométricos (Triangulação) e de tempo de voo (TOF – *Time of Flight*).

Métodos de obtenção de dados de forma direta ou indireta:

- Direta - dá a medição de uma distância exata a um ponto do objeto.
- Indireta – tem como base imagens a partir das quais se procura obter a distância relativamente a um ponto do objeto.

Método monocular ou múltiplos pontos de medida:

- Monocular - um único ponto de vista.
- Múltiplos pontos - vários pontos de vista do objeto.

A técnica de digitalização realizada através de qualquer uma destas técnicas (varrimento por laser ou fotogrametria) pode ser classificada ainda como estática ou dinâmica:

- Uma digitalização é estática quando o ponto de recolha de dados (digitalizador) se encontra fixo na mesma posição durante uma digitalização.
- Uma digitalização é dinâmica quando o digitalizador se move recolhendo dados de diferentes perspetivas do objeto a digitalizar [7]. Estes métodos, muito frequentemente, usam sistemas adicionais de auxílio para obtenção da posição do mesmo, como sistemas de

posicionamento INS (*Inertial Navigation System*ⁱ [8]) ou GPS (*Global Positioning System*), de modo a facilitar a análise dos dados [7]. A posição de captação dos dados da digitalização ajuda no pós-processamento dos dados, visto se ter a noção espacial da posição de onde estes foram recolhidos em relação ao objeto que se pretende digitalizar.

Desta forma, é possível classificar os dois métodos de estudo presentes neste trabalho.

O varrimento por laser é um método ativo, direto e com múltiplos pontos de vista. Depende da emissão do feixe laser para obter distâncias exatas até à superfície do objeto (método ativo e direto), sendo realizado com o digitalizador fixo, recorrendo a uma base rotativa para obter múltiplos pontos de vista do objeto.

A fotogrametria é um método passivo, indireto e com múltiplos pontos de vista. Neste processo, são tiradas fotografias de vários pontos de vista, em redor do objeto alvo, sendo o processamento para criação de uma representação digital feito posteriormente (método indireto). Contudo, a técnica utilizada pode ser estática ou dinâmica e, desta maneira, mudar de aplicação para aplicação. No âmbito da engenharia biomédica, a utilização deste método de forma estática, com múltiplos pontos de vista, seria o método mais vantajoso, uma vez que esta situação permitiria melhores resultados, devido a uma maior facilidade no controlo dos parâmetros da digitalização.

O interesse da comparação entre estes dois métodos está relacionado com os custos da tecnologia e o tempo de digitalização dos objetos. A comparação entre o varrimento por laser e a fotogrametria permitirá verificar o nível de precisão das digitalizações feitas por fotogrametria, avaliando a sua viabilidade como alternativa ao varrimento por laser. Este apresenta como vantagens o facto de ser um método teoricamente mais barato, que exige menos tempo de captação dos dados necessários para a criação de modelos CAD.

Os modelos utilizados na comparação são um cubo de madeira e um modelo anatómico do sacro facultado pela ESTSEL. O cubo foi escolhido por ser um hexaedro regular facilitando a medição do modelo real com um paquímetro. O modelo anatómico do sacro é um bom exemplo no que respeita a uniformidade da cor, a forma complexa e os orifícios (buracos sagrados) que representam um desafio. O sacro é, assim, um caso muito complexo de digitalizar.

ⁱ *Inertial Navigation System* usa um computador, sensores de movimento (acelerómetros) e sensores de rotação (giroscópios) para calcular continuamente a posição de um objeto em movimento sem referências externas [8]

1.2 Objetivos e Estrutura

O objetivo deste trabalho é a avaliação da fiabilidade da fotogrametria no processo de digitalização para reconstrução 3D biomédica. O trabalho assenta na comparação da fotogrametria com o varrimento laser no processo de digitalização e na respetiva reconstrução 3D de dispositivos biomédicos.

A presente tese encontra-se estruturada em sete capítulos, ao longo dos quais é trabalhado o conceito de engenharia inversa; a classificação dos métodos de digitalização; o estudo do varrimento por laser e da fotogrametria, com uma introdução às estas duas tecnologias; os materiais utilizados; os métodos e resultados intermédios obtidos; resultados finais, bem como uma análise destes e sua conclusão.

O capítulo 1 é introdutório, contendo a contextualização, a motivação e os objetivos do trabalho.

No capítulo 2 apresentam-se a introdução LASER, suas origens, propriedades, aplicabilidades e princípios de funcionamento do varrimento por LASER.

O capítulo 3 contém a introdução a fotogrametria, suas origens, aplicabilidades e princípios de funcionamento. Estes princípios de funcionamento são ilustrados com figuras explicativas do processo realizado pelos algoritmos de reconstrução 3D.

No capítulo 4 é feita uma comparação teórica entre o varrimento por LASER e a fotogrametria, tendo em conta os dados apresentados nos capítulos 2 e 3.

No capítulo 5 encontram-se os materiais utilizados para a realização dos estudos práticos, como a metodologia e os resultados intermédios obtidos. Na Figura 1.1 encontra-se o esquema da metodologia.

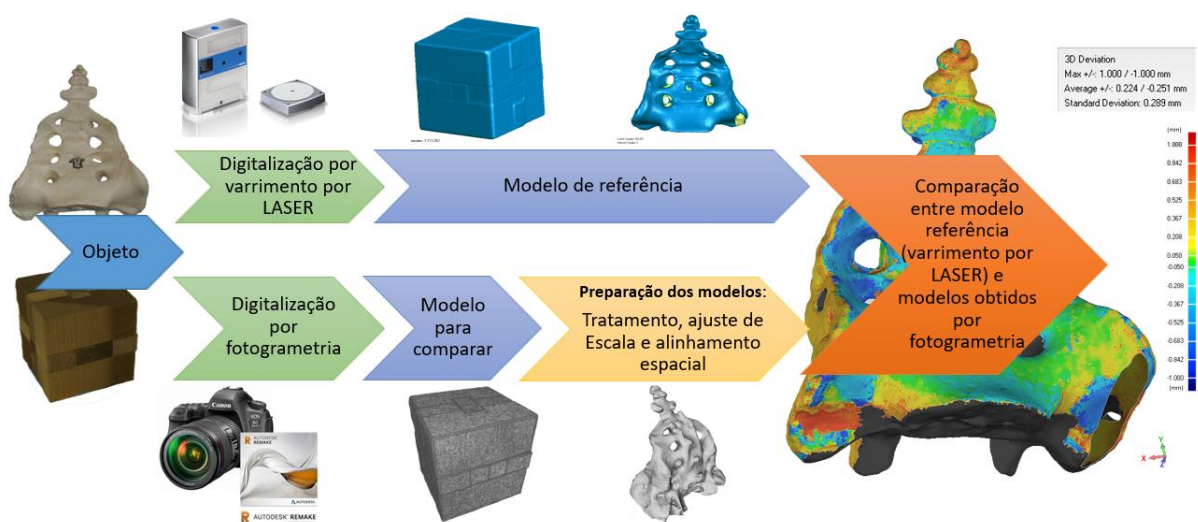


Figura 1.1 - Esquema representativo da metodologia.

É no capítulo 6 que são apresentados os resultados finais bem como a sua análise.

Por último, no capítulo 7, é feita uma conclusão com base nos resultados e no estudo teórico.

2 Varrimento por LASER

2.1 Introdução

A digitalização por varrimento LASER permite a obtenção de informação da superfície de um objeto ou ambiente, sendo possível, com esta recolha de dados, recriá-lo digitalmente. Uma das grandes vantagens do laser é a capacidade de recolha de um número muito elevado de amostras, constituindo estas amostras as distâncias relativamente à superfície do objeto [7].

O LASER (acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) tem ao longo do tempo vindo a demonstrar um enorme potencial para múltiplas aplicações como giroscópios, sistemas de medição de distância e digitalização. Os estudos e formulação dos conceitos teóricos básicos do laser deram o prémio nobel da física, em 1964, a três cientistas, o americano Charles Hard Townes, e a dois soviéticos, Alexander Mikhailovich Prokhorov e Nikolai Gennediyevich Basov [9]. Contudo o primeiro laser, operacional e funcional, aparece em 1960, numa experiência demonstrativa levada a cabo pelo cientista Theodore Harold Maiman [9] [10].

O LASER é uma fonte de luz, com propriedades muito específicas em que as ondas de sinal são coerentes, colimadas e monocromáticas, ou seja, elas têm um comprimento de onda igual e bem definido, percorrem grandes distâncias, com muito pequenas diferenças na fase, e todos os feixes de ondas são paralelos entre si, isto permite que o sinal tenha um espectro estreito, conseguindo, assim, emitir uma única cor. Este tipo de característica permite uma alta direccionalidade, e não é encontrado na natureza [9]. Na Figura 2.1 apresenta-se o esquema representativo destas propriedades do laser em comparação com uma fonte de luz normal (lâmpada, sol).

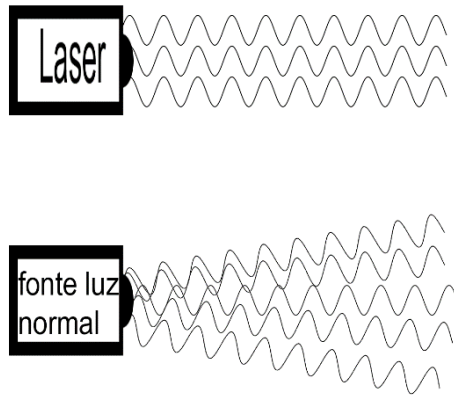


Figura 2.1 - Esquema comportamento raios Laser e fonte normal de luz, retirado e adaptado de [9]

2.2 Aplicações

O LASER tem aplicabilidade em muitas áreas e permite resolver muitos problemas devido às suas propriedades únicas. A ilustrar esta aplicabilidade apresenta-se uma lista de algumas aplicações mais comuns do laser: [7] [9]

- Medidores de distância;
- Sistema de defesa: sistema anti mísseis e guia de mísseis;
- Comunicações: fibra ótica, transmissões debaixo de água (máximo 500m, água limpa e clara);
- Radares: Lidar (Light Detection And Ranging), reconhecimento aéreo;
- Giroscópio em anel laser (bom para medir pequenos ângulos de rotações em objetos em movimento);
- Cirurgia na Medicina e construção de semicondutores: corte, furos e pequenos pormenores muito precisos em materiais;
- Tratamentos estéticos: remoção de tatuagens, remoção de pelos;
- Imagem: projetores, hologramas, fotografia ultrarrápida (9mil *frames* por segundo);
- Sismografia: dez vezes mais preciso que métodos convencionais;
- Impressoras;
- Gravação e leitura de informação: DVD (Digital Video Disc), BD (blu-ray disc);
- Digitalização
- Sistemas de monitorização: usado em processos industriais;

2.3 Princípios de funcionamento do varrimento por LASER

Os três princípios de funcionamento em que se baseia a medição de distância para uma digitalização tridimensional (3D) por varrimento por laser são: tempo de voo, diferença de fase e triangulação [7]. A captação das distâncias é efetuada com vários ângulos em torno do objeto fazendo os 360 graus. Após esta fase, os dados são agregados através de processamento por software, produzindo uma malha final que representa a superfície do objeto.

2.3.1 Tempo de voo

Esta técnica baseia-se no “tempo de voo”, isto é, no tempo que um pulso de sinal demora desde que é emitido, até que é recebido no receptor. A Figura 2.2 apresenta uma representação esquemática de uma medição por tempo de voo.

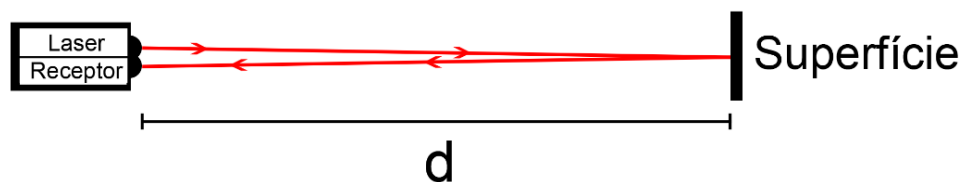


Figura 2.2 - Esquema da medição de distância por tempo de voo. Retirado e adaptado de [7]

É possível usar este parâmetro de tempo, sendo conhecidos todos os outros parâmetros necessários, visto haver controlo do emissor, e a velocidade da luz aproximada ser conhecida ($c = 299\,792\,458$ m/s). Com isto obtém-se a distância:

$$d = \frac{c \times t}{2} \quad (2.1) [7]$$

Onde,

d – Distância (metros)

c – Constante da velocidade da luz (299 792 458 m/s)

t – Tempo de voo (nota: $t > t_{\text{pulso}}$)

A divisão por 2 na expressão 2.1 é devida ao tempo de voo ser contabilizado desde a emissão do sinal até ao seu retorno, o que dará uma distância entre o ponto refletido e a origem do laser duas vezes superior, como pode ser visto na Figura 2.2.

Para este processo é necessário um microprocessador, com uma função cronómetro, para contar o tempo entre o sinal emitido e sinal recebido. A distância mínima possível de

medição é a do tamanho do pulso emitido, para garantir que o pulso é emitido por completo antes da chegada do pulso refletivo ao recetor. Este método utiliza o tamanho do pulso emitido para verificar a chegada do mesmo. Em curtas distâncias a perda de energia do pulso é negligenciável.

2.3.2 Diferença de fase

O cálculo de uma distância através da diferença de fase ($\Delta\phi$) é um método semelhante ao de tempo de voo, sendo todos dos parâmetros, à partida, conhecidos, a exceção de um que será observável, neste caso, o parâmetro a observar é a fase do sinal refletido. Para esta técnica, é necessário modelar o sinal controlando, assim, a fase do sinal transmitido [7]. As modelações mais comuns são por amplitude (AM) e por frequência (FM). Neste método, para comparação de fases, é usada a modelação AM [6]. Na Figura 2.3, está representado um esquema possível da medição por diferença de fase, sendo possível observar que a fase do sinal emitido é diferente do refletido na superfície.

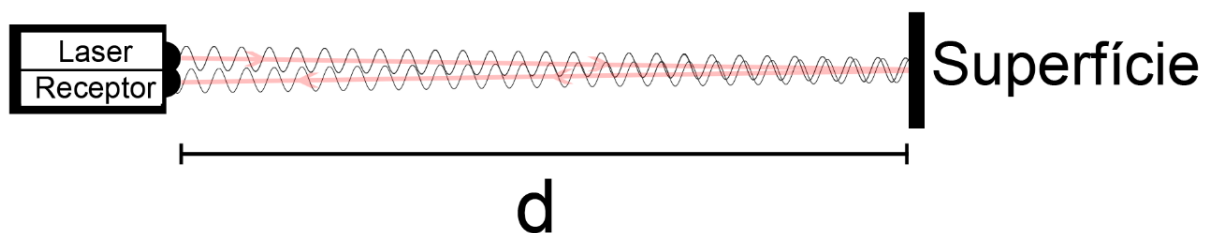


Figura 2.3 - Esquema de medição por diferença de fase com laser retirado e adaptado de [7] nota: imagem não real, e apenas representativa, as ondas sinusoidais são o sinal laser, a parte vermelha no fundo é apenas uma representação para enquadramento do cenário.

A vantagem deste método em relação ao tempo de voo é a possibilidade de medir distâncias mais curtas, pois o método não depende do tamanho do pulso emitido.

O método consiste num sinal modelado através de parâmetros conhecidos, como por exemplo a frequência ou a amplitude, que é emitido e, posteriormente, refletido e captado por um receptor. Assim, pode-se obter a diferença de fase entre a fase do sinal recebido (ϕ_{rx}) e a fase do sinal transmitido (ϕ_{tx}), através da diferença de fase ($\Delta\phi$) dada por: [7] [11]

$$\Delta\phi = \phi_{rx} - \phi_{tx} \quad (2.2)$$

A relação entre a diferença de fase, frequência modelada (f_{tx}) e o tempo de voo (t), é dada por:

$$t = \frac{\Delta\phi}{2\pi f_{tx}} \quad (2.3) [7]$$

Relacionando as expressões 2.1 e 2.3, consegue-se obter a relação entre a distância, a frequência transmitida e a diferença de fase, dada por:

$$d = \frac{c \times \Delta\phi}{4\pi f_{tx}} \quad (2.4) [7]$$

Onde,

d – Distância (metros)

c – Constante da velocidade da luz (299 792 458 m/s)

f_{tx} – Frequência do sinal modelado transmitido

$\Delta\phi$ – Diferença de fase

À semelhança do cálculo da distância a partir do tempo de voo, também neste caso, todos os dados são controlados ou são observáveis como a fase do sinal recebido (ϕ_{rx}), o que permite o cálculo da distância, o único valor não conhecido, à partida.

2.3.3 Triangulação

A triangulação é um método que permite a determinação de distâncias ou posições de objetos a partir de considerações baseadas na geometria de triângulos semelhantes. Este trabalho, baseia-se na medição de distância entre dois pontos conhecidos, um emissor de laser e um sensor ótico, o captor da câmara digital. A Figura 2.4 é um esquema ilustrativo do princípio da triangulação, onde através do conhecimento da distância (A) e dos dois ângulos (α e β) se pode calcular a distância (D) a um terceiro ponto, o objeto. [12] A expressão que representa as relações trigonométricas do triângulo apresentado é dada por:

$$\frac{A}{\sin \gamma} = \frac{D}{\sin(\beta)} = \frac{C}{\sin(\alpha)} \quad (2.5) [7]$$

O ângulo da câmara (α) pode ser determinado observando a posição do laser no seu campo de visão [7].

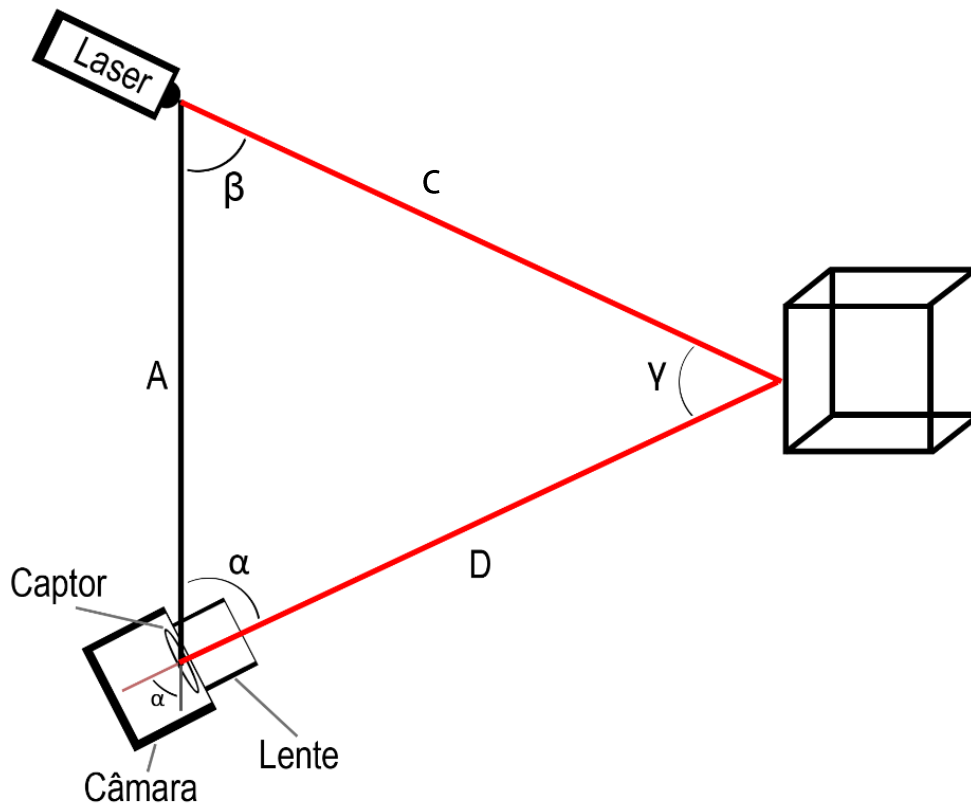


Figura 2.4 - Esquema triangulação – esquema adaptado de [13]

Ao esquema representativo da Figura 2.4 associam-se as expressões, para cálculo da distância:

$$D = A \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} = A \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2.6) [12]$$

em que A é a distância entre o emissor LASER e o captor da câmara, β e α são os ângulos entre o feixe de LASER e a reta formada pelo alinhamento do emissor LASER e do captor da câmara (reta da distância A). γ é o ângulo de reflexão do raio LASER no objeto alvo.

3 Fotogrametria

3.1 Introdução

A fotogrametria é muito influenciada pelos avanços tecnológicos, a nível da eletrónica e computadores [14]. Os princípios básicos continuam a ser os mesmos desde os primeiros pioneiros [15], embora atualmente mais desenvolvidos.

“A fotogrametria é a ciência de obter informações coerentes e fidedignas sobre propriedades de objetos e superfícies sem contacto físico com estes, sendo possível retirar medidas e interpreta-las.” [14]

A primeira fotografia foi realizada por Joseph Nicephore Niépce. Essa fotografia precisava de uma exposição de oito horas. A primeira fotografia considerada prática, devido a não necessitar de um tempo de exposição demasiado grande, foi realizada por Jacques Mandé Daguerre em 1837. Em 1840, o físico francês François Jean Arago começou a defender que o uso da fotogrametria seria possível, usando o método fotográfico de Jacques Mandé Daguerre [15].

Os desenvolvimentos da fotogrametria podem ser observados na Figura 3.1, com os quatro patamares mais importantes desta tecnologia.

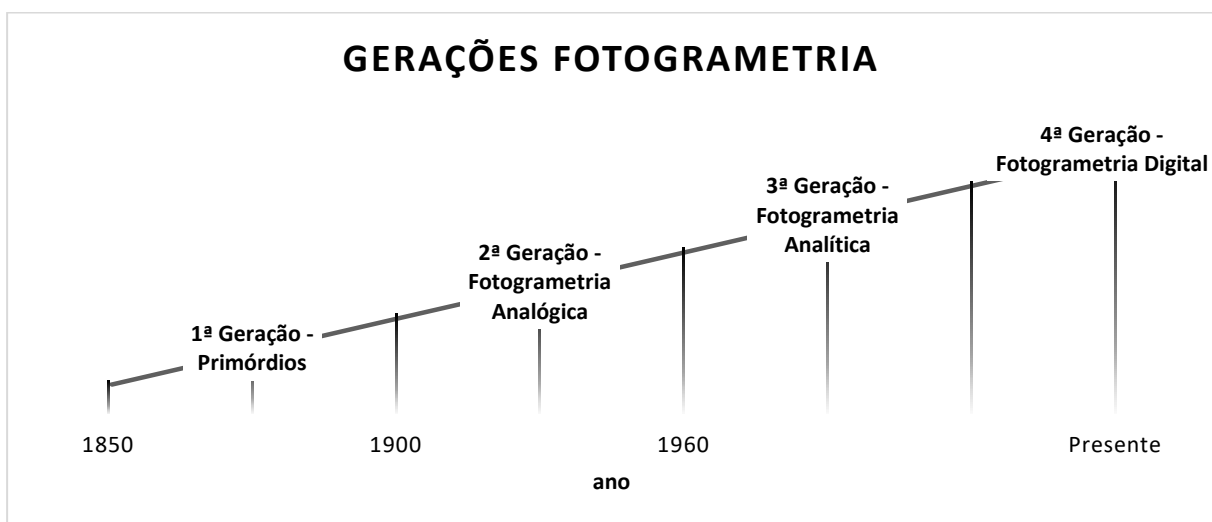


Figura 3.1- Histograma Gerações fotogrametria, retirado e adaptado de [14] e [15].

As primeiras aplicações foram realizadas com imagens aéreas. Conseguir obter noções de relevo exatas do território chamou a atenção da potencialidade na sua aplicação militar. Em 1855, Félix Nadar (Gaspard Felix Tournachon, fotógrafo francês) obteve as primeiras imagens aéreas, tiradas de um balão de ar quente. A primeira aplicação verdadeiramente militar foi feita em 1859, na preparação para a batalha de Solferino para reconhecimento do terreno. Este reconhecimento terá sido ordenado a Félix Nadar pelo imperador francês Napoleão III [15].

A primeira fotografia aérea feita num avião para cartografia, e não apenas para reconhecimento de território, foi realizada pelo capitão Cesare Tardivo. Este apresentou estas imagens e esse estudo, na conferência internacional *Society of Photogrammetry*, Vienna, em 25 de setembro de 1913 [15].

Os desenvolvimentos mais importantes na fotogrametria foram no âmbito da cartografia e topografia, e tiveram lugar entre a primeira e segunda guerra mundial, devido ao grande avanço tecnológico na aviação e na fotografia [14].

A 4ª Geração é onde se encaixa este estudo. A fotogrametria digital tem tido grandes avanços, em grande parte relacionados com o aumento de capacidade de processamento dos computadores. Este aumento na capacidade de processamento tem possibilitado o desenvolvimento de aplicações cada vez mais complexas.

3.2 Aplicações

O avanço tecnológico permite à fotogrametria aumentar exponencialmente o seu leque de aplicações. Num mundo em que cada vez mais se recorre à tecnologia digital, uma técnica como esta permite que seja criada uma *interface* entre o mundo físico e digital. A fotogrametria tem uma característica muito importante: ser um método de digitalização passivo, que recorre a algoritmos para transformar imagens em duas dimensões num modelo em três dimensões. O tempo de captação da informação é muito curto, e pode mesmo ser instantâneo, permitindo captar mais que objetos inanimados. Um exemplo seria a possível digitalização de um ser vivo sem necessidade da sua imobilização.

A fotogrametria tem sido aplicada na criação de mapas 3D, hoje em dia, ao consultar mapas digitais (ex. *google maps*, *google earth*, *Microsoft bing maps*), estes fornecem muitas cidades já em 3D, conseguindo-se ver fachadas de edifícios e suas formas geométricas. Estes modelos de cidades a três dimensões são úteis, entre outras áreas, a nível de turismo, de turismo virtual, de planeamento urbano (ex. modelos de riscos urbanos, arquitetura visual, telecomunicações), de sistemas de navegação e de transportes inteligentes [16].

Na arqueologia existe um grande interesse na fotogrametria e esta começa a ser muito utilizada, visto tratar-se de um método não intrusivo. Com isto consegue-se criar modelos de objetos encontrados e mesmo de ruínas, visando o estudo, a replicação, a reconstrução e a conservação destes [17]. Outras aplicações possíveis encontram-se no domínio do conhecimento tais como: a arquitetura, a indústria, a análise forense, a análise de movimento e a ortoprotesia [18].

3.3 Princípio de funcionamento

A ideia básica da fotogrametria digital é conseguir obter informação a partir de um conjunto de fotografias (duas dimensões) que permita a reconstrução da superfície de um objeto, criando um modelo 3D [19]. Para que isto seja possível, existem certos pré-requisitos necessários, tais como a sobreposição de informação entre fotografias. Isto é necessário pois só assim será possível encontrar pontos comuns entre fotografias.

A uniformidade de luz, preferencialmente difusa de forma a não obter sombras nos objetos, a quantidade de pixéis, ou a informação de cada fotografia também são fatores importantes para que se consiga obter mais pormenores e detalhes na reconstrução.

Uma imagem digital não passa de uma matriz, com as informações de cada pixel. Os algoritmos de reconstrução por fotogrametria procuram os pontos comuns entre estas matrizes. Aqui pode-se afirmar que o pilar desta técnica é o poder de processamento, pois um conjunto de fotografias com 1 megapixel (1 milhão de pixéis) cada uma teria no mínimo várias dezenas de milhões de pixéis a comparar. A complexidade destes cálculos exige computadores com uma capacidade de processamento elevado.

Neste trabalho, o menor conjunto de fotografias tem 25 fotografias, cada uma com uma resolução de 3820x2160 pixéis, resultando assim em 8.294.400 (~8,3 megapixéis). Isto faz com que tenham de ser comparados 207 milhões de pixéis ou 25 fotografias com 8,3 milhões de elementos.

Nas Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 representa-se esquematicamente o processo geral realizado pelos algoritmos de reconstrução 3D em fotogrametria digital. No esquema também é evidenciada a necessidade da sobreposição referenciada. De notar que este processo é meramente exemplificativo pois com 3 fotografias não seria possível a reconstrução total de um objeto.

A Figura 3.2 representa o processo de captação de 3 fotografias com ângulos diferentes do objeto, neste caso um cubo. As 3 fotografias são representadas com cores diferentes, a fotografia 1 (**foto 1**) tem uma janela azul, a fotografia 2 (**foto 2**) uma janela verde, a fotografia 3 (**foto 3**) uma janela vermelha.

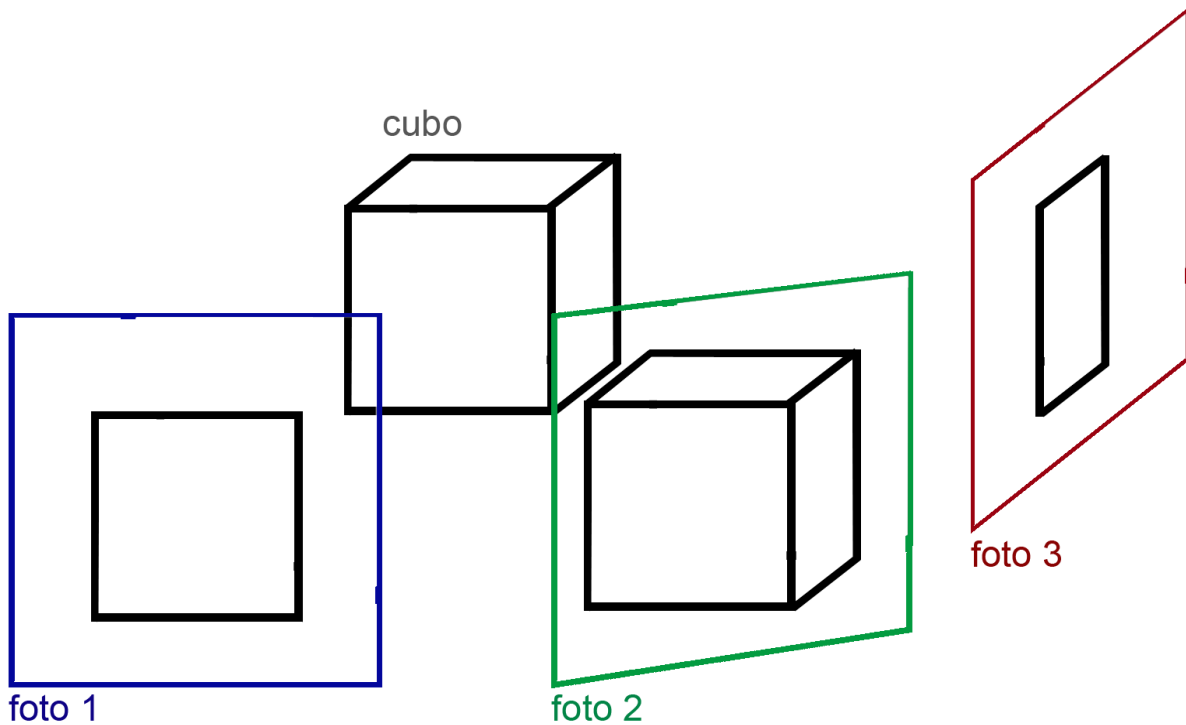


Figura 3.2 - Captação de 3 fotografias, múltiplos pontos de vista.

A Figura 3.3 representa um cubo (objeto alvo) com marcadores (pontos) de cores azul (**foto 1**), verde (**foto 2**) e vermelho (**foto 3**). Estes marcadores estão colocados nas faces do cubo demonstrando que face é vista por cada foto. Estes marcadores são uma previsão muito simplificada de alguns pontos que o algoritmo de reconstrução iria considerar. Tendo em conta que este exemplo é generalista, os marcadores são representativos de eventuais características que o cubo poderia ter nas suas faces, como cores na superfície.

Caso o objeto a digitalizar seja completamente simétrico e todo com um tom de cor uniforme, os algoritmos de reconstrução não conseguiriam identificar corretamente os pontos de correlação entre fotografias, fazendo com que não fosse possível uma reconstrução bem-sucedida.

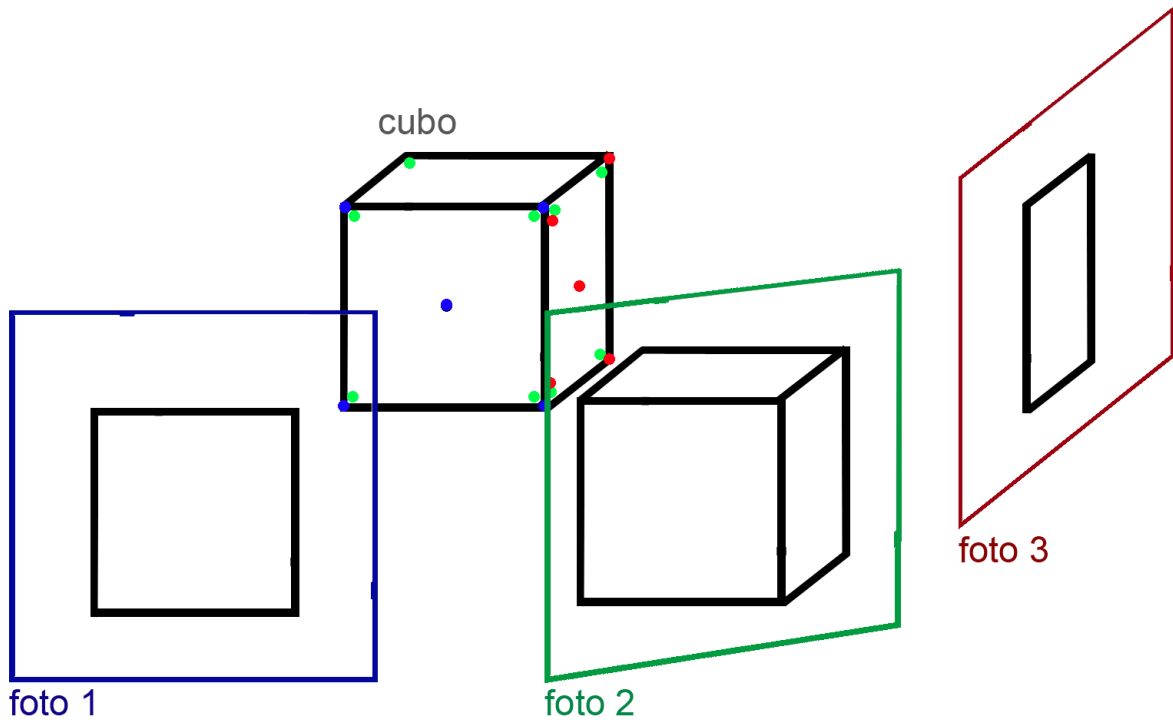


Figura 3.3– Marcadores (pontos) no cubo representativos do que face é vista por cada foto

A Figura 3.4 demonstra, de uma forma muito simplificada, a correlação que o algoritmo iria estabelecer e as características que iria selecionar, em cada fotografia. Com a sobreposição temos pontos comuns entre as fotografias, neste caso, o elo de ligação entre as três fotografias é a **foto 2**.

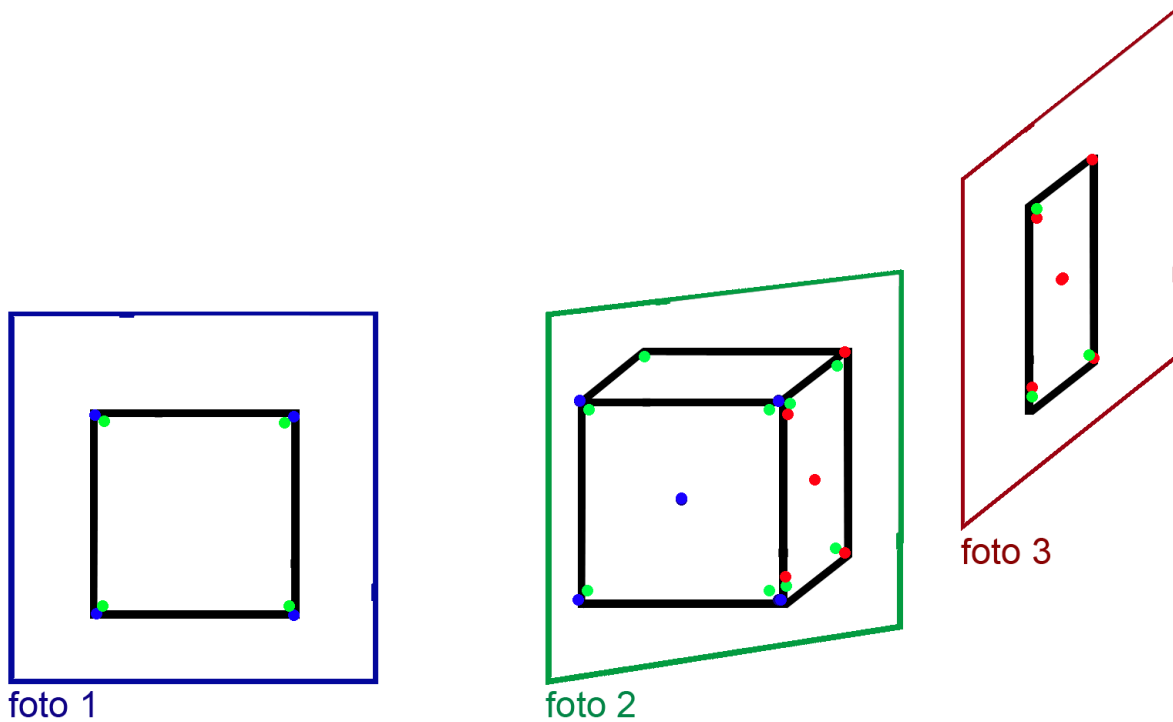


Figura 3.4 - Pontos selecionados por algoritmo

Numa ultima fase, a Figura 3.5 representa a junção das três fotografias a partir dos marcadores (pontos), conseguindo assim reconstruir as três faces do cubo alvo da Figura 3.2. Esta junção das imagens é como se estas fossem coladas umas às outras usando os pontos específicos da mesma cor entre fotografias.

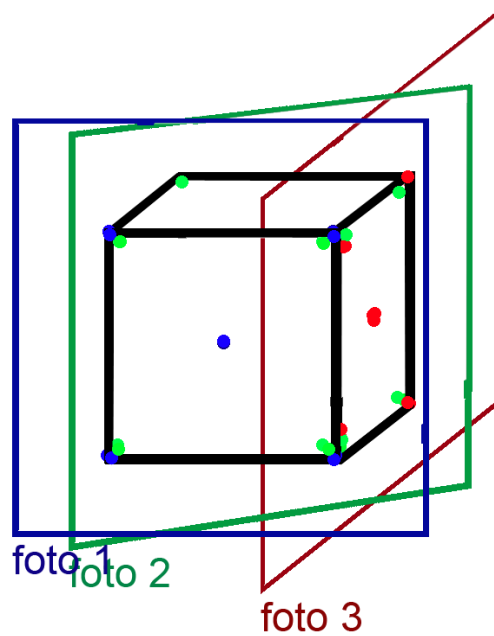


Figura 3.5 - Reconstrução através de pontos encontrados

Este é, pois, o processo para a obtenção de modelos 3D. No exemplo considerado apenas foram utilizadas 3 fotografias, mas para uma reconstrução de um objeto completo em 3D são necessários mais ângulos e perspectivas, de modo a conseguir ter uma cobertura total do objeto. Se não houvesse sobreposição entre a **foto 2** e as restantes fotografias nunca teria sido possível concretizada a reconstrução. Isto demonstra a importância da sobreposição entre fotografias, criando, assim, correlações entre as fotografias do conjunto.

3.4 Câmaras digitais

Neste subcapítulo é feita uma breve análise de algumas características e definições ajustáveis das máquinas digitais que influenciam as fotografias e por consequência a fotogrametria digital.

As características e definições abordadas são: Abertura, profundidade de campo, sensibilidade à luz (ASA, DIN e ISO), velocidade, lente e deformações, número de megapixéis.

Abertura: é representada por um rácio entre a abertura (**f**) e distância de foco (**n**) (**f/n**, ex: $f/2$, $f/8$, $f/16$). Sendo que **f** (abertura) representa a abertura do diafragma que se encontra no interior do corpo da máquina digital. A figura 3.6 demonstra a relação entre a abertura, sua designação e a luz que esta deixa passar para o sensor da câmara digital [20] [21] [22].

