

ANDRÉ GIACOMELLI LEAL

**INVESTIGAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE BIOMODELOS 3D FABRICADOS POR
MANUFATURA ADITIVA PARA ELEIÇÃO DE CLIPE E SIMULAÇÃO CIRÚRGICA
NAS MICROCIRURGIAS DE ANEURISMAS INTRACRANIANOS**

**DOUTORADO EM
TECNOLOGIA EM SAÚDE
PUCPR**

PUCPR
CURITIBA
2019

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA EM SAÚDE**

ANDRÉ GIACOMELLI LEAL

**INVESTIGAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE BIOMODELOS 3D FABRICADOS POR
MANUFATURA ADITIVA PARA ELEIÇÃO DE CLIPE E SIMULAÇÃO CIRÚRGICA
NAS MICROCIRURGIAS DE ANEURISMAS INTRACRANIANOS**

CURITIBA

2019

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA EM SAÚDE

ANDRÉ GIACOMELLI LEAL

**INVESTIGAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE BIOMODELOS 3D FABRICADOS POR
MANUFATURA ADITIVA PARA ELEIÇÃO DE CLIPE E SIMULAÇÃO CIRÚRGICA
NAS MICROCIRURGIAS DE ANEURISMAS INTRACRANIANOS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia em Saúde da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como pré-requisito para a obtenção do título de Doutor em Tecnologia em Saúde.

Orientador: Prof. Dr. Percy Nohama

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Mauren Abreu de Souza

CURITIBA

2019

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central
Edilene de Oliveira dos Santos CRB 9 / 1636

L435i
2019

Leal, André Giacomelli
Investigação da utilização de biomodelos 3D fabricados por manufatura aditiva para eleição de clipe e simulação cirúrgica nas microcirurgias de aneurismas intracranianos ; orientador, Percy Nohama ; coorientadora, Mauren Abreu de Souza -- 2019
166 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2019
Bibliografia: f. 153-159

1. Tecnologia médica. 2. Aneurisma intracraniano. 3. Cérebro – Cirurgia. 4. Microcirurgia. 5. Simulação (Computadores digitais. I. Nohama, Percy. II. Souza, Mauren Abreu de. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia em Saúde. IV. Título.

CDD 20. ed. – 610.28



Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Escola Politécnica

Programa de Pós Graduação em Tecnologia em Saúde

ATA DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

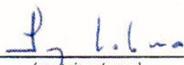
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA EM SAÚDE

DEFESA DE TESE Nº 001

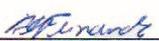
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TECNOLOGIA EM SAÚDE

Aos onze dias do mês de junho de 2019 às 9:00h no Auditório, Bento Munhoz da Rocha, 1º Andar-Bloco 9 (Parque Tecnológico - Bloco Mecânica), realizou-se a sessão pública de Defesa da Tese: **INVESTIGAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE BIOMODELOS 3D FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA PARA ELEIÇÃO DE CLIPE E SIMULAÇÃO CIRÚRGICA NAS MICROCIRURGIAS DE ANEURISMAS INTRACRANIANOS** apresentado pelo doutorando André Giacomelli Leal sob orientação da Prof. Dr. Percy Nohama e coorientação da Prof. Dr. Mauren Abreu de Souza como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Tecnologia em Saúde**, perante uma Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Percy Nohama
PUCPR (Presidente)


(assinatura) APROVADO
(Aprov/Reprov.)

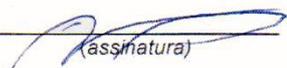
Prof. Dr. Beatriz Luci Fernandes
PUCPR (Examinador)


(assinatura) APROVADO
(Aprov/Reprov.)

Prof. Dr. Sergio Ossamu Ioshii
PUCPR (Examinador)


(assinatura) APROVADO
(Aprov/Reprov.)

Prof. Dr. José Aguiomar Foggiatto
UTFPR (Examinador)


(assinatura) APROVADO
(Aprov/Reprov.)

Prof. Dr. Hélio Afonso Ghizoni Teive
UFPR (Examinador)

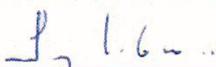

(assinatura) APROVADO
(Aprov/Reprov.)

Início: 9:00 h Término: 10:55 h

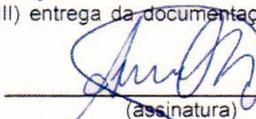
Conforme as normas regimentais do PPGTS e da PUCPR, o trabalho apresentado foi considerado APROVADO (aprovado/reprovado), segundo avaliação da maioria dos membros desta Banca Examinadora.
Observações: _____

O(a) aluno(a) está ciente que a homologação deste resultado está condicionada: (I) ao cumprimento integral das solicitações da Banca Examinadora, que determina um prazo de _____ dias para o cumprimento dos requisitos; (II) entrega da dissertação em conformidade com as normas especificadas no Regulamento do PPGTS/PUCPR; (III) entrega da documentação necessária para elaboração do Diploma.

ALUNO(A): André Giacomelli Leal



Prof. Dr. Percy Nohama,
Coordenador do PPGTS PUCPR


(assinatura)



Dedico esta tese aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente aos meus professores orientadores Percy Nohama e Mauren Abreu de Souza, pela dedicação, paciência, ensinamentos e compreensão durante o tempo deste doutorado.

À professora Márcia Regina Cubas, por sua compreensão e dedicação na escolha do orientador desta tese de doutorado.

Agradeço por toda a dedicação e incentivos que recebi de todos os professores do programa e que particularmente contribuíram de forma significativa através dos ensinamentos transmitidos durante todo o período do doutorado e que serviram de base teórica para realização deste trabalho. Um especial agradecimento aos professores: Beatriz Luci Fernandes, Deborah Ribeiro Carvalho e Sérgio Ossamu Ioshii.

Aos meus professores e amigos do Instituto de Neurologia de Curitiba, em especial aos doutores Ricardo Ramina e Murilo Sousa de Meneses, pela minha formação e incentivo ao desenvolvimento desta tese de doutorado.

Ao professor Luiz Roberto Aguiar pela orientação nos momentos iniciais deste trabalho.

À querida amiga Marli Aico Ataka Uchida, pela dedicação e pela paciência de me ouvir e ajudar em muitos momentos durante a elaboração desta tese.

Agradeço a todos os meus amigos e familiares que estiveram ao meu lado durante todo o período de estudo, em especial a grande amiga e companheira Sheila Fantin Buratti.

Agradeço a Deus por esta oportunidade de poder estudar e no futuro transmitir esses conhecimentos para outras pessoas.

RESUMO

Aneurismas intracranianos (AI) são dilatações das artérias cerebrais, cujo tratamento baseia-se na sua exclusão da circulação sanguínea, por meio do implante de um clipe metálico junto ao colo aneurismático. A principal dificuldade durante essa cirurgia é a escolha do clipe ideal a ser utilizado. Embora os exames de imagem disponíveis garantam a visualização do AI, não existe um método de planejamento que permita uma visualização real tridimensional (3D) e que possibilite a escolha prévia do clipe. Este estudo teve como objetivo investigar a utilização de modelos 3D, fabricados por manufatura aditiva, para a eleição do clipe cirúrgico nas microcirurgias de AI e para simulação cirúrgica por neurocirurgiões em formação. Foram avaliados os biomodelos 3D de AI de 10 voluntários e, para isso, foram utilizados os seguintes equipamentos: tomógrafo computadorizado, microscópio cirúrgico e impressora 3D. A metodologia dessa pesquisa foi dividida em quatro fases: (1) desenvolvimento e confecção dos biomodelos, (2) avaliação das características dimensionais dos biomodelos, (3) avaliação do planejamento cirúrgico com o biomodelo e efetividade da clipagem, e (4) avaliação da simulação cirúrgica com os modelos. Como resultados, foram confeccionados dez biomodelos 3D com duas partes: uma maleável e oca, formada pelo AI e artérias relacionadas; e outra parte rígida, composta pelo crânio e demais artérias da base do crânio. As características dimensionais dos biomodelos 3D em relação às estruturas anatômicas reais apresentaram baixo erro relativo (8,56% nos diâmetros dos colos; 2,25% nas distâncias colo-*domus* e 9,35% nos diâmetros das artérias correlacionadas). Os dez cliques eleitos durante os planejamentos cirúrgicos, com base nos modelos 3D, corresponderam exatamente às características dos cliques utilizados nas cirurgias reais, as quais ocorreram sem intercorrências e com redução de transcurso de 20,75%. A simulação cirúrgica com os biomodelos, realizada por dois neurocirurgiões em formação, obteve 100% de acerto na identificação dos cliques utilizados nas cirurgias. Portanto, os biomodelos 3D gerados por meio de manufatura aditiva mostraram-se efetivos para a eleição do clipe cirúrgico nas microcirurgias de AI, reduzindo o tempo cirúrgico e ampliando a compreensão da angioarquitetura cerebral e a segurança nesse tipo de cirurgia.

Palavras-chave: Aneurisma intracraniano. Manufatura aditiva. Biomodelo 3D. Planejamento cirúrgico. Simulação cirúrgica. Clipe.

ABSTRACT

Intracranial aneurysms (IA) are dilatations of the cerebral arteries, whose treatment is based on their exclusion from the blood circulation, by the implant of a metallic clip on the aneurysm neck. The main difficulty during this surgery is the choice of the ideal clip to be used. Although available imaging tests guarantee the IA visualization, there is no planning method that allows a real three-dimensional (3D) visualization and the choice of the clip previous the surgery. This study aimed to investigate the use of 3D models, made by additive manufacturing, for the surgical clip election in microsurgeries for IA and surgical simulation by training neurosurgeons. Three-dimensional IA biomodels of ten volunteers were evaluated using the following imaging devices: computerized tomography, surgical microscope and 3D printer. The research method was divided into four phases: (1) development of the 3D biomodels, (2) evaluation of the biomodels dimensional characteristics, (3) surgical planning evaluation with the biomodel and their clipping effectiveness, and (4) evaluation of the actual surgical simulation process within the models. As final results, ten 3D biomodels were obtained, made of two parts: a malleable and hollow one, formed by the IA and related arteries; and another rigid part, composed by the skull and other arteries of the skull base. The dimensional characteristics of the 3D biomodels compared with the real anatomical structures presented a small relative error (i.e. about 8.56% in neck diameters, 2.25% in *colodorus* distances and 9.35% in correlated arteries diameters). Based on such 3D models, ten clips were chosen during the surgical planning, and they all match exactly with the clips characteristics used during the real surgeries, which occurred without interferences and reducing the surgical time by 20.75%. The surgical simulation with the biomodels performed by two neurosurgeons still in training, obtained 100% accuracy in the identification of the clips used during the actual surgeries. Therefore, 3D biomodels generated by additive manufacturing methods were effective for the surgical clip election in microsurgeries for IA, reducing surgical time, increasing cerebral angioarchitecture understanding and providing more safety in this type of surgery.

Key-words: Intracranial aneurysm. Additive manufacturing. 3D biomodel. Surgical planning. Surgical simulation. Clip.

LISTA DE ABREVIATURAS

2D	—	duas dimensões
3D	—	três dimensões
3DP	—	<i>3D printing</i> (impressão 3D)
ABS	—	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
AI	—	aneurismas intracranianos
AM	—	<i>Additive Manufacturing</i> (manufatura aditiva)
ARM	—	angioressonância
ATC	—	angiotomografia computadorizada
CAD	—	<i>Computer Aided Design</i>
CETAC	—	Centro de Tomografia de Curitiba (centro de imagem)
DICOM	—	<i>Digital Imaging and Communications in Medicine</i>
DPM	—	Ultrassom Doppler pulsado microvascular
FDM	—	<i>Fused Deposition Modeling</i>
GE	—	General Electric
HH	—	Hunt e Hess
HSA	—	hemorragia subaracnoide
INC	—	Instituto de Neurologia de Curitiba
LOM	—	<i>Laminated Object Manufacture</i> (fabricação de objetos laminados)
PLA	—	poliácido láctico
RNM	—	Ressonância nuclear magnética
RX	—	raios X
SLA	—	<i>Stereolithography</i> (estereolitografia)
SLS	—	<i>Selective Laser Sintering</i> (sinterização seletiva a laser)
TC	—	tomografia computadorizada
TCLE	—	termo de consentimento livre e esclarecido
UV	—	ultravioleta

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Classificação dos aneurismas intracranianos segundo seu formato	29
Figura 2	- Denominações importantes dos aneurismas intracranianos.....	29
Figura 3	- Imagem de arteriografia com subtração digital.....	32
Figura 4	- Imagem de angiotomografia computadorizada.....	33
Figura 5	- Imagem de angioressonância magnética.....	34
Figura 6	- Imagem do transdutor (seta) do Doppler pulsado microvascular (a) e a imagem obtida no monitor, visualizada durante a insonação sobre uma artéria (b).....	35
Figura 7	- Os principais formatos de cliques utilizados para o tratamento de AI: (a) reto, (b) fenestrado, (c) curvo e (d) baioneta.....	37
Figura 8	- Ilustração do clipe metálico e local que define o seu tamanho.	38
Figura 9	- Processo de fabricação do biomodelo.....	46
Figura 10	- Medidas avaliadas durante a Fase 2.....	47
Figura 11	- Plataforma de simulação utilizada para a escolha do clipe metálico.....	48
Figura 12	- Ilustração do local de perfuração do domus do aneurisma do biomodelo (linha de corte).....	49
Figura 13	- Imagem de ATC cerebral, formato DICOM, corte coronal, ilustrando o aneurisma na bifurcação da artéria carótida interna direita (seta).....	53
Figura 14	- Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o AI na bifurcação da artéria carótida interna direita (seta).....	54
Figura 15	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, ilustrando o AI na bifurcação da artéria carótida interna direita (seta).....	54
Figura 16	- As imagens de ATC no formato DICOM foram processadas pelo programa InVesalius® e, a seguir, transformadas em arquivo passível de impressão 3D (formato STL).....	55
Figura 17	- Aspecto final do biomodelo 3D de ABS e borracha de silicone, manufaturado pela impressora 3D RepRap, modelo Prusa I3®.....	55
Figura 18	- Segmento do biomodelo 3D em ABS (seta azul), manufaturado pela impressora 3D Prusa I3®, e segmento	

	maleável e oco, em silicone (seta vermelha), representando o AI.....	56
Figura 19	- Imagem ilustrando um momento do procedimento de realização da TC do biomodelo.....	57
Figura 20	- Imagem de ATC cerebral do paciente, indicando as medidas do AI (diâmetro do colo e distância colo-domus).....	58
Figura 21	- Imagem de ATC cerebral do paciente, indicando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artérias carótida interna (seta azul) e cerebral média (seta vermelha).....	58
Figura 22	- Imagem de TC do biomodelo 1, indicando as medidas do AI (diâmetro do colo e distância colo-domus).....	59
Figura 23	- Imagem de TC do biomodelo 1, indicando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artérias carótida interna (seta azul) e cerebral média (seta vermelha).....	59
Figura 24	- Posição cirúrgica do biomodelo completo para a realização da fase 3 desta pesquisa, onde o AI é indicado pela seta.....	60
Figura 25	- Sistema de circulação com soro fisiológico acoplado ao biomodelo 3D de borracha de silicone, para a avaliação da escolha do clipe metálico e verificação do método.....	61
Figura 26	- Etapa da escolha do clipe metálico pelo neurolocirurgião.....	61
Figura 27	- Ilustração do clipe metálico antes (a) e após (b) a aplicação no colo do aneurisma do biomodelo 1.....	62
Figura 28	- Ilustração da aplicação do clipe metálico no colo do aneurisma do biomodelo em silicone, acoplado ao sistema de circulação artificial.....	62
Figura 29	- Ilustração da perfuração do domus aneurismático (seta) do biomodelo 3D de borracha de silicone acoplado ao sistema de circulação artificial, após o implante do clipe metálico. Não se constatou saída de soro fisiológico pela perfuração.....	63
Figura 30	- Uso do Ultrassom Doppler pulsado microvascular (DPM) (seta) para avaliação da eficácia do tratamento logo após o implante do clipe cirúrgico. A seta azul ilustra a ausência de fluxo no interior do aneurisma, pelo DPM.....	64
Figura 31	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, pós-operatória, ilustrando o clipe cirúrgico (seta) e oclusão completa do AI na bifurcação da artéria carótida interna direita.....	64

Figura 32	- Imagem de ATC cerebral, corte coronal, expandido, para uma melhor visualização do clipe metálico (seta) utilizado para oclusão do AI na bifurcação da artéria carótida interna direita.....	65
Figura 33	- Imagem de ATC cerebral, corte axial, ilustrando o aneurisma na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (seta).....	65
Figura 34	- Imagem de ATC cerebral, reconstrução na posição oblíqua para uma melhor visualização do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (seta).....	66
Figura 35	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, mostrando o AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (seta).....	66
Figura 36	- Aspecto final do biomodelo 3D do paciente 2, visão externa....	67
Figura 37	- Aspecto final do biomodelo 3D do paciente 2, visão da região interna, onde a seta indica a localização do AI.....	67
Figura 38	- Imagem de ATC cerebral do paciente 2, ilustrando as medidas do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (diâmetro do colo e distância colo-domus).....	68
Figura 39	- Imagem de ATC cerebral do paciente 2, ilustrando as dimensões das artérias relacionadas ao AI: artérias carótida interna (seta azul) e cerebral média (seta vermelha).....	68
Figura 40	- Imagem de TC do biomodelo 3D (caso 2), ilustrando as medidas do AI da bifurcação da artéria cerebral média esquerda (diâmetro do colo e distância colo-domus).....	69
Figura 41	- Imagem de TC do biomodelo 3D (caso 2), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artérias carótida interna (seta azul) e cerebral média (seta vermelha).....	69
Figura 42	- Posição cirúrgica do biomodelo (caso 2) para a realização da fase 3 deste estudo. AI (seta).....	70
Figura 43	- Ilustração do início da aplicação do clipe metálico no aneurisma do biomodelo (caso 2).....	71
Figura 44	- Ilustração do clipe metálico aplicado no colo do aneurisma do biomodelo 3D (caso 2): vista superior.....	72
Figura 45	- Ilustração do clipe metálico aplicado no colo do aneurisma do biomodelo 3D (caso 2): vista inferior.....	73
Figura 46	- Imagem cirúrgica, acesso fronto-temporal, ilustrando o clipe cirúrgico (seta azul) e oclusão completa do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (seta branca).....	74

Figura 47	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, pós-operatória, ilustrando o clipe cirúrgico (seta) e a oclusão completa do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda.....	74
Figura 48	- Imagem de ATC cerebral, reconstrução em oblíquo, ilustrando o clipe metálico (seta) utilizado para oclusão do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda.....	75
Figura 49	- Imagem de ATC cerebral, corte axial, ilustrando o aneurisma na artéria comunicante anterior (seta).....	75
Figura 50	- Imagem de ATC cerebral, reconstrução na posição oblíqua para uma melhor visualização do AI na artéria comunicante anterior (seta).....	76
Figura 51	- Imagem de ATC cerebral, reconstrução na posição oblíqua para uma melhor visualização do AI na artéria comunicante anterior (seta).....	76
Figura 52	- Imagem de ATC cerebral do paciente (caso 3), ilustrando as medidas do AI na artéria comunicante anterior (diâmetro do colo e distância colo-domus).....	77
Figura 53	- Imagem de ATC cerebral do paciente (caso 3), ilustrando as dimensões da artéria relacionada ao AI (artéria cerebral anterior direita).....	77
Figura 54	- Imagem de TC do biomodelo 3D (caso 3), mostrando as dimensões do AI (diâmetro do colo e distância colo-domus)....	78
Figura 55	- Imagem de TC do biomodelo 3D (caso 3), indicando as dimensões da artéria relacionada ao AI (artéria cerebral anterior direita).....	78
Figura 56	- Imagem ilustrando o uso da plataforma de simulação com o biomodelo (caso 3) posicionado.....	79
Figura 57	- Posição cirúrgica do biomodelo (caso 3) durante a realização da fase 3 deste estudo. AI (seta).....	80
Figura 58	- Etapa da escolha do clipe metálico do biomodelo (caso 3), pelo pesquisador.....	80
Figura 59	- Ilustração do clipe metálico colocado no colo do aneurisma do biomodelo (caso 3).....	81
Figura 60	- Ilustração do clipe metálico colocado no colo do aneurisma do biomodelo (caso 3)	81
Figura 61	- Imagem cirúrgica, acesso fronto-temporal, ilustrando o clipe	

	cirúrgico (seta preta) e oclusão completa do AI (seta branca)..	82
Figura 62	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, pós-operatória, ilustrando o clipe cirúrgico (seta) e oclusão completa do AI na artéria comunicante anterior.....	83
Figura 63	- Imagem de ATC cerebral, corte coronal, com visualização do clipe metálico (seta) colocado para oclusão do AI na bifurcação da artéria comunicante anterior.....	83
Figura 64	- Imagem de ATC cerebral, corte axial, ilustrando o aneurisma na artéria cerebral média direita (seta).....	84
Figura 65	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, ilustrando o AI na bifurcação da artéria cerebral média direita (seta).....	84
Figura 66	- Aspecto final do biomodelo (caso 4) (visão interna), indicando o AI pela seta.....	85
Figura 67	- Imagem de ATC cerebral do quarto paciente estudado, ilustrando as medidas do AI na artéria cerebral média direita (diâmetro do colo e distância colo-domus).....	85
Figura 68	- Imagem de TC do biomodelo (caso 4), ilustrando as dimensões do AI (diâmetro do colo e distância colo-domus) ...	86
Figura 69	- Imagem de TC do biomodelo 3D do quarto paciente estudado, ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta azul).....	86
Figura 70	- Imagem de TC do biomodelo (caso 4), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta azul) e tronco superior da artéria cerebral média direita (seta vermelha).....	87
Figura 71	- Posição cirúrgica do biomodelo (caso 4) completo para a realização da fase 3 desta pesquisa, sendo o AI indicado pela seta.....	88
Figura 72	- Etapa da escolha do clipe metálico do biomodelo (caso 4), pelo pesquisador.....	88
Figura 73	- Etapa da escolha do clipe metálico do biomodelo (caso 4) pelo neurocirurgião convidado.....	89
Figura 74	- Imagem do clipe metálico colocado no colo do aneurisma do biomodelo (caso 4).....	90
Figura 75	- Sistema de circulação com soro fisiológico acoplado ao molde de borracha de silicone do biomodelo (caso 4) (a). Após a aplicação do clipe, não se constatou saída de soro	

	fisiológico pela perfuração no domus do aneurisma (b).....	90
Figura 76	- Uso do Doppler pulsado microvascular (seta) para avaliação da eficácia do tratamento logo após o implante do clipe cirúrgico.....	91
Figura 77	- Imagem de ATC cerebral, reconstrução em oblíquo, ilustrando o clipe metálico (seta) utilizado para oclusão do AI na bifurcação da artéria cerebral média direita.....	91
Figura 78	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, pós-operatória, ilustrando o clipe cirúrgico (seta) e a oclusão completa do AI na bifurcação da artéria cerebral média direita	92
Figura 79	- Imagem de ATC cerebral, corte axial, ilustrando o aneurisma na artéria cerebral média esquerda (seta).....	92
Figura 80	- Imagem de ATC cerebral, reconstrução na posição oblíqua para uma melhor visualização do AI na artéria cerebral média esquerda (seta).....	93
Figura 81	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, ilustrando o AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (seta).....	93
Figura 82	- Aspecto final do biomodelo (caso 5), visão interna. AI (seta)...	94
Figura 83	- Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 5, ilustrando as medidas do AI na artéria cerebral média esquerda (diâmetro do colo e distância colo-domus).....	94
Figura 84	- Imagem de TC do biomodelo (caso 5), ilustrando as dimensões do AI (diâmetro do colo e distância colo-domus)....	95
Figura 85	- Imagem de TC do biomodelo 3D do paciente do caso 5, ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média esquerda (seta azul) e tronco superior da artéria cerebral média esquerda (seta vermelha).....	95
Figura 86	- Imagem de TC do biomodelo (caso 5), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média esquerda (seta azul) e tronco superior da artéria cerebral média esquerda (seta vermelha).....	96
Figura 87	- Posição cirúrgica do biomodelo (caso 5) completo para a realização da Fase 3 desta pesquisa. AI (seta).....	97
Figura 88	- Imagem do aneurisma do biomodelo (caso 5) no microscópio cirúrgico.....	97
Figura 89	- Ilustração do clipe metálico antes (a) e após (b) a aplicação no colo do aneurisma do biomodelo (caso 5).....	98

Figura 90	- Sistema de circulação com soro fisiológico acoplado ao molde de borracha de silicone do biomodelo (caso 5) (a). Após a aplicação do clipe, não se constatou saída de soro fisiológico pela perfuração no domus do aneurisma (b).....	98
Figura 91	- Uso de Doppler pulsado microvascular (seta) para avaliação da eficácia do tratamento logo após o implante do clipe cirúrgico.....	99
Figura 92	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, corte axial, pós-operatória, mostrando o clipe cirúrgico (seta) e oclusão completa do AI na bifurcação da artéria carótida interna esquerda.....	99
Figura 93	- Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o clipe metálico (seta) utilizado para oclusão do AI na bifurcação da artéria carótida interna esquerda.....	100
Figura 94	- Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o AI na artéria cerebral média direita (seta).....	100
Figura 95	- Imagem de ATC cerebral, reconstrução em oblíquo para melhor definição do aneurisma na artéria cerebral média direita (seta).....	101
Figura 96	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, ilustrando o AI na bifurcação da artéria cerebral média direita (seta).....	101
Figura 97	- Aspecto final do biomodelo 3D do paciente do caso 6, visão externa.AI (seta).....	102
Figura 98	- Aspecto final do biomodelo 3D do paciente do caso 6, visão interior AI (seta).....	102
Figura 99	- Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 6, ilustrando as medidas do AI na artéria cerebral média direita: diâmetro do colo (seta azul) e distância colo-domus (seta vermelha).....	103
Figura 100	- Imagem de TC do biomodelo (caso 6), ilustrando as dimensões do AI (diâmetro do colo e distância colo-domus)....	103
Figura 101	- Imagem de TC do biomodelo 3D do paciente do caso 6, ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta azul) e tronco superior da artéria cerebral média direita (seta vermelha).....	104
Figura 102	- Imagem de TC do biomodelo (caso 6), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta azul) e tronco superior da artéria cerebral média direita (seta vermelha).....	104

Figura 103	- Posição cirúrgica do biomodelo (caso 6) completo para a realização da Fase 3 desta pesquisa, onde a seta indica o AI.	105
Figura 104	- Imagem mostrando o aneurisma do biomodelo (caso 6) no microscópio cirúrgico.....	105
Figura 105	- Ilustração do clipe metálico antes (a) e após (b) a aplicação no colo do aneurisma do biomodelo (caso 6).....	106
Figura 106	- Sistema de circulação com soro fisiológico acoplado ao molde de borracha de silicone do biomodelo (caso 6) (a). Após a aplicação do clipe, não se constatou saída de soro fisiológico pela perfuração no domus do aneurisma.....	106
Figura 107	- Imagem cirúrgica, acesso fronto-temporal, ilustrando o clipe cirúrgico (seta azul) e oclusão completa do AI na bifurcação da artéria cerebral média (seta branca).....	107
Figura 108	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, pós-operatória, ilustrando o clipe cirúrgico (seta) e oclusão completa do AI na bifurcação da artéria cerebral média direita	107
Figura 109	- Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o clipe (seta) utilizado para oclusão do AI na bifurcação da artéria cerebral média direita.....	108
Figura 110	- Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o aneurisma no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (seta).....	108
Figura 111	- Imagem de ATC cerebral, reconstrução na posição oblíqua para melhor visualização do AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (seta).....	109
Figura 112	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, ilustrando o AI no segmento comunicante da artéria carótida interno direita (seta).....	109
Figura 113	- Aspecto final do biomodelo 3D do paciente do caso 7, visão externa. Aneurisma intracraniano (seta).....	110
Figura 114	- Aspecto final do biomodelo 3D do paciente do caso 7, visão interior. Aneurisma intracraniano (seta).....	111
Figura 115	- Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 7, ilustrando as medidas do AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (diâmetro do colo e distância colo-domus).....	111
Figura 116	- Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 7 ilustrando as dimensões das artérias relacionadas ao AI: artérias carótida interna (seta vermelha) e cerebral anterior (seta azul).....	112

Figura 117	- Imagem de TC do biomodelo 3D (caso 7), ilustrando as medidas do AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (diâmetro do colo e distância colo-domus).....	112
Figura 118	- Imagem de TC do biomodelo 3D (caso 7), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artérias carótida interna (seta vermelha) e cerebral anterior (seta azul).....	113
Figura 119	- Ilustração da aplicação do clipe metálico no aneurisma do biomodelo (caso 7).....	113
Figura 120	- Ilustração do clipe metálico aplicado no colo do aneurisma do biomodelo (caso 7).....	114
Figura 121	- Imagem cirúrgica, acesso fronto-temporal, ilustrando o clipe cirúrgico (seta azul) e oclusão completa do AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (seta branca)...	115
Figura 122	- Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o clipe metálico (seta) utilizado para oclusão do AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita.....	115
Figura 123	- Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o AI na artéria cerebral média esquerda (seta).....	116
Figura 124	- Imagem de ATC cerebral, reconstrução em oblíquo para melhor definição do aneurisma na artéria cerebral média esquerda (seta).....	117
Figura 125	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D ilustrando o AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (seta).....	117
Figura 126	- Aspecto final do biomodelo 3D (caso 8), visão a partir do exterior. A seta indica a localização do AI.....	118
Figura 127	- Aspecto final do biomodelo 3D (caso 8), visão a partir do interior. A seta indica a localização do AI.....	118
Figura 128	- Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 8, ilustrando as medidas do AI na artéria cerebral média esquerda: diâmetro do colo (seta vermelha) e distância.....	119
Figura 129	- Imagem de TC do biomodelo (caso 8), ilustrando as dimensões do AI diâmetro do colo (seta vermelha) e distância colo-domus (seta azul).....	119
Figura 130	- Imagem de TC do biomodelo 3D (caso 8), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta vermelha) e tronco inferior da artéria cerebral média esquerda (seta azul).....	120

Figura 131	- Imagem de TC do biomodelo (caso 8), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta vermelha) e tronco inferior da artéria cerebral média esquerda (seta azul).....	120
Figura 132	- Posição cirúrgica do biomodelo (caso 8) para a realização da Fase 3 desta pesquisa. A seta indica a localização do AI.....	121
Figura 133	- Imagem ilustrando o aneurisma (seta) do biomodelo (caso 8) no microscópio cirúrgico.....	122
Figura 134	- Ilustração do clipe metálico antes (a) e após (b) a aplicação no colo do aneurisma do biomodelo (caso 8).....	122
Figura 135	- Sistema de circulação com soro fisiológico acoplado ao molde de borracha de silicone do biomodelo (caso 8) (a). Após a aplicação do clipe, não se constatou saída de soro fisiológico pela perfuração no domus do aneurisma (b).....	123
Figura 136	- Imagem cirúrgica, acesso fronto-temporal, ilustrando o clipe cirúrgico (seta branca) e o AI ocluído (seta azul).....	123
Figura 137	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, pós-operatória, mostrando o clipe cirúrgico (seta) e oclusão completa do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda.....	124
Figura 138	- Imagem de ATC cerebral, corte coronal, mostrando o clipe (seta) utilizado para oclusão do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda.....	124
Figura 139	- Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o AI na artéria cerebral média direita (seta).....	125
Figura 140	- Imagem de ATC cerebral, reconstrução em oblíquo para melhor definição do aneurisma na artéria cerebral média direita (seta).....	125
Figura 141	- Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D ilustrando o AI na bifurcação da artéria cerebral média direita (seta).....	126
Figura 142	- Aspecto final do biomodelo 3D (caso 9), visão pelo lado externo. A seta indica a localização do AI.....	126
Figura 143	- Aspecto final do biomodelo 3D (caso 9), visão pelo lado interior. AI encontra-se na bifurcação da artéria cerebral média direita (seta).....	127
Figura 144	- Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 9 ilustrando as medidas do AI na artéria cerebral média direita: diâmetro do colo (seta vermelha) e distância colo-domus (seta azul).....	128

- Figura 145 – Imagem de TC do biomodelo (caso 9), ilustrando as dimensões do AI: diâmetro do colo (seta vermelha) e distância colo-domus (seta azul)..... 128
- Figura 146 – Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 9, ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta vermelha) e tronco superior da artéria cerebral média direita (seta azul)..... 129
- Figura 147 – Imagem de TC do biomodelo (caso 9), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta vermelha) e tronco superior da artéria cerebral média direita (seta azul)..... 129
- Figura 148 – Posição cirúrgica do biomodelo (caso 9) para a realização da Fase 3 desta pesquisa. O AI encontra-se na bifurcação da artéria cerebral média direita, conforme indicado pela seta..... 130
- Figura 149 – Imagem do aneurisma do biomodelo (caso 9) no microscópio cirúrgico..... 130
- Figura 150 – Ilustração do clipe metálico antes (a) e após (b) a aplicação no colo do aneurisma do biomodelo (caso 9)..... 131
- Figura 151 – Sistema de circulação com soro fisiológico acoplado ao molde de borracha de silicone do biomodelo (caso 9) (a). Após a aplicação do clipe, não se constatou saída de soro fisiológico pela perfuração no domus do aneurisma (b)..... 131
- Figura 152 – Imagem cirúrgica, acesso fronto-temporal, ilustrando o clipe cirúrgico (seta branca) e a sonda do Doppler microvascular (seta azul)..... 132
- Figura 153 – Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, pós-operatória, ilustrando o clipe cirúrgico (seta) e a oclusão completa do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda..... 132
- Figura 154 – Imagem de ATC cerebral pós-operatória, com reconstrução axial, ilustrando o clipe (seta) utilizado para oclusão do AI na bifurcação da artéria cerebral média direita..... 133
- Figura 155 – Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (seta)..... 134
- Figura 156 – Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, ilustrando o AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (seta)..... 134
- Figura 157 – Imagem de ATC cerebral, reconstrução em oblíquo para melhor definição do aneurisma no segmento comunicante da

	artéria carótida interna direita (seta).....	135
Figura 158	- Aspecto final do biomodelo 3D (caso 10), visão a partir do exterior. A seta indica a localização do AI.....	135
Figura 159	- Aspecto final do biomodelo 3D (caso 10), visão interior. AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (seta).....	136
Figura 160	- Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 10, ilustrando as medidas do AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita: diâmetro do colo (seta vermelha) e distância colo-domus (seta azul).....	137
Figura 161	- Imagem de TC do biomodelo (caso 10), ilustrando as dimensões do AI: diâmetro do colo (seta vermelha) e distância colo-domus (seta azul).....	137
Figura 162	- Imagem de ATC do paciente do caso 10, ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria carótida interna direita (seta vermelha) e artéria cerebral média direita (seta azul).....	138
Figura 163	- Imagem de TC do biomodelo (caso 10), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria carótida interna direita (seta vermelha) e artéria cerebral média direita (seta azul).....	138
Figura 164	- Imagem do aneurisma do biomodelo (caso 10) no microscópio cirúrgico.....	139
Figura 165	- Ilustração do clipe metálico antes (a) e após (b) a aplicação no colo do aneurisma do biomodelo (caso 10).....	139
Figura 166	- Sistema de circulação com soro fisiológico acoplado ao molde de borracha de silicone do biomodelo (caso 10) (a). Após a aplicação do clipe, não se constatou saída de soro fisiológico pela perfuração no domus do aneurisma (b).....	140
Figura 167	- Imagem cirúrgica, acesso fronto-temporal, ilustrando o clipe cirúrgico (seta branca) e o aneurisma ocluído (seta azul).....	140
Figura 168	- Imagem de ATC cerebral pós-operatória com reconstrução em oblíquo, ilustrando o clipe (seta) utilizado para oclusão do AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita.....	141
Figura 169	- Biomodelos dispostos sobre a mesa de simulação para realização da Fase 4 deste estudo.....	142
Figura 170	- Mesa de simulação com os biomodelos e cliques metálicos	

	para a realização da Fase 4 deste estudo.....	142
Figura 171 -	Etapa da simulação cirúrgica e escolha do clipe metálico.....	143

LISTA DE TABELAS

Tabela	1 - Resultados.....	52
Tabela	2 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo do primeiro caso e o erro relativo encontrado (%)...	59
Tabela	3 - Característica dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo 1 fase 3 desta tese de doutorado.....	63
Tabela	4 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do segundo caso e o erro relativo encontrado (%).....	69
Tabela	5 - Característica dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo 3D (caso 2) na fase 3 deste estudo.....	72
Tabela	6 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do terceiro caso e o erro relativo encontrado (%).....	78
Tabela	7 - Característica dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo 3D (caso 3) na fase 3 deste estudo.....	82
Tabela	8 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do caso 4 e o erro relativo encontrado (%).....	87
Tabela	9 - Característica dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo (caso 4) na fase 3 deste estudo.....	90
Tabela	10 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do caso 5 e o erro relativo encontrado (%).....	96
Tabela	11 - Característica dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo (caso 5) na Fase 3 deste estudo.....	98
Tabela	12 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do caso 6 e o erro relativo encontrado (%).....	104
Tabela	13 - Característica dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo (caso 6) na fase 3 deste estudo.....	106
Tabela	14 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do sétimo caso e o erro relativo encontrado (%).	113
Tabela	15 - Características dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo 3D do paciente do caso 7, na fase 3 deste estudo...	114
Tabela	16 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D (caso 8) e o erro relativo encontrado (%).	120

Tabela 17 - Características dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo (caso 8) na fase 3 deste estudo.....	123
Tabela 18 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do caso 9 e o erro relativo encontrado (%).....	129
Tabela 19 - Características dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo (caso 9) na fase 3 deste estudo.....	131
Tabela 20 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do caso 10 e o erro relativo encontrado (%).....	139
Tabela 21 - Característica dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo (caso 10) na fase 3 deste estudo.....	140
Tabela 22 - Característica dos cliques metálicos escolhidos na Fase 4 e a correspondência com os utilizados nas cirurgias reais.....	143

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	24
1.2	OBJETIVOS	26
1.2.1	GERAL	26
1.2.2	ESPECÍFICOS	26
1.3	JUSTIFICATIVA	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2.1	ANEURISMAS INTRACRANIANOS	28
2.2	MODALIDADES DE IMAGENS MÉDICAS UTILIZADAS NAS DOENÇAS VASCULARES	31
2.2.1	ARTERIOGRAFIA COM SUBTRAÇÃO DIGITAL	31
2.2.2	ANGIOTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (ATC)	32
2.2.3	ANGIORESSONÂNCIA MAGNÉTICA (ARM)	33
2.2.4	ULTRASSOM DOPPLER PULSADO MICROVASCULAR (DPM)	34
2.3	TÉCNICAS DE TRATAMENTO	35
2.4	CLIPES CIRÚRGICOS DE AI	36
2.5	MANUFATURA ADITIVA (AM)	38
2.6	PLANEJAMENTO CIRÚRGICO EMPREGANDO MODELOS 3D	40
2.7	SIMULAÇÃO DE PROCEDIMENTOS NEUROCIRÚRGICOS	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	MATERIAIS	42
3.2	MÉTODOS	43
4	RESULTADOS	50
4.1	RESULTADOS GERAIS	50
4.2	ESTUDOS DE CASO	50
4.3	FASE DE SIMULAÇÃO CIRÚRGICA E AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO COM OS BIOMODELOS (FASE 4)	140
5	DISCUSSÃO	144
6	CONCLUSÕES	150
7	CONTRIBUIÇÕES DA TESE	151
8	TRABALHOS FUTUROS	152
	REFERÊNCIAS	153
	APÊNDICE 1	160
	ANEXO 1	164

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Estima-se que os aneurismas intracranianos (AI) comprometam, aproximadamente, 2% da população mundial (STEINER et al., 2013; RINKEL et al., 1998). A sua principal complicação ocorre quando acontece rompimento, ocasionando a chamada hemorragia subaracnoide (HSA) (RINKEL et al., 1998; SUAREZ; TALL; SELMAN, 2006). Nesse caso, a taxa de mortalidade alcança índices de, aproximadamente, 60% em seis meses (STEINER et al., 2013), o que comprova a importância do tratamento adequado de AI.

O tratamento cirúrgico de AI consiste na exclusão do aneurisma da circulação cerebral por meio da clipagem microcirúrgica ou da embolização endovascular (LI et al., 2013). Para orientar o tratamento, bem como auxiliar na escolha das técnicas e estratégias cirúrgicas, vários métodos de imagem, invasivos e não invasivos, são utilizados. Entre os métodos não invasivos, a angiotomografia cerebral (ATC) é a mais utilizada, pois atinge quase 100% de especificidade e 95% de sensibilidade para avaliação de AI (ANDRADE et al., 2003). No entanto, por apresentar as estruturas cerebrais em imagens bidimensionais, a ATC limita a visualização do colo aneurismático (YASUI et al., 2000), que é a principal região a ser claramente identificada pelo cirurgião durante o procedimento cirúrgico (GUGLIELMI et al., 1992).

As principais dificuldades durante o tratamento microcirúrgico de AI incluem a escolha de materiais apropriados a serem utilizados devido às variações anatômicas. Considera-se, em particular, nos AI de colo largo e/ou complexos, que o planejamento cirúrgico seja essencial (LAWTON; SPETZLER, 1995), a fim de evitar manipulação excessiva dos vasos intracranianos e tempo cirúrgico prolongado, que predisponem à ruptura aneurismática intraoperatória (RINNE et al., 1995).

Os exames de imagens não invasivos atualmente disponíveis garantem ao cirurgião uma ótima visualização da morfologia de AI; porém, não existe um método eficaz de planejamento de tratamento no qual uma visualização em três dimensões (3D) seja obtida para reproduzir adequadamente o AI (GUGLIELMI et al., 1991). Embora os modelos virtuais, visualizados computacionalmente, tenham se tornado muito semelhantes à realidade, a simulação de um procedimento cirúrgico continua

sendo difícil e longe de ser colocada em prática, mesmo quando tecnologias avançadas são adotadas. Simuladores de realidade virtual foram desenvolvidos para a cirurgia neurológica, tentando resolver esse problema. Todavia, baseiam-se no uso extensivo de imagens e com *feedback* tátil limitado. Apesar de fornecer imagens virtuais em 3D, a interpretação de tais imagens depende da experiência do cirurgião, que deve transformar as imagens projetadas em duas dimensões (2D) em imagens 3D virtuais (VLOEBERGHS et al., 2007). Em contraste, os modelos reais de órgãos humanos, também chamados de biomodelos, trazem uma expressão tátil e não necessitam de habilidades especiais do cirurgião para processar as imagens 2D, uma vez que consistem em modelos físicos 3D reais da própria estrutura a ser analisada.

Adicionalmente, o uso de modelos 3D de estruturas arteriais aumenta a compreensão das doenças cerebrovasculares. Tais modelos 3D realistas oferecem uma oportunidade promissora para a simulação da cirurgia. Sem eles, o cirurgião somente terá certeza sobre qual clipe cirúrgico irá utilizar, além do melhor ângulo de implante, das variações anatômicas e das dificuldades do procedimento, no momento da cirurgia (MOLYNEUX et al., 2002).

A fim de resolver essas limitações, propõe-se um novo planejamento pré-operatório, que utilize a tecnologia de manufatura aditiva (MA). A MA, também conhecida como impressão 3D ou prototipagem rápida, é composta por um conjunto de tecnologias e processos automatizados capazes de gerar objetos em 3D a partir de imagens bidimensionais (GORNI, 2001). É um processo ordenado de sobreposições de camadas de material, que permite a produção de estruturas 3D de forma automatizada, rápida e barata (TUKURU et al., 2008). Na área médica, o uso dessa tecnologia foi demonstrado adequado para uma variedade de aplicações, envolvendo desde a fabricação de próteses maxilares (WINDER; BIBB, 2005) até moldes de cranioplastia (MULLER et al., 2003). No campo da cirurgia vascular, estudos relataram o uso de modelos 3D no planejamento cirúrgico para aneurismas aórticos (MARKL et al., 2005). No entanto, existem poucos estudos sobre a aplicação de AM para AI (WURM et al., 2004; KIMURA et al., 2009; D'URSO et al., 1999; ISHIKAWA et al., 2014; MASHIKO et al., 2017), sendo essa uma área de pesquisa a ser mais explorada.

Em dois estudos previamente realizados pelo autor dessa pesquisa, já foi estabelecida a viabilidade de fabricação de modelos 3D de AI saculares e

demonstrado o seu uso como coadjuvante no planejamento cirúrgico. No primeiro estudo, concluiu-se que é possível fabricar biomodelos 3D de AI a partir de resina sintética (ERBANO et al., 2013). No segundo, demonstrou-se a possibilidade de fabricação de biomodelos 3D a partir de um tipo de material maleável (elastômero), o qual provou ser uma representação física e tridimensional adequada de imagens angiotomográficas (LEAL et al., 2016).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é investigar a utilização de modelos 3D, fabricados por manufatura aditiva, para a eleição de clipe cirúrgico e simulação cirúrgica em microcirurgias de AI.

1.2.2 Específicos

Para alcançar o objetivo principal, enunciam-se os seguintes objetivos específicos:

1. avaliar as principais características dimensionais do modelo 3D em relação ao exame de ATC do voluntário;
2. avaliar o planejamento cirúrgico com o modelo 3D, incluindo a escolha do clipe (tamanho, formato, número e ângulo de aplicação);
3. avaliar a efetividade do procedimento cirúrgico de exclusão de AI por meio do clipe metálico selecionado durante o planejamento;
4. avaliar a simulação cirúrgica utilizando o biomodelo 3D.

1.3 JUSTIFICATIVA

Embora os exames de imagens disponíveis garantam ao cirurgião uma visualização adequada da morfologia de um AI (PECHLIVANIS et al., 2005), a literatura não descreve um método de planejamento de tratamento em que se

consiga visualização 3D e a manipulação real e integral do AI, a qual possibilite a escolha prévia do clipe cirúrgico a ser utilizado na cirurgia (MULLER et al., 2003; MASHIKO et al., 2015). Os exames de imagem servem para guiar o profissional no planejamento pré-operatório; porém, a escolha do clipe somente é realizada no intraoperatório.

Os cliques cirúrgicos para AI são confeccionados em titânio e se assemelham a um grampo. Uma variedade de modelos (tamanhos e formatos) foi desenvolvida para atender às mais diversas necessidades do cirurgião, de acordo com a localização e posicionamento do AI. Porém, a escolha do modelo a ser utilizado em determinada cirurgia está reservada para o ato cirúrgico principal. Logo, a utilização de modelos 3D pode ampliar a compreensão das estruturas vasculares e do AI previamente à cirurgia, e fornecer, também, uma promissora oportunidade para a simulação cirúrgica. Sabe-se que a manipulação excessiva dos vasos intracranianos e do AI durante a escolha do clipe cirúrgico correto retarda a cirurgia e constitui fator predisponente à rotura aneurismática intraoperatória e à lesão cerebral direta, com consequente aumento da morbimortalidade (MOLYNEUX et al., 2002).

Os benefícios da simulação cirúrgica são amplamente reconhecidas (KONAKONDLA et al., 2017; DAWSON et al., 2007; ISSENBERG et al., 1999), especialmente durante o programa de residência médica em neurocirurgia, quando uma técnica cirúrgica inadequada pode trazer sérias consequências aos pacientes (LAI; MORGAN, 2012). A clipagem de AI ainda é uma intervenção importante em neurocirurgia. Como o tratamento endovascular para AI está aumentando, os médicos residentes têm menos experiência na realização da clipagem, tornando-se um procedimento difícil (TENJIN; OKANO, 2017). Uma solução para isso seria a simulação cirúrgica utilizando os biomodelos 3D (KONAKONDLA et al., 2017).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ANEURISMAS INTRACRANIANOS

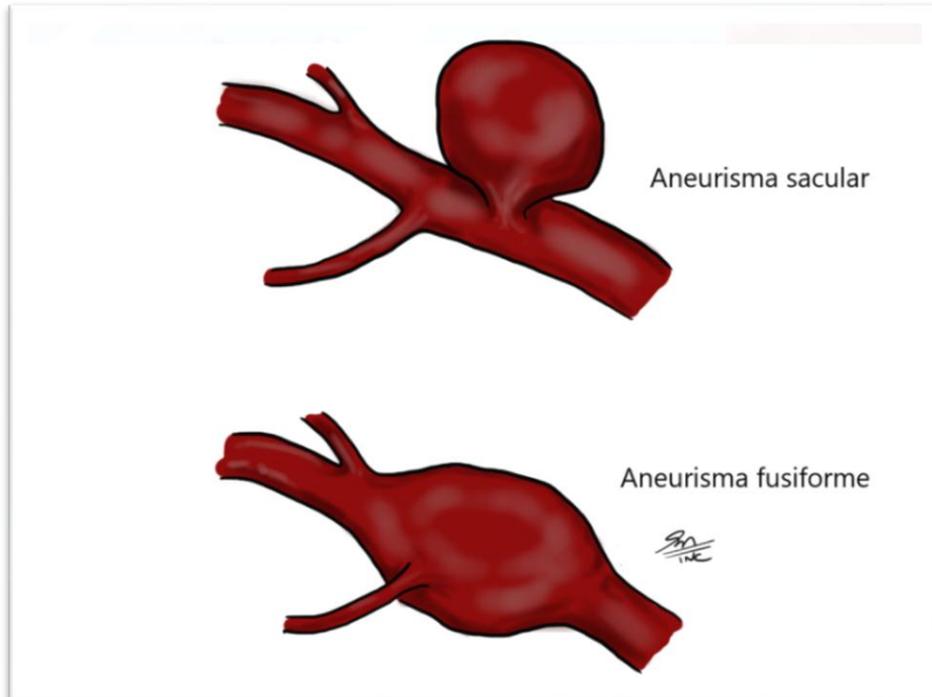
AI, por definição, são malformações vasculares adquiridas ao longo do tempo, que se apresentam sob a forma de dilatação localizada na parede arterial. Tipicamente, são localizados nos pontos de ramificação das principais artérias da base do crânio. A distribuição de AI nas artérias intracranianas é uniforme, sendo que existem certos segmentos arteriais mais acometidos que outros, possivelmente devido a fatores hemodinâmicos. Dentre as localizações mais frequentes estão as artérias comunicantes anterior e posteriores, além da artéria cerebral média (STEINER et al., 2013; RINKEL et al., 1998; SUAREZ; TARR; SELMAN, 2006).

Estudos epidemiológicos apontam uma maior prevalência de AI no gênero feminino, com risco aumentado de 1,6 a 4,5 vezes. Quanto à idade, a maior incidência encontra-se aos 55 anos (MOLYNEUX et al., 2002). Quase em sua totalidade, os AI são assintomáticos, o que dificulta um diagnóstico precoce. Uma minoria é descoberta incidentalmente durante estudos de imagens, tais como, angiotomografia computadorizada (ATC) ou angioressonância (ARM); ou então quando produzem sintomas devido à compressão de estruturas adjacentes. Esses exames são realizados para avaliar as estruturas vasculares cerebrais e cervicais, de forma não invasiva. AI múltiplos ocorrem entre 15 a 30% dos pacientes (LEAL; AGNOLETTO; MENESES, 2016).

Os AI podem ser classificados por sua localização em aneurismas de circulação anterior e de circulação posterior. Os primeiros situam-se na artéria carótida interna ou em seus dois principais ramos, as artérias cerebrais média e anterior. Os aneurismas da circulação posterior localizam-se no sistema vértebro-basilar. Os AI também podem ser classificados conforme o seu formato em saculares e fusiformes (Figura 1). Os saculares são uma dilatação de forma esférica da artéria, enquanto os fusiformes apresentam uma forma alongada ao longo do eixo principal. Com relação ao tamanho (diâmetro colo-*domus* ou altura) (Figura 2), os AI podem ser pequenos, com menos de 5 mm; médios, entre 5 e 15 mm; grandes, entre 15 e 25 mm e gigantes, quando maiores de 25 mm de diâmetro. O colo pode ser considerado pequeno quando mede menos de 4 mm, ou com menos de 0,8 mm da divisão entre a sua dimensão e a circunferência do aneurisma; e

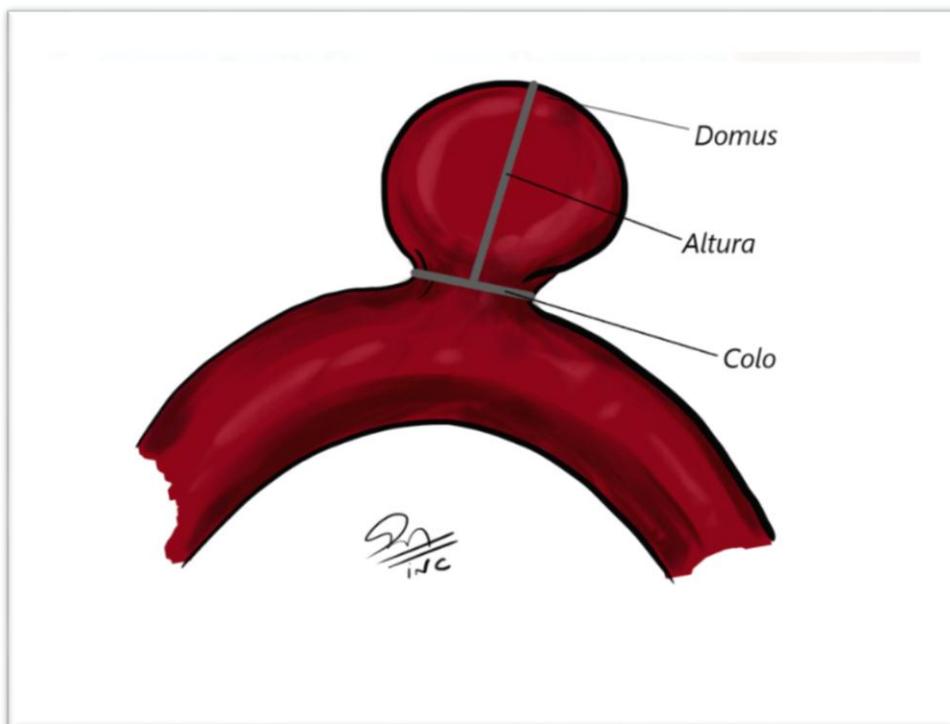
grande, quando apresenta medidas maiores nesses parâmetros (LEAL; AGNOLETTI; MENESES, 2016).

Figura 1 - Classificação dos aneurismas intracranianos segundo seu formato.



Fonte: o autor, 2017. Arte: Erasmo Barros da Silva Jr.

Figura 2 - Denominações importantes dos aneurismas intracranianos.



Fonte: O autor, 2017. Arte: Erasmo Barros da Silva Jr.

Quando o AI se rompe, ocorre a chamada hemorragia subaracnoide (HSA). Estima-se uma incidência de, aproximadamente, 10 a cada 100.000 habitantes/ano no mundo (THE ACROSS GROUP, 2000; LAWTON et al., 1996). Os sintomas típicos da HSA incluem a cefaleia intensa de início súbito, náuseas, vômitos e, frequentemente, perda da consciência. Fatores de risco para a HSA são: tabagismo, consumo excessivo de álcool, hipertensão arterial e história familiar (FEIGN et al., 2005; JUVELA, 2002; JUVELA, 2003). Algumas desordens hereditárias estão também classicamente relacionadas com AI, incluindo doença renal policística, síndrome de Ehlers-Danlos do tipo IV, síndrome de Marfan e neurofibromatose do tipo I (RONKAINEN et al., 1997). HSA é um evento devastador associado com uma taxa de mortalidade cumulativa em 6 meses de, aproximadamente, 50% (FOGELHOLM; HERNESNIEMI; VAPALAHTI, 1993; HOP et al., 1997). Representa somente 5 a 10% dos acidentes vasculares encefálicos, visto que acomete uma faixa da população jovem e, frequentemente, resulta em morte. A perda de anos de vida produtiva é similar àquela do acidente vascular encefálico isquêmico (JOHNSTON; SELVIN; GRESS, 1998). Antecedendo entre 1 e 6 semanas à ruptura do AI, pode ocorrer um sangramento menor, muitas vezes deflagrado por episódio de cefaleia brusca que, não raro, é desvalorizado, dificultando o diagnóstico conhecido como cefaleia sentinela.

Suspeitar da HSA aneurismática é fundamental, já que é uma emergência médica e em 20% dos casos é inicialmente subdiagnosticada (NAIDECH et al., 2005). Ao longo dos anos, muitas escalas foram propostas para classificar esses quadros, merecendo destaque a de Hunt e Hess (HH), proposta em 1968 (OSAWA et al., 2001; RINNE et al., 1996). A escala de HH é um dos instrumentos de classificação utilizados para avaliar a gravidade de uma HSA com base na condição clínica do paciente (HUNT; HESS, 1968).

O diagnóstico de HSA é realizado pela tomografia computadorizada (TC), sendo quase sempre o primeiro método de investigação por apresentar sensibilidade nos primeiros momentos após a HSA, que diminui proporcionalmente à medida que o sangue se deposita no espaço subaracnoide. A quantificação do espaço hemático é, geralmente, feita pela escala de Fisher (FISHER; KISTLER; DAVIS, 1980). Essa escala é comumente usada para prever o risco de vasoespasm cerebral após a HSA, tendo como base a quantidade de sangue mostrada nas TC de crânio iniciais. A punção lombar com investigação do líquido cefalorraquidiano (líquor) vem

perdendo força desde que a TC começou a ser empregada, restringindo-se a casos específicos de pacientes que apresentam exames de imagem normais ou negativos e uma história clínica convincente. O padrão ouro para o diagnóstico definitivo da causa da HSA ainda é a arteriografia ou angiografia cerebral com subtração digital; entretanto, deve ser feita ressalva importante a respeito das taxas de ressangramento e outras complicações inerentes a esse método invasivo, como, por exemplo, ataque isquêmico transitório e acidente vascular encefálico.

O objetivo mais importante do tratamento dos pacientes com HSA aneurismática é a prevenção do ressangramento a partir do AI. No momento, isso é possível pela oclusão do aneurisma por meio do método microcirúrgico clássico, no qual se implanta um clipe metálico sobre o colo aneurismático, possibilitando a exclusão do AI da circulação. Da mesma forma, esse tipo de tratamento também é oferecido aos pacientes com diagnóstico de AI não rotos.

2.2 MODALIDADES DE IMAGENS MÉDICAS UTILIZADAS NAS DOENÇAS VASCULARES

2.2.1 Arteriografia com subtração digital

O diagnóstico de AI passou a ser realizado com o advento da arteriografia cerebral apresentada à comunidade científica por Egas Moniz em julho de 1927 (MAYBERG; WINN, 2001). Ainda hoje, é o exame "padrão ouro" para a detecção de AI. A arteriografia cerebral com subtração digital (Figura 3) é realizada por meio da técnica de Seldinger, com cateterização da artéria femoral e estudo dos quatro grandes vasos intracranianos, possuindo elevada especificidade e sensibilidade (ANDRADE, 2003). Tem a vantagem de ser realizado o estudo dinâmico da vascularização intracraniana, porém, como todo método invasivo, possui riscos de complicações que variam entre 0,1% e 2,6% em pacientes saudáveis (EARNEST et al., 2003).

Figura 3 – Imagem de arteriografia com subtração digital.



Fonte: o autor, 2017.

Nos últimos 20 anos, surgiram duas novas modalidades diagnósticas não invasivas para as doenças vasculares intracranianas: a angiotomografia computadorizada (ATC) e a angioressonância magnética (ARM).

2.2.2 Angiotomografia Computadorizada (ATC)

A ATC (Figura 4) é uma técnica de tomografia por raios X (RX) na qual uma fonte de RX gira em torno do paciente e um feixe de RX atravessa o corpo em várias direções. A reconstrução matemática da imagem usa a atenuação de RX ao longo de cada um dos muitos trajetos através do corpo para calcular a atenuação local em cada ponto no volume da aquisição. Os coeficientes de atenuação locais são normalizados, sendo que cada ponto da matriz da imagem corresponde a um pixel na imagem gerada. Por fim, esses dados da imagem de tomografia computadorizada (TC) são convertidos em tons de cinza e exibidos como uma imagem ou fatia da região analisada. Com o advento dos tomógrafos com tubos de RX de rotação contínua, tornou-se possível a aquisição contínua de um volume de dados, ou seja, os dados brutos são capturados durante várias rotações, enquanto a mesa do paciente avança no plano de varredura (PROKOP, 2010). Essa técnica

permite a reconstrução de um conjunto de dados 3D completos formados por imagens axiais superpostas, tornando-se a base da ATC. Para realçar as estruturas vasculares, é necessário o uso de contraste iodado endovenoso. A vantagem da ATC é a possibilidade de alta padronização, o que a torna um procedimento muito rápido e seguro, tornando-se quase sempre a técnica de escolha inicial para a investigação de AI. As informações apresentadas são tridimensionais, com resolução espacial relativamente alta, e é possível fazer avaliação simultânea da luz vascular, da parede do vaso e das estruturas subjacentes (PROKOP, 2010).

Figura 4 - Imagem de angiogramia computadorizada.



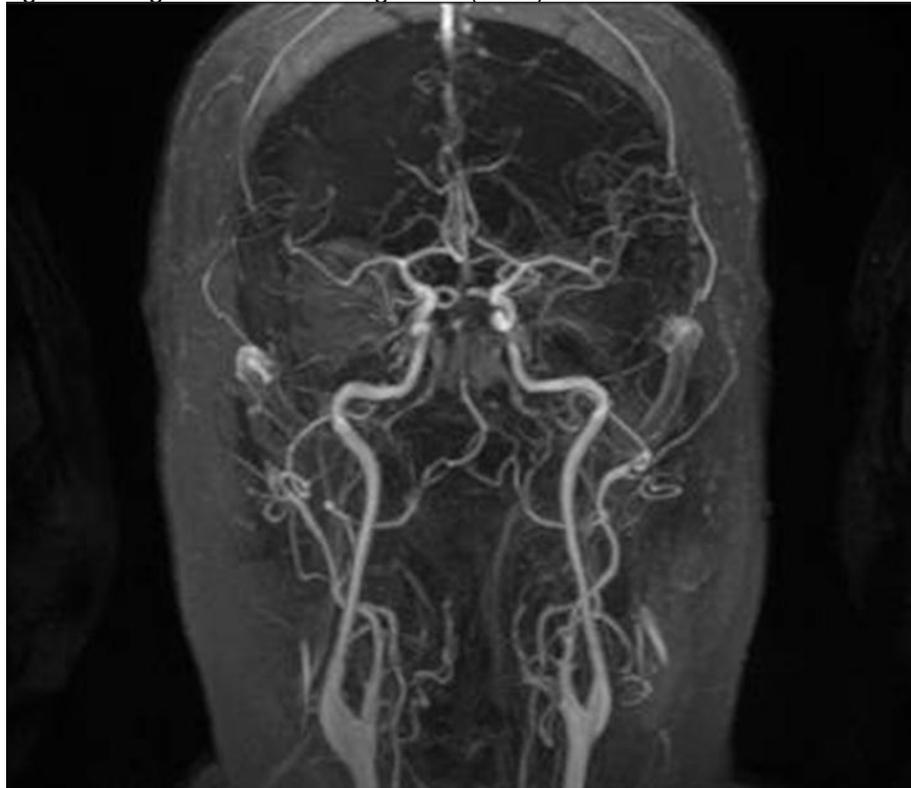
Fonte: o autor, 2017.

2.2.3 Angioressonância Magnética (ARM)

A ressonância nuclear magnética (RNM) é um método não invasivo (sem radiação ionizante), o qual utiliza um campo magnético intenso e ondas de radiofrequência permitindo a geração de imagens anatômicas de diversas partes do corpo humano com alto grau de precisão (KOROSEC, 2010). Logo após a introdução dessa tecnologia, constatou-se que essa modalidade poderia ser usada

para obter imagens dos vasos sanguíneos. Desde então, foram criados vários métodos de angiografia por RNM para a avaliação não invasiva, ou minimamente invasiva, de AI. A ARM (Figura 5) é usada para mostrar informações vasculares em 3D, fornecer informações sobre a velocidade e taxa de fluxo volumétrico do sangue, além de obter angiogramas sem o uso de contraste iodado ou radiação ionizante. Concomitantemente, é possível a avaliação de tecidos moles. As técnicas de ARM mais usadas podem ser classificadas por contraste de fase, tempo de movimento ou uso de contraste endovenoso, diferenciando-se, principalmente, pelo tempo de aquisição das imagens, quantidade de ruídos (artefatos) e, por fim, pela qualidade da imagem final (KOROSEC, 2010).

Figura 5 - Imagem de angioressonância magnética (ARM).



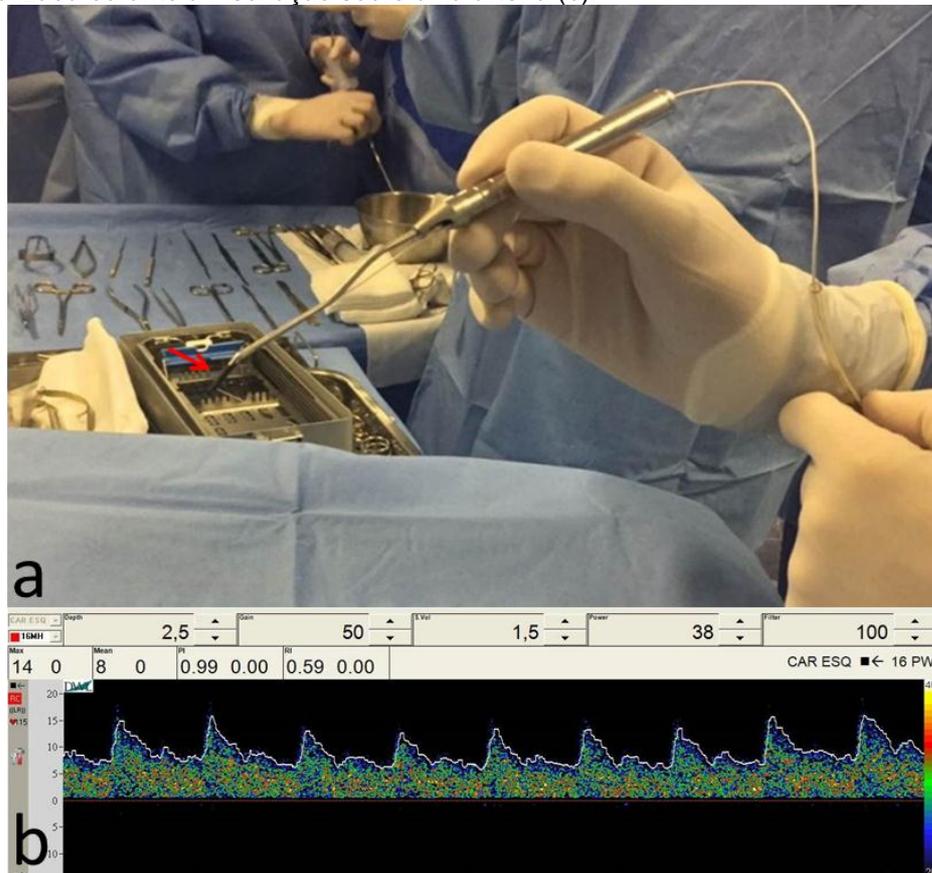
Fonte: o autor, 2017.

2.2.4 Ultrassom Doppler Pulsado Microvascular (DPM)

Outro exame utilizado para avaliar a circulação sanguínea dos principais vasos intracranianos é o Doppler transcraniano, um método baseado em ultrassonografia Doppler com emissão pulsada de baixa frequência (2 MHz), capaz de atravessar o crânio íntegro. Trata-se de um exame não invasivo e indolor ao paciente. O objetivo do exame é avaliar a circulação sanguínea dos principais vasos

intracranianos. O aperfeiçoamento das técnicas de US Doppler pulsado tem tornado possível a sua aplicação não apenas no diagnóstico de doenças cerebrovasculares, mas também em procedimentos neurovasculares. O uso de transdutores ultrassônicos milimétricos oferece a possibilidade de monitorização e controle intraoperatório de estruturas vasculares como, por exemplo, nas cirurgias para clipagem de AI. A patência vascular, a estenose arterial, a direção de fluxo e as alterações na resistência podem ser investigadas em tempo real e de forma segura pela tecnologia Doppler pulsado microvascular, sem nenhum preparo adicional (DPM) (Figura 6) (LEAL; COCORULLO, 2017).

Figura 6 - Imagem do transdutor (seta) do Doppler pulsado microvascular (a) e a imagem obtida no monitor, visualizada durante a insonação sobre uma artéria (b).



Fonte: o autor, 2017.

2.3 TÉCNICAS DE TRATAMENTO

O objetivo do tratamento dos pacientes com AI é a exclusão do mesmo da circulação cerebral e, conseqüentemente, prevenir o sangramento para o espaço

subaracnoide. Em caso de AI roto e com HSA já instalada, o mesmo tipo de tratamento é necessário, todavia de forma emergencial, evitando, desta forma, o ressangramento (STEINER et al., 2013).

Existem duas opções terapêuticas disponíveis no momento: a terapia endovascular e o tratamento cirúrgico (LEAL; AGNOLETTO; MENESES, 2016).

A primeira foi desenvolvida por Guido Guglielmi, em 1990, e baseia-se na introdução intra-arterial de espirais metálicas no interior do AI, através de acesso femoral e guiado por radioscopia (MULLER et al., 2003). É uma técnica que vem passando por uma série de aperfeiçoamentos devido ao avanço tecnológico. Atualmente, existem outros dispositivos em uso, como, por exemplo, os diversores de fluxo, que são *stents* metálicos implantados no interior da artéria comprometida pelo AI. Os diversores de fluxo funcionam redirecionando o fluxo sanguíneo, consequentemente, ocasionando trombose no interior do AI.

A outra opção de tratamento é a microcirurgia para implante de clipe metálico no colo aneurismático, embora outras opções, como *trapping* (com ou sem *bypass*) e o *wrapping* também sejam utilizados (LEAL; AGNOLETTO; MENESES, 2016). A técnica foi descrita inicialmente por Walter Dandy (1938) e, ainda hoje, é considerada a técnica clássica para exclusão segura de AI da circulação cerebral (LEAL; AGNOLETTO; MENESES, 2016).

2.4 CLIPES CIRÚRGICOS DE AI

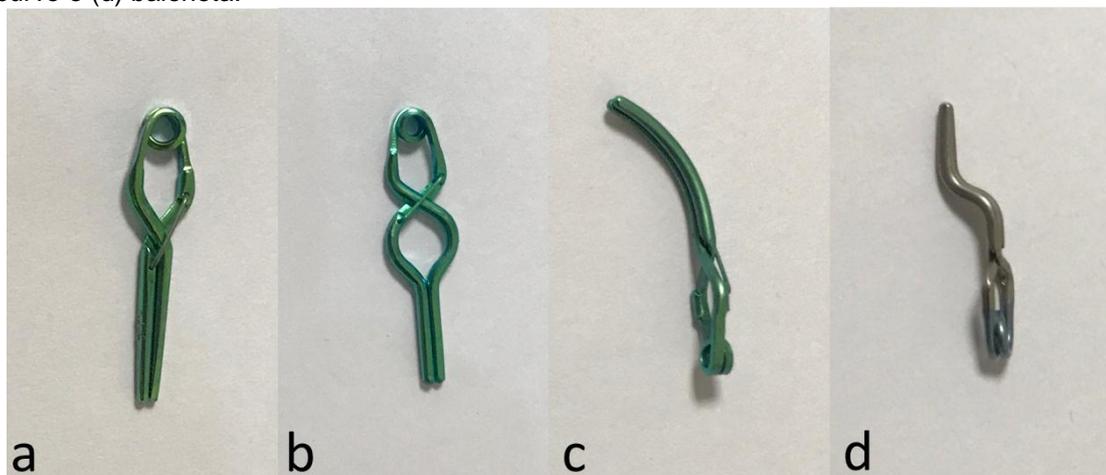
O objetivo moderno da microcirurgia de AI é isolá-lo do fluxo arterial, mantendo a patência normal da artéria acometida e dos ramos adjacentes. Em 1937, Walter Dandy foi a primeira pessoa a ocluir cirurgicamente um AI aplicando um clipe de prata maleável em forma de V no colo de um aneurisma da artéria carótida interna (LOUWN, 2001). Desde essa época, existem registros dos primeiros modelos de cliques cirúrgicos; porém, a versão moderna (fechamento automático) só teve início nos anos 60 com a introdução do clipe de aneurisma de Mayfield