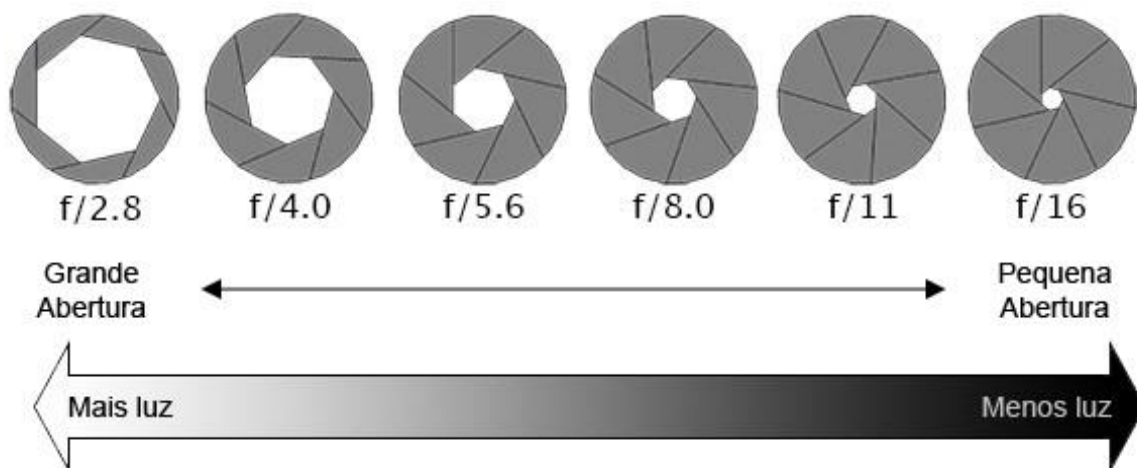


Figura 3.6 - Esquema abertura e relação com a luz. Imagem traduzida e retirada de [21]

Profundidade de campo: é inversamente proporcional à abertura. Quanto menor a abertura maior será a profundidade de campo. A profundidade de campo é o conjunto de distâncias em que os pixéis se distinguem e formam uma imagem nítida. A Figura 3.7 representa um esquema explicativo da profundidade de campo, o seu efeito e a relação com a abertura representada na Figura 3.6 [20] [23].

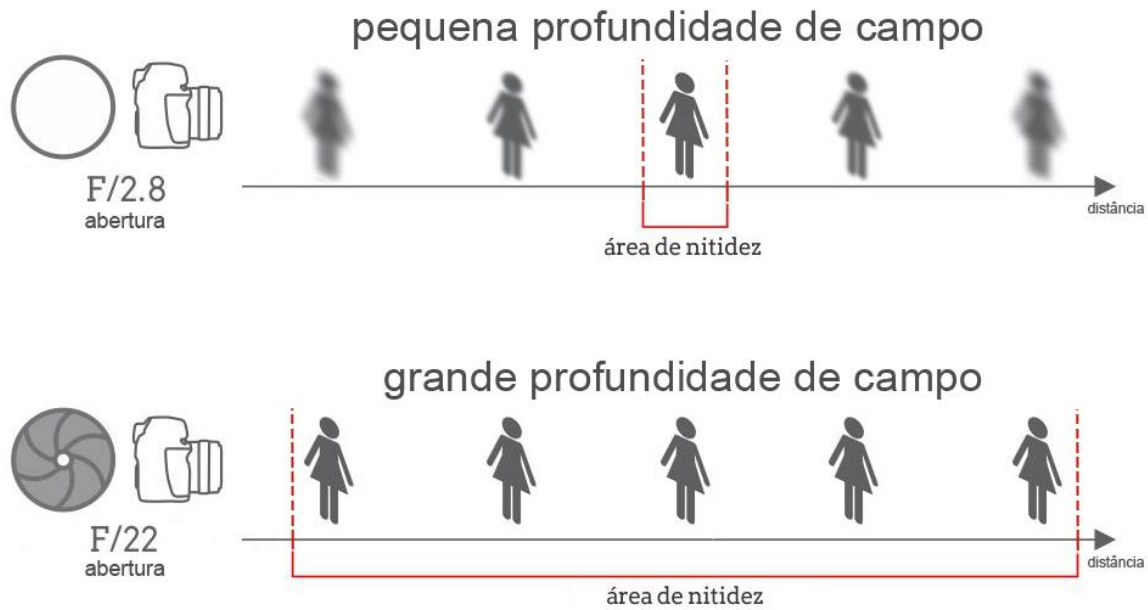


Figura 3.7 - Esquema profundidade de campo, retirado e adaptado de [24]

Sensibilidade a luz do sensor ótico: é um parâmetro que pode ser ajustado, e é medido em ASA, DIN ou ISO. Sendo o mais antigo o ASA, e é uma escala aritmética, e o DIN uma escala logarítmica. A escala de medida mais recente combina a aritmética e o logarítmico, e é designada como ISO. Uma sensibilidade maior provoca efeitos secundários, com o aumento de ruído na imagem [21].

Velocidade: representa a velocidade de abertura e fecho do obturador que controla o tempo de exposição da luz ao sensor ótico, quanto maior a velocidade menor tempo de exposição à luz. Este parâmetro é medido em frações de segundos. Como exemplo, uma grande velocidade é útil perante um cenário em que não haja hipótese da utilização de um tripé, suporte ou estabilizador, pois a captura da fotografia é feita em frações de segundos, fazendo com que o risco das fotografias saírem desfocadas seja menor [20] [21].

Distorções: podem ser introduzir nas imagens através das lentes, sendo que há lentes em que estas distorções são praticamente nulas, mas em equipamentos de qualidade inferior estas distorções podem existir. O diafragma impede que os raios de luz oblíquos passem pelo centro da objetiva e, como as superfícies das lentes não são paralelas nos bordos, a luz que forma a imagem inclina-se. Na Figura 3.8 são representados os dois extremos das distorções mais comuns: a distorção forma de barril e forma de almofada [20] [25].

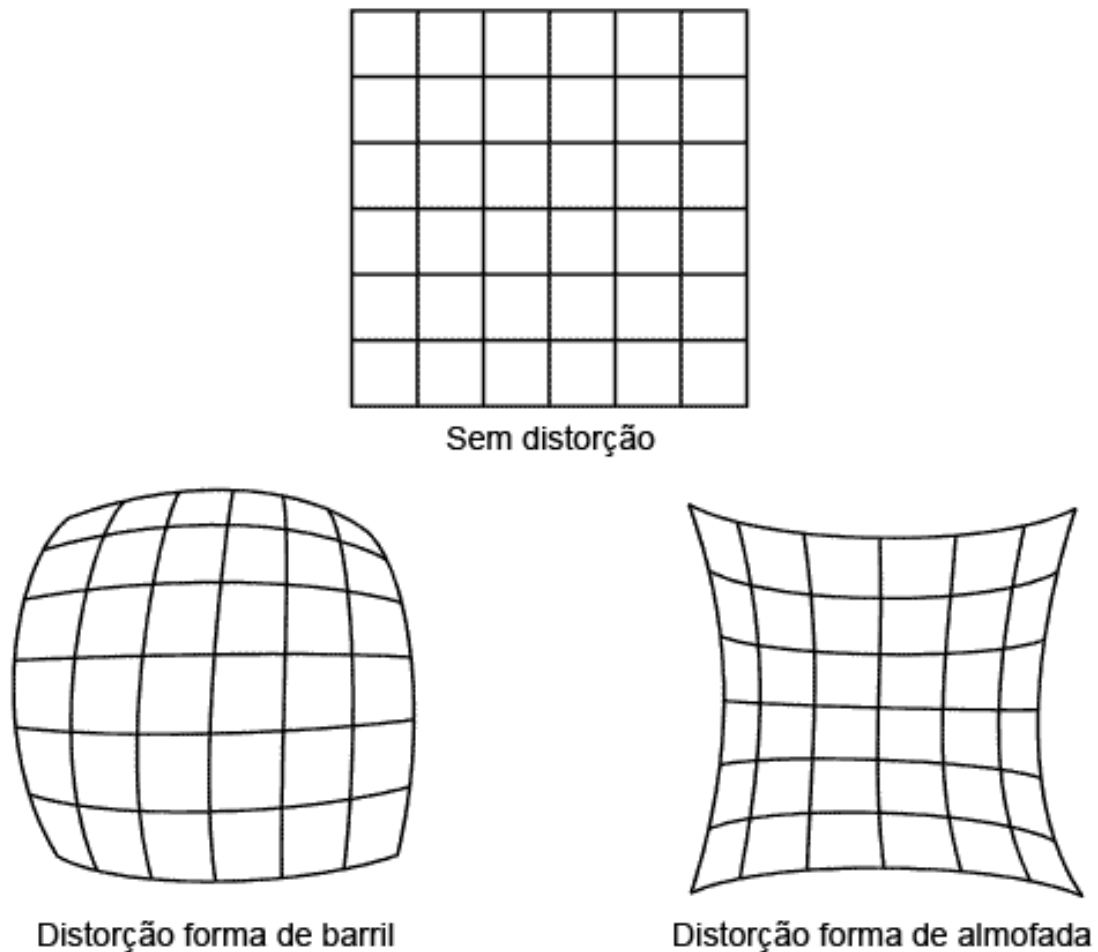


Figura 3.8 - distorções mais comuns, retirado e adaptado de [26]

Megapixéis: representam o número de pixéis, em milhões, que a máquina consegue reproduzir nas fotografias captadas. Este valor é diretamente proporcional ao número de sensores na matriz do sensor ótico. Numa câmara digital (DSLR), o tamanho da matriz é maior podendo atingir centímetros de largura e altura, em comparação com os telemóveis em que a matriz atinge apenas milímetros, se não micromilímetros de largura e altura. Isto faz com que estes sensores, mesmo tendo a mesma quantidade de megapixéis, tenham densidades de pixéis diferentes. O megapixel não mede a qualidade da imagem, apenas mede o número de “pontos” onde é captada a informação [22].

4 Materiais e Métodos

4.1 Materiais

Os materiais utilizados na parte pratica foram: Digitalizador laser (NextEngine 3D scanner), câmara digital (Canon EOS 6D, telemóvel nexus 6), tripé, computador, Autodesk ReMake, VisualSFM, Geomagic, cubo de madeira, sacro.

- Digitalizador de varrimento por laser: *NextEngine 3D scanner*. Este tem como características uma precisão de $\pm 0,127$ mm com uma janela de aquisição de 129,54 x 96,52 mm (*“Macro mode”*) e $\pm 0,381$ mm com uma janela de aquisição de 342,9 x 256,54 mm (*“Wide mode”*). A velocidade máxima de aquisição de pontos é de 50.000 pontos/seg. Como nota de segurança de utilização, refere-se que a intensidade do laser (classe 1M) é 1/1000 da intensidade de um ponteiro laser, ao mesmo tempo que se alerta o utilizador para não olhar para o feixe de laser emitido.
- Câmara digital profissional: Canon EOS 6D Mark II tem como características 20 Megapixéis, tamanho do sensor ótico 35.8 x 23.9 mm, resolução máxima 5472 x 3648 pixéis, tamanho de pixel 6.54 μm e uma limitação máxima limitada por difração da luz de f/10.5.
- Câmara digital de qualidade inferior: Telemóvel Nexus 6, parceria da Google com a Motorola, modelo lançado em 2014. Características da câmara, 13 Megapixéis, tamanho do sensor ótico 4.69 x 3.53 mm, resolução máxima 4160 x 3120 pixéis, tamanho do pixel 1.12 μm , abertura máxima f/2.
- Tripé: Velbon VX-501, com ajuste vertical, horizontal e ângulos possíveis para o equipamento montado no tripé.
- Computador: Placa gráfica Nvidia gtx 980 4gb de GDDR5, processador Intel i5-3450 e 16gb de RAM.
- Software: Para reconstrução de modelos por fotogrametria, Autodesk ReMake licença académica e VisualSFM *open-source*. Para manipulação de modelos, tratamento e comparação, Autodesk ReMake permite funções básicas, para funções avançadas o Geomagic como versão *trial*, visto não ter sido fornecida uma licença académica, nem uma resposta por parte da empresa ao contacto feito por e-mail (1 julho, 2017).
- Modelos utilizados para comparação entre a fotogrametria e o varrimento por LASER são: um cubo de madeira e um modelo anatómico do sacro facultado pela ESTSEL. O cubo foi escolhido por ser um hexaedro regular facilitando a medição do modelo real

com um paquímetro. As suas características de cores semelhantes dificultam a fotogrametria, visto não evidenciarem devidamente as diferenças entre si de modo a facilitar a correlação entre imagens. O modelo anatómico do sacro é um bom exemplo no que respeita a uniformidade da cor, a forma complexa e os orifícios (buracos sagrados) que representam um desafio. O sacro é, assim, um caso muito complexo de digitalizar.

4.2 Métodos e resultados intermédios

O primeiro passo considerado consistiu no teste e exploração dos princípios básicos da fotogrametria. Para este efeito foi selecionado um cubo sem grandes variações de cores. A Figura 4.1 apresenta este objeto escolhido. O interessante nesta fase é conseguir observar e perceber qual a influencia de certos parâmetros para obter uma digitalização bem-sucedida através da fotogrametria.



Figura 4.1 - cubo real de madeira com o fundo recortado, retirado do conjunto C 14.

Foram reconstruídos 16 cubos a partir de 15 conjuntos de fotografias, num total de 615 fotografias. As diferenças entre estes conjuntos são vários tipos de máquinas digitais, lentes, número de fotografias, base colorida para auxiliar o processo de fotogrametria, máquina fixa ou não. Na Tabela 4.1, estão os 15 conjuntos e as características de captação relacionadas com a máquina utilizada. Todas as fotografias tiradas com Canon EOS 6D foram realizadas com foco manual, sendo este foco mantido na aquisição de um conjunto completo. Os nomes dos conjuntos têm uma letra seguida de um número que corresponde à ordem em que foram tirados os conjuntos, e a letra representa a primeira letra do nome do modelo usado, neste caso o **C** de cubo. A cor do sombreado do conjunto indica se o conjunto foi retirado com o telemóvel (verde claro) ou com a máquina digital (azul claro).

Tabela 4.1 - Nome e características dos conjuntos. nota: resolução pixéis, é a resolução de cada fotografia tirada no conjunto, logo o número do pixéis dos conjuntos seria o número de fotografias multiplicado por a resolução de pixéis.

Nome conjunto	Número fotografias (resolução pixéis)	câmara fixa	câmara	lente	Abertura (f/n)	Velocidade (segundos)	ISO
C 1	27 (3840x2160)	Não	Telemóvel nexus 6	4mm	f/2	1/60	179
C 2	25 (3840x2160)	Não	Telemóvel nexus 6	4mm	f/2	1/30	338
C 3	32 (2340x4160)	Não	Telemóvel nexus 6	4mm	f/2	1/12	337
C 5	23 (2340x4160)	Não	Telemóvel nexus 6	4mm	f/2	1/17	310
C 6	29 (2340x4160)	Não	Telemóvel nexus 6	4mm	f/2	1/20	321
C 7	26 (5472x3648)	Não	Canon EOS 6D	24mm	f/9	1/50	3200
C 8	32 (5472x3648)	Não	Canon EOS 6D	70mm	f/9	1/50	3200
C 9	37 (2340x4160)	Não	Telemóvel nexus 6	4mm	f/2	1/17	319
C 10	48 (5472x3648)	Não	Canon EOS 6D	70mm	f/11	1/30	6400
C 11	48 (5472x3648)	Sim	Canon EOS 6D	24mm	f/11	1/4	1600
C 12	72 (5472x3648)	Sim	Canon EOS 6D	70mm	f/8	1/4	1600
C 13	72 (5472x3648)	Sim	Canon EOS 6D	70mm	f/8	1/4	1600
C 14	48 (5472x3648)	Sim	Canon EOS 6D	35mm	f/8	1/4	1600
C 15	48 (5472x3648)	Sim	Canon EOS 6D	100mm	f/8	1/4	1600
C 16	48 (5472x3648)	Sim	Canon EOS 6D	100mm	f/8	1/4	1600

A Tabela 4.1 apresenta as características das máquinas e parâmetros usados nas fotografias. O conjunto C4 não existe e foi saltado devido a ter sido criado um modelo adicional a partir do conjunto C 3, antes d ter sido decidido a nomenclatura dos conjuntos. A tabela 5.2 apresenta as condições em que os conjuntos foram obtidos. Esta informação dá um maior detalhe sobre o que foi feito e irá ser útil na comparação e análise dos resultados.

Estes conjuntos do cubo, C 1 ao C 16, encontram-se em no Anexo 1 até ao Anexo 9.

Tabela 4.2 – Condições em que os conjuntos foram tirados e observações das fotografias obtidas.

Nome conjunto	Base papel	Condições de luz	Condições das fotografias	Número de ângulos
C 1	Com texto	Não uniforme	Algumas com ruído / desfocadas	2
C 2	Com texto	Não uniforme	Algumas com ruído / desfocadas	2
C 3	Com símbolos azuis	Não uniforme	Algumas com ruído / desfocadas	2
C 5	Com símbolos coloridos	Não uniforme	Uma foto com cubo cortada numa extremidade	2
C 6	Com símbolos coloridos	Uniforme holofote led 20w	Boas, mas fotografias a menos	2
C 7	Com símbolos coloridos	Uniforme holofote led 20w	Fotografias a menos	2
C 8	Com símbolos coloridos	Uniforme holofote led 20w	Fotografias a menos	2
C 9	24 Cores diferentes, circular	Uniforme holofote led 20w	Algumas com ruído / desfocadas	2
C 10	24 Cores diferentes, circular	Uniforme holofote led 20w	Algumas com ruído / desfocadas	2
C 11	24 Cores diferentes, circular	Uniforme holofote led 20w	Boas, fundo branco	2
C 12	24 Cores diferentes, circular	Uniforme holofote led 20w	Boas, fundo branco	2
C 13	24 Cores diferentes, circular	Uniforme holofote led 20w	Boas, fundo branco	2
C 14	24 Cores diferentes, circular	Uniforme holofote led 20w	Boas, fundo branco	2
C 15	24 Cores diferentes, circular	Uniforme holofote led 20w	Boas, fundo branco	2
C 16	24 Cores diferentes, circular	Uniforme holofote led 20w	Boas, fundo branco	2

No decorrer destes testes, concluiu-se que uma base colorida poderia ajudar na reconstrução, pois estas cores iriam ajudar o programa a encontrar pontos comuns entre fotografias, mesmo que os objetos não apresentassem características muito distintas. A ideia inicial era apenas a de ter cores nos cantos da base para estas aparecerem no máximo de fotografias possível. No entanto, para auxiliar os utilizadores com os ângulos de fotografias para garantir uma sobreposição foi criada uma base circular com os ângulos definidos por cores, sendo assim criada a base final. O **Anexo 10** e a Figura 4.2 apresenta a base colorida

criada, sendo esta constituída por 24 cores variadas que dividem os 360 graus, marcando assim 24 ângulos ou 48 ângulos usando a barreira entre cores.



Figura 4.2 - cubo de madeira com base colorida, retirado do conjunto C 14.

Na Figura 4.2 é possível observar a base rotativa (base preta), por cima a base colorida impressa numa folha A4 e a cartolina branca que envolve a base rotativa e proporciona um fundo uniforme. Também é possível observar que as condições de luz nesta fotografia, retirada do conjunto C 14, são boas e que não apresentam sombras devido a ter uma boa iluminação difusa.

A Figura 4.3 apresenta um esquema do ambiente em que foram tiradas as fotografias. Para este fim, foi utilizada uma máquina digital fixa num tripé, uma base rotativa envolvida numa cartolina branca onde foram colocados os objetos, tendo sido a iluminação conseguida através de um holofote led de 20 watts. O holofote está apontado à parede oposta ao Cubo para garantir uma luz difusa no mesmo. A cartolina branca em volta da base rotativa permite ter um fundo uniforme sem detalhes que sejam suscetíveis de ser usados como referências falsas pelos algoritmos de reconstrução.

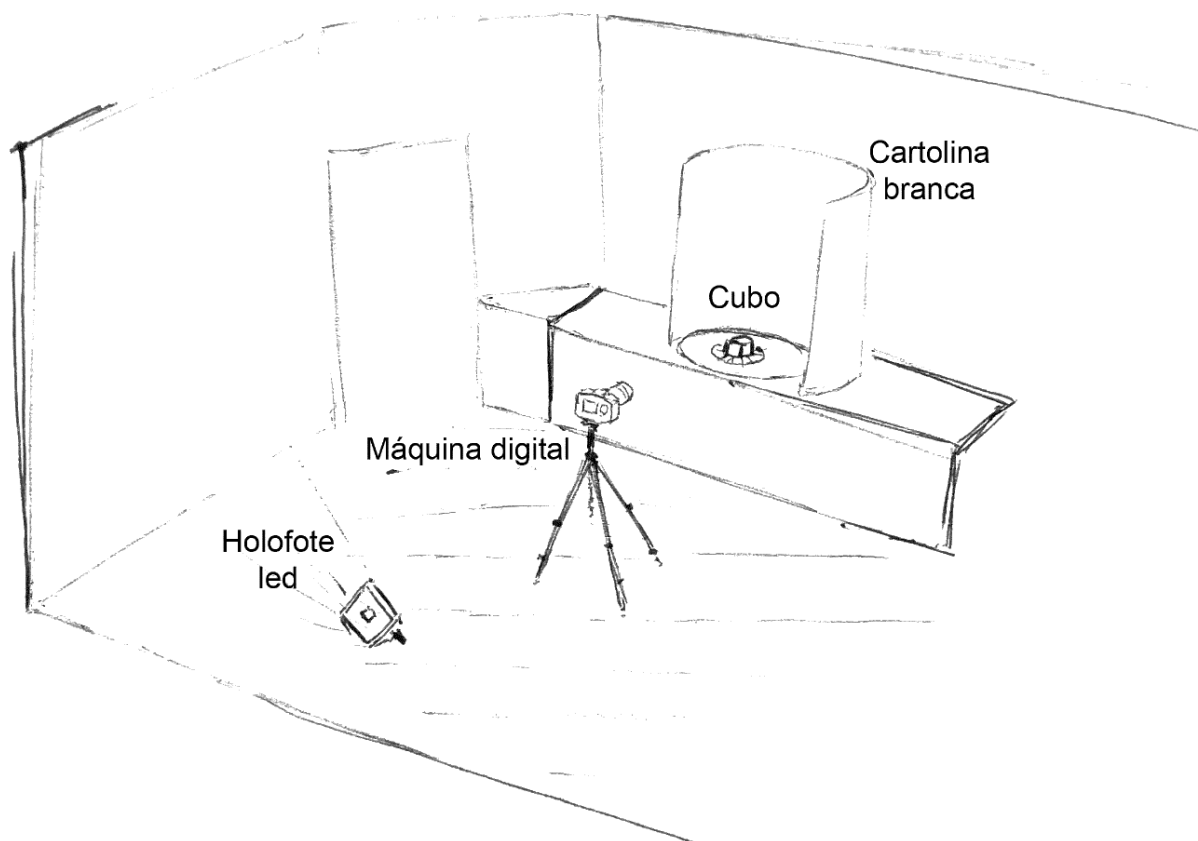


Figura 4.3 - Esquema das condições de tiragem dos conjuntos com máquina fixa.

No caso do cubo de madeira utilizado, a medição do modelo real é possível, usando um paquímetro. Assim, foram feitas medidas do comprimento, da altura e da largura do cubo. Estas medidas encontram-se na Tabela 4.3. A Figura 4.4 apresenta o cubo real com legendas do que foi considerado altura, largura e comprimento.

Tabela 4.3 - Medições lados cubo de madeira real com paquímetro

Nome	Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Cubo de madeira	43,72	43,94	43,58

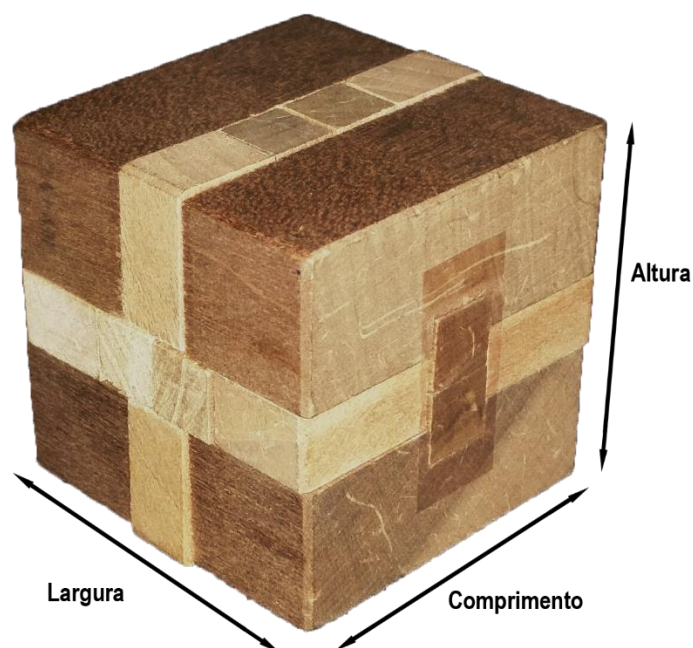


Figura 4.4 - Cubo com legendas indicativas do que foi considerado a altura, largura e comprimento. Estes foram os mesmos pontos posteriormente usados para medir no modelo 3D do varrimento por laser.

Uma digitalização 3D usando varrimento por LASER também foi realizada para ser utilizada como referência aos modelos reconstruídos. Esta digitalização demorou cerca de uma hora. A Tabela 4.4 contém os dados da digitalização 3D do cubo por varrimento por LASER.

Tabela 4.4 – Dados do Modelo 3D obtido através da digitalização usando varrimento por laser. As medições representadas na tabela contêm o erro de operador, são distâncias medidas entre dois pontos selecionados manualmente.

Nome do modelo	Número triângulos que constituem a superfície	Número vértices	Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Cubo digitalização laser	1 085 226	555 189	44,51	44,25	43,70

Recorrendo ao *software* de reconstrução 3D, foram obtidos os modelos 3D a partir dos conjuntos de fotografias realizados. Nos dois primeiros cubos reconstruídos (cubo 1 e cubo 2) foi utilizado o “123 3d catch” da Autodesk no telemóvel. Essa linha de *software* gratuito foi descontinuada e substituída pelo Autodesk ReMake, sendo este um programa pago e apenas suportado no computador, contudo, foi cedida uma licença académica gratuita para este trabalho.

Os resultados das reconstruções nem sempre contêm apenas o objeto pretendido, os algoritmos de reconstrução recriam tudo o que conseguem com a informação que obtêm a partir das fotografias. Através de um ambiente controlado na realização das fotografias, pode

evitar-se que existam muitas partes indesejadas na reconstrução. A base em que é colocado o objeto também é, inevitavelmente, reconstruída e, por vezes, vem “colada” ao objeto, mas sendo indesejada tem necessariamente de ser retirada. É, portanto, necessário um tratamento específico dos modelos reconstruídos, para eliminar tudo o que não faça parte do objeto em estudo. Na Tabela 4.5, encontram-se os dados dos modelos reconstruídos sem tratamento.

Tabela 4.5 - Dados dos modelos 3D obtidos por fotogrametria, sem tratamento.

Nome conjunto	Nome modelo 3D reconstruído	Número triângulos que constituem a superfície	Número vértices	Deformação
C 1	cubo 1	179 253	91 090	Sim, grave
C 2	cubo 2	275 028	139 992	Sim, grave
C 3	cubo 3	508 302	275 727	Sim, ligeira
C 3	cubo 4	349 864	189 642	Sim, grave
C 5	cubo 5	52 299	28 449	Sim, muito grave
C 6	cubo 6	192 871	103 799	Sim, ligeira
C 7	cubo 7	265 300	145 550	Sim, muito grave
C 8	cubo 8	161 237	87 305	Sim, grave
C 9	cubo 9	226 866	121 739	Sim, grave
C 10	cubo 10	553 715	297 622	Sim, grave
C 11	cubo 11	141 733	76 868	Sim, muito grave
C 12	cubo 12	963 805	522 590	Não
C 13	cubo 13	574 683	317 553	Não
C 14	cubo 14	674 163	364 404	Não
C 15	cubo 15	1 178 252	631 331	Não
C 16	cubo 16	534 207	288 215	Não

Foi considerada uma deformação no modelo 3D. Todo o tipo de falhas que, claramente, deixam o modelo 3D muito diferente do real, sem que se recorra a programas para identificar essas diferenças, corresponde a uma deformação. **Uma deformação pode classificar-se conforme se indica:**

- **Ligeira:** Se ocorrem pequenas deformações que modificam ligeiramente as faces. (Exemplo face que seria plana, estar com ligeiros altos ou baixos).
- **Grave:** Se ocorrem buracos na superfície ou alguma face do objeto se encontra em falta.
- **Muito grave:** Se não existe objeto, ou se apenas se formou uma face ou duas faces do mesmo. Contudo, a falta da superfície da base não é contabilizada, pois não há fotografias da base para a reconstruir.

Os **cubo 3** e **cubo 4** tiveram como base o mesmo conjunto de fotografias para a sua reconstrução, mas as definições de reconstrução usadas foram diferentes. Servindo isto de teste para verificar as diferenças das definições. O cubo 3 teve como parâmetros “surface: detailed; and resolution: fine” e o cubo 4 teve “surface: smooth; and resolution: coarse”. Parâmetros do Autodesk ReMake, que constituem os seus próprios extremos.

O tempo necessário para as reconstruções 3D depende do computador utilizado, das opções de reconstrução, do número de fotografias e do número de pixéis das fotografias. As configurações de reconstrução foram selecionadas para o maior detalhe possível, sendo estas configurações as que levam a um maior tempo de processamento. O fator que mais influencia o tempo de reconstrução é o poder de processamento do computador utilizado, quanto mais poder menor tempo de reconstrução. Neste estudo, as reconstruções demoraram entre 30 minutos e 4 horas. Com o avanço da tecnologia irá sempre haver uma tendência de redução dos tempos de reconstrução. O tempo total que uma reconstrução demora é difícil de monitorizar, pois o computador em que estas reconstruções foram feitas não é uma máquina dedicada apenas para este propósito e, como tal, não é garantido que os recursos (CPU e GPU) estivessem todos dedicados ao máximo para a aplicação usada, o Autodesk ReMake.

Na Figura 4.5 encontra-se um exemplo de dois modelos anteriores ao tratamento e pós-tratamento. Nos retângulos da esquerda encontra-se o modelo sem qualquer tratamento, ou seja, acabado de ter sido processado pelos algoritmos de reconstrução. É visível que existem partes que não são o cubo, apesar de o cubo estar centrado no cenário, para obter apenas o cubo, como é visível à direita da figura, é necessário usar ferramentas de um programa que permita editar modelos 3D (ex. Geomagic trial ou Autodesk ReMake), de modo a seleccionar e eliminar toda a informação que não é desejada.

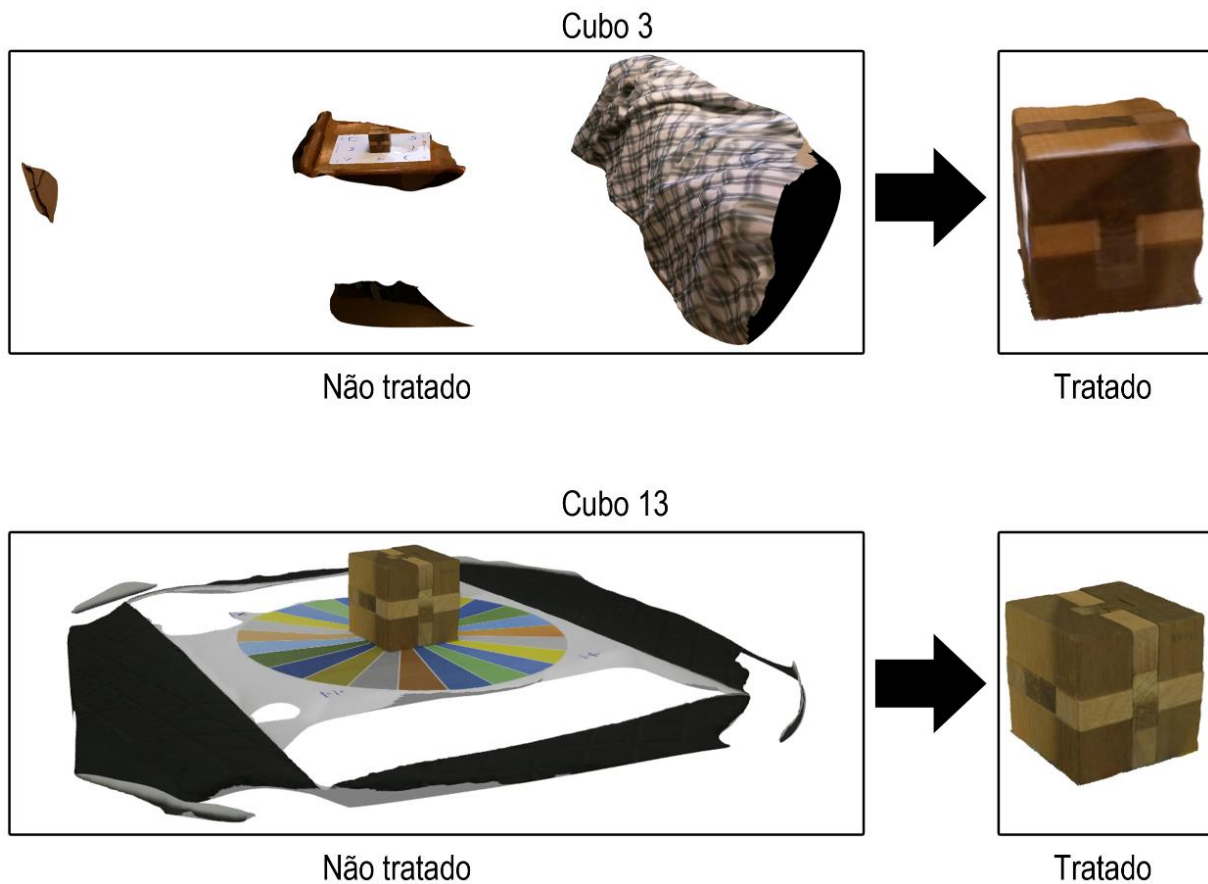


Figura 4.5 - Exemplos de modelo tratado, com cubo 3 e cubo 13, reconstruído por fotogrametria.

Com o auxílio de um programa de edição 3D (Geomagic trial), é possível colocar ambos os modelos na mesma escala e alinhá-los espacialmente, para que haja uma sobreposição entre eles. Para facilitar esta tarefa, foi usado o modelo 3D obtido por varrimento por LASER como modelo de referência, sendo o modelo obtido por fotogrametria o que irá ser ajustado em escala e alinhado espacialmente com o de referência. Após estas manipulações, é possível fazer uma análise da distância a que os pontos das superfícies dos modelos estão entre si e do desvio existente associado. Este será o processo final para obtenção dos dados de comparação direta entre os modelos por varrimento por laser e por fotogrametria. Este processo tem de ser repetido para todos os modelos obtidos por fotogrametria.

O processo descrito anteriormente é repetido para o sacro. Foram tirados 12 conjuntos de fotografias, mas 3 destes conjuntos tiveram de ser editados pois continham informação não desejada que estava a causar problemas de malformação nos modelos. Foram editados esses 3 conjuntos e mantidos os originais, o que deu um total de 15 conjuntos de fotografias, com um total de 2400 fotografias que deram origem a 15 modelos 3D reconstruídos.

O sacro, tendo características complexas, será um bom exemplo e um bom desafio para a reconstrução por fotogrametria, para além de também ter sido um desafio para a digitalização usando o varrimento por laser. O enorme detalhe, a cor tendencialmente uniforme, as superfícies arredondadas e os buracos sagrados (orifícios) representam um grande desafio na digitalização, tanto por varrimento por laser como por fotogrametria. O modelo anatómico do sacro utilizado pode ser visto na Figura 4.6. No lado esquerdo encontra-se a parte da frente do sacro, e na parte direita, a parte posterior. A terminologia usada para os conjuntos de fotografia e modelos 3D, obtidos por reconstrução, seguem a mesma lógica do cubo. Para os conjuntos, o nome é uma letra seguida de um número, o número corresponde à ordem por que foram realizados os conjuntos, e a letra é a primeira letra do nome do modelo real, neste caso o **S** de sacro.



Figura 4.6 – Fotografias do modelo do sacro retiradas do conjunto S 10 c

A Tabela 4.6 contém os dados relativos aos conjuntos das fotografias tiradas para a reconstrução do sacro, com o nome e as características dos conjuntos. A coluna “Câmara fixa”, refere-se à utilização da máquina, numa posição fixa usando tripé, sendo usada uma base giratória de forma a rodar o objeto. Isto permite um melhor controlo das condições de aquisição de fotografias ao mesmo tempo que garante que as condições entre fotografias são mantidas.

Tabela 4.6 - Nome e características dos conjuntos de fotografias tiradas do sacro.

Nome do conjunto	Número de fotografias (resolução pixéis)	Câmara fixa	Câmara	Lente	Abertura (f/n)	Velocidade (segundos)	ISO
S 1	133 (5472x3648)	Sim	Canon EOS 6D	100 mm	f/8	1/100	3200
S 2	91 (5472x3648)	Sim	Canon EOS 6D	35 mm	f/8	1/50	1600
S 3	97 (2340x4160)	Sim	Telemóvel nexus 6	4 mm	f/2	1/50	178
S 4	103 (5472x3648)	Sim	Canon EOS 6D	24 mm	f/8	1/50	1600
S 5	99 (5472x3648)	Sim	Canon EOS 6D	70 mm	f/8	1/50	1600
S 6	102 (5472x3648)	Sim	Canon EOS 6D	100 mm	f/8	1/50	1600
S 7	42 (5472x3648)	Não	Canon EOS 6D	100 mm	f/8	1/50	1600
S 8	192 (5472x3648)	Sim	Canon EOS 6D	100 mm	f/11	1/100	1600
S 8 c	192 (3537x2358)	Sim	Canon EOS 6D	100 mm	f/11	1/100	1600
S 9	196 (5472x3648)	Sim	Canon EOS 6D	100 mm	f/11	1/100	1600
S 9 c	196 (3537x2358)	Sim	Canon EOS 6D	100 mm	f/11	1/100	1600
S 10	147 (5472x3648)	Sim	Canon EOS 6D	100 mm	f/11	1/100	1600
S 10 c	147 (3537x2358)	Sim	Canon EOS 6D	100 mm	f/11	1/100	1600
S 11	98 (2340x4160)	Sim	Telemóvel nexus 6	4 mm	f/2	1/60	60
S 12	97 (2340x4160)	Sim	Telemóvel nexus 6	4 mm	f/2	1/60	62

Conjuntos com sufixo “c” indicam que estes foram manipulados com o *software* da Canon, para retirar detalhes estáticos que estariam a provocar erros muito graves nas reconstruções. Estes detalhes, sendo estáticos nas laterais das fotografias, originavam pontos falsos de referência entre fotografias, criando assim as deformações nos modelos reconstruídos a partir dessas mesmas fotografias. O detalhe estático referido pode ser observado na Figura 4.7, e está assinalado com um contorno vermelho, estando presente em todas as fotografias deste conjunto, logo, é a origem de pontos de referência falsos para os algoritmos de reconstrução. Todos estes conjuntos de fotografias do sacro, **S 1** aos **S 12**, encontram-se do **Anexo 11** ao **Anexo 26**.



Figura 4.7 - Fotografia do conjunto S 8, com barra fixa na lateral no lado direito.

Para cada conjunto de fotografias foram feitos registos acerca das suas condições de aquisição. Estes encontram-se na Tabela 4.7. Nos conjuntos de fotografias do sacro tirados não foi possível um controlo de iluminação tão favorável quando comparado com os conjuntos finais do cubo. Os conjuntos de fotografias do sacro foram tirados no laboratório M.1.21 do departamento de mecânica do ISEL. Por este ser um espaço muito amplo, impediu a utilização do foco led de 20w, usado no cubo, isto porque a sua potência não era suficiente para obter uma luz difusa com a intensidade necessária. Os pontos de iluminação do laboratório estão colocados no teto, com luz fluorescente, o que produz sombras nos objetos, podendo originar, assim, deformações nos modelos obtidos através destas fotografias. A luz natural vinda das janelas, não sendo a ideal, uma vez que não era suficientemente difusa, provou ser, contudo, a melhor opção, apesar das ligeiras sombras observáveis na cartolina branca (Figura 4.7). Estas são, portanto, devidas às condições de luz não serem 100% controláveis. Na Figura 4.10 apresenta-se o esquema representativo das condições de captação das fotografias do conjunto **S 8**.

Tabela 4.7 - Condições em que foram tiradas as fotografias do sacro

Nome do conjunto	Base em papel	Condições de luz	Condições das fotografias	Número de ângulos
S 1	24 Cores diferentes, circular	Nada uniforme, luz do teto	Boas, mas com sombras	2
S 2	24 Cores diferentes, circular	Nada uniforme, luz do teto	Boas, mas com detalhes fixos laterais (problema)	2
S 3	24 Cores diferentes, circular	Nada uniforme, luz do teto	Algumas com ruído / desfocadas	2
S 4	24 Cores diferentes, circular	Nada uniforme, luz do teto	Boas, mas com sombras	2
S 5	24 Cores diferentes, circular	Nada uniforme, luz do teto	Boas, mas com sombras	2
S 6	24 Cores diferentes, circular	Nada uniforme, luz do teto	Boas, mas com sombras	2
S 7	24 Cores diferentes, circular	Nada uniforme, luz do teto	Fotografias a menos	2
S 8	24 Cores diferentes, circular	Não uniforme, luz janela grande	Boas, mas com detalhes fixos laterais (problema)	4
S 9	24 Cores diferentes, circular	Não uniforme, luz janela grande	Boas, mas com detalhes fixos laterais (problema)	4
S 10	24 Cores diferentes, circular	Não uniforme, luz janela grande	Boas, mas com detalhes fixos laterais (problema)	3
S 11	24 Cores diferentes, circular	Não uniforme, luz janela grande	Boas	2
S 12	24 Cores diferentes, circular	Não uniforme, luz janela grande	Boas	2

Na Figura 4.8 e na Figura 4.10 apresentam-se esquemas que demonstram a posição da máquina digital em relação à base rotativa, à cartolina e à fonte de luz. Ambas as figuras são desenhos feitos à mão, para representar a relação de posição no laboratório M.1.21 do departamento de mecânica do ISEL. Na Figura 4.8 observa-se que o estore da janela se encontra fechado com vista a manter apenas a luz artificial do teto. Entre a janela a base rotativa envolvida pela cartolina encontra-se um armário que serviu de obstáculo para eventuais fugas de luz provenientes do estore.

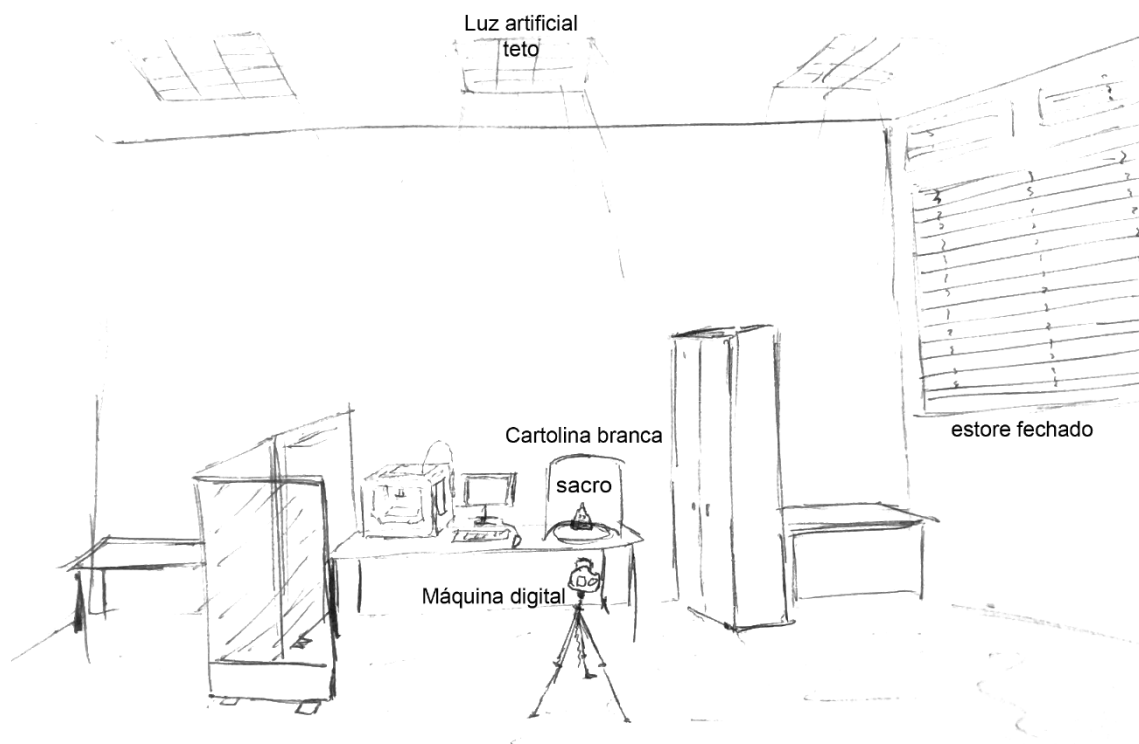


Figura 4.8 - Condições em que foram tirados os conjuntos de fotografias S 1 até S 7, com câmara fixa

Na Figura 4.9 apresenta-se uma fotografia correspondente ao esquema da Figura 4.8.



Figura 4.9 - Fotografia real das condições de captação das fotografias referentes ao esquema da figura 5.8

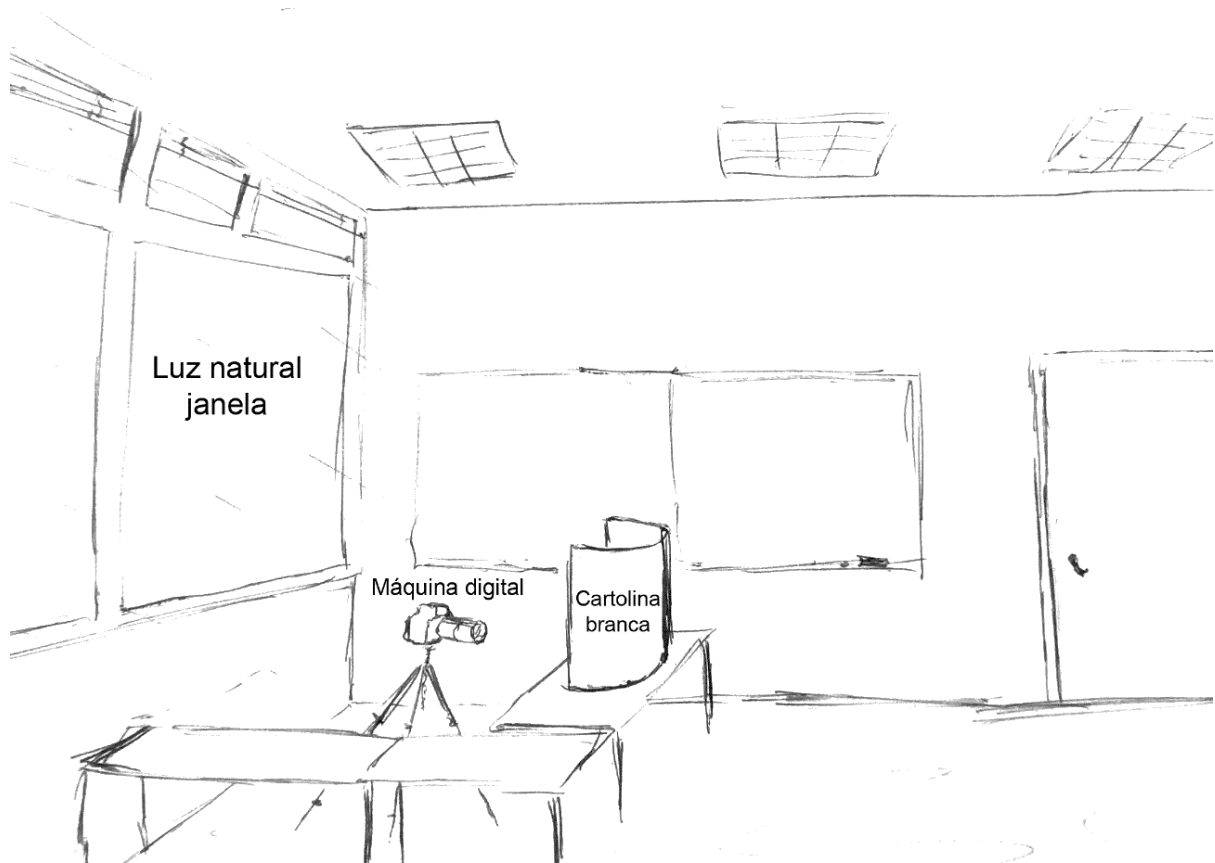


Figura 4.10 - Condições em que foram tirados os conjuntos de fotografias S 8 até S 12.

Após realizados todos os conjuntos de fotografias, o passo seguinte corresponde à sua reconstrução através de um programa de reconstrução. Na Tabela 4.8, encontram-se os resultados das reconstruções sem tratamento, de acordo com os critérios já mencionados. Estas reconstruções necessitam de ser tratadas, uma vez que existem pontos que não pertencem ao objeto em estudo e que devem ser eliminadas. As notas referentes às deformações apenas dizem respeito à parte da reconstrução que é relevante para o estudo, portanto, apenas contempla deformações na superfície do sacro. No caso de terem sido reconstruídos mais que modelo a partir de um conjunto de fotografias, o nome desse modelos é 1.X, sendo X começado em zero para o primeiro modelo e sendo este incrementado com os outros modelos.

O modelo 3D, **sacro 1.1**, foi uma experiência com o objetivo de testar a eventual possibilidade de obter um modelo do sacro com o número de fotografias muito aproximado ao limite mínimo aconselhado, isto é, tendo apenas 17 fotografias por cada um dos dois ângulos. Este número de fotografias partiu do pressuposto de que uma fotografia representaria cerca de 70°, portanto, para obter 70% de sobreposição entre fotografias daria 21° entre elas, se se considerar uma cobertura total do objeto (360°), o que resulta nas 17 fotografias em volta do

mesmo. Contudo, esta experiência não foi bem-sucedida, pois as fotografias não garantiam o mínimo exigível de 21°, o que poderá ter sido o motivo das deformações observadas no modelo. As sombras presentes no objeto podem ter constituído um segundo motivo desse insucesso, uma vez que com menos fotografias a sua influência apresentou-se mais relevante.

Tabela 4.8 – Dados das reconstruções por fotogrametria dos conjuntos de fotografias do sacro.

Nome do conjunto	Nome do modelo 3D obtido por reconstrução	Número de triângulos que constituem a superfície	Número de vértices	Deformação
S 1	sacro 1	1 018 636	558 743	Não, um buraco tapado
S 1	sacro 1.1 34 fotos	578 406	318 924	Sim, muito grave
S 2 c	sacro 2 c	678 398	372 847	Não, dois buracos sagrados tapados, base ligeiramente colada
S 3	sacro 3	729 105	400 836	Não, dois buracos sagrados tapados, base ligeiramente colada
S 4	sacro 4	1 100 203	601 292	Não, dois buracos sagrados tapados, base ligeiramente colada
S 5	sacro 5	1 045 271	571 572	Não, dois buracos sagrados tapados, base ligeiramente colada
S 6	sacro 6	1 008 096	555 670	Não, dois buracos sagrados tapados, base ligeiramente colada
S 7	sacro 7	952 838	521 872	Não, cinco buracos sagrados tapados, base ligeiramente colada
S 8 c	sacro 8 c	648 843	359 412	Sim, muito grave
S 8 c	sacro 8.1 c 2 ângulos	495 637	274 675	Não, dois buracos sagrados tapados e base ligeiramente colada
S 8 c	sacro 8.2 c s/ repetidas 2 ângulos	634 335	350 078	Não, dois buracos sagrados tapados, base colada
S 9 c	sacro 9 c	747 888	409 869	Não, um buraco sagrado parcialmente tapado, base ligeiramente colada
S 10 c	sacro 10	623 081	345 971	Não, três buracos tapados, base colada
S 11	sacro 11	757 707	416 915	Não, um buraco sagrado tapado, base ligeiramente colada
S 12	sacro 12	678 526	375 831	Não, dois buracos sagrados tapados

Por último, apresenta-se os dados relativos à digitalização por varrimento por LASER na Tabela 4.9. Neste caso, devido à complexidade do sacro, a única referência para a comparação é a digitalização por varrimento por laser, e não foi realizada qualquer medida com paquímetro no modelo real.

Tabela 4.9 - Dados do modelo 3D do sacro obtido por varrimento por laser

Nome do modelo	Número de triângulos que constituem a superfície	Número de vértices	Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Sacro digitalização laser	977 106	499 083	122,48	120,34	54,46

Após terem sido coligidos todos estes dados, utilizou-se o Geomagic *trial*, ou programa equivalente de manipulação de modelos 3D, para auxílio no ajuste da escala e alinhamento espacial dos modelos. O programa utilizado foi o Geomagic, com versão *trial*, uma vez que não houve, em tempo útil, resposta ao pedido de licença académica. Uma vez na posse dos modelos alinhados, pode usar-se a ferramenta de análise referida para realizar a comparação entre a superfície do modelo de referência obtido por varrimento por laser e a superfície dos modelos obtidos por fotogrametria. A expectativa é de que se verifiquem diferenças, pois, mesmo que se comparem duas digitalizações realizadas por varrimento por LASER são esperadas pequenas diferenças. Estas diferenças entre os modelos ocorrem pelo facto das referidas digitalizações não registarem sempre os mesmos pontos da superfície dos objetos. Acresce, ainda, que a junção dos vários cortes pode provocar também pequenas diferenças.

5 Resultados e Discussão

Para a obtenção dos resultados, foi necessário tratar todos os modelos de forma a obter apenas o objeto que se pretende analisar. Para além deste tratamento, foi feito o ajuste de escala e alinhamento espacial recorrendo ao programa Geomagic. Deste modo, apresentam-se a Tabela 5.1 e a Tabela 5.2 com os resultados das comparações dos cubos obtidos por fotogrametria com os de referência (varrimento por laser). Nestas tabelas não estão incluídos os modelos com deformações graves ou muito graves, apenas com a exceção do cubo 1 e cubo 2. Estes dois modelos deformados foram testes realizados com vista a verificar se seria possível obter informações a partir de modelos deformados. A razão para a exclusão dos restantes modelos com deformações graves deve-se ao facto de essas mesmas deformações terem impedido o alinhamento espacial em relação ao modelo de referência (varrimento por laser). Por consequência, os referidos modelos não apresentavam as condições necessárias para que a comparação das superfícies entre eles fosse efetivada pelo programa.

Nas tabelas de resultados os pontos considerados são representados em percentagem do global de pontos do modelo, que formam os triângulos que constituem a superfície do modelo 3D, que respeitam a regra de tolerância máxima. Esta tolerância permite filtrar a parte dos pontos que não sejam comuns nos dois modelos devido a eventuais falhas de informação, como a ausência da base dos modelos obtidos a partir da fotogrametria. A tolerância predefinida que foi usada em todos os casos foi de 1 mm, exceto os casos em que é indicado o contrário. O desvio médio representa a média da distância a que os pontos do modelo em estudo se encontram do modelo usado como referência. O desvio médio está dividido em duas colunas, sendo estas para o desvio médio positivo dos pontos e o desvio médio negativo. Os pontos com desvio positivo encontram-se fora do sólido definido pela superfície de referência, encontrando-se os pontos com desvio negativo dentro do interior do sólido definido pela superfície de referência.

Para possibilitar uma análise dos dados, foi considerado que as distribuições de probabilidade do desvio em relação à superfície de referência é uma distribuição normal, uma vez que existe um número muito elevado de amostras. Nos casos em que o desvio médio positivo e negativo são muito diversos, presume-se que exista um erro sistemático no alinhamento espacial dos dois modelos. Na distribuição normal, três vezes o desvio padrão corresponde a 99,73%, o que significa que 99,73% dos pontos não se afasta mais do que três vezes o desvio dado pela análise feita através Geomagic *trial* do desvio da superfície do modelo reconstruído (fotogrametria) à superfície referência (varrimento por laser).

A Tabela 5.1 representa os dados resultantes das comparações dos modelos do cubo obtidos por fotogrametria com o modelo obtido através de varrimento por laser.

Tabela 5.1 - Resultados de comparações entre modelos do Cubo obtidos por fotogrametria e varrimento por laser. A tolerância máxima de desvio predefinida é de 1 mm.

Nome do conjunto	Nome do modelo 3D obtido por reconstrução	Número de triângulos	Pontos considerados (%)	Desvio médio (mm)		Desvio padrão (mm)
				+	-	
C 1	cubo 1 (2 mm tolerância max.)	17 825	60	0,350	-0,365	0,423
C 2	cubo 2	16 825	32	0,591	-0,948	0,882
C 3	cubo 3 (2 mm tolerância max.)	38 254	65	0,435	-0,594	0,713
C 3	cubo 3	38 254	53	0,299	-0,342	0,410
C 6	cubo 6	52 525	65	0,311	-0,267	0,375
C 12	cubo 12	269 932	90	0,259	-0,342	0,345
C 13	cubo 13	105 238	86	0,278	-0,334	0,364
C 14	cubo 14	201 825	86	0,243	-0,283	0,327
C 15	cubo 15	482 033	71	0,337	-0,298	0,391
C 16	cubo 16	150 898	87	0,274	-0,300	0,348

O mesmo foi feito para os modelos obtidos do sacro. Os resultados encontram-se na Tabela 6.2.

Tabela 5.2 - Resultados de comparações entre modelos do Sacro obtidos por fotogrametria e varrimento por laser

Nome do conjunto	Nome do modelo 3D obtido por reconstrução	Número de triângulos	Pontos considerados (%)	Desvio médio (mm)		Desvio padrão (mm)
				+	-	
S 1	sacro 1	532 846	82	0,247	-0,297	0,354
S 2 c	sacro 2 c	218 861	85	0,228	-0,287	0,326
S 3	sacro 3	310 379	83	0,227	-0,253	0,292
S 4	sacro 4	355 348	83	0,242	-0,334	0,343
S 5	sacro 5	335 414	85	0,220	-0,276	0,328
S 6	sacro 6	505 263	85	0,224	-0,251	0,289
S 7	sacro 7	514 384	76	0,243	-0,297	0,357
S 8 c	sacro 8.1 c 2 ângulos	285 031	80	0,271	-0,381	0,352
S 8 c	sacro 8.2 c s/ repetidas 2 ângulos	316 957	59	0,393	-0,563	0,445
S 9 c	sacro 9 c	309 962	79	0,279	-0,312	0,335
S 10 c	sacro 10	339 226	51	0,442	-0,453	0,528
S 11	sacro 11	263 967	83	0,222	-0,264	0,325
S 12	sacro 12	288 837	84	0,258	-0,264	0,346

O sacro 10 não aparentava deformações visíveis, mas quando foi feita a comparação por sobreposição de modelos, era claramente observável uma ligeira deformação na forma, o que explica o seu valor elevado do desvio padrão e pouca percentagem de pontos considerados em comparação com os restantes.

Em geral, não são visíveis diferenças significativas entre reconstruções a partir de fotografias tiradas com o telemóvel ou com a máquina digital. Como era expectável, em nenhum dos casos foram considerados 100% dos pontos, pois nem o modelo de referência (digitalização através de varrimento por laser), nem os modelos analisados (obtidos por fotogrametria) continham a informação completa da superfície do sacro real. Estes não

revelavam toda a informação da superfície por falha dos próprios processos de digitalização. Contudo, se a percentagem de pontos considerados for muito baixa, consegue observar-se claramente que os modelos não contêm muitos pontos em comum. Este parâmetro não é obrigatório nem há possibilidade de ser 100% no estudo, como foi referido anteriormente, mas é vantajoso que seja o mais elevado possível.

Na Figura 5.1 apresenta-se uma imagem do Geomagic, onde são visíveis falhas na superfície do modelo obtido por varrimento por laser. Estas falhas na superfície estão identificadas pelos contornos vermelhos. As partes amarelas visíveis correspondem à parte interior da superfície do sacro (a cor é meramente representativa), para que seja facilmente distinguível a superfície exterior e interior.

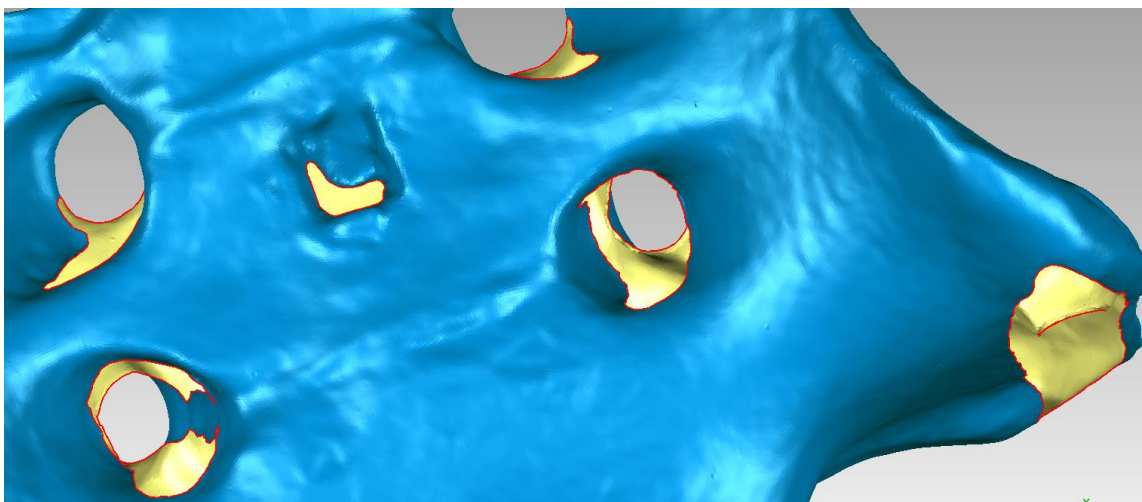


Figura 5.1 - Ampliação do modelo do sacro obtido por varrimento, que demonstra as falhas na superfície. Modelo observado no Geomagic trial.

A Figura 5.2 obtida através do Geomagic apresenta a reconstrução Sacro 6. A parte da superfície em falta (base) está assinalada com um contorno vermelho, e o fundo amarelo demonstra a parte interior da superfície do sacro, como explicado anteriormente. A base não está reconstruída devido à limitação da fotogrametria, não sendo possível tirar fotografias à base do objeto estando este pousado numa base, ainda que esta seja transparente. Esse facto só iria causar deformações no modelo devido à refração da luz que iria atravessar essa mesma superfície transparente.

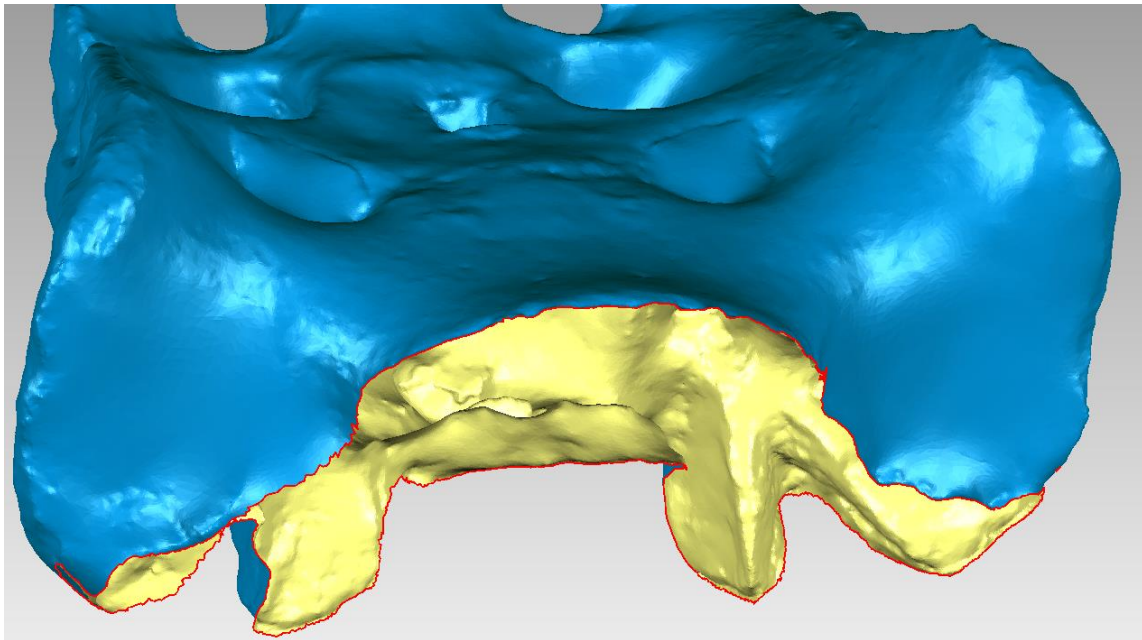


Figura 5.2 - Ampliação da base do modelo Sacro 6, obtido por fotogrametria. Modelo observado no Geomagic trial.

Com a falta de superfície da base do sacro, e sabendo que têm sido considerados no máximo 85% dos pontos das reconstruções nas comparações, poder-se-á concluir que esta área corresponde a menos de 15% dos pontos da superfície do modelo reconstruído.

A Figura 5.3 contém o resultado de uma comparação entre as superfícies (varrimento por laser e sacro). As áreas cinzentas correspondem aos pontos não considerados na comparação. O resto dos pontos foram tidos em consideração, e a sua cor depende do desvio que estes têm relativamente à superfície de referência (varrimento por laser), sendo que quando estes têm um desvio para o exterior do modelo 3D de referência a sua cor adquire cores quentes (ex: vermelho, laranja e amarelo). Quando os pontos apresentam um desvio para o interior do modelo 3D, as cores destes pontos são cores frias (ex: azul claro, azul e azul escuro). Os pontos coincidentes entre as duas superfícies dos modelos tomam uma cor verde.

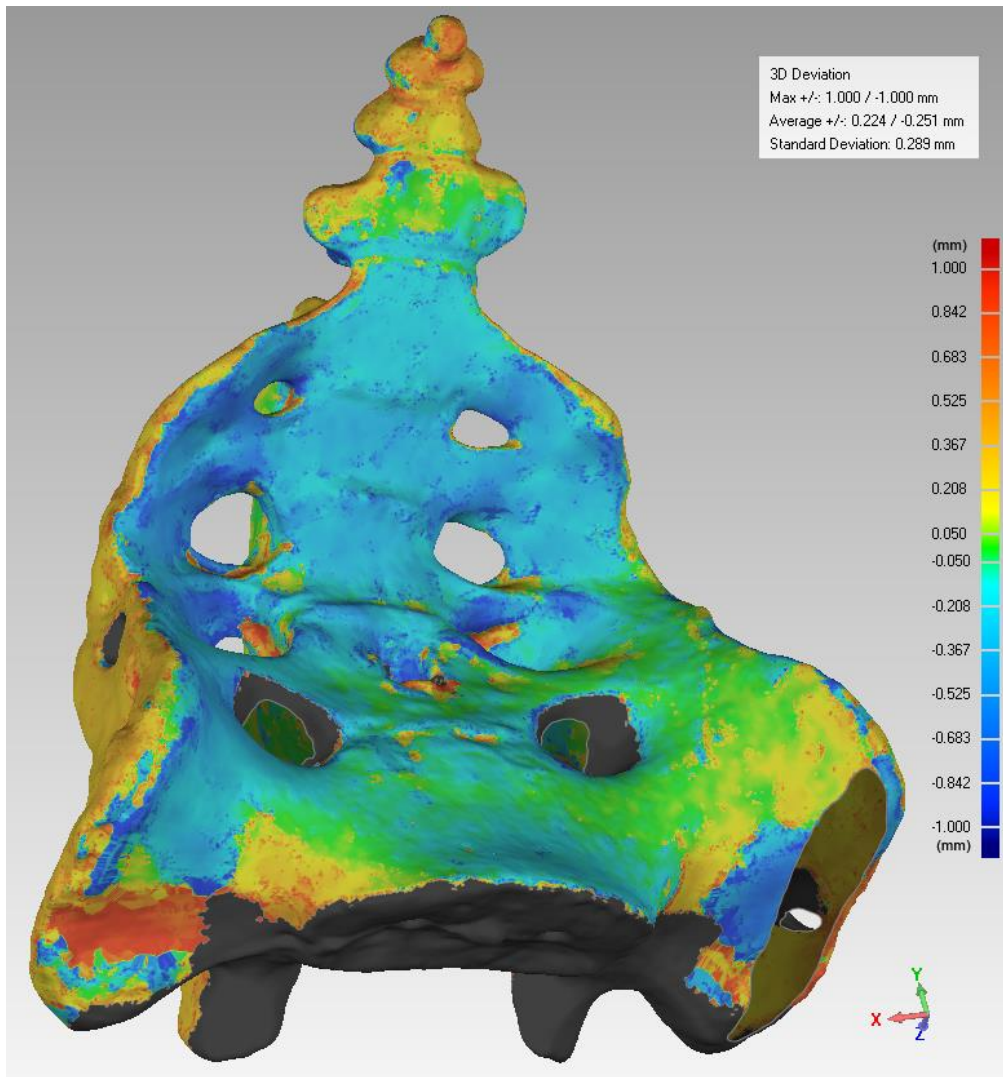


Figura 5.3 - Resultado do teste de comparação entre o modelo obtido por varrimento por laser e o sacro 6. Todas as unidades são expressas em milímetros. Obtido no Geomagic trial.

Os fatores que influenciam mais a fotogrametria é a qualidade das imagens (Ex.: boa luz, focadas) e uma boa cobertura do objeto; contudo, como é observável nos resultados, um conjunto de 98 fotografias (**S 11**) produz um modelo com a mesma precisão que um conjunto de 196 fotografias (**S 9**). Isto é, uma reflexão das limitações dos algoritmos de reconstrução por fotogrametria, em que a cobertura é suficiente com 98 fotografias, a sobreposição entre fotografias será muito maior que os 70% recomendados em qualquer um dos casos.

Os resultados dos modelos **culo 1**, **culo 2**, **culo 3** e **culo 6** demonstram uma percentagem reduzida de pontos considerados que a consequência direta das deformações nos modelos. Mesmo alterando um pouco a tolerância de desvio (aumento percentagem de pontos considerado), continua a ser visível, nestes testes, um desvio padrão mais elevado, o que representa que as diferenças entre modelos obtidos através de varrimento por laser e fotogrametria são consideráveis.

5.1 Limitações e comparações

As arestas representam um desafio em processos de digitalização com laser. Estas dificuldades surgem quando um raio LASER apanha uma extremidade e é “dividido”, perdendo a precisão, uma vez que o recetor irá receber duas ou mais reflexões, dependendo do número de extremidades que o mesmo raio laser possa apanhar [7]. Contudo, este problema das extremidades retas também está presente na fotogrametria, neste caso o problema tem a sua origem na junção que é feita das várias fotografias.

As propriedades das superfícies dos objetos a serem digitalizados têm uma grande influência na realização de uma boa digitalização. No caso do LASER, transparências e superfícies muito refletoras fazem com que seja impossível digitalizar um objeto, pois este é induzido em erro, com os múltiplos raios refletivos ou refratados das superfícies [7]. Na fotogrametria, a informação “falsa” que as fotografias podem conter, devido às superfícies refletoras ou transparentes, é o motivo do problema. Como foi visto anteriormente, a fotogrametria é um processo que consiste em várias fotografias e, com elas, tenta obter um modelo 3D. Se o objeto a ser digitalizado for espelhado, ele irá conter reflexões do mundo que o rodeia, e com a mudança de ângulo de visão desse objeto, essas reflexões irão sofrer alterações. Isto faz com que não haja pontos comuns entre fotografias para uma reconstrução bem-sucedida. No caso de uma superfície transparente, o problema é a refração dos raios (ex: lentes de óculos). Com estas refrações, as fotografias com ângulos diferentes irão ter diferentes informações nessa área, fazendo com que pontos comuns naquela zona sejam difíceis de obter, o que leva a deformações nas reconstruções ou incapacidade de reconstrução.

Em teoria, ambas as tecnologias poderão ter uma boa precisão. Estas tecnologias são cada vez mais procuradas dado o potencial do seu baixo custo, e o facto de não danificarem os materiais a digitalizar [27]. Contudo, o laser pode danificar os materiais se estes forem sensíveis à energia emitida por este. Em aplicações na engenharia Biomédica, o laser não é isento de riscos, como por exemplo afetar a visão ou pele dos pacientes. Devido a estes riscos, existe uma norma de segurança IEC 60825 (International Electrotechnical Commission), em que as classes de LASER bem como os seus respetivos efeitos são classificados.

Os tempos de aquisição para o processo de fotogrametria são menores do que os do laser, com um hardware de custos inferior. Em ambos os casos, poderão ser construídos estruturas ou equipamentos para a digitalização. No caso laser, já existem digitalizadores laser que usam bases rotativas para auxiliar na digitalização. A fotogrametria é uma área em

evolução e poderá vir a ter equipamentos de menor custo e menos complexos para um tempo de digitalização muito menor. Um tempo de digitalização menor é importante em digitalizações de alvos ou objetos móveis.

Como exemplo, neste estudo, a digitalização do sacro, por varrimento por laser, demorou 60 minutos, em comparação com 5 minutos da captação de um conjunto de fotografias com vista a serem extraídos os modelos por fotogrametria. Não foi utilizado um equipamento especializado para a captação rápida de fotografias em volta dos objetos.

No que toca a necessidade de uma boa iluminação do objeto a digitalizar, o LASER tem vantagem sobre a fotogrametria, sendo a fotogrametria muito afetada por uma má iluminação.

Entre os dois métodos de digitalização em estudo, a que tem um maior potencial para aplicações no ramo da engenharia Biomédica é a fotogrametria, pois os tempos de aquisição de dados são muito menores e não representam qualquer risco para a saúde dos pacientes, visto tratar-se de um método passivo. Isto porque com uma estrutura de auxílio à fotogrametria, é possível a aquisição da informação dos dados do paciente em milésimos de segundos, não havendo assim interferência de pequenos movimentos realizados pelo paciente.

5.2 Protocolo digitalização e obtenção de modelo CAD fotogrametria

Proposta de protocolo que resume a metodologia aplicada no trabalho ao mesmo tempo assegura uma possível replicação do mesmo.

1. Materiais:

- 1.1. Câmera digital, que forneça imagens nítidas;
- 1.2. Tripé;
- 1.3. Base rotativa;
- 1.4. Papel com uma circunferência dividida em ângulos de 7,5°; base para ajudar na aquisição de fotografias sempre com a mesma distância entre si em volta do objeto. Exemplo **Anexo 10**;
- 1.5. Cartolina branca para colocar em volta da base rotativa, deixando uma abertura mínima de 90°;
- 1.6. Holofote branco ou luzes de estúdio para controle iluminação;
- 1.7. *Software* de reconstrução através de fotografias (AutoDesk ReMake ou equivalente);
- 1.8. *Software* de manipulação de modelos 3D (Geomagic ou equivalente);

2. Localização e condições:

- 2.1. Um local onde seja possível impedir a luz natural, ou que permita uma luz completamente difusa;

3. Digitalização (captação de fotografias):

- 3.1. Colocar o objeto centrado na base rotativa, alinhar a câmera no tripé com as marcas do papel descrito no ponto 1.4;
- 3.2. Focar a câmera, se possível bloquear o foco, para aquela distância, e não mexer mais no tripé e câmera até ao fim da captação de um conjunto inteiro de fotografias para garantir as mesmas condições para todas elas.
- 3.3. Tirar fotografias sempre com o mesmo ângulo entre elas, usar material de auxílio indicado no ponto 1.4, se necessário, terminar quando tiver dado uma volta completa e chegado à posição de partida. **ATENÇÃO**, não tirar fotografias repetidas do mesmo ângulo;

4. Reconstrução 3D através dos conjuntos de fotografias:

- 4.1. Utilizar um *software* como indicado no ponto 1.7, e importar as fotografias de um conjunto;

4.2. Nas definições de reconstrução, se disponíveis, selecionar as opções para maior detalhe do modelo. (Isto irá aumentar o tempo necessário para reconstrução 3D);

4.3. Exportar os modelos para ficheiros do tipo: .STL, .OBJ ou .XYZ;

5. Tratamento dos modelos:

5.1. Utilizar um *software* como indicado no ponto 1.8 e importar o modelo;

5.2. Selecionar manualmente todas as partes que não sejam de interesse e ir eliminando essas partes;

5.2. Se não for importante manter o resultado direto do modelo obtido, reparar falhas na superfície ou mesmo editar o modelo como desejar;

6. Análise de comparação (comparar modelos obtidos a partir do ponto 4 e 5):

Este ponto é opcional tem relação com este estudo.

6.1. Utilizar um programa como indicado no ponto 1.8; importar os dois modelos a comparar;

6.2. Decidir qual o modelo que irá servir de referência (apenas escolha do utilizador); ATENÇÃO, não mexer ou manipular este modelo no decorrer de todo o processo;

6.3. Selecionar o modelo que não é de referência e alinha-lo espacialmente, de forma manual, com o modelo de referência o melhor possível, tirando, assim, partido das funções do programa escolhido;

6.4. Ajustar manualmente a escala do modelo em estudo para que esta coincida com a escala do modelo de referência;

6.5. Procurar a função “**Best fit Alignment**”; selecionar a opção para permitir também o ajuste da escala e selecionar que modelo pretende como referência (esta função irá realizar um ajuste final em relação ao posicionamento espacial e de escala face ao modelo de referência);

6.6. Com os dois modelos sobrepostos, utilizar função “**Deviation**”. Esta função irá analisar o desvio entre as duas superfícies.

6 Conclusão

Com todos os testes realizados, a conclusão principal é que a fotogrametria regista uma margem de erro superior em comparação com a do varrimento por laser. No melhor caso, foi alcançado um desvio padrão de 0,289 mm. Os dados analisados com uma distribuição normal, três desvios padrão correspondem a 99,73%, o que resultaria num desvio da superfície em relação a superfície referência (varrimento por laser) de 0,867 mm (nota: $3 \times 0,289$ mm) para 99,73% dos pontos da reconstrução. Este erro é ainda considerável, mas trata-se de uma técnica não invasiva e não nociva para a saúde. Para registos visuais, como o registo facial ou o registo da pose, este erro não levanta qualquer problema. Para registos de controlo, de nevos (sinais na pele), de verrugas ou de lesões que necessitem de um controlo de alta precisão, esta tecnologia poderá ainda não estar totalmente operacional se forem consideradas apenas as condições de captação dos conjuntos apresentadas neste mesmo estudo. Contudo, com uma estrutura de auxílio na fase de captação das fotografias e com algoritmos adaptados a essa estrutura, é muito provável que sejam obtidos melhores resultados do que os apresentados neste estudo.

Os modelos obtidos por varrimento por laser também contêm um erro em relação ao modelo real, conforme podem ser observados nas medições efetuadas com o paquímetro e nas medições realizadas no modelo de referência do cubo. Uma análise rápida do modelo do cubo obtida por varrimento laser e comparado simplesmente com as medidas tiradas com o paquímetro no modelo real daria um erro de 0,493 mm. Mas esta análise, para ter validade, teria de ser efetuada como muito mais que uma só amostra.

A necessidade de construir um protótipo de uma máquina para auxiliar na fase de digitalização (fotografias) de modo a ser possível testar os limites extremos desta tecnologia apresenta-se como uma realidade. Neste estudo, o controlo dos parâmetros foi bem-sucedido, e conseguiram-se boas amostras mesmo na ausência de um equipamento dedicado. Verificou-se, também, que não é necessário um equipamento de maior custo para uma boa digitalização, pois os dois melhores resultados foram obtidos a partir de um conjunto de fotografias tirados com o telemóvel e um de um conjunto tirado com uma máquina digital profissional da Canon (Canon EOS 6D Mark II). Um equipamento de preço mais elevado talvez seja necessário numa fase em que os parâmetros, como a luz, sejam completamente controlados, pois este parâmetro da uniformidade da luz é o mais complexo de controlar, sem uma sala ou equipamento de digitalização dedicado.

Não foram considerados 100% dos pontos das superfícies dos modelos nas comparações como é observável nas tabelas de resultados, mas este era, no entanto, um parâmetro

esperado. Como referido no capítulo anterior (capítulo 6), os modelos não teriam hipótese de ser iguais, na medida em que, o próprio modelo obtido por varrimento por laser não continha todos os dados da superfície do sacro, conseqüentemente, não poderiam ser considerados todos os pontos dos modelos reconstruídos nas comparações, por haver falhas nas superfícies tanto da referência como dos modelos reconstruídos.

Reconstruções por fotogrametria a partir de conjuntos de fotografias que apresentem alguma zona com informação estática entre fotografias, que não seja o objeto, criam referências falsas, e os algoritmos testados não foram capazes de identificar que aquela informação seria de ignorar. A luz uniforme é necessária para obter uma boa reconstrução. Não poderá haver fotografias repetidas do mesmo ângulo, pois estas introduzem referências semelhantes, o que induz os algoritmos de reconstrução em erro. Não é necessária uma cobertura de 7° em 7° graus, em volta do objeto (360°), e não é recomendado um espaçamento de ângulos muito próximos uma vez que isso pode começar a introduzir erros. Estes erros são devidos à tolerância que os algoritmos têm no cálculo de previsão da posição espacial de onde as fotografias foram tiradas, pois estas fotografias podem ser consideradas como sendo do mesmo ângulo o que é suscetível de introduzir erros.

A reconstrução, realizada pelo *software open source* (VisualSFM), obteve uma qualidade muito inferior à dos modelos obtidos com o Autodesk ReMake. Para ser possível compará-lo com um modelo de referência, teve de ser tratado ao nível da sua superfície, o que se afastava do objetivo deste estudo, pois a integridade da informação é comprometida. A reconstrução foi feita com o mesmo conjunto de fotografias com que foi realizada no Autodesk ReMake. No **Anexo 27** pode ser vista uma imagem do modelo total com falhas, e no **Anexo 28** uma imagem com a ampliação da superfície, demonstrando o estado desta.

Os modelos obtidos por varrimento por laser, garantem a escala e proporções do objeto real digitalizado. Na fotogrametria o cenário é diferente, e os modelos obtidos por este método garantem as suas proporções, contudo, não garantem uma escala 1:1. Isto significa que os modelos têm de ter um ajuste posterior ao processamento do mesmo. Uma referência de escala para auxiliar no ajuste da mesma, após a reconstrução, poderá ser introduzida na base utilizada.

Com o estudo e com as conclusões alcançadas neste trabalho, foi realizada uma proposta de protocolo para garantir uma digitalização e criação de modelos por fotogrametria bem-sucedida.

7 Bibliografia

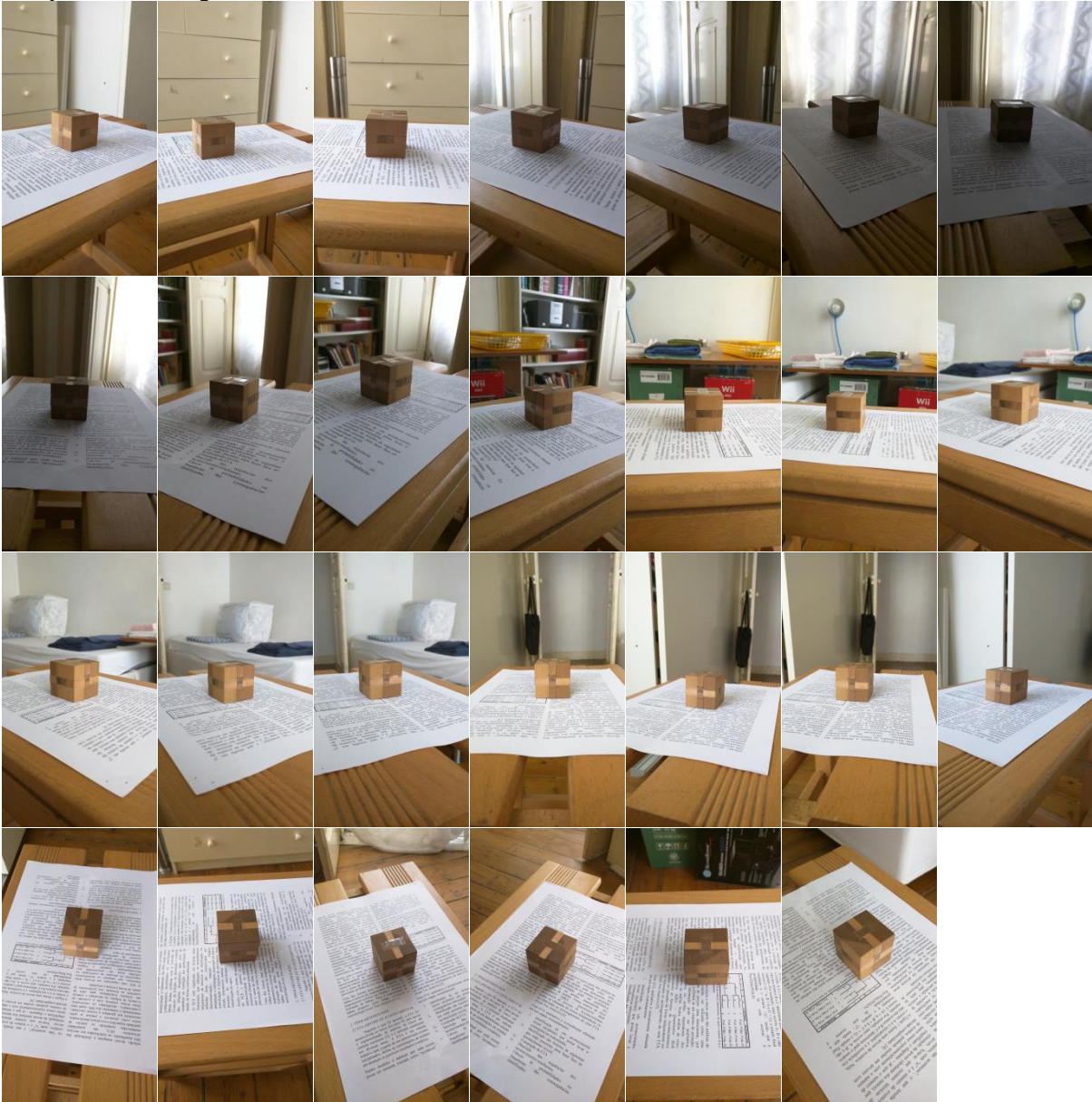
- [1] T. Várady, R. R. Martin e J. Cox, "Reverse engineering of geometrix models - an introduction," *Computer-Aided Design*, vol. 29, pp. 255-268, Abril 1997.
- [2] M. Akay, Ed., WILEY ENCYCLOPEDIA OF BIOMEDICAL ENGINEERING, John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [3] J. Herráez, J. C. Martínez, E. Coll, M. T. Martín e J. Rodríguez, "3D modeling by means of videogrammetry and laser scanners for reverse engineering," *Measurement*, p. 216–227, junho 2007.
- [4] C. Gottardo, "The application of laser scanners for 3D replication of cultural heritage," Queensland University of Technology - Spatial Science, 2015.
- [5] M. R. Osmana e K. N. Tahar, "3D accident reconstruction using low-cost imaging technique," *Advances in Engineering Software 100*, vol. 100, p. 231–237, 3 agosto 2016.
- [6] A. KILPELÄ, "PULSED TIME-OF-FLIGHT LASER RANGE FINDER TECHNIQUES FOR FAST, HIGH PRECISION MEASUREMENT APPLICATIONS," Department of Electrical and Information Engineering, University of Oulu, 2004.
- [7] B. Van Genechten, "Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications," Universidad Politecnica de Valencia Editorial, 2008.
- [8] X. Wang e L. Xiao, "Gyroscope-reduced inertial navigation system for flight vehicle motion estimation," *Advances in Space Research*, vol. 59, p. 413–424, 1 setembro 2016.
- [9] "LASER and its Applications". *Popular Science & Technology Series (PST)*.
- [10] B. Edlén, "Award Ceremony Speech," em *The Nobel Prize in Physics*, 1964.
- [11] S. Mohammad Nejad e K. Fasihi, "A new design of laser phase-shift range finder independent of environmental conditions and thermal drift," em *Proceedings of the 2006 Joint Conference on Information Sciences, JCIS*, Kaohsiung, Taiwan, ROC, 2006.

- [12] H. G. Nguyen e M. R. Blackburn, "A Simple Method for Range Finding via Laser Triangulation," Naval Command, Control and Ocean Surveillance Center, RDT&E Division, San Diego, CA 92152-5001, 1995.
- [13] A. Malhotra, K. Gupta e K. Kant, "Laser Triangulation for 3D Profiling of Target," *International Journal of Computer Applications*, vol. 35, nº 8, dezembro 2011.
- [14] T. Schenk, "Introduction to photogrammetry," The Ohio State University, Columbus, 2005.
- [15] "HISTORY OF PHOTOGRAMMETRY," Center for Photogrammetric Training, 2008.
- [16] A. El Garouani, A. Alobeid e S. El Garouani, "Digital surface model based on aerial image stereo pairs for 3D building," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 3, pp. 119-126, 17 junho 2014.
- [17] W. Boehler e A. Marbs, "3D scanning and photogrammetry for heritage recording: a comparison," em *Proceedings of 12th International Conference on Geoinformatics*, Suécia, 2004.
- [18] N. B□orlin, "Fundamentals of Photogrammetry," Department of Computing Science, Umeå University, suécia, 2014.
- [19] K. Schindler, "Mathematical Foundations of Photogrammetry," *Handbook of Geomathematics*, 2014.
- [20] M. Freeman, Grande manual da fotografia, Lisboa: Dinalivro, 2001.
- [21] E. Hook, "Digital Photography School," [Online]. Available: <https://digital-photography-school.com/megapost-learning-how-to-use-your-first-dslr/>. [Acedido em 1 junho 2017].
- [22] D. Pierce e V. Savov, "theverge," 30 julho 2013. [Online]. Available: <https://www.theverge.com/2012/1/2/2663464/camera-buyers-guide>. [Acedido em 1 junho 2017].
- [23] J. Meyer, "techradar," [Online]. Available: <http://www.techradar.com/how-to/photography-video-capture/cameras/deep-depth-of-field-vs-shallow-10-common-questions-and-answers-1320909>. [Acedido em 1 junho 2017].

- [24] [Online]. Available: <http://aprendafotografia.org/como-funciona-diafragma-abertura/>. [Acedido em 15 agosto 2017].
- [25] N. Mansurov, “photographylife,” 11 junho 2015. [Online]. Available: <https://photographylife.com/what-is-distortion>. [Acedido em 2 junho 2017].
- [26] [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/neydiasopticaoftalmica/lentes>. [Acedido em 20 agosto 2017].
- [27] L. Galantucci, M. Pesce e F. Lavecchia, “A powerful scanning methodology for 3D measurements of smallparts with complex surfaces and sub millimeter-sized features, basedon close range photogrammetry,” *Precision Engineering*, vol. 43, p. 211–219, 26 julho 2015.

Anexo 1

Conjunto de fotografías C 1:



Conjunto de fotografías C 2:



Anexo 2

Conjunto de fotografias C 3:



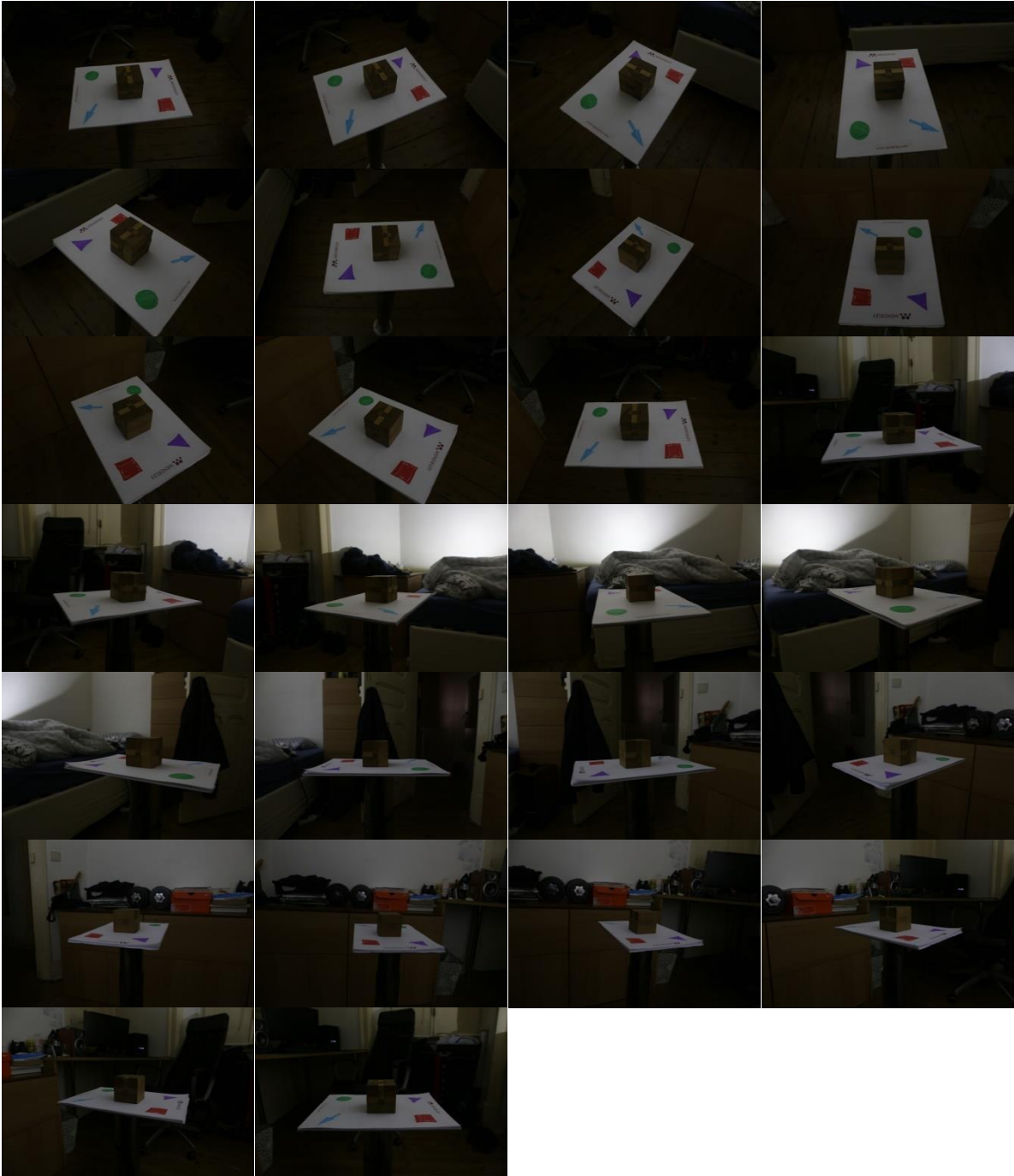
Conjunto de fotografías C 5:



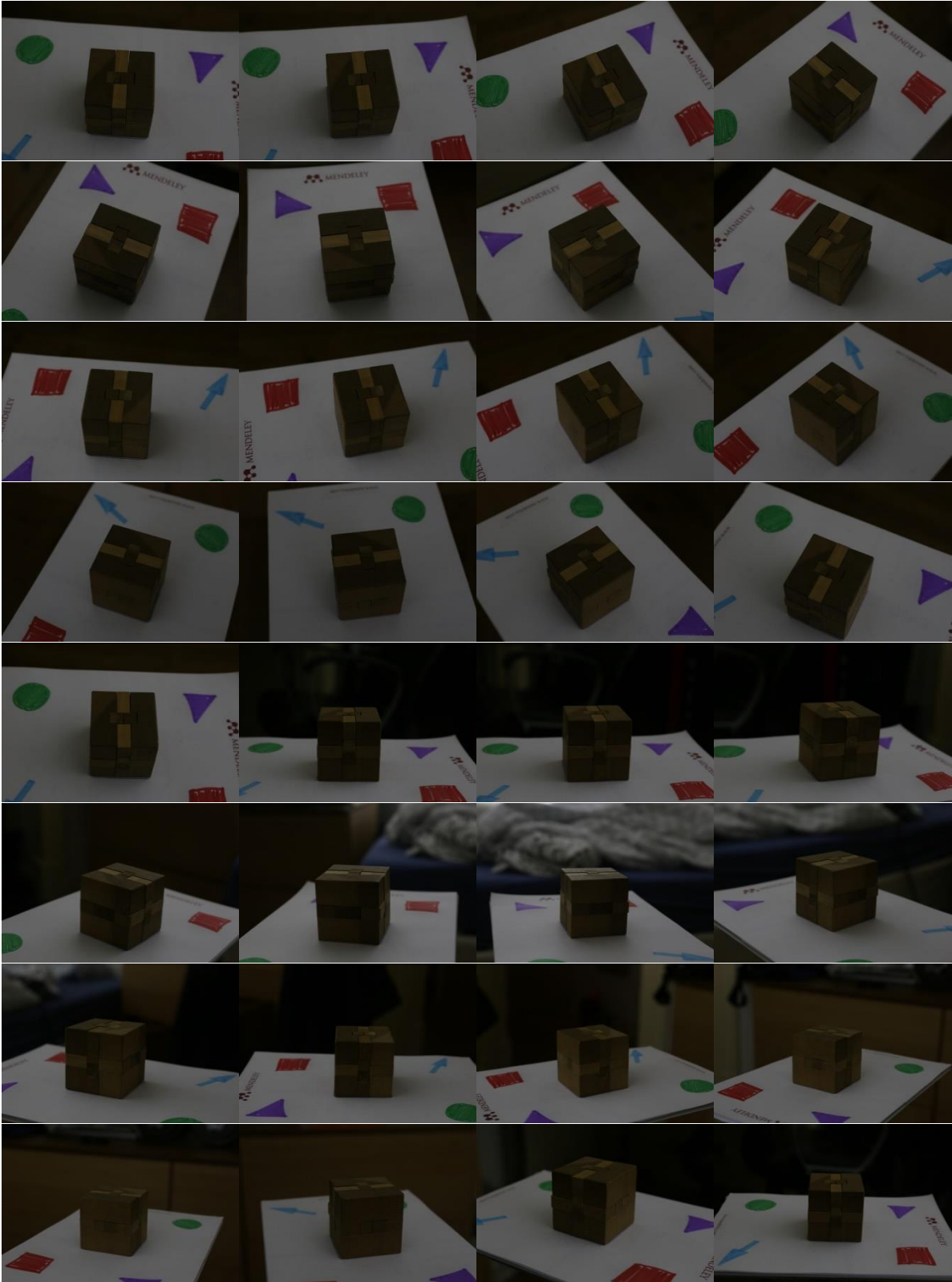
Conjunto de fotografias C 6:



Conjunto de fotografias C 7:



Conjunto de fotografias C 8:

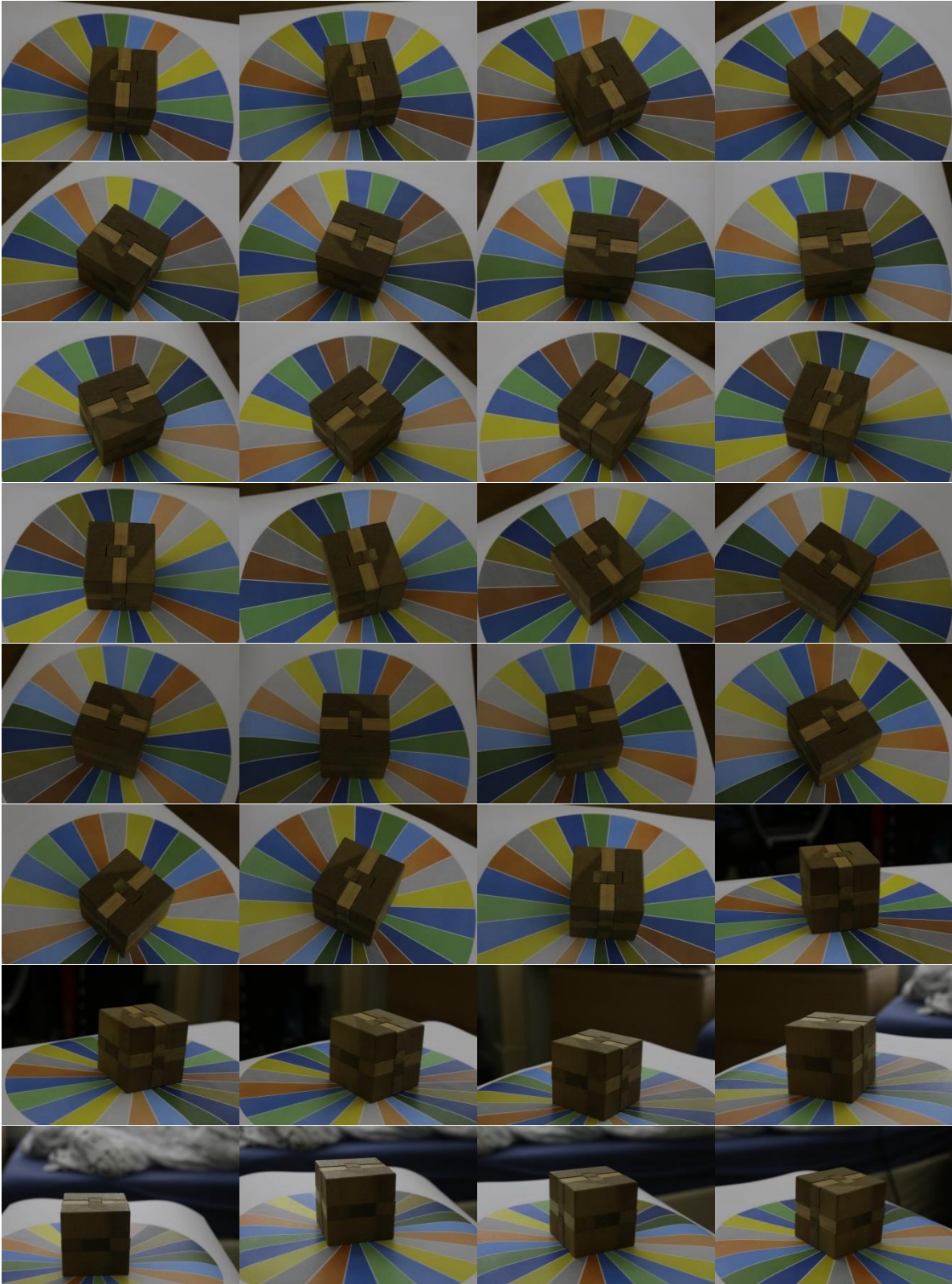


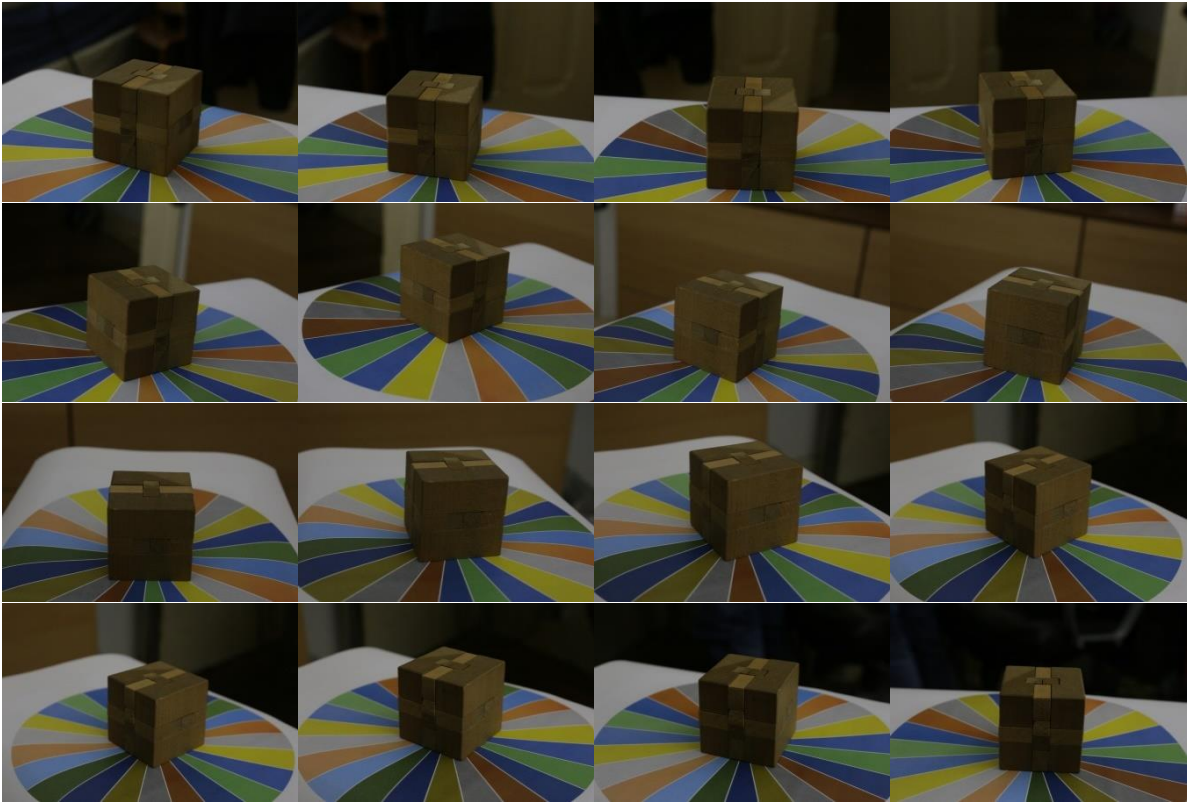
Anexo 3

Conjunto de fotografias C 9:



Conjunto de fotografías C 10:

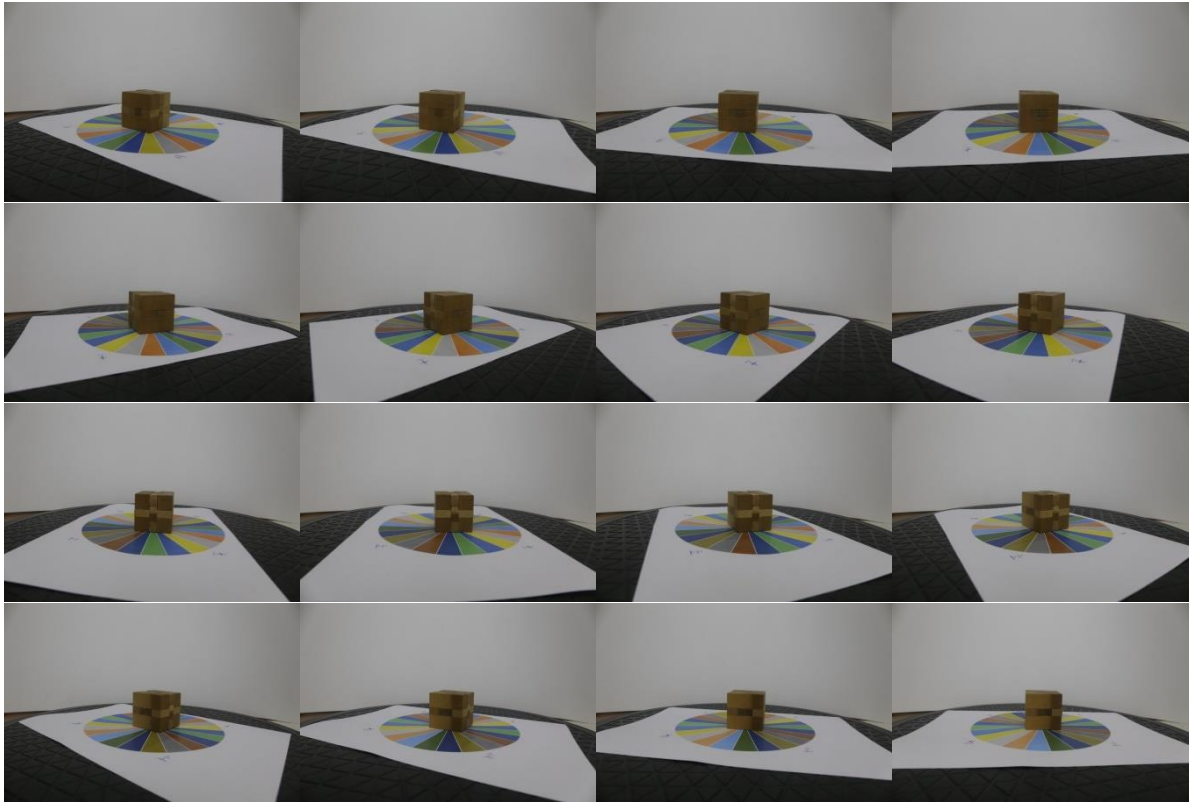




Anexo 4

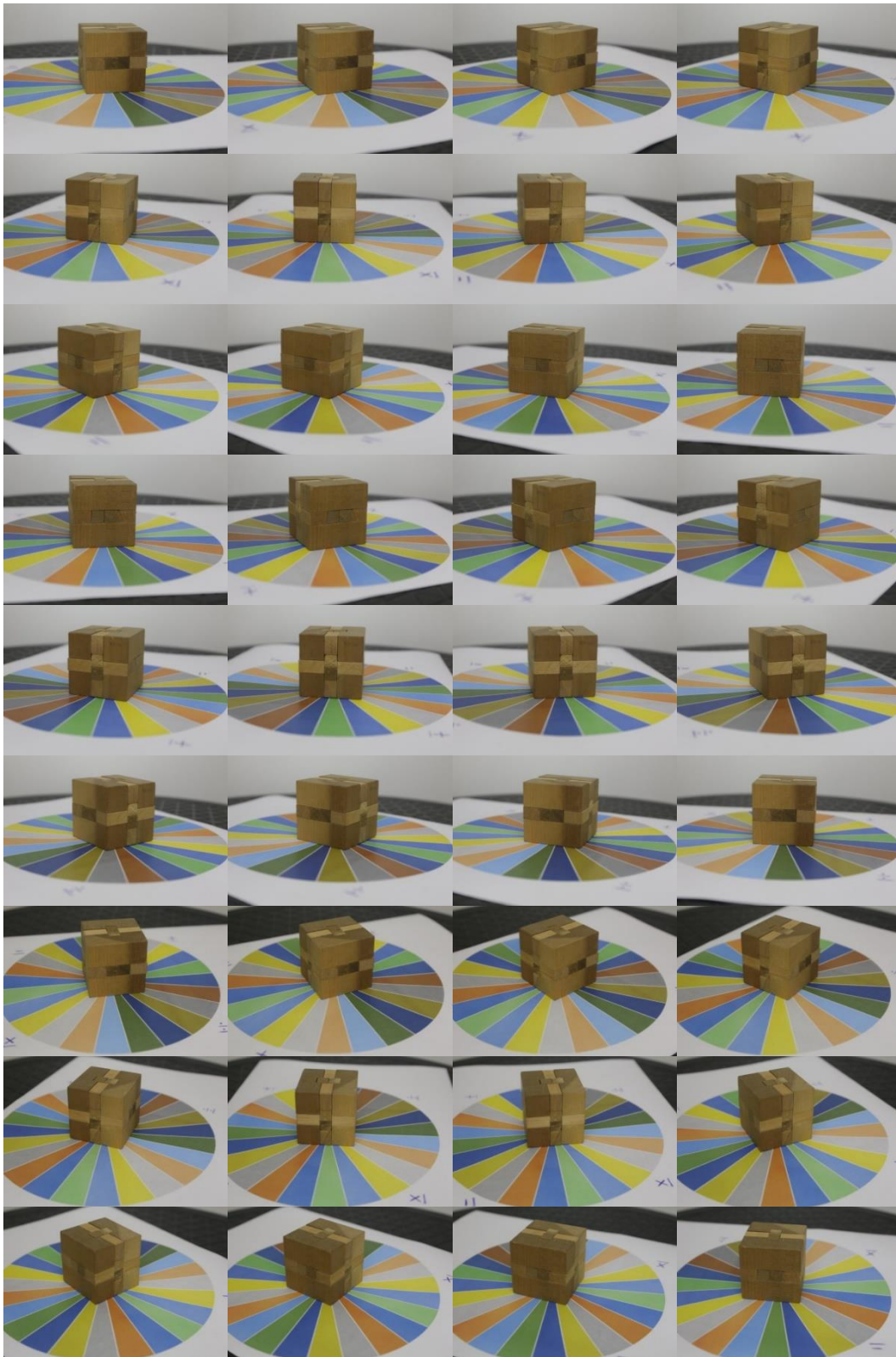
Conjunto de fotografias C 11:

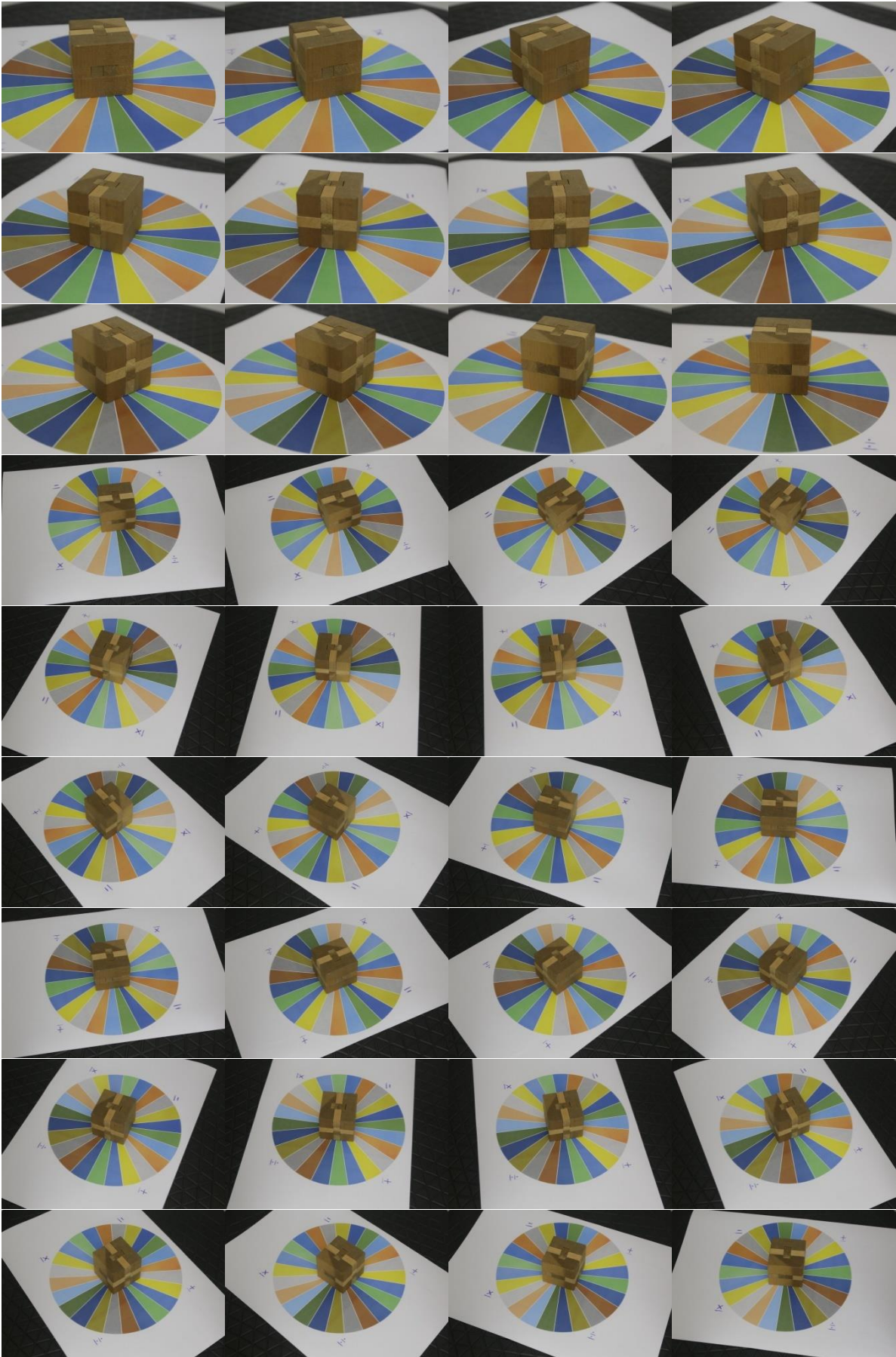




Anexo 5

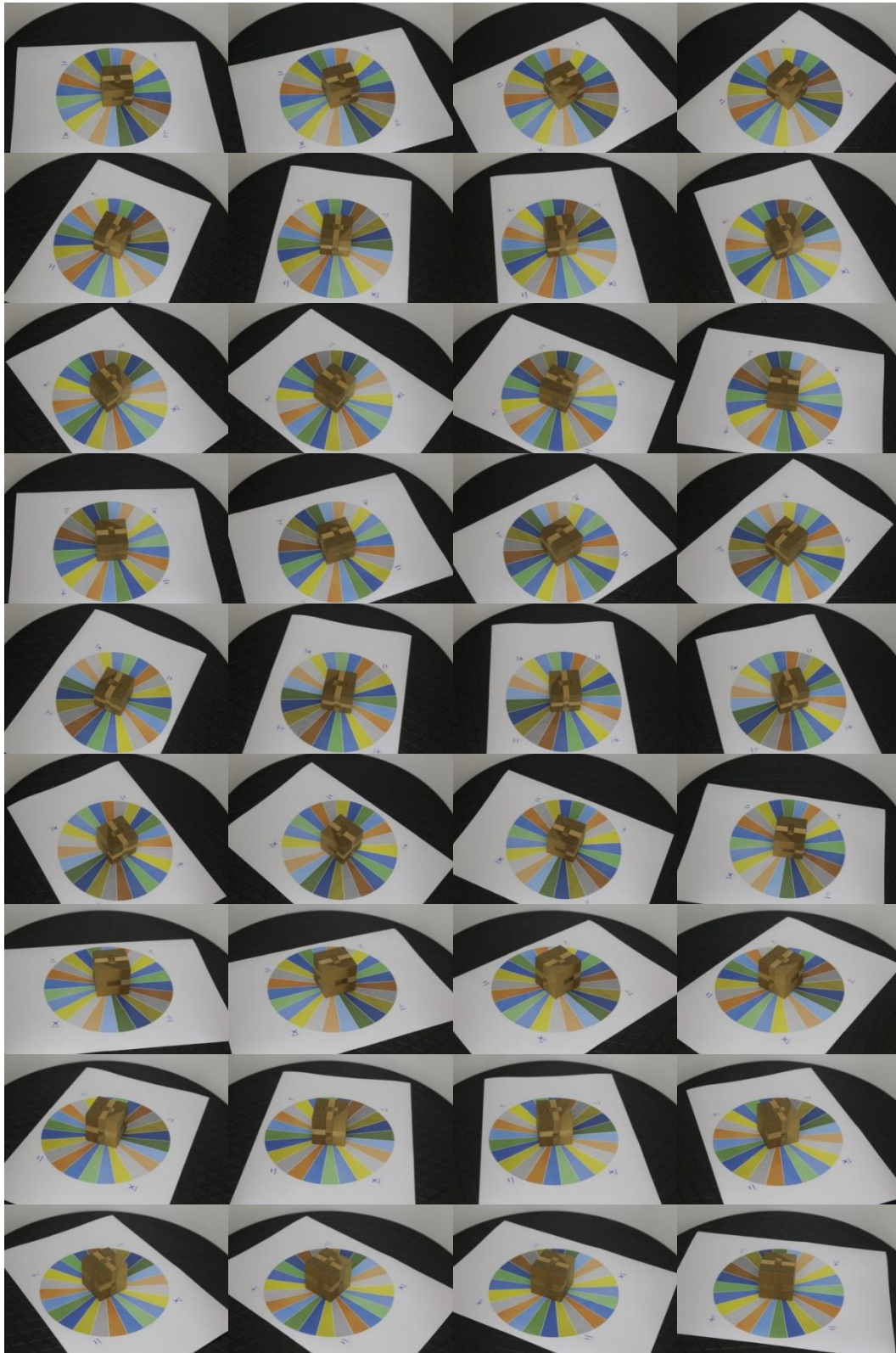
Conjunto de fotografías C 12:

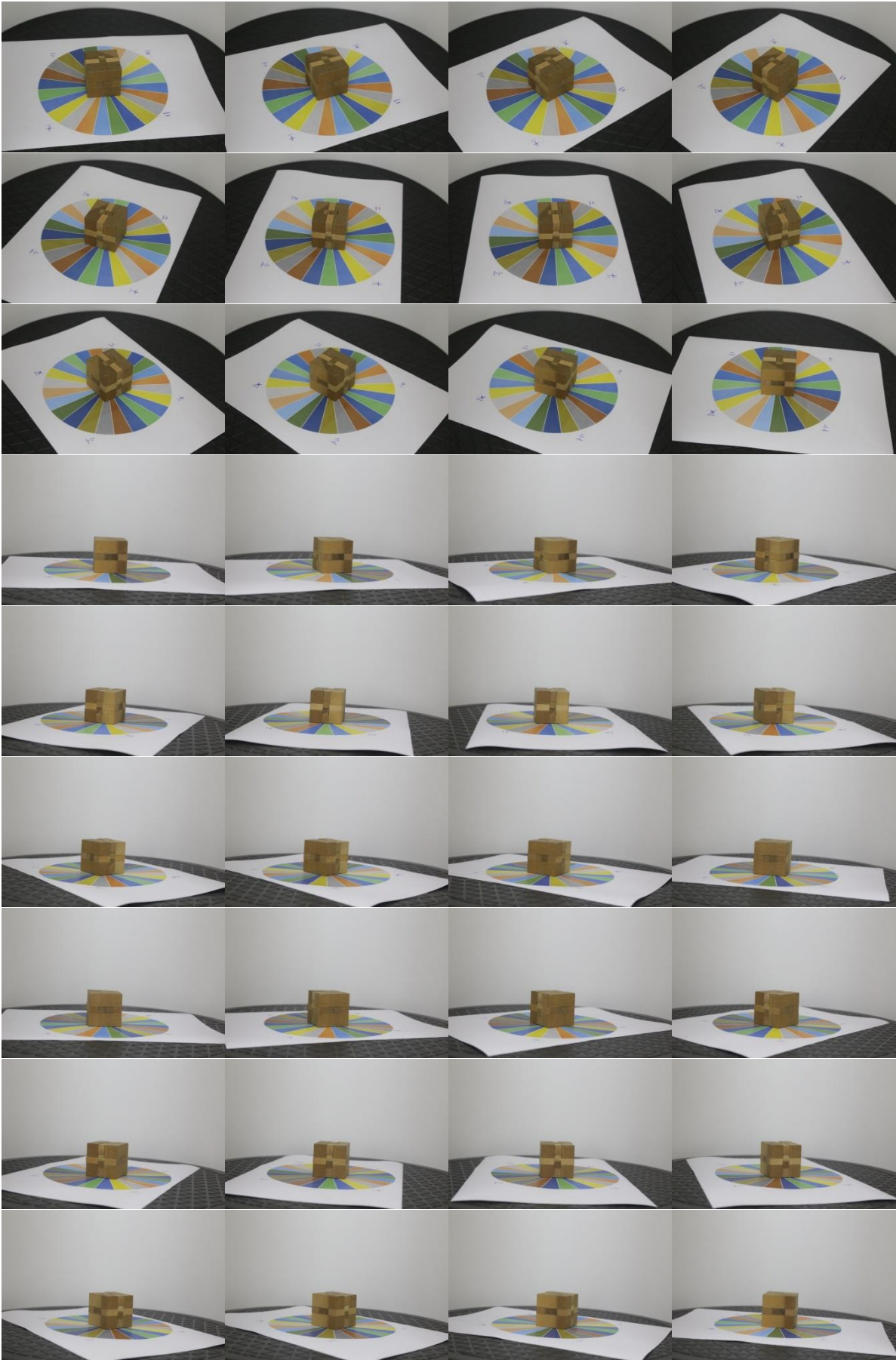




Anexo 6

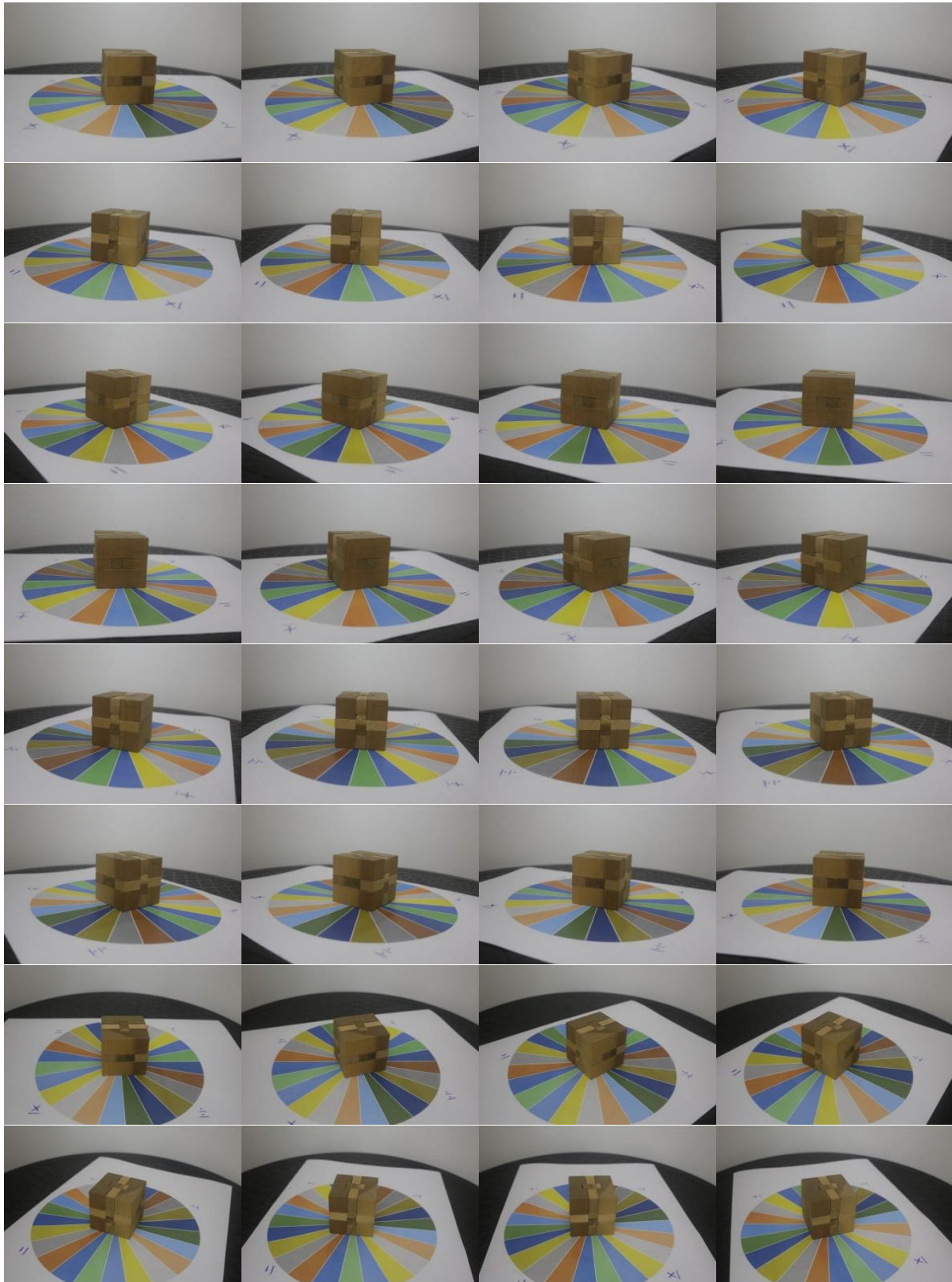
Conjunto de fotografias C 13:

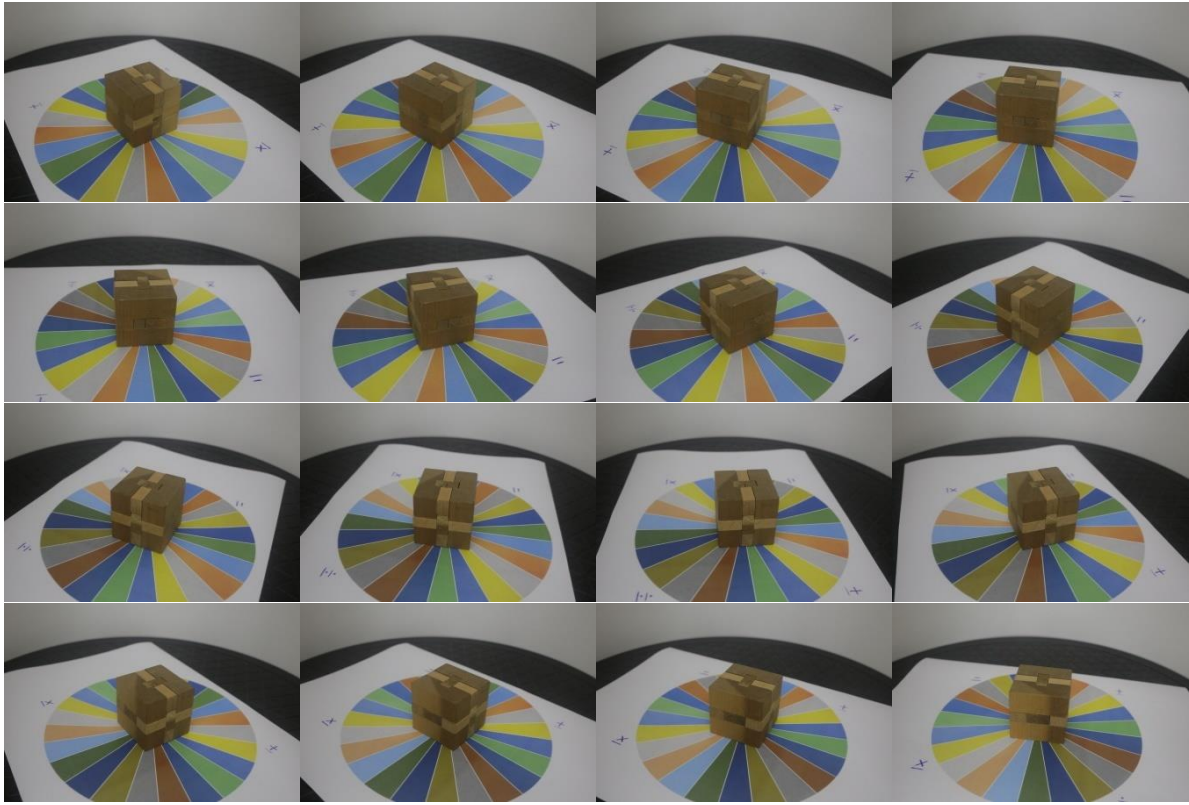




Anexo 7

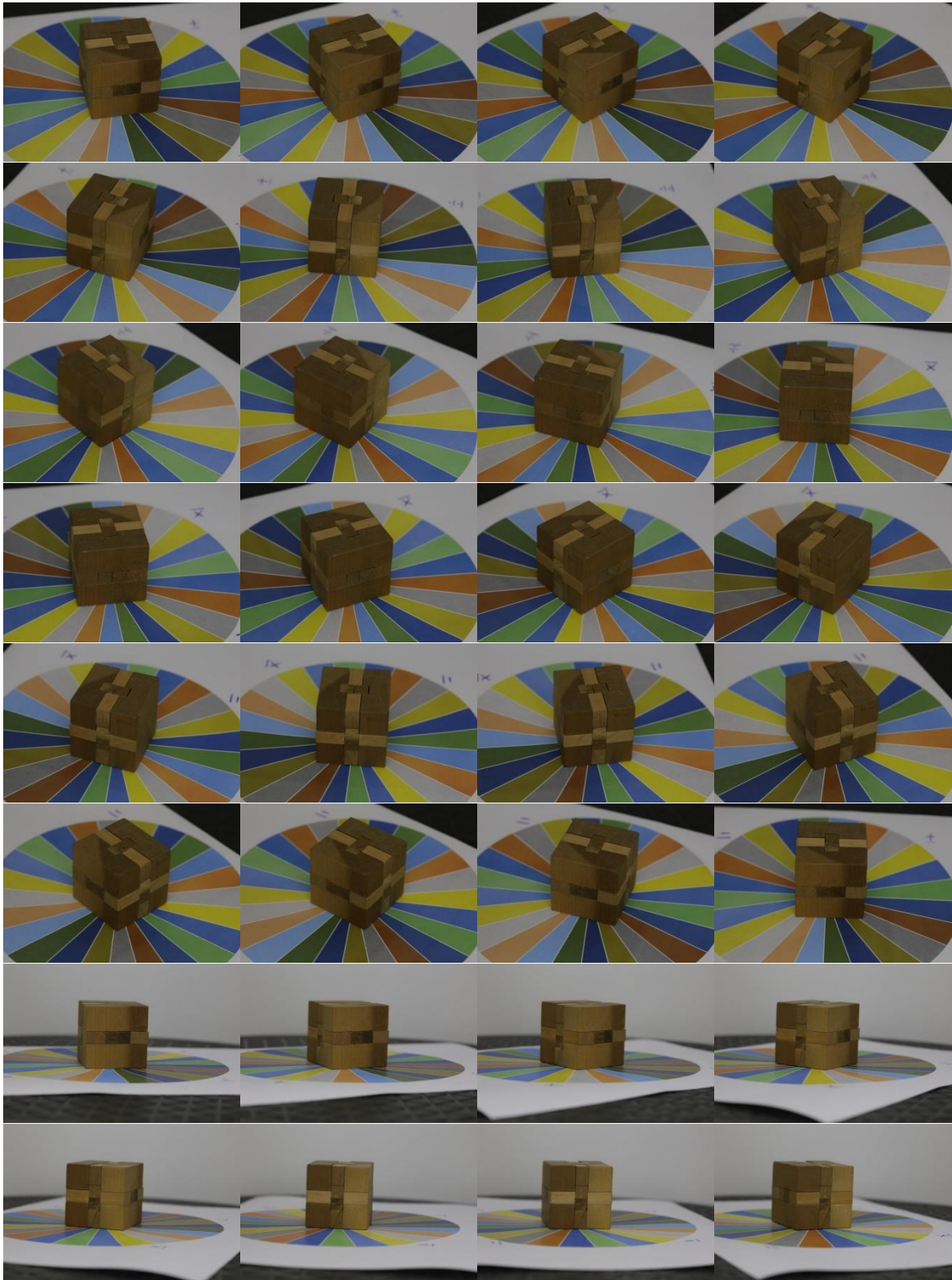
Conjunto de fotografias C 14:

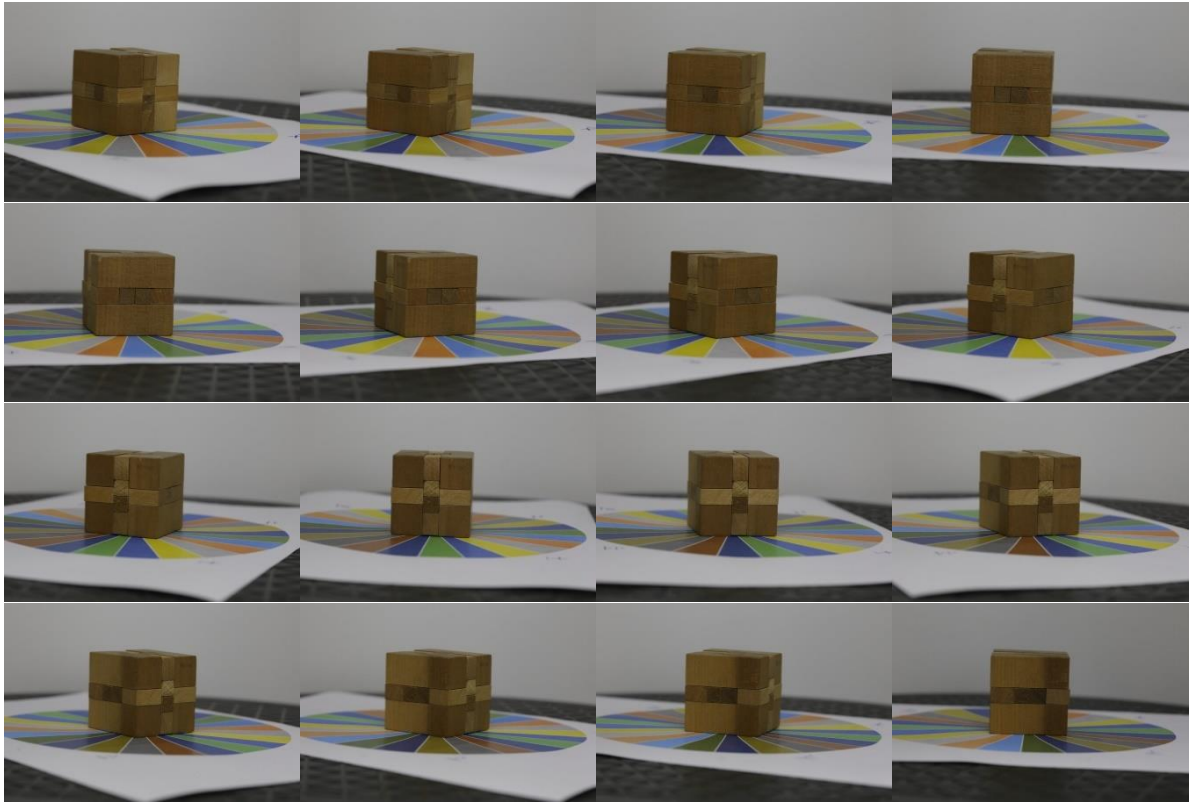




Anexo 8

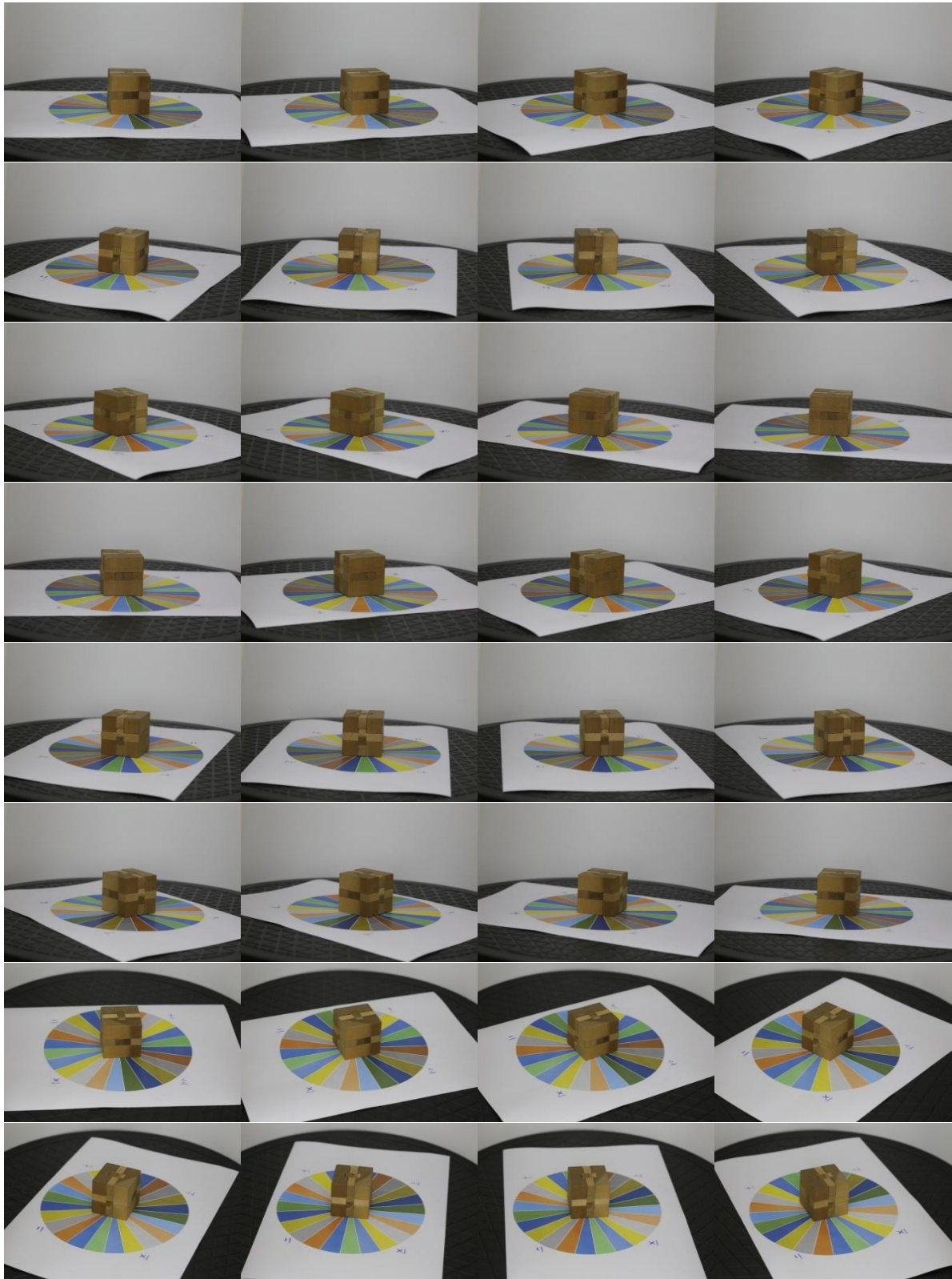
Conjunto de fotografias C 15:

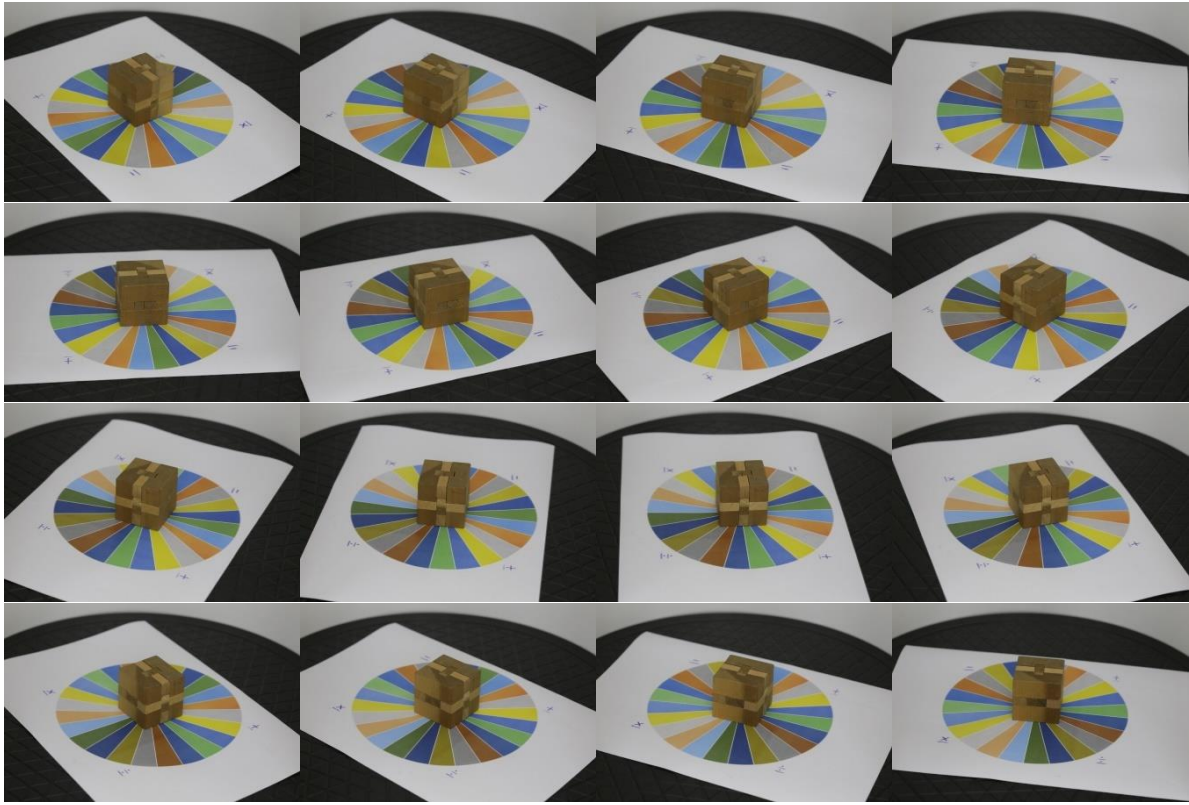




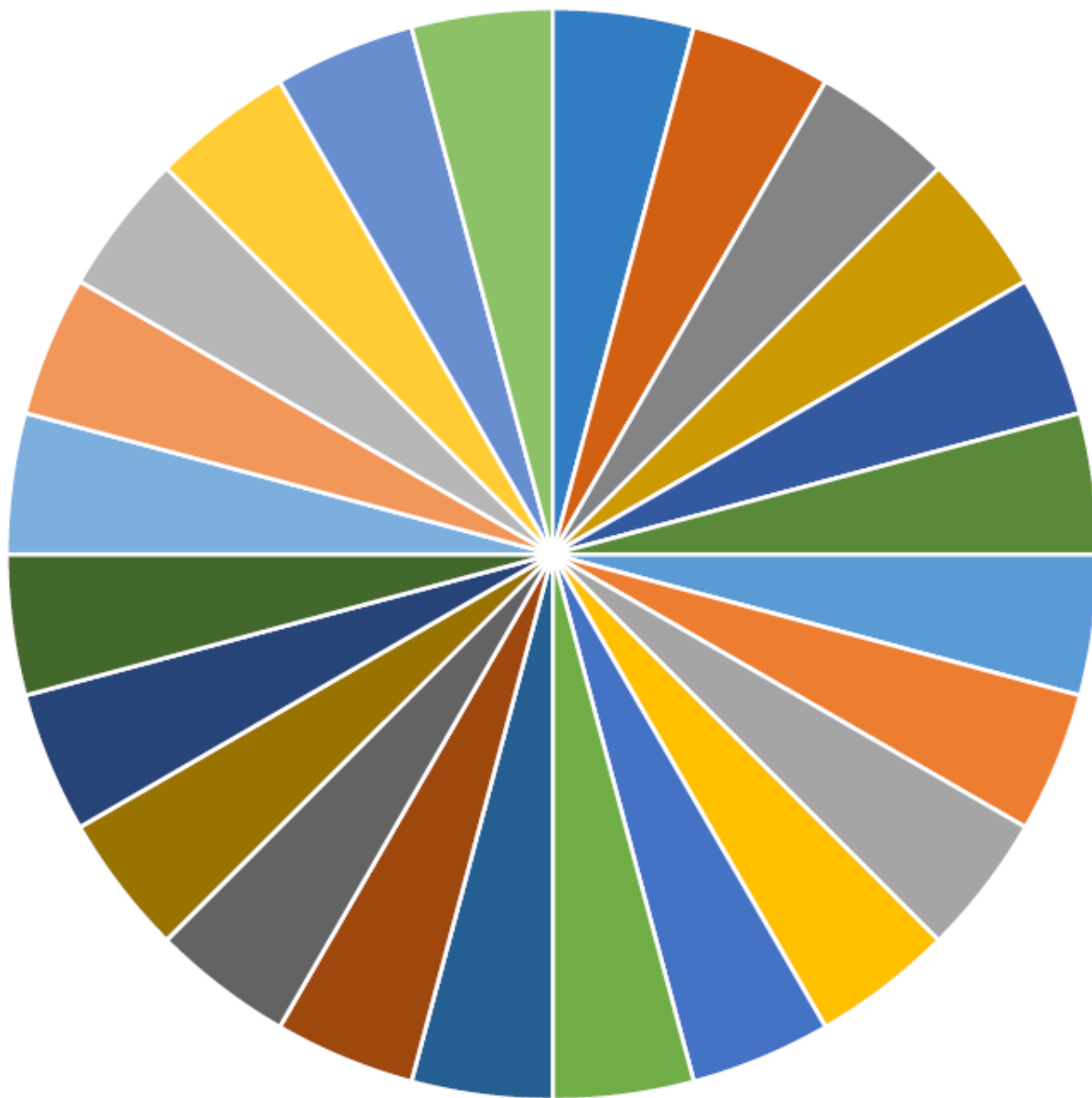
Anexo 9

Conjunto de fotografias C 16:





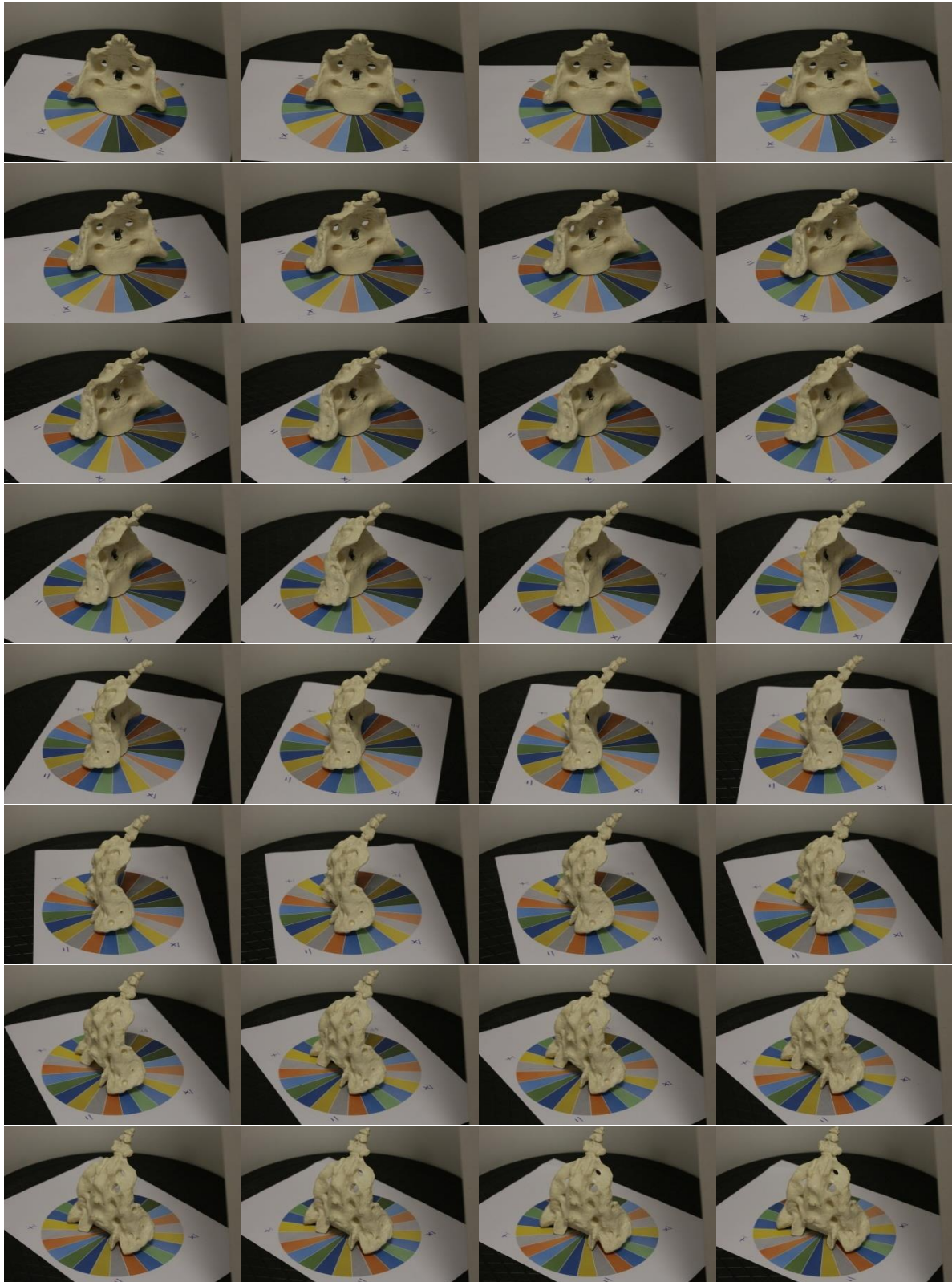
Anexo 10

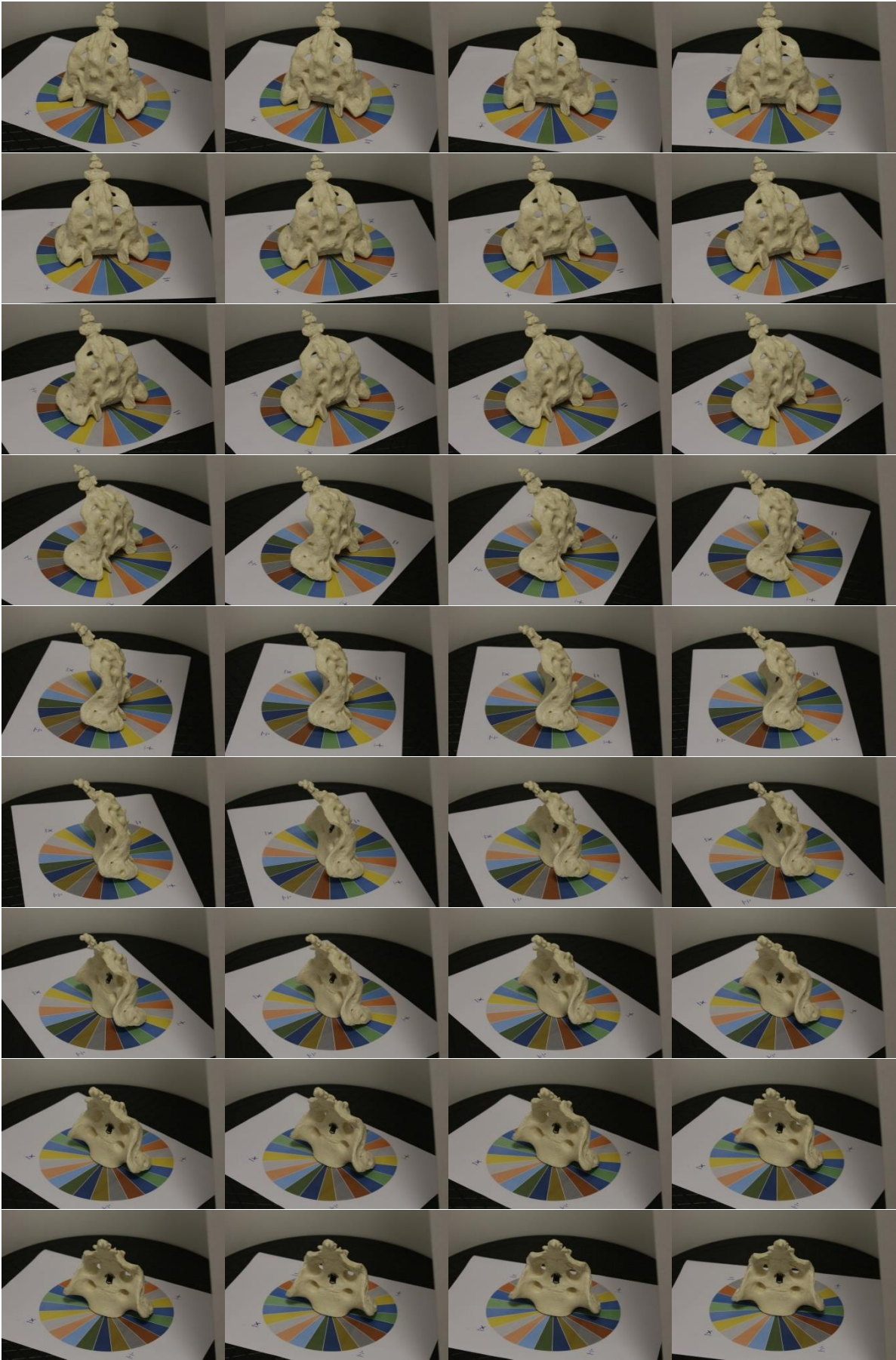


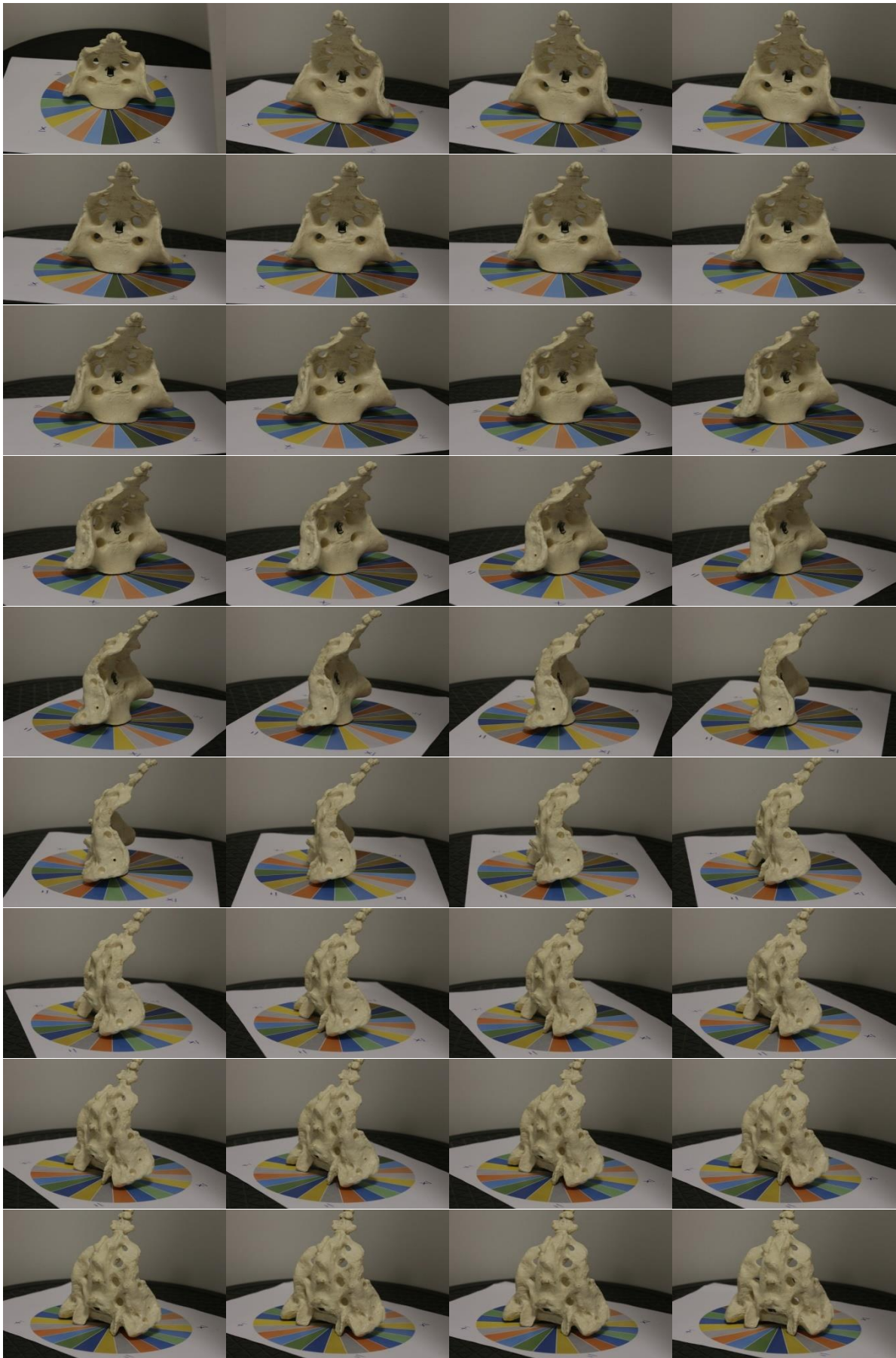
Base colorida, esta é constituída por 24 cores variadas que dividem os 360 graus, tendo assim uma noção de 24 ângulos ou 48 usando a barreira entre as cores.

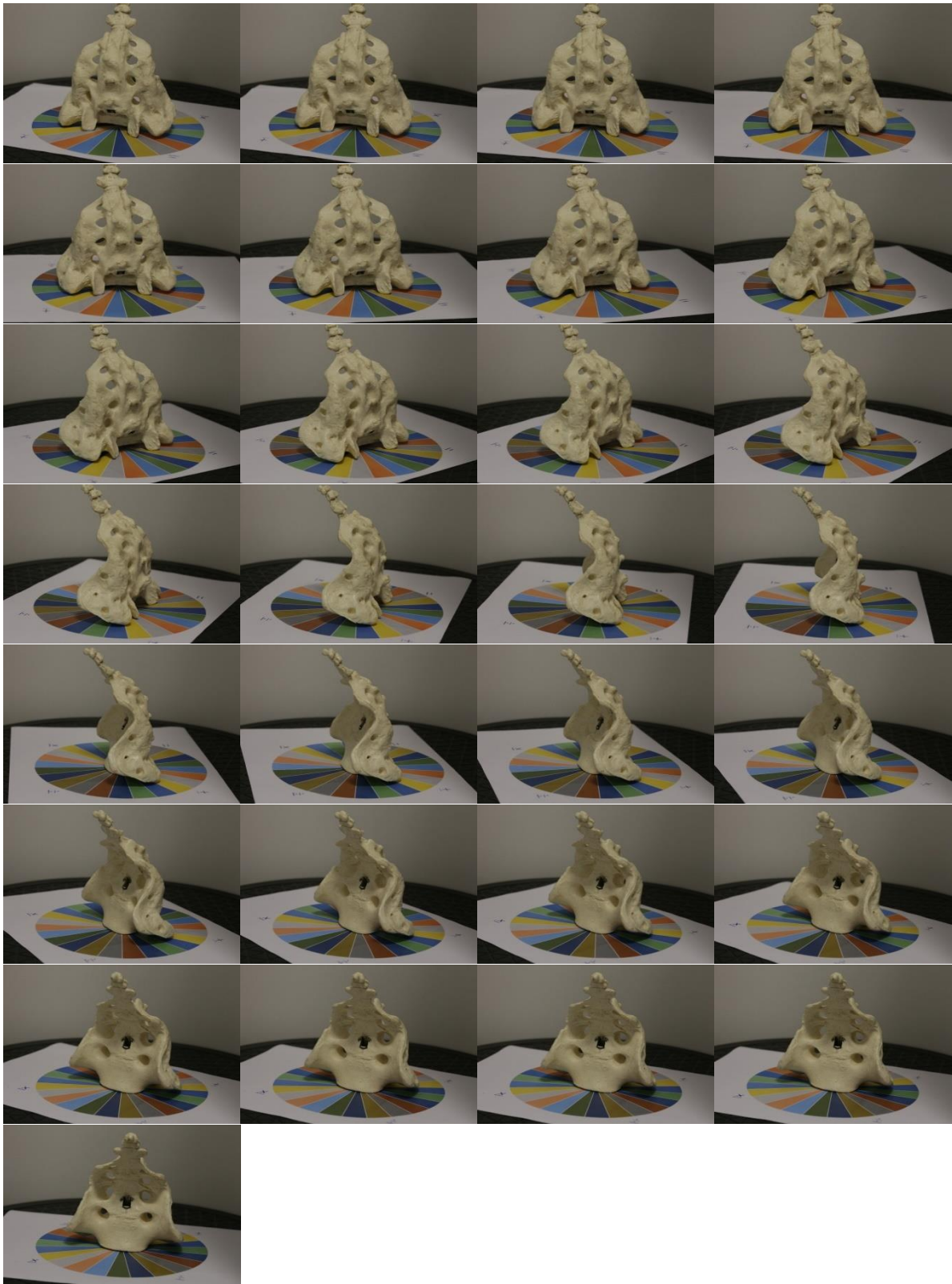
Anexo 11

Conjunto de fotografias S 1:





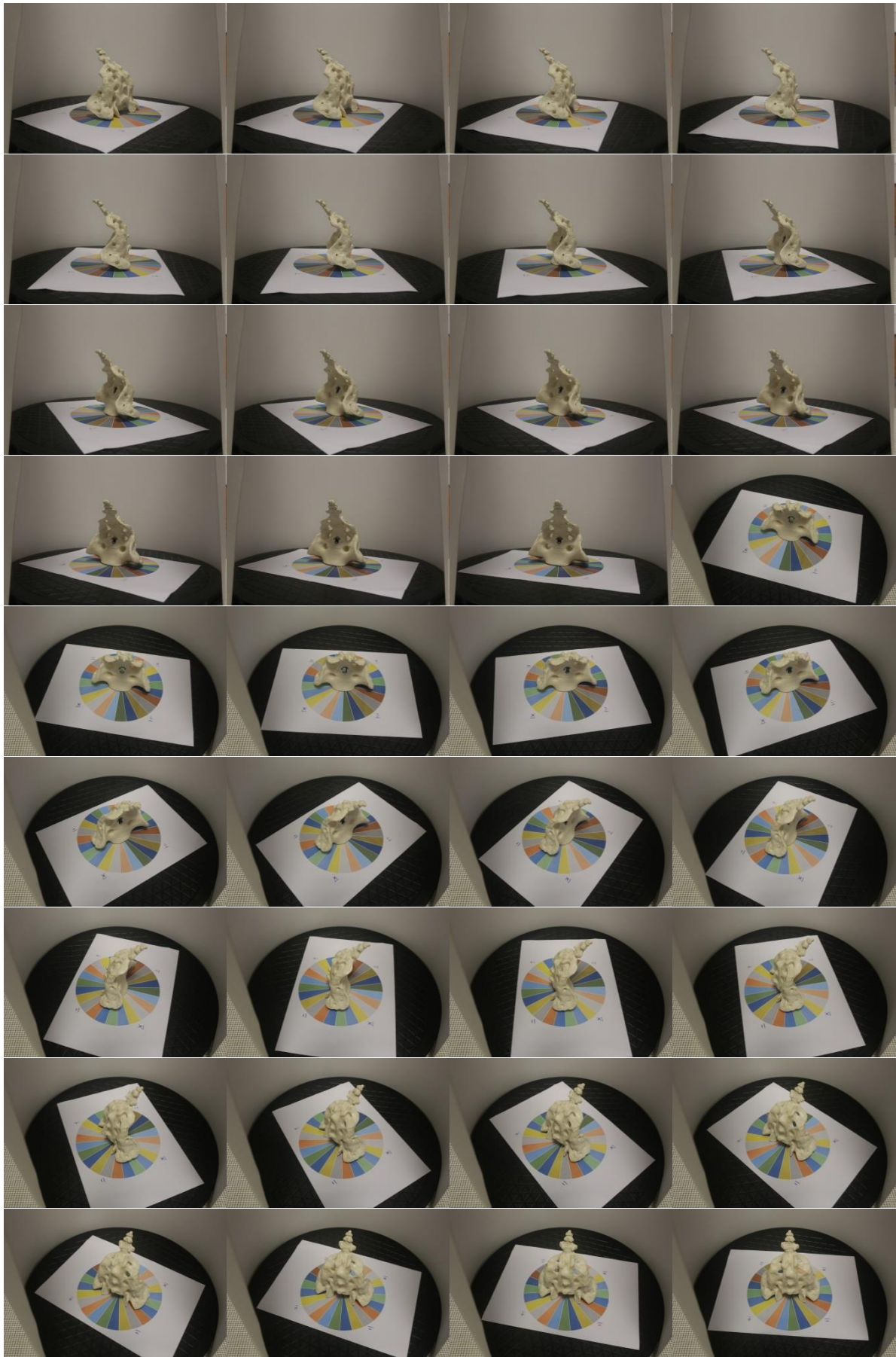


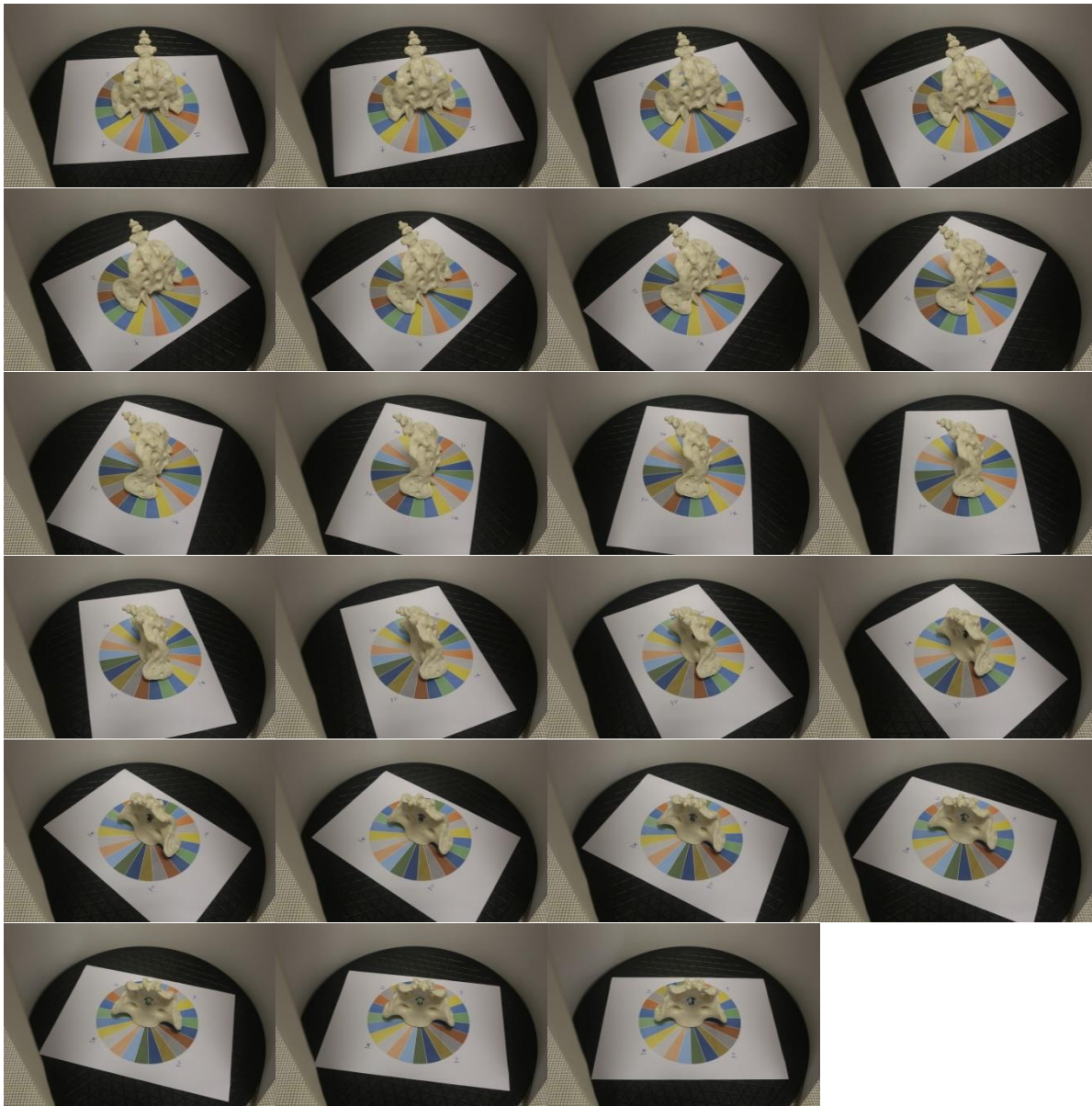


Anexo 12

Conjunto de fotografias S 2:

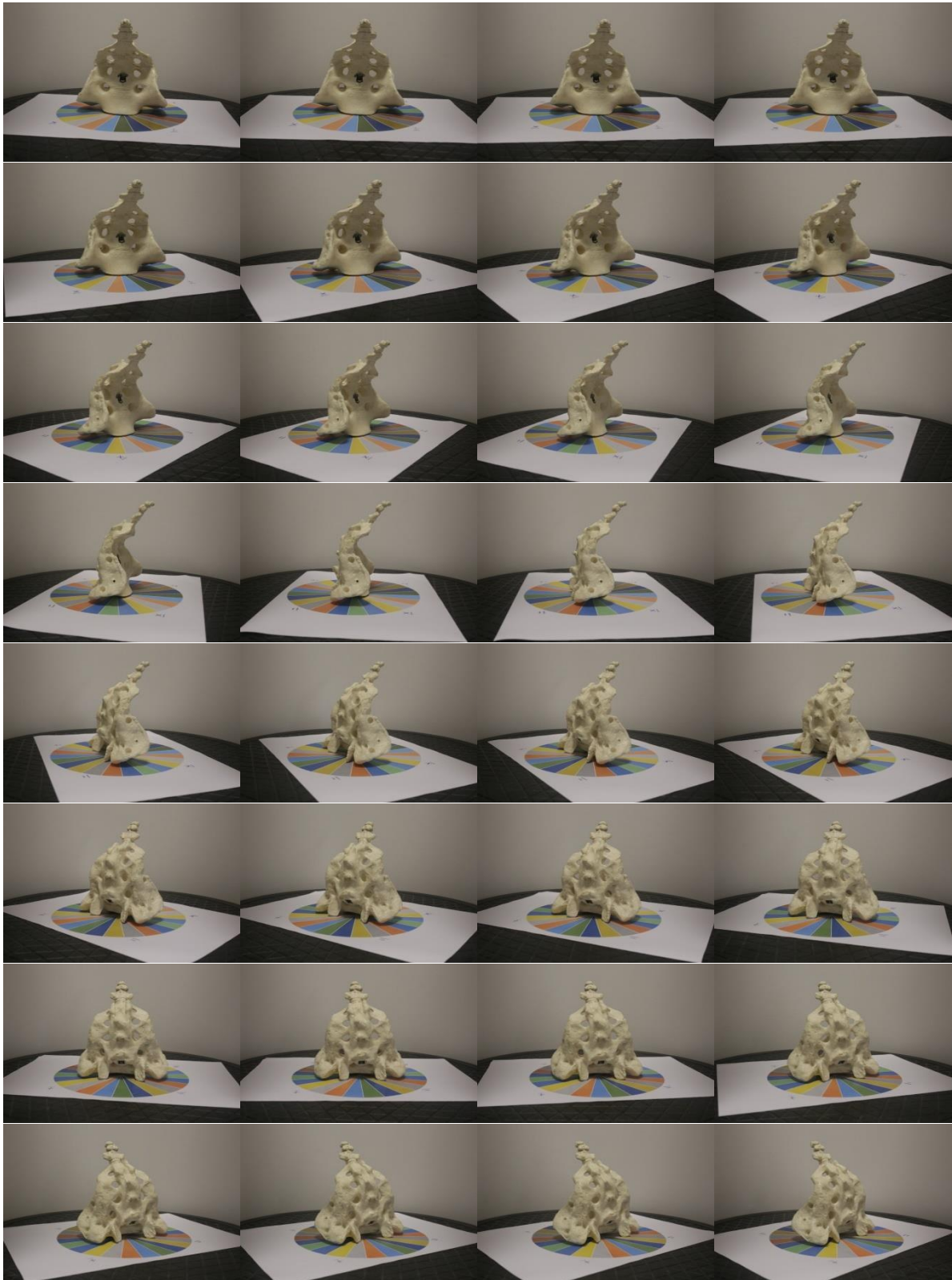




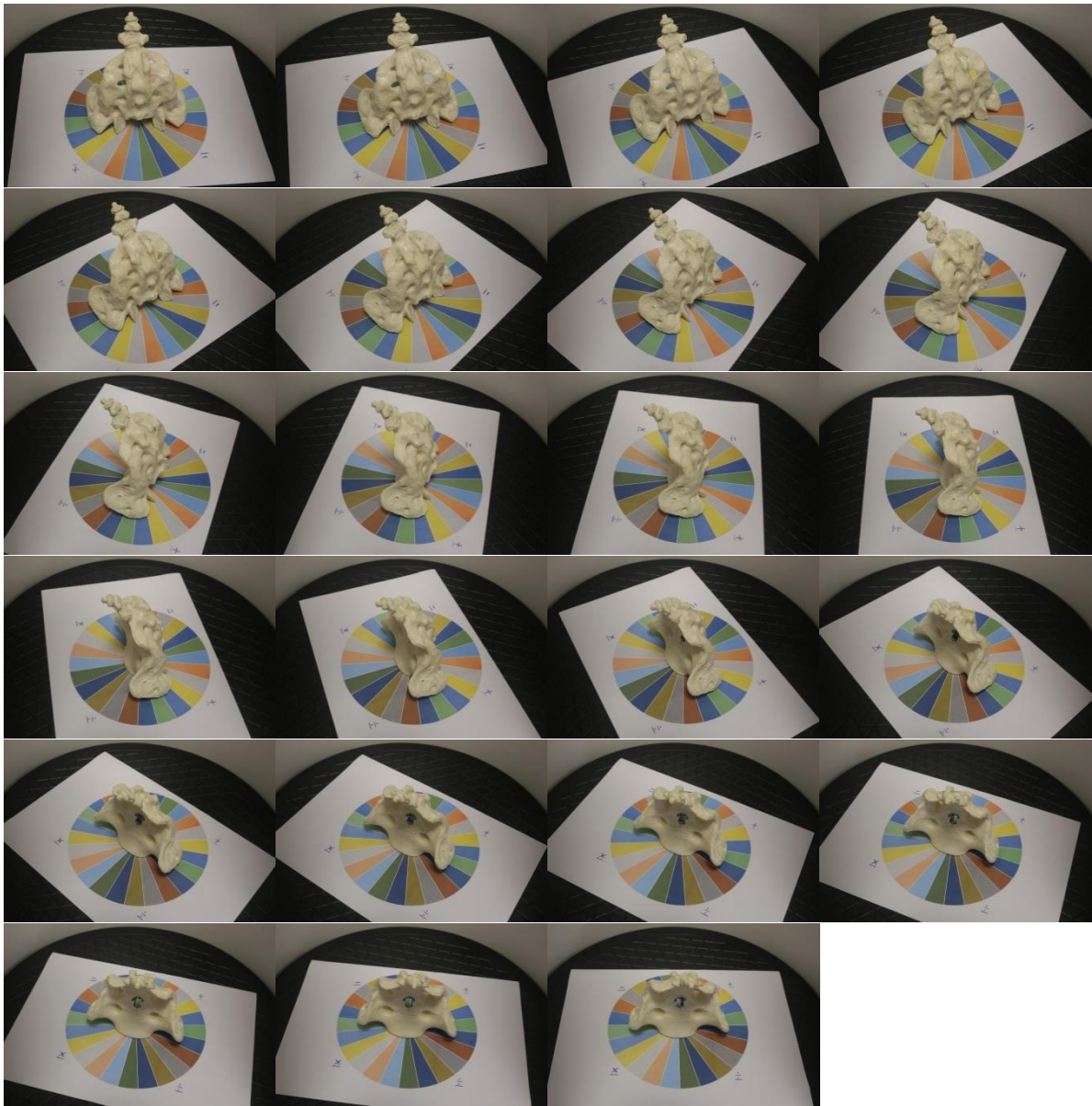


Anexo 13

Conjunto de fotografías S 2 c:



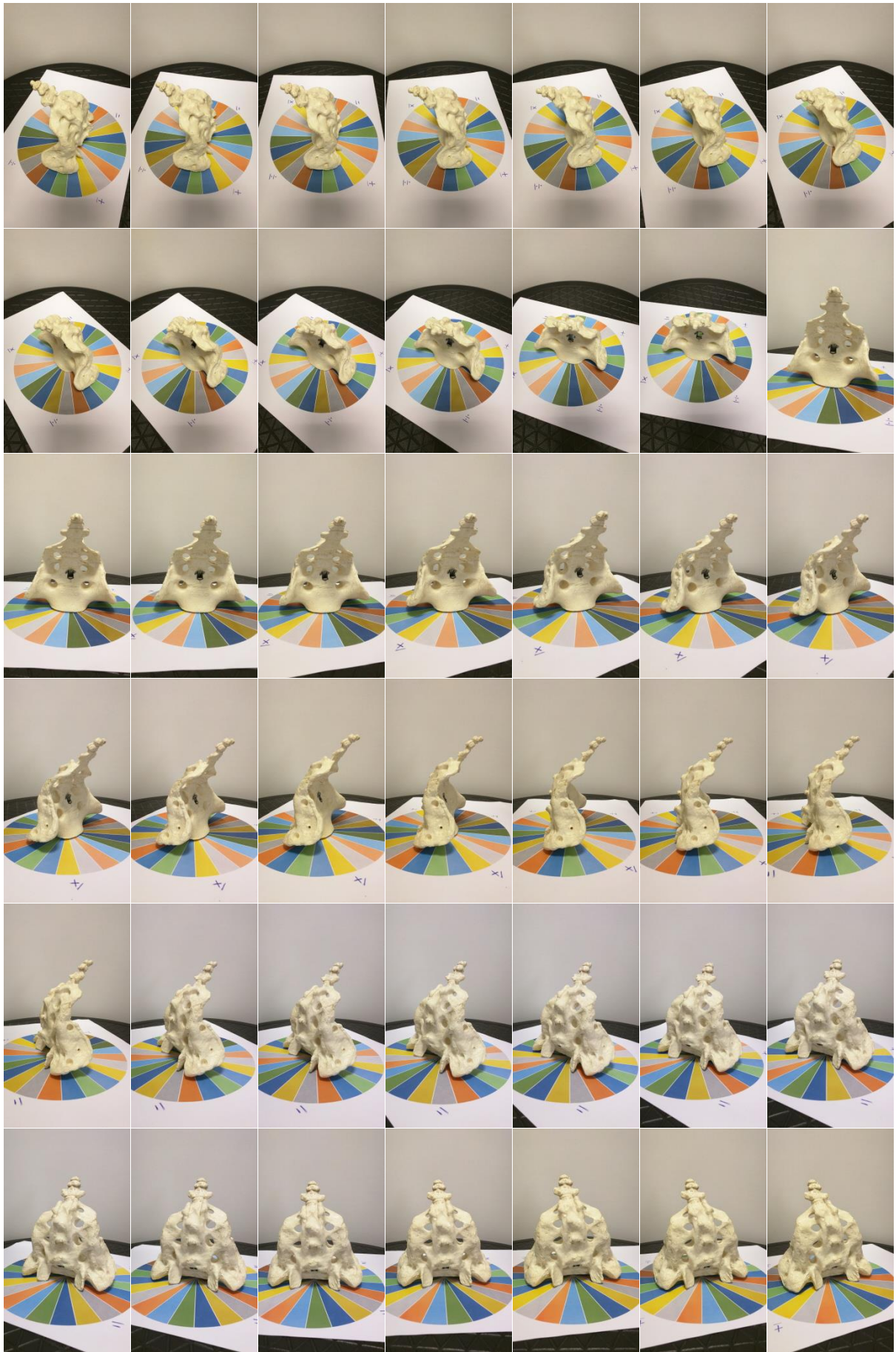


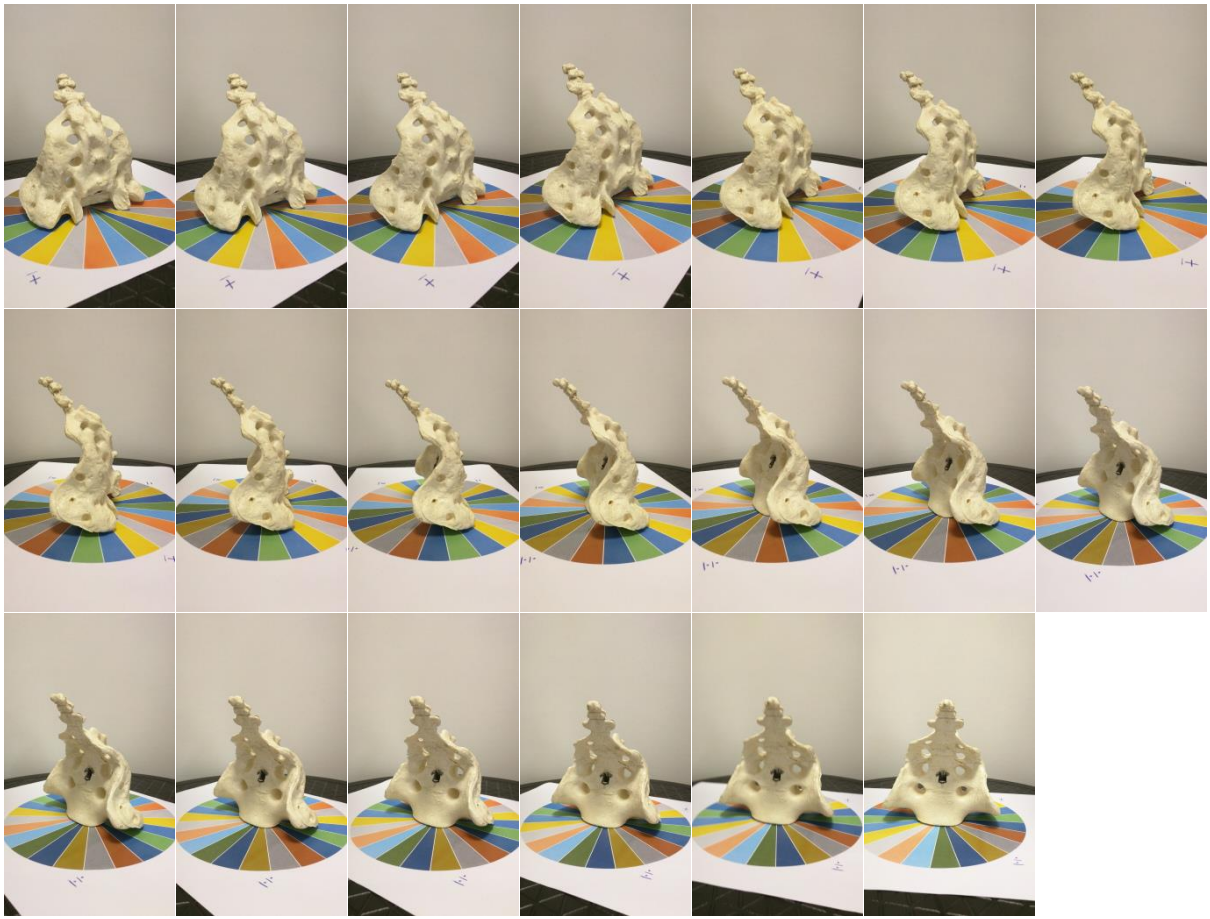


Anexo 14

Conjunto de fotografias S 3:

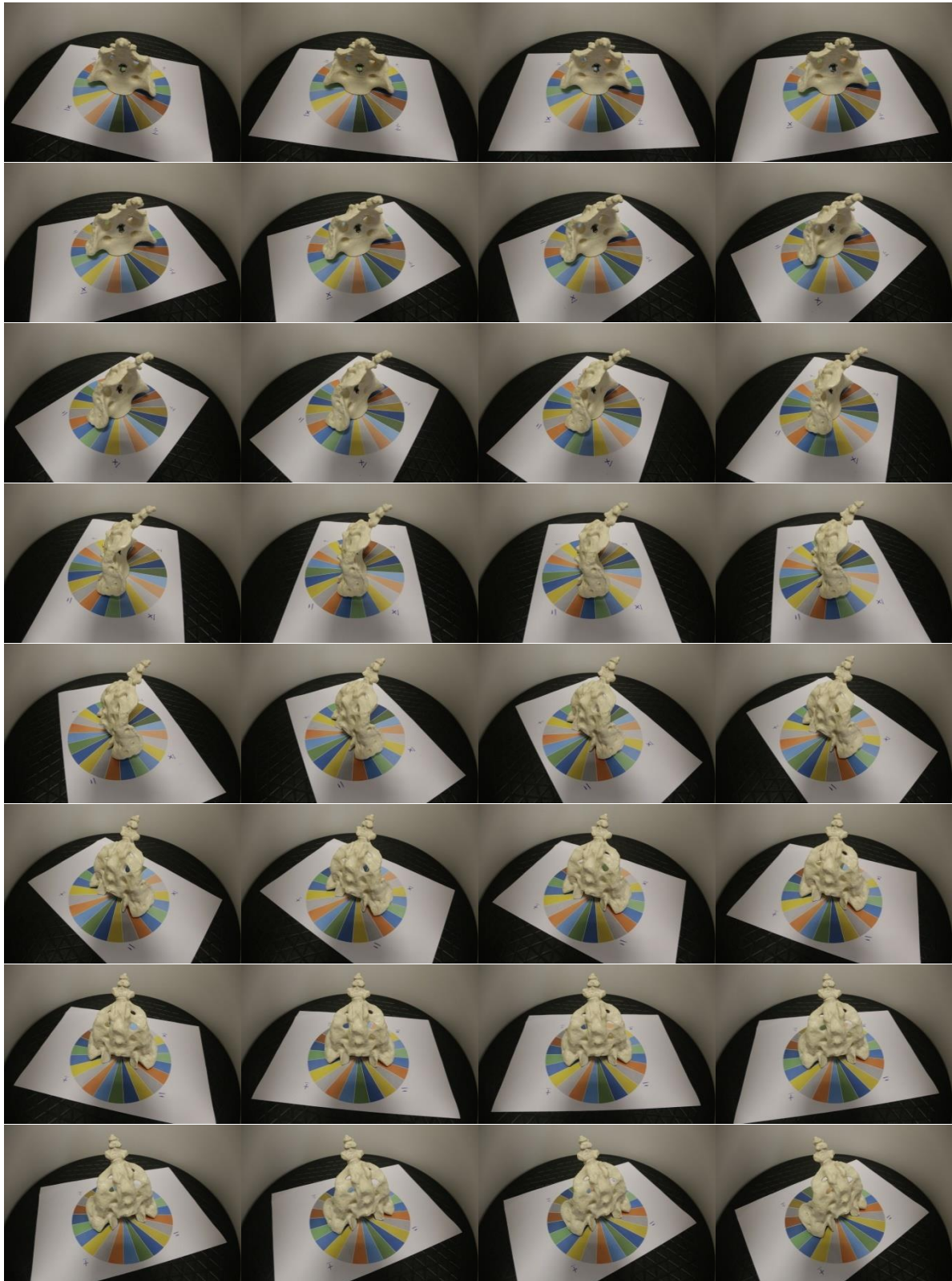


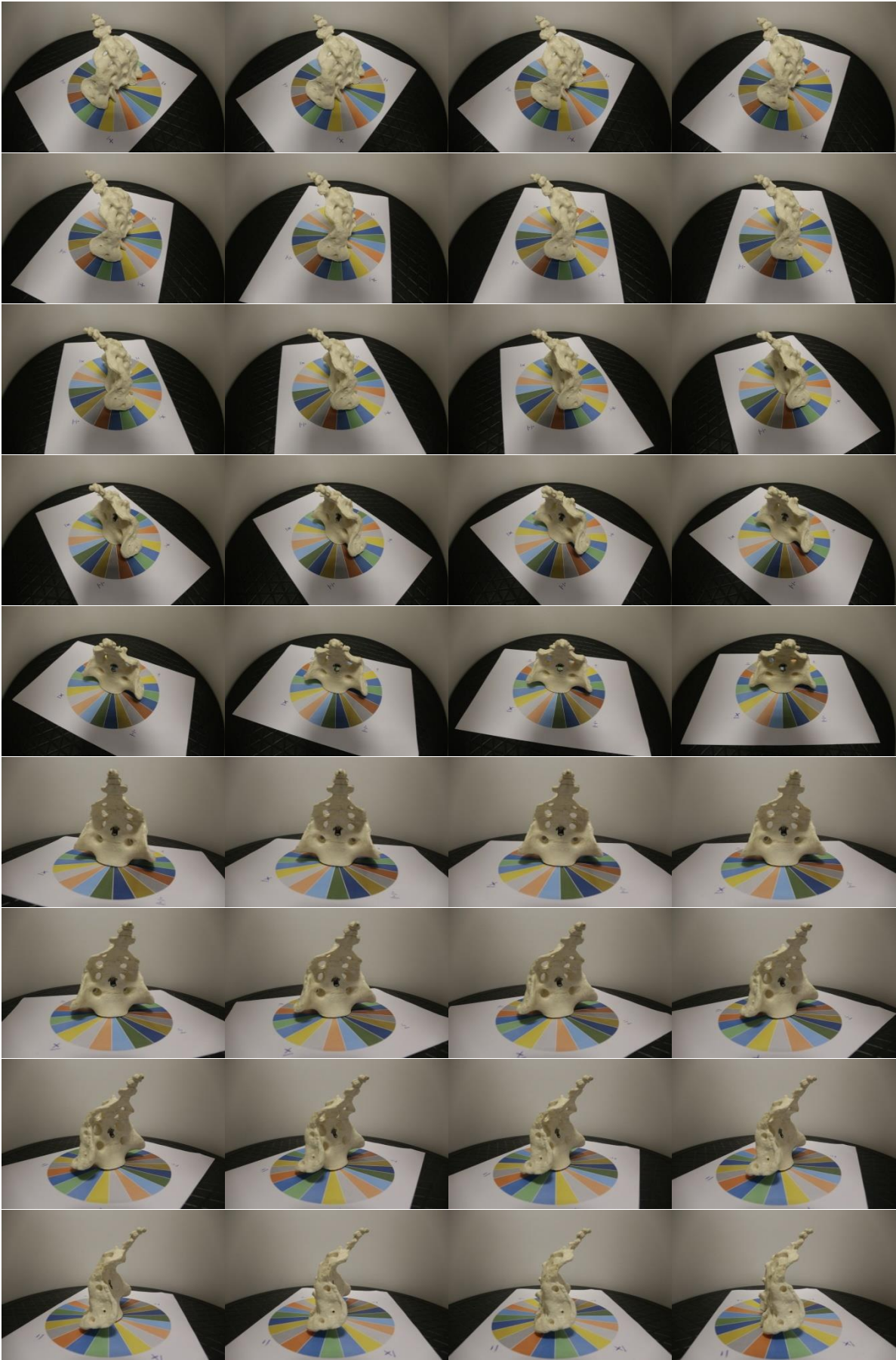




Anexo 15

Conjunto de fotografias S 4:

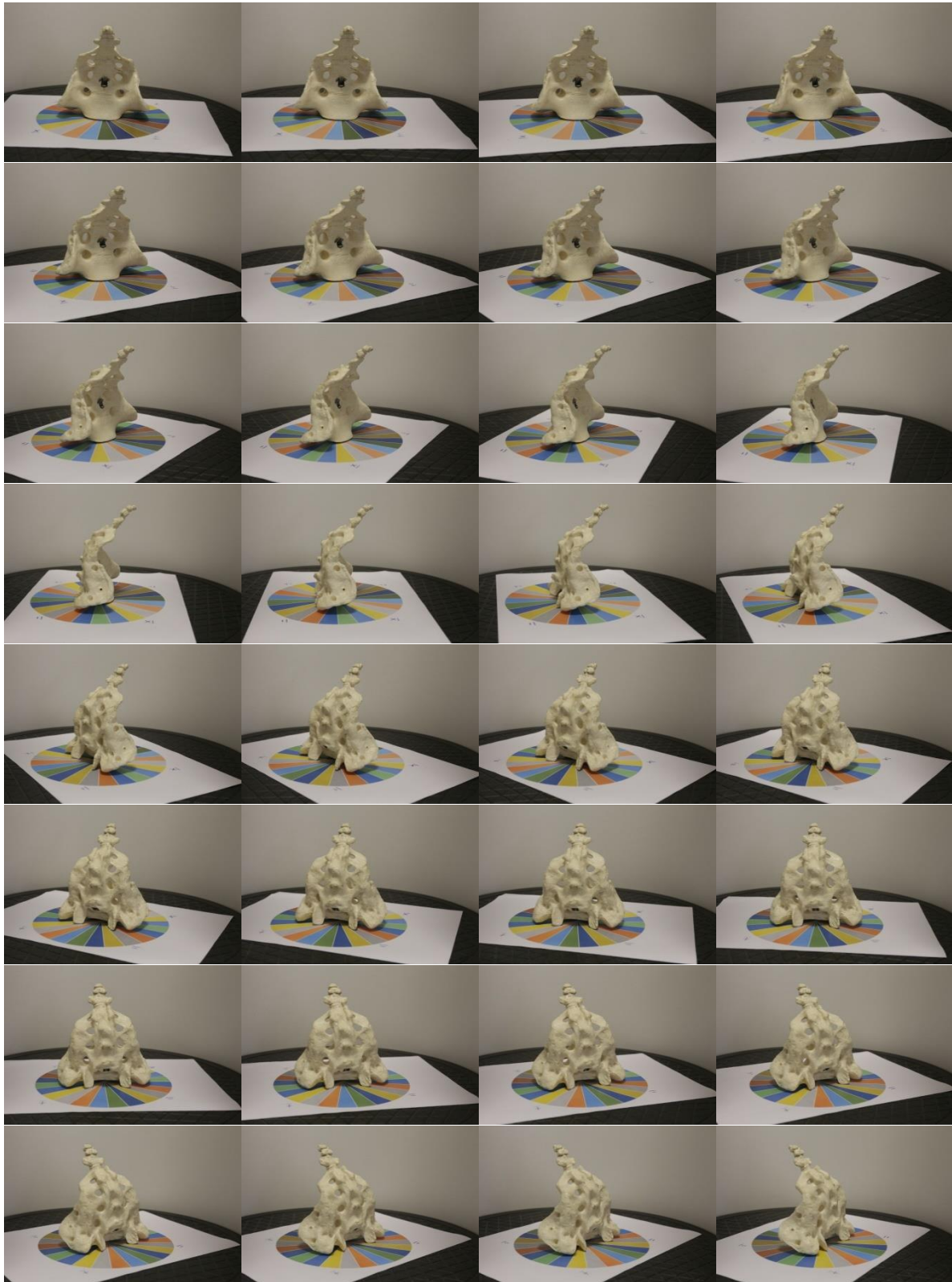




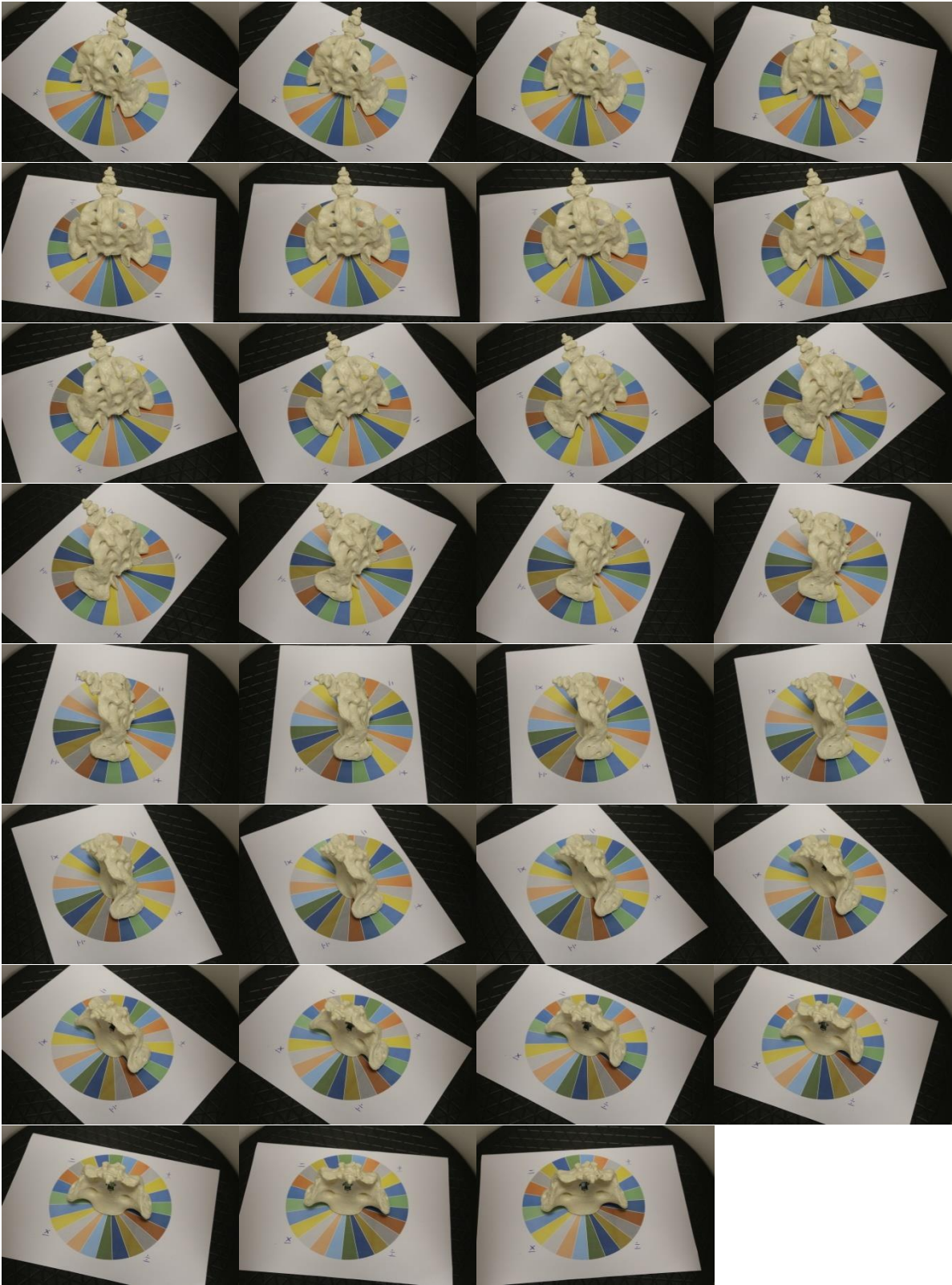


Anexo 16

Conjunto de fotografias S 5:

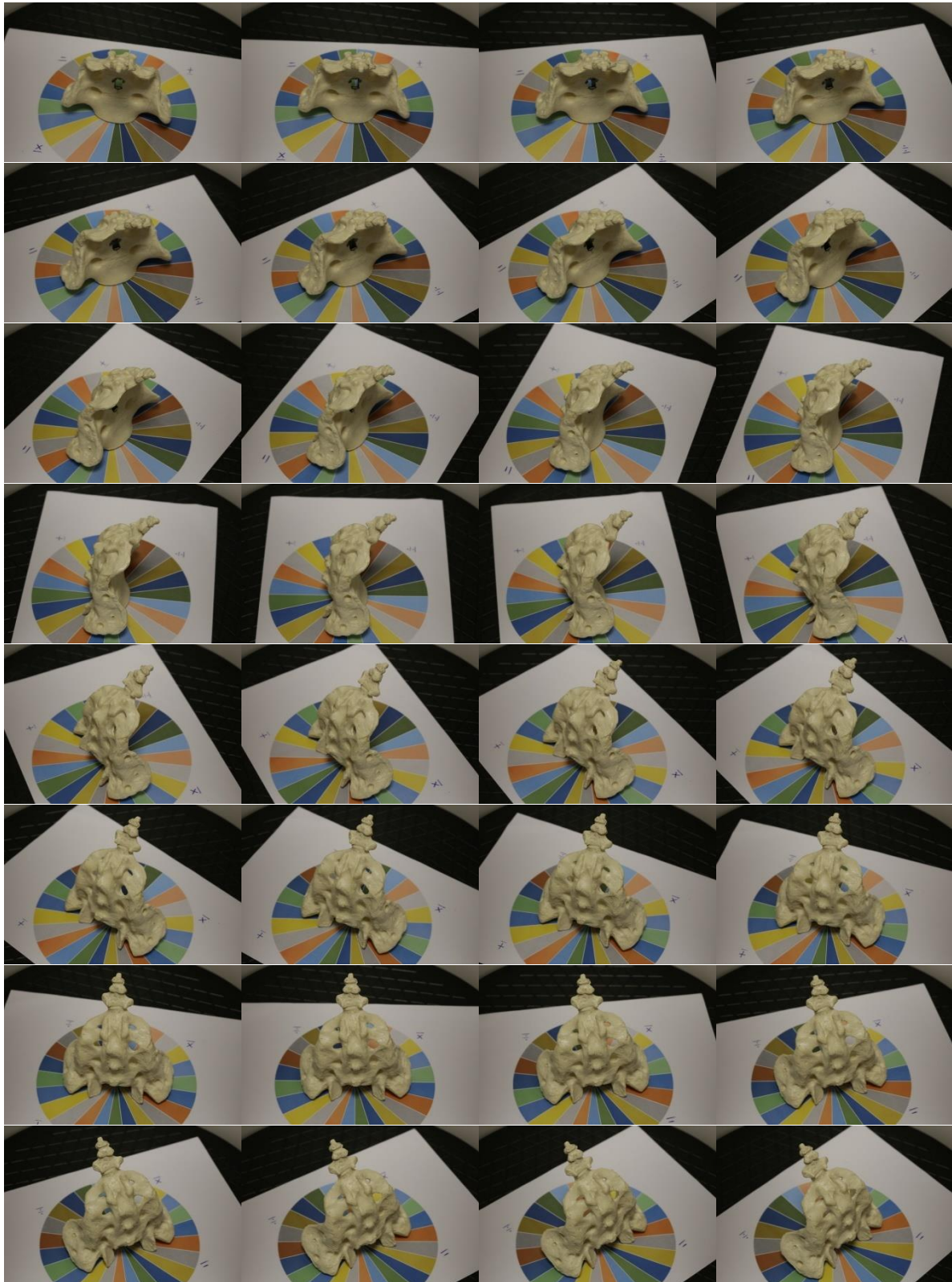


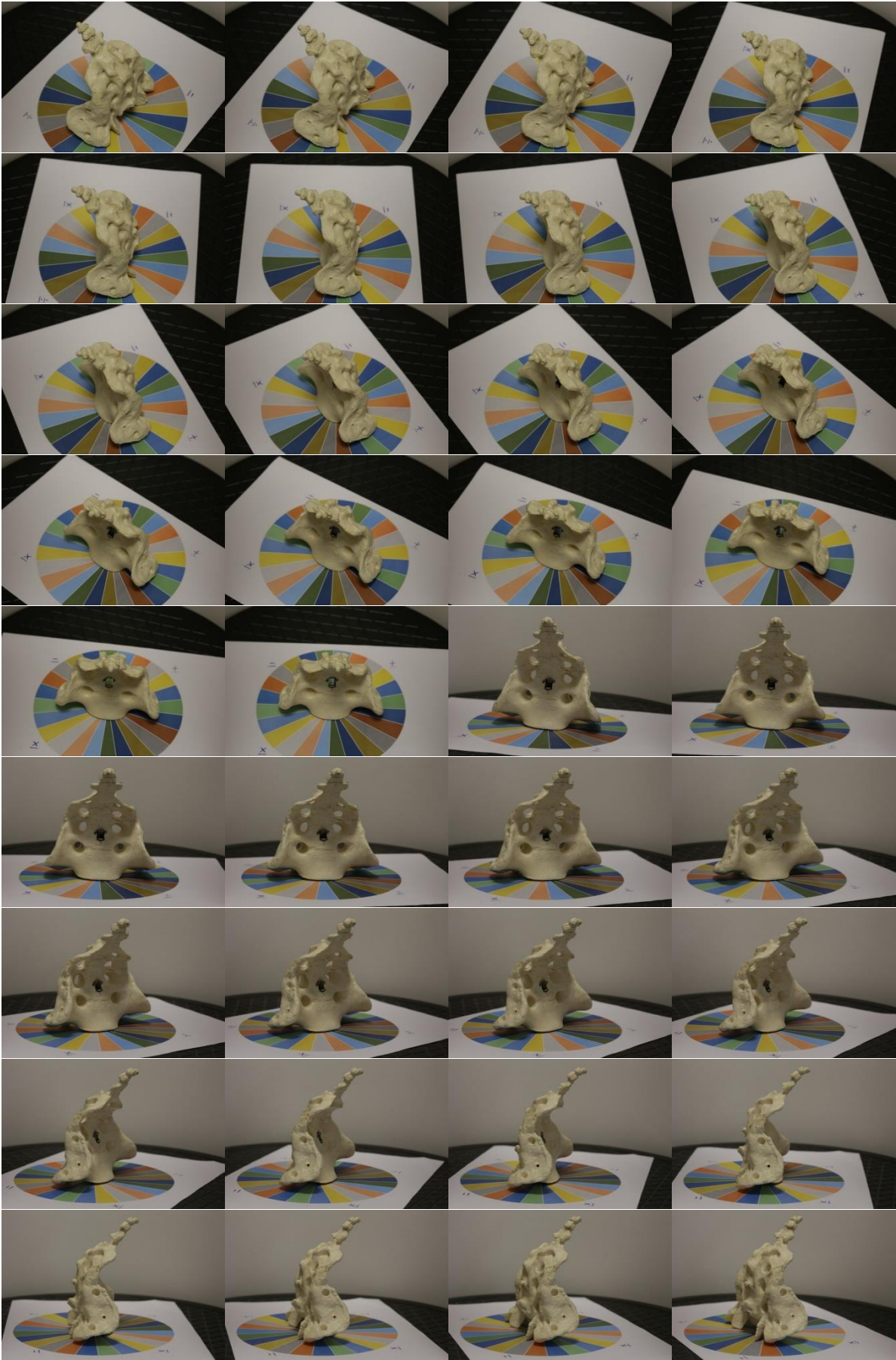


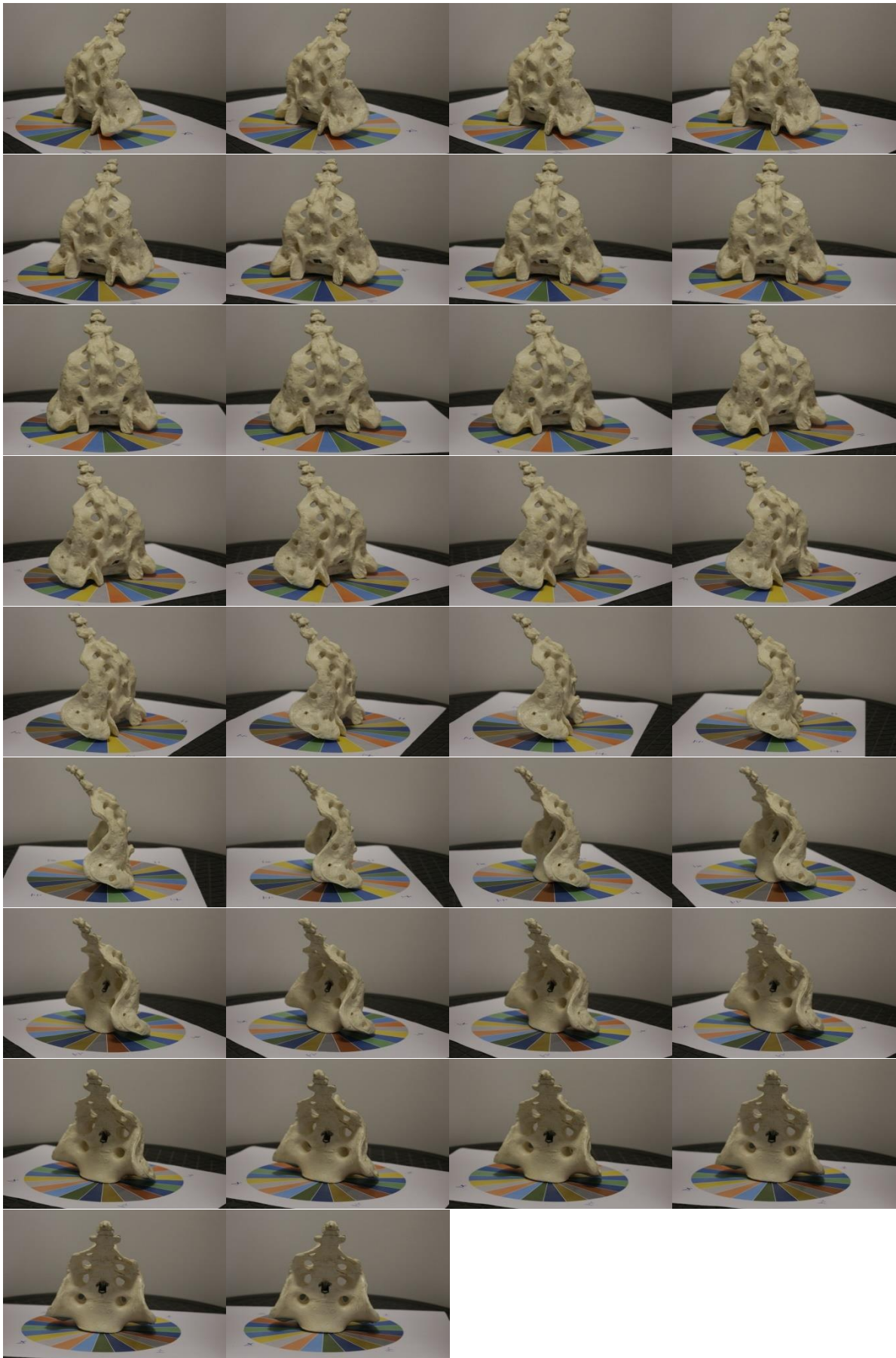


Anexo 17

Conjunto de fotografías S 6:

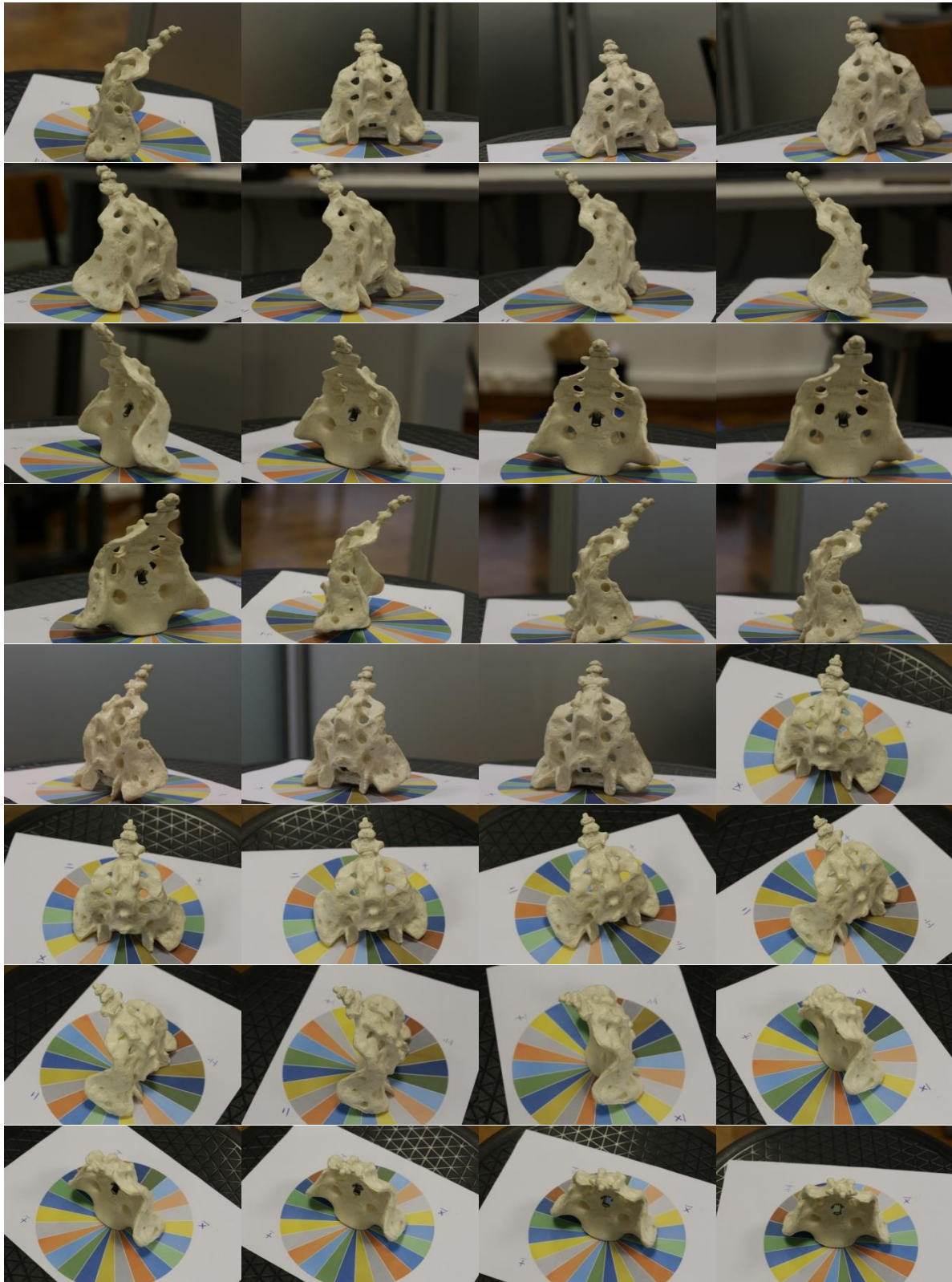


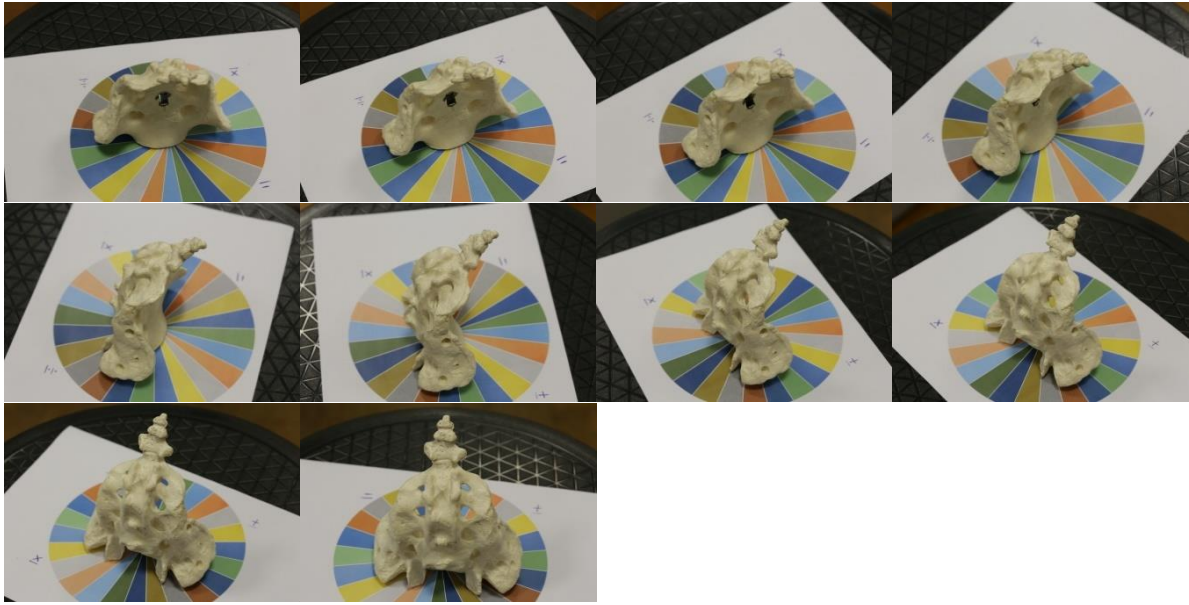




Anexo 18

Conjunto de fotografias S 7:





Anexo 19

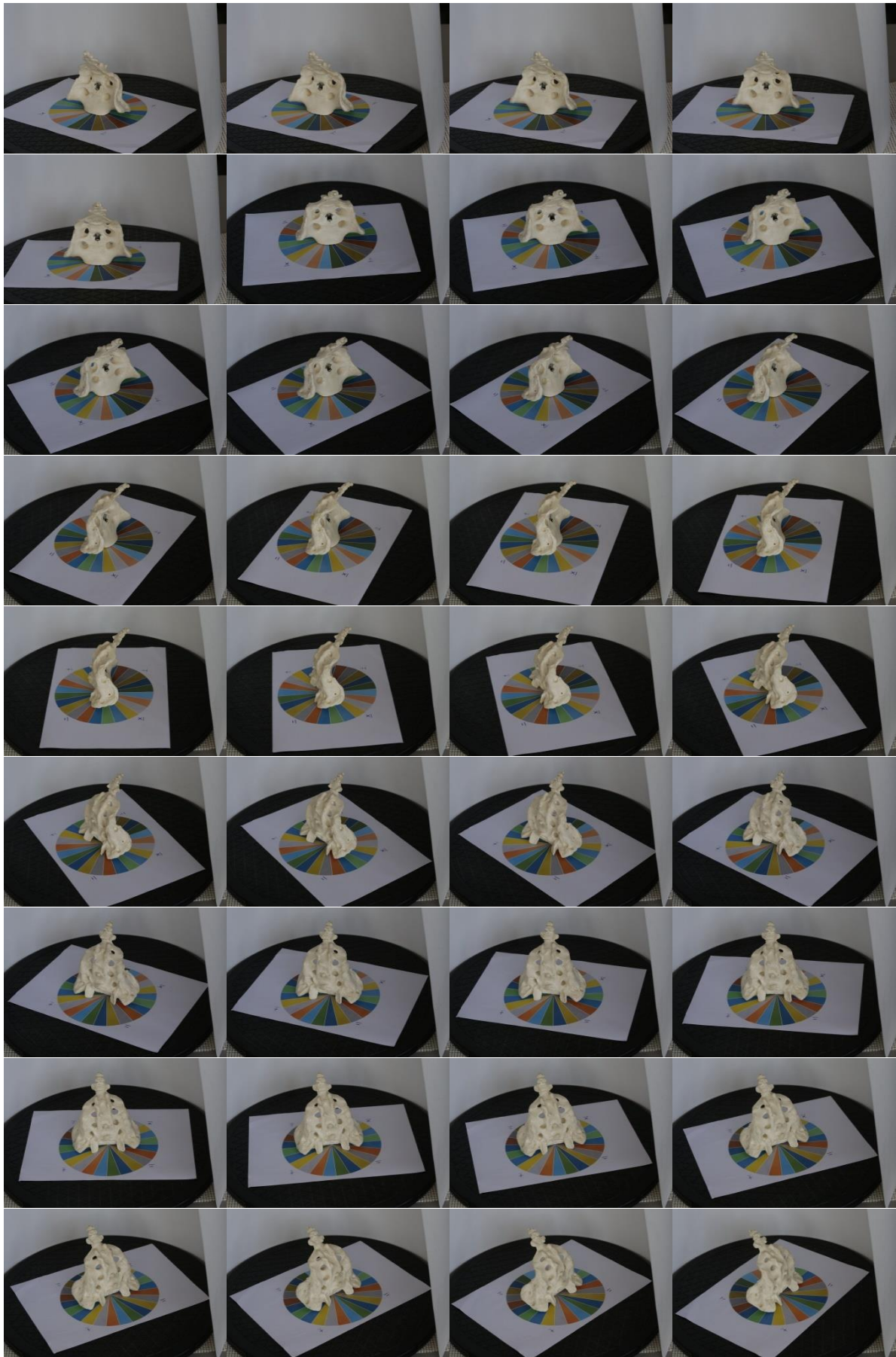
Conjunto de fotografías S 8:

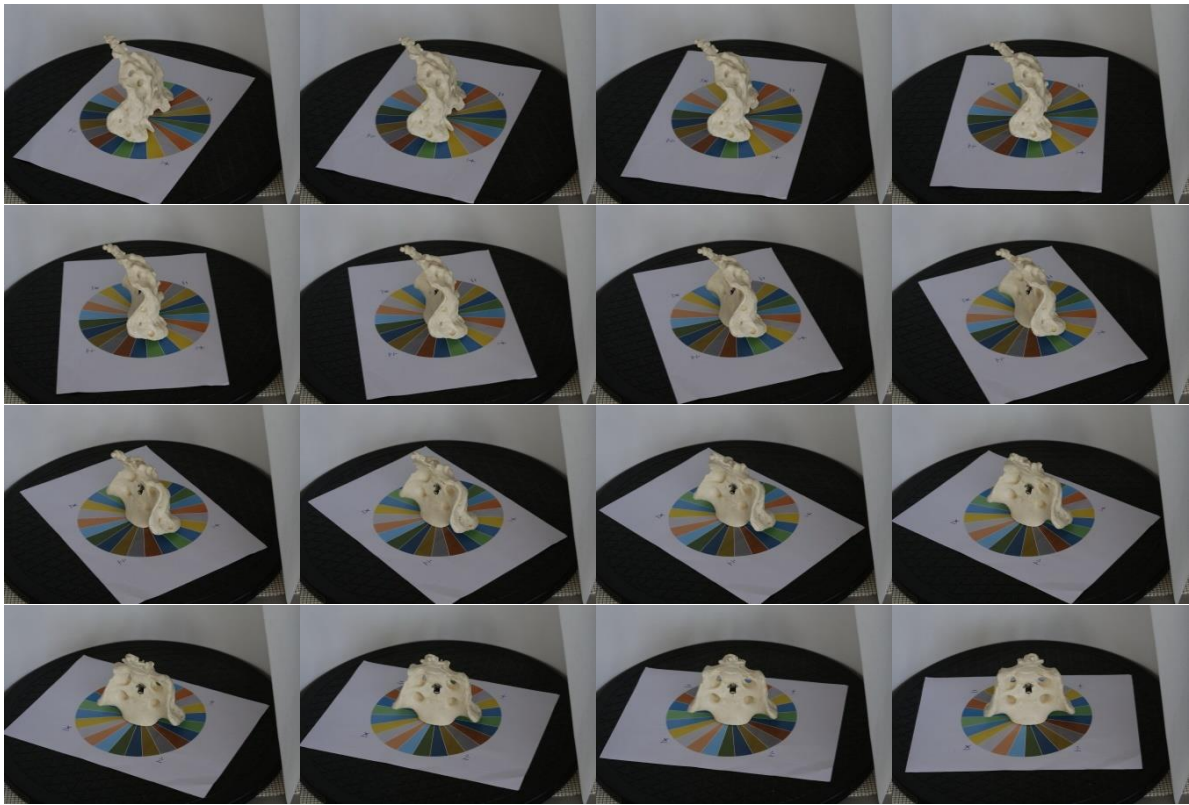






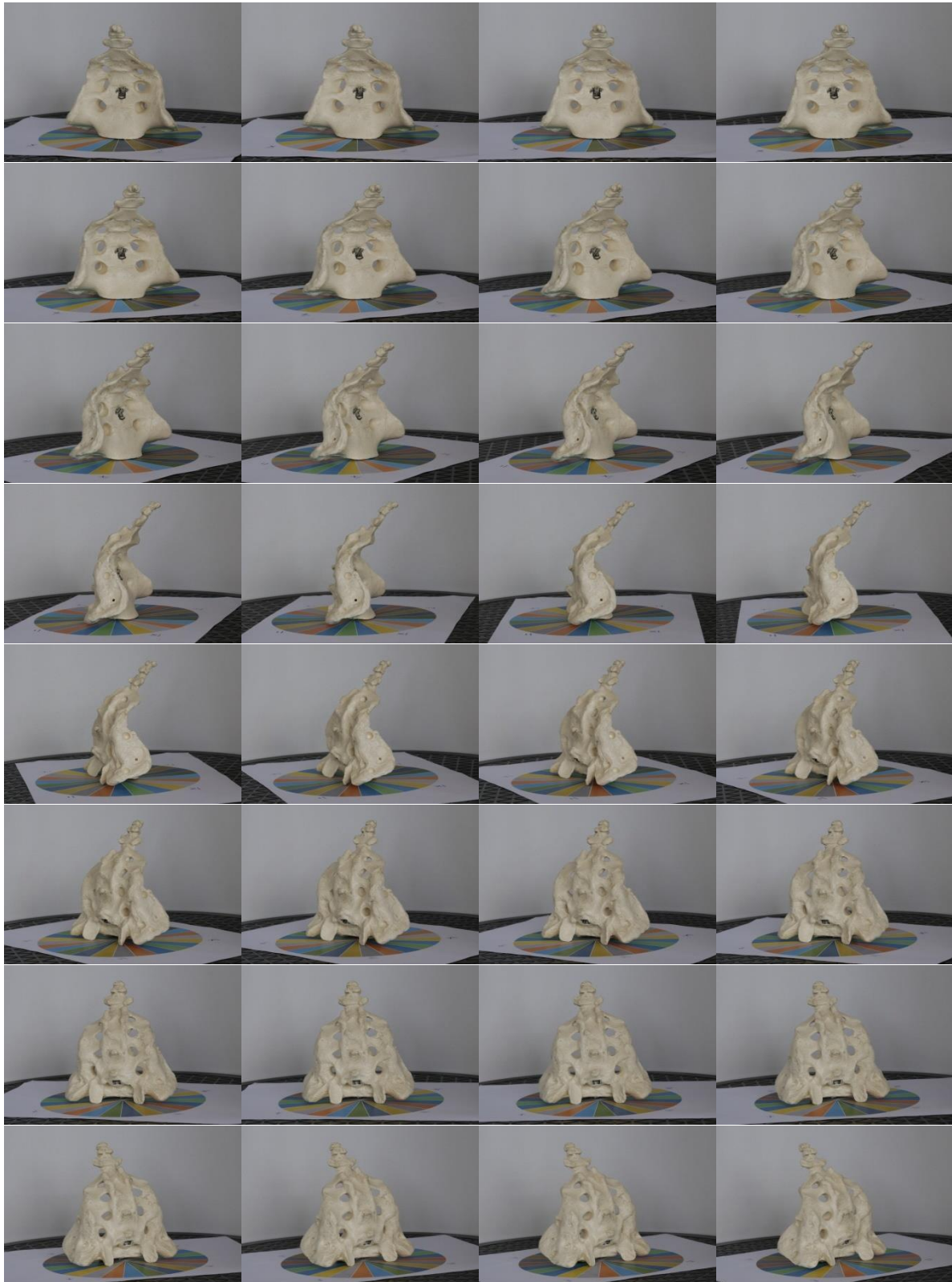


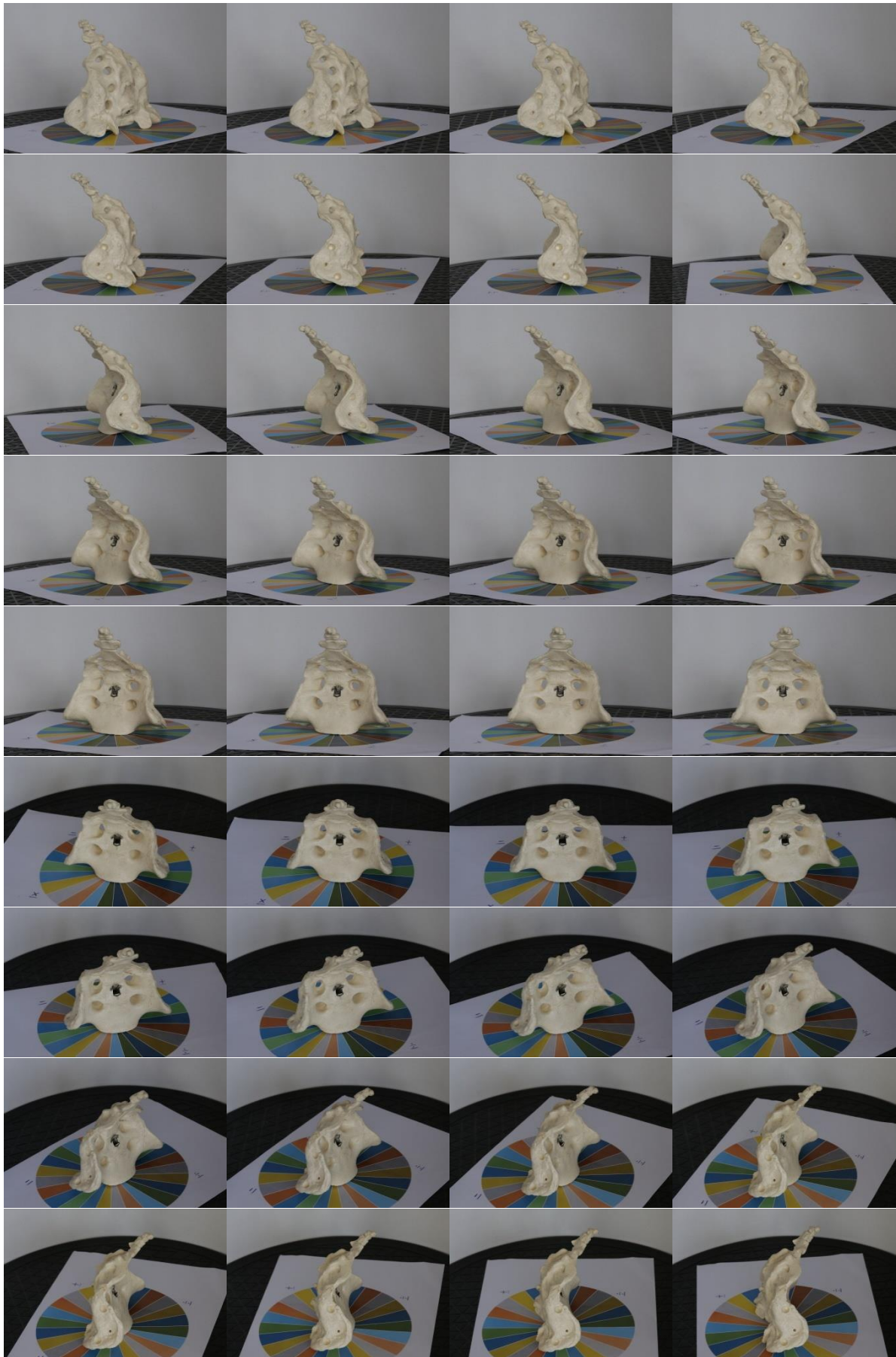


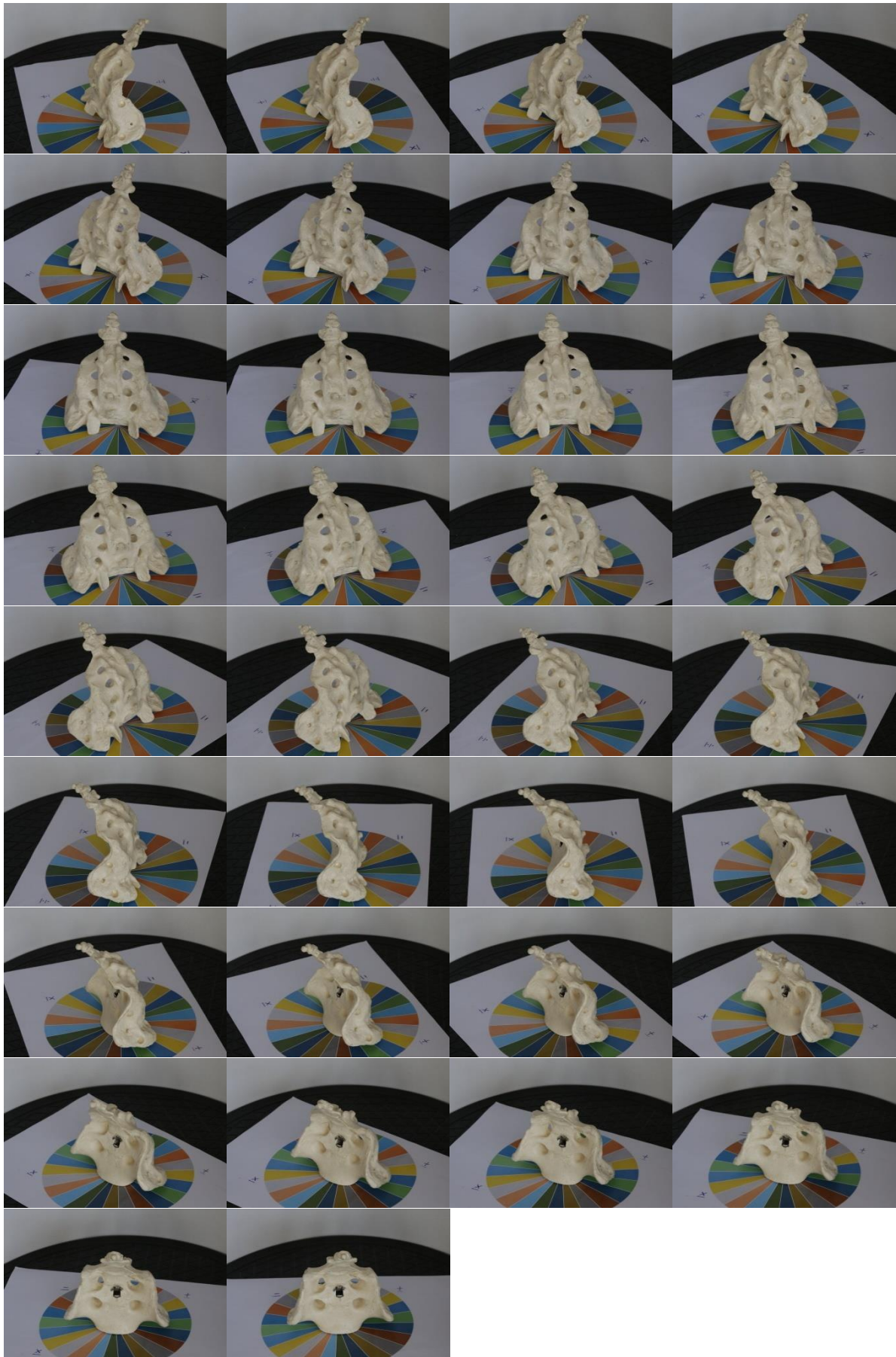


Anexo 20

Conjunto de fotografias S 8 c:

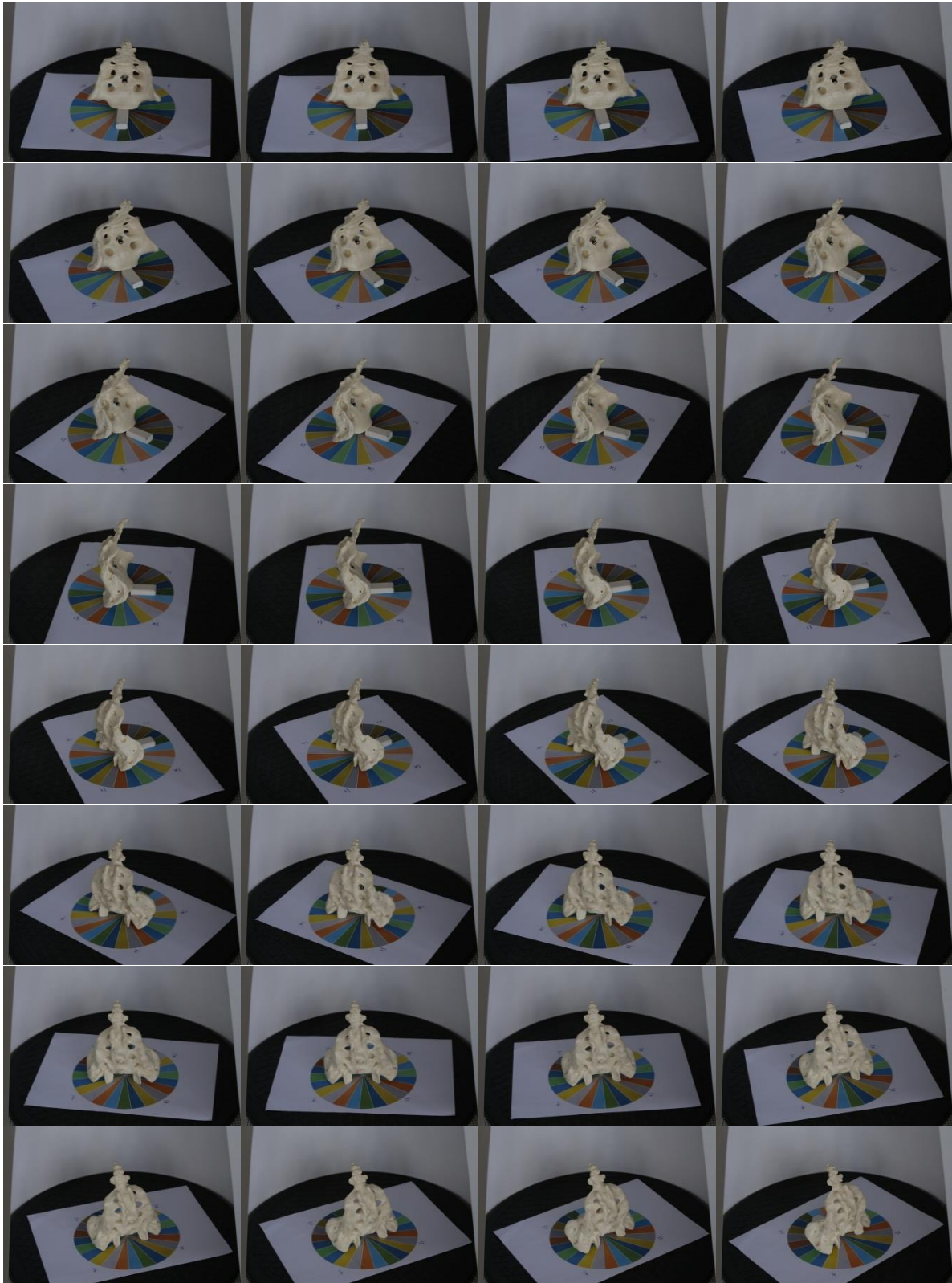


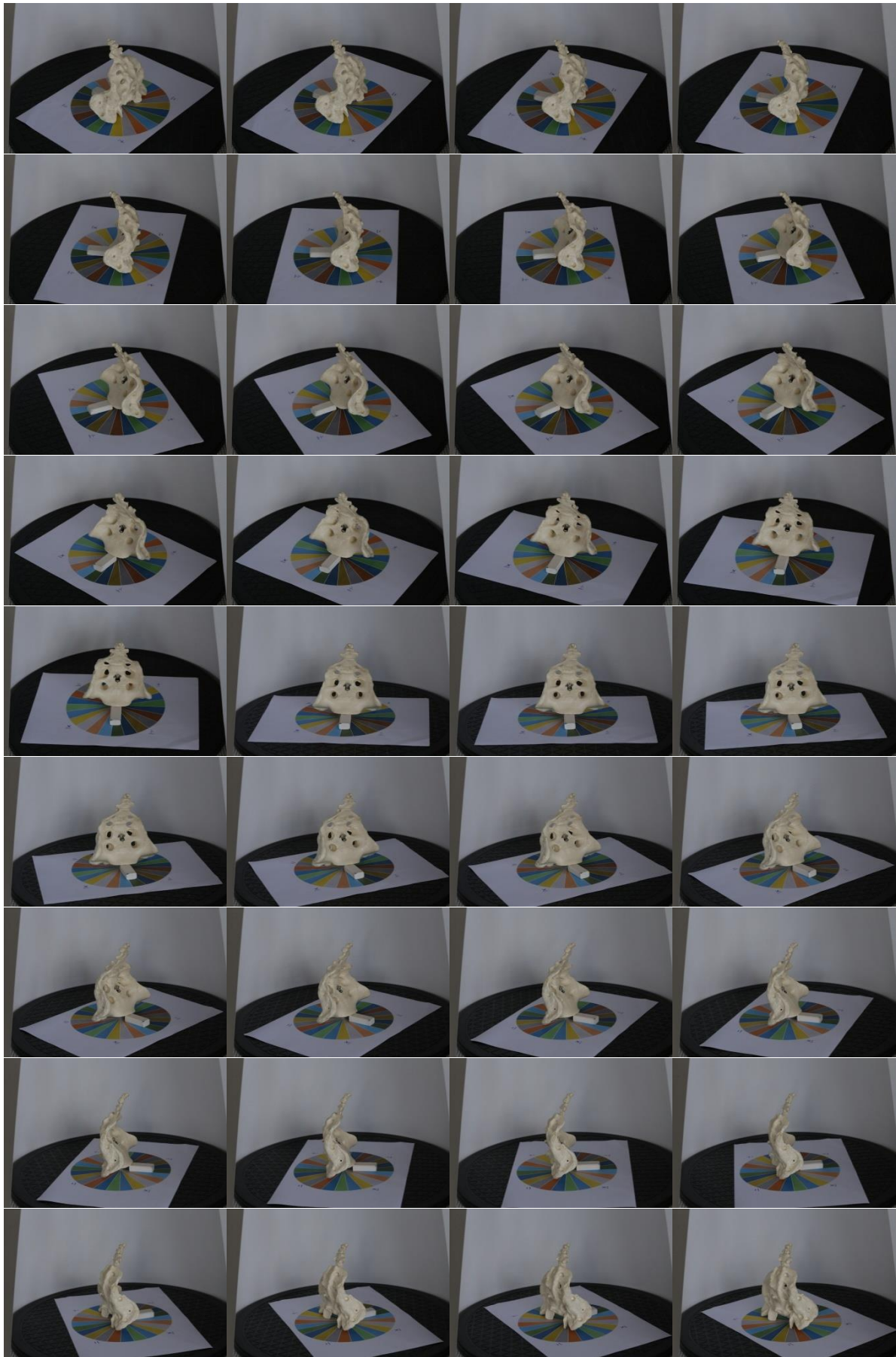




Anexo 21

Conjunto de fotografias S 9:







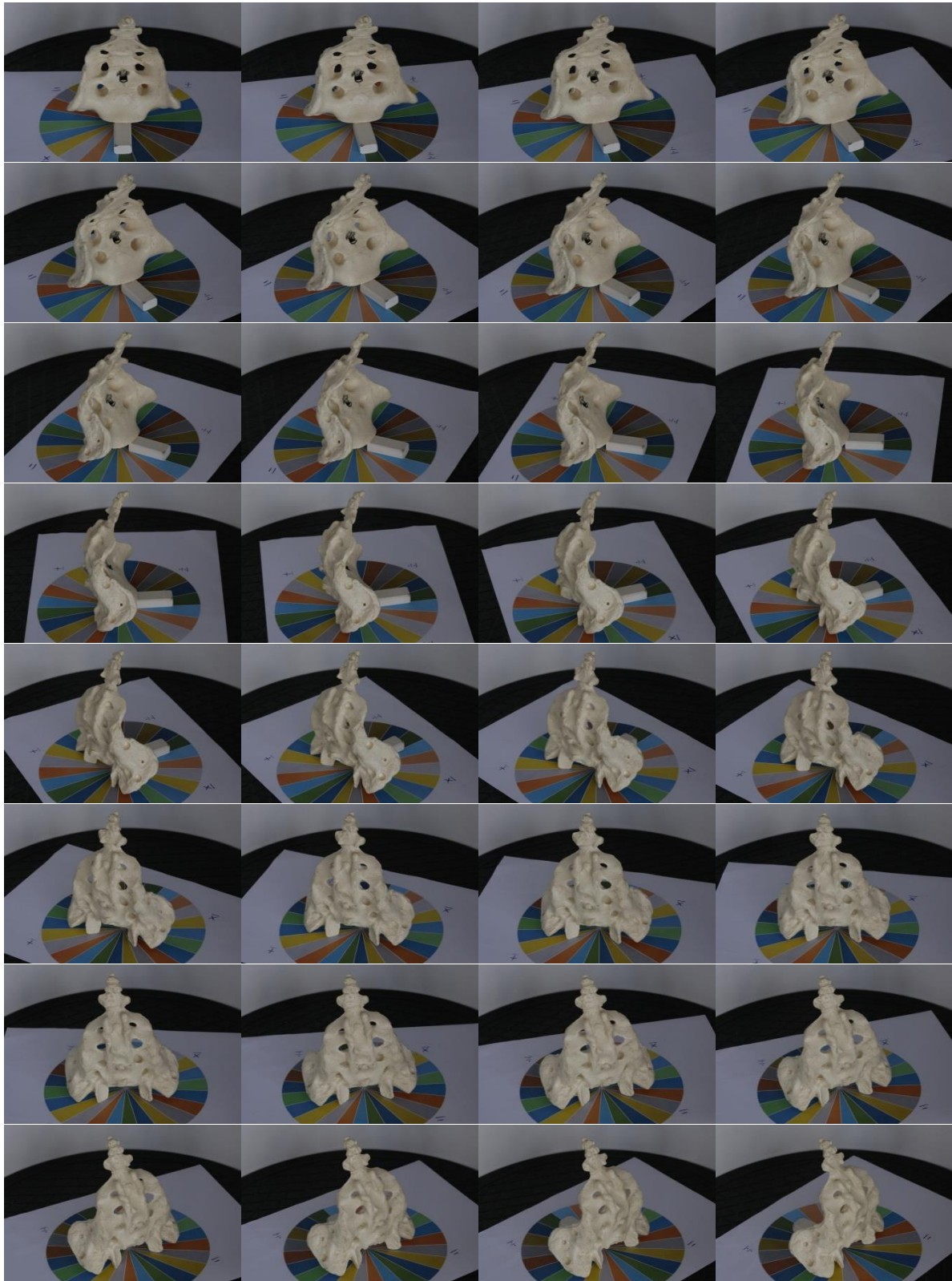


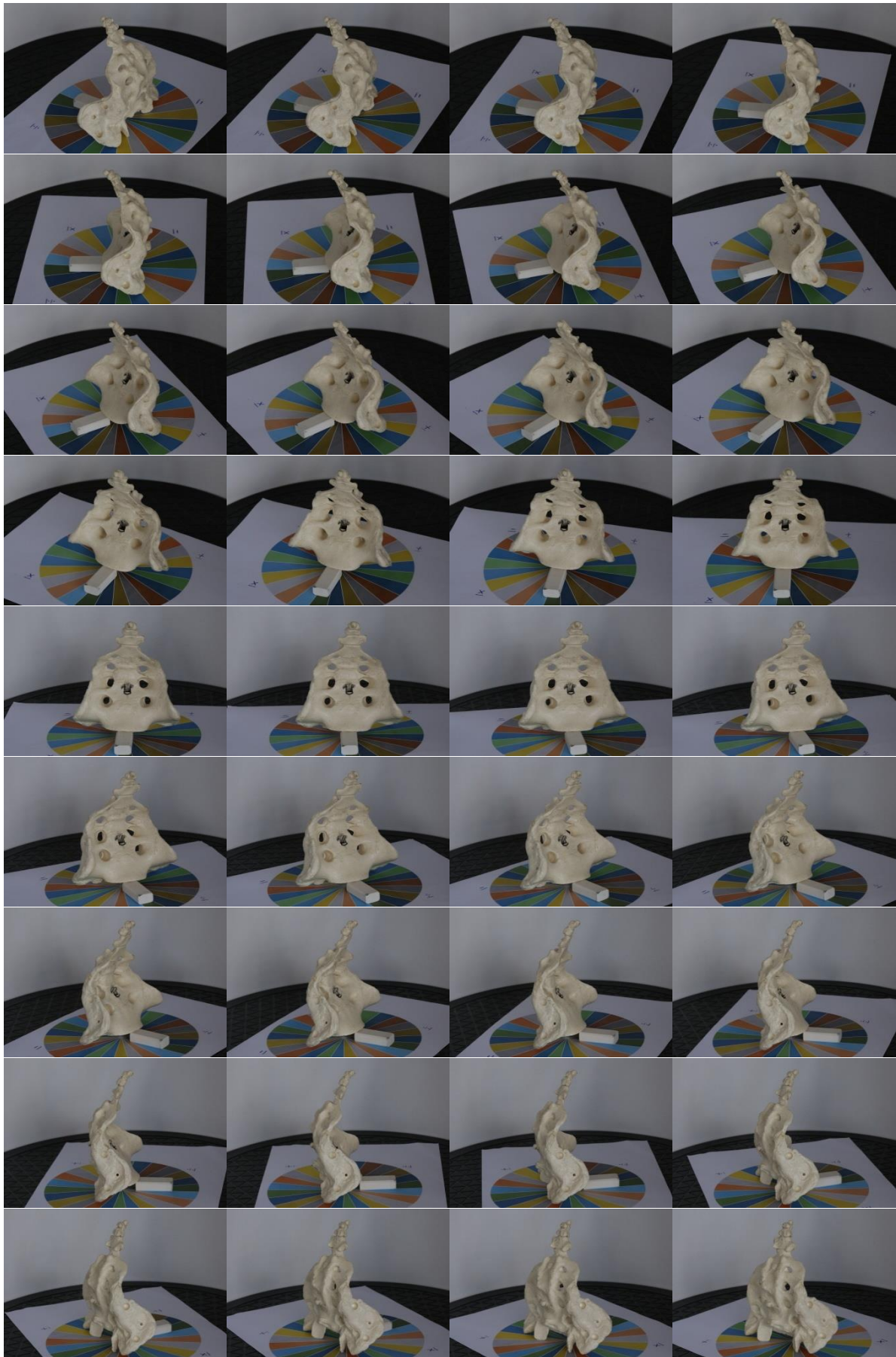




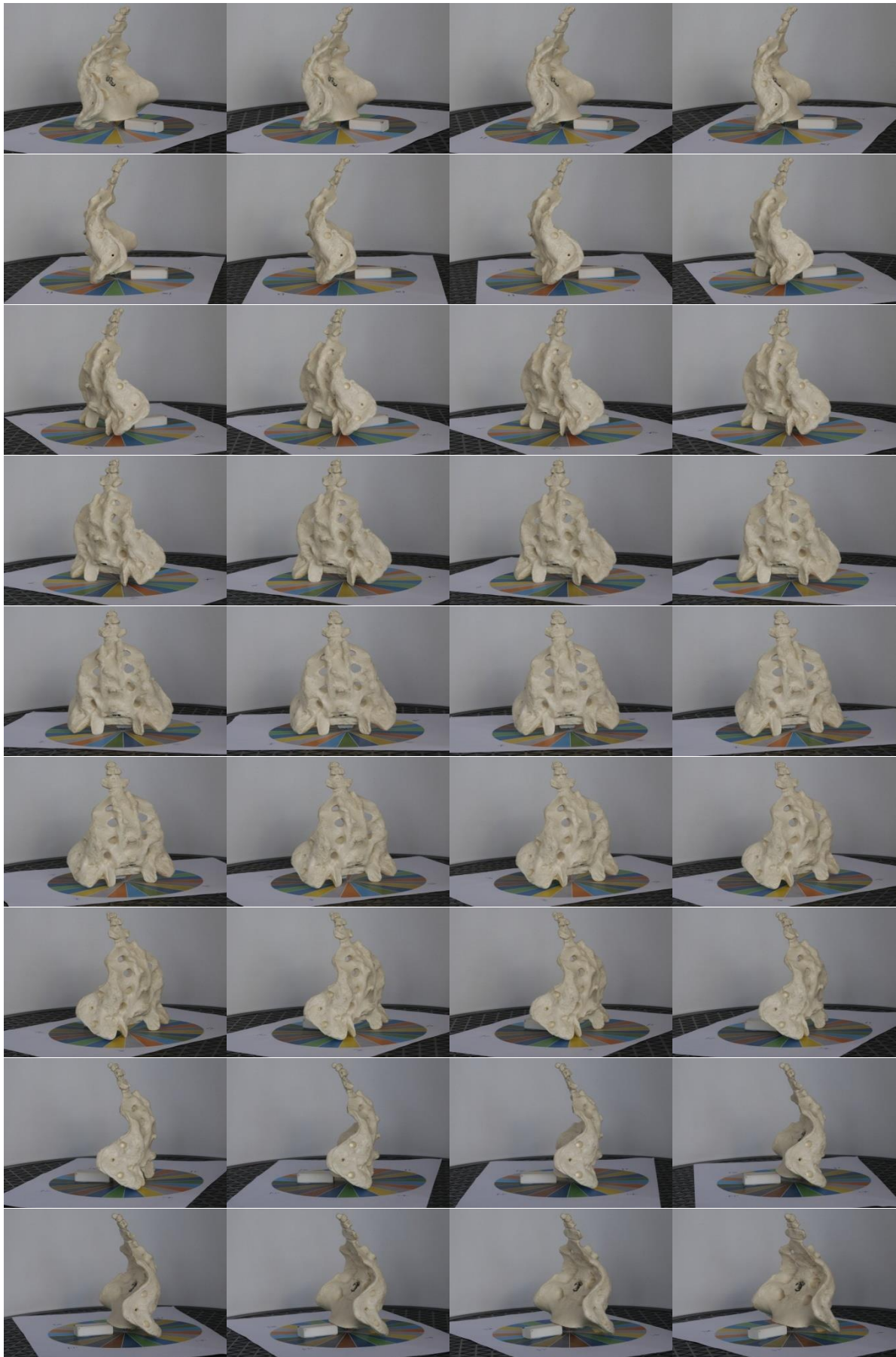
Anexo 22

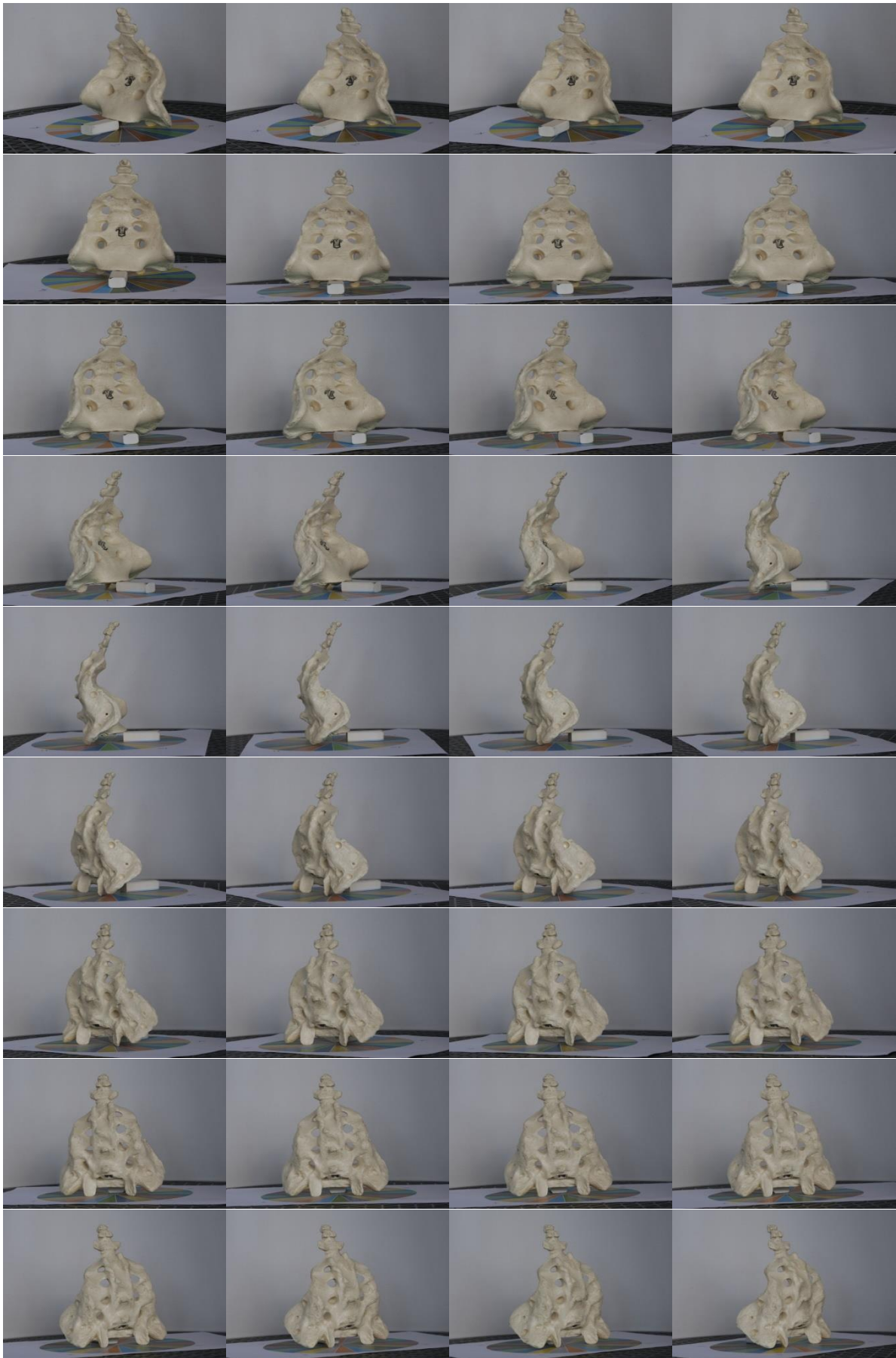
Conjunto de fotografías S 9 c:

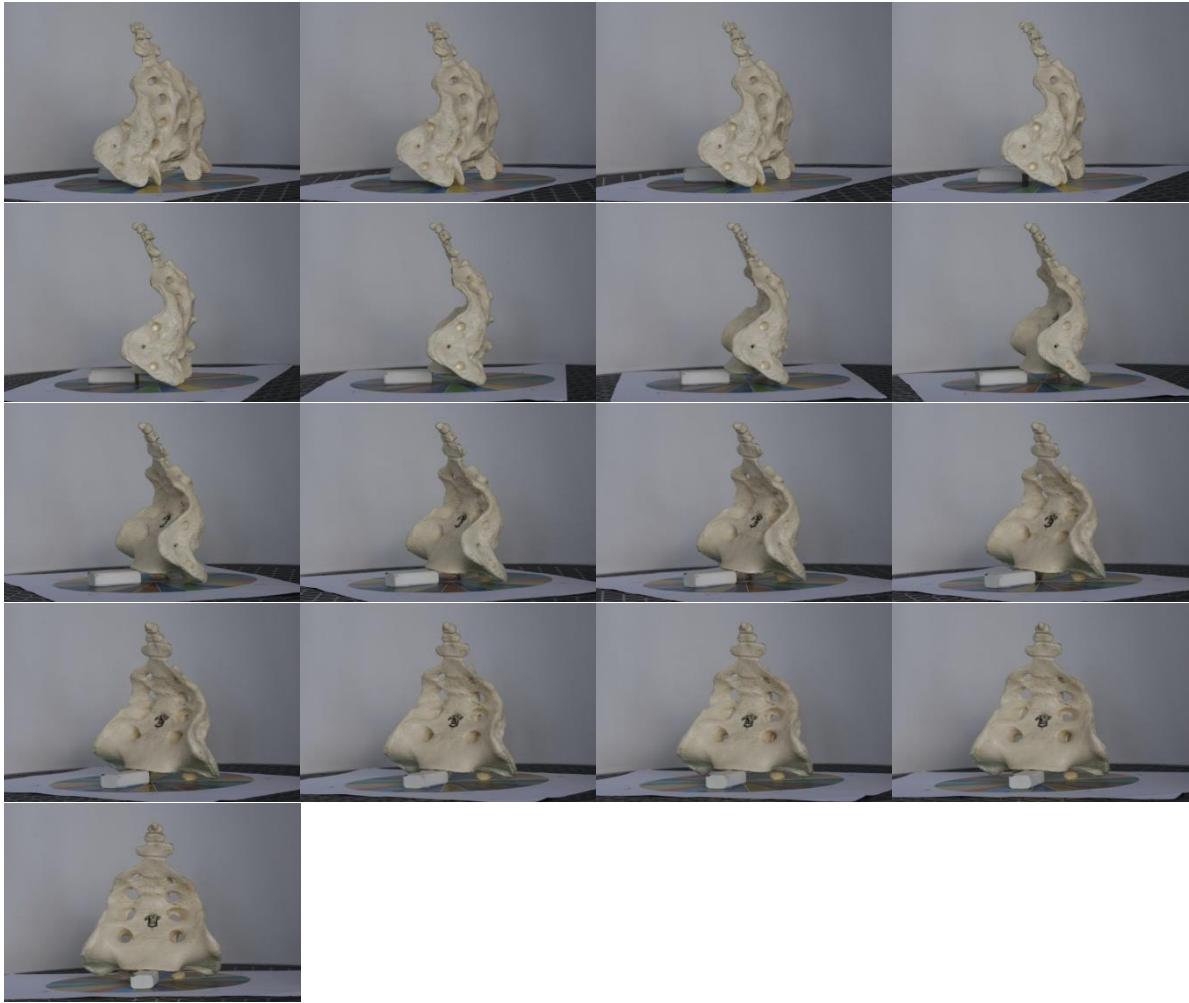












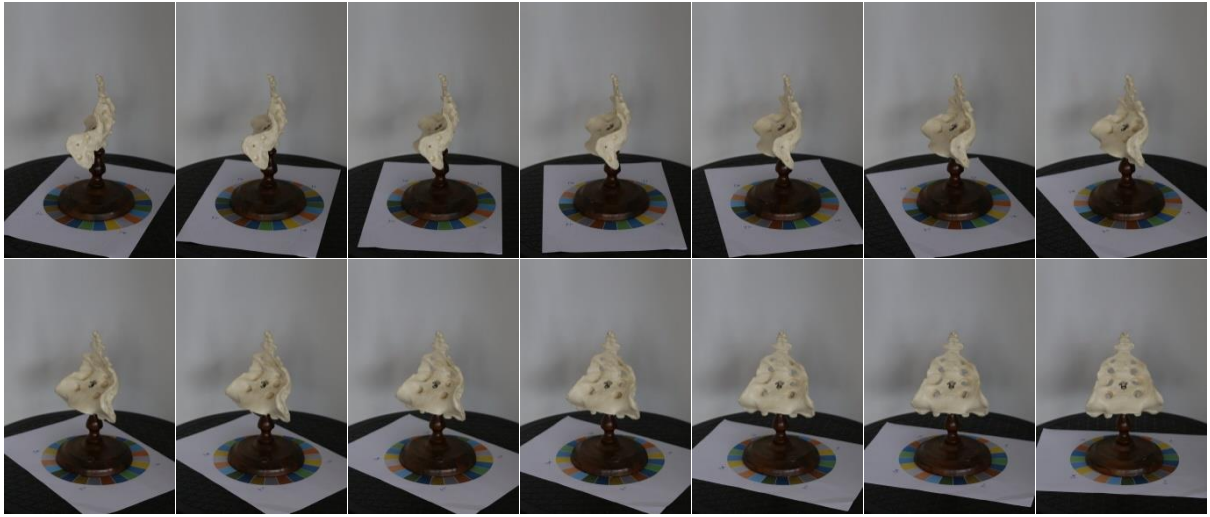
Anexo 23

Conjunto de fotografias S 10:









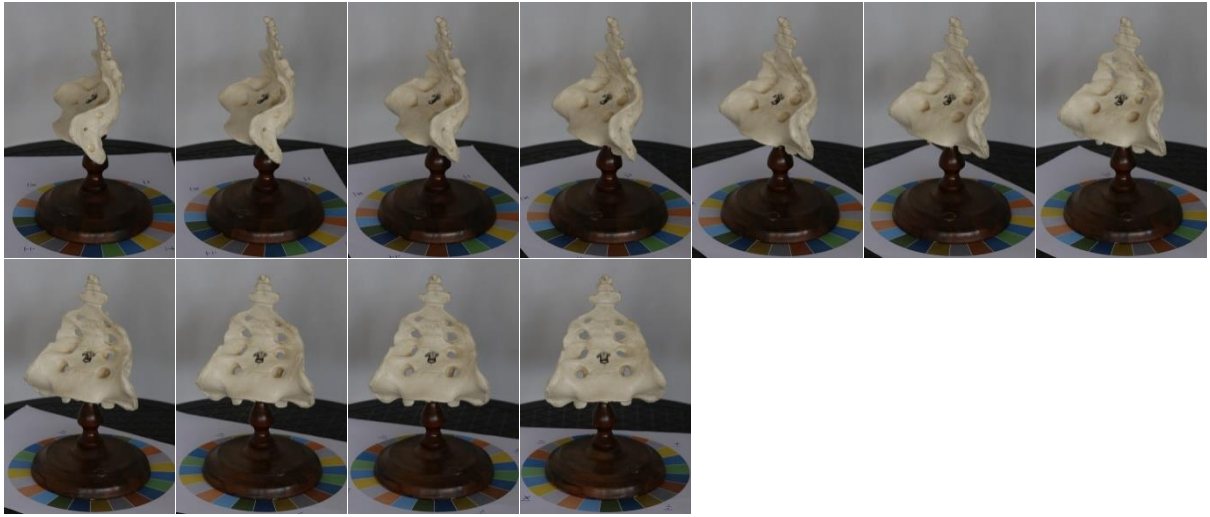
Anexo 24

Conjunto de fotografías S 10 c:



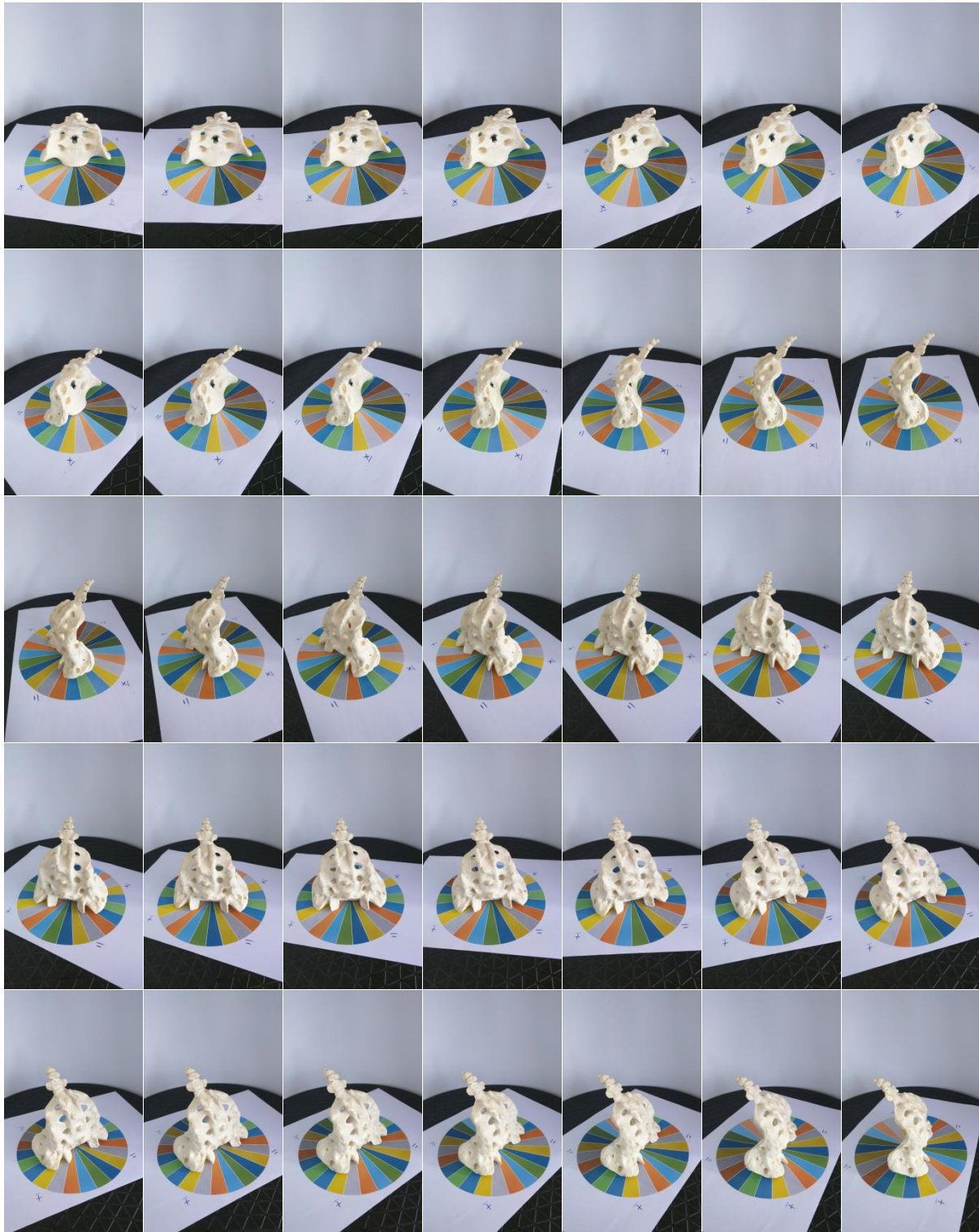


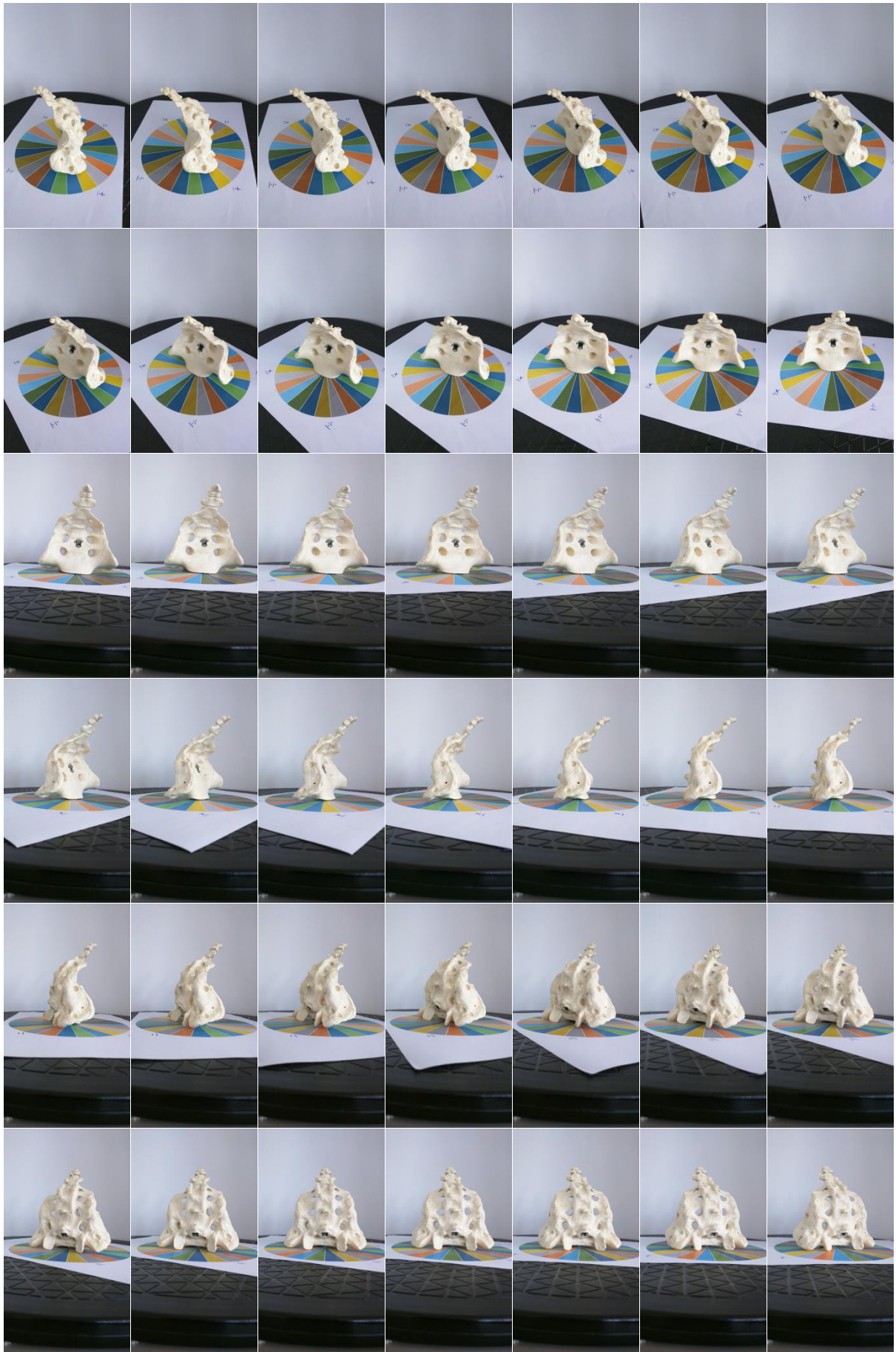




Anexo 25

Conjunto de fotografías S 11:





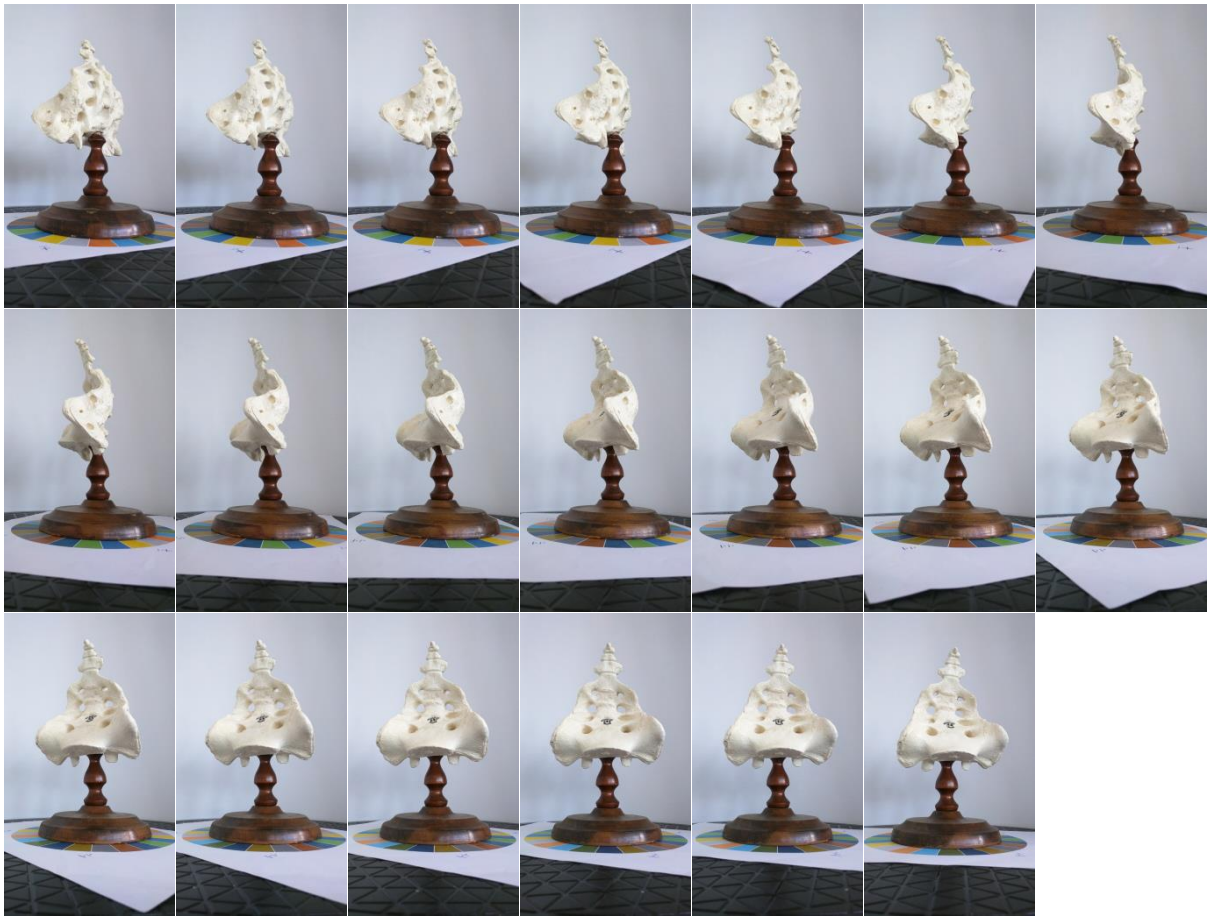


Anexo 26

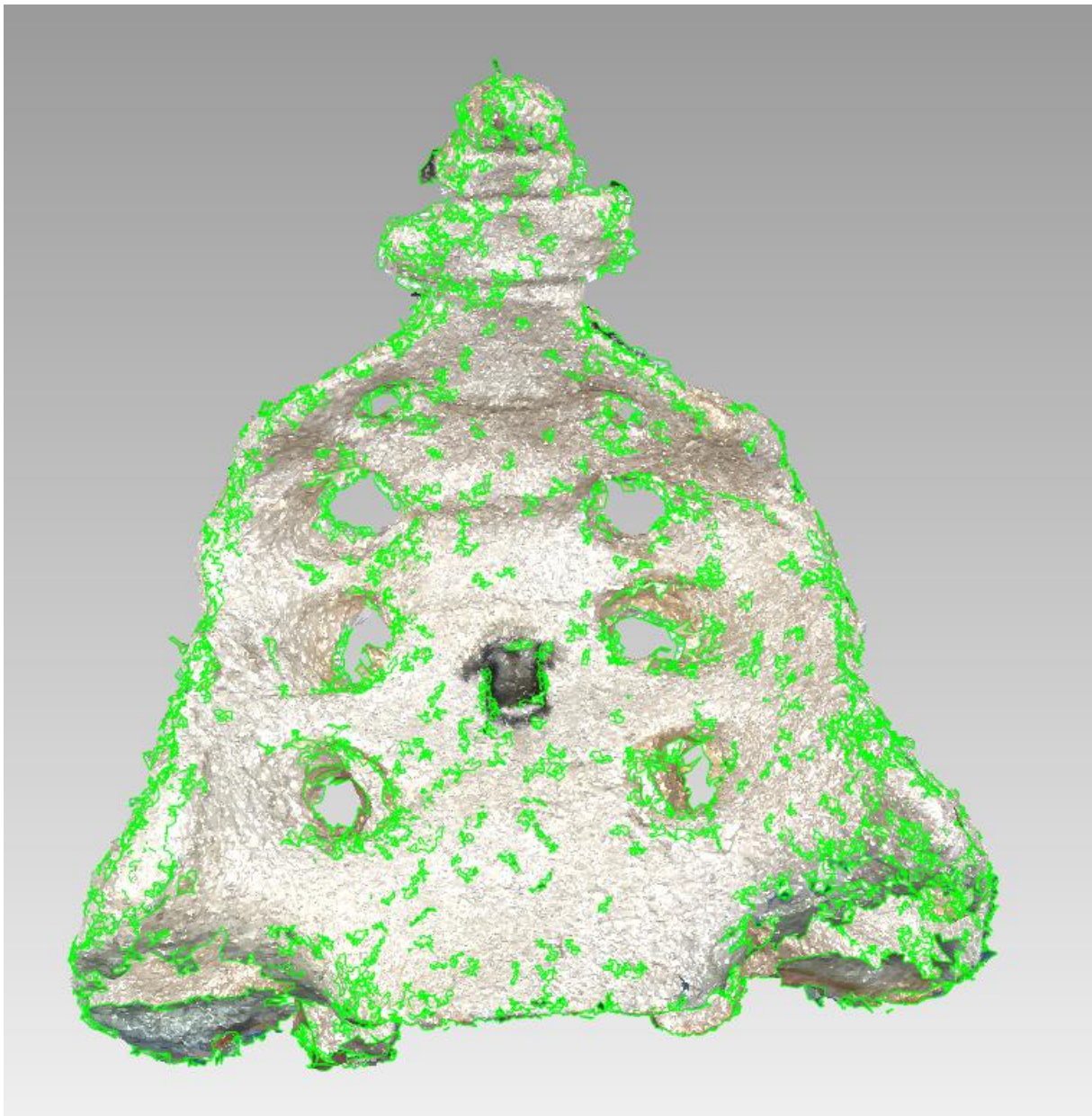
Conjunto de fotografías S 12:





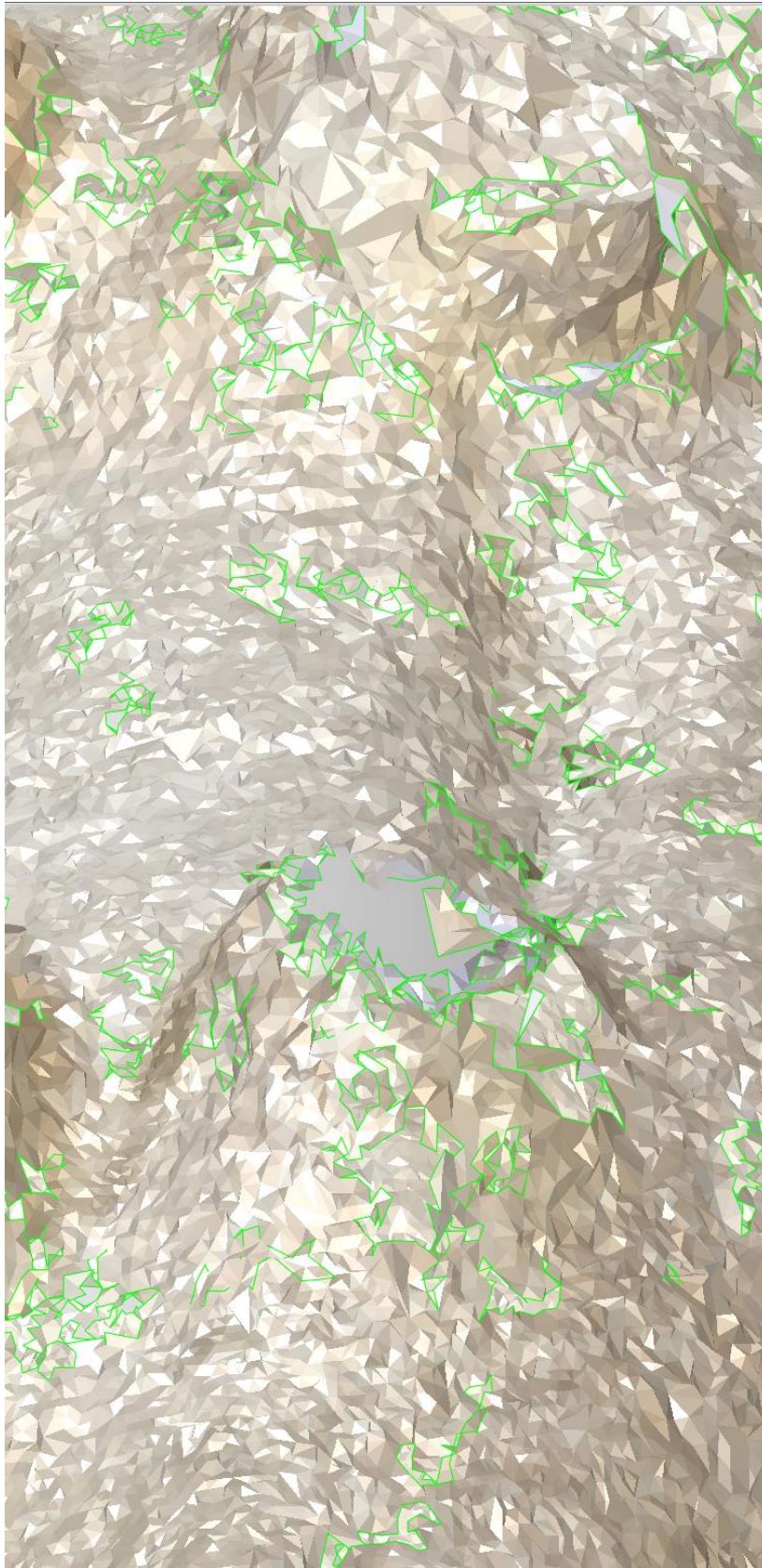


Anexo 27



Modelo 3D do sacro obtido através de fotogrametria, pelo programa VSFM, foi retirado ao modelo as partes que não faziam parte do sacro. Como se pode observar muitas falhas na superfície reconstruída. Como base foi usado o conjunto **S 11**.

Anexo 28



Zoom da superfície do modelo obtido pelo VSFM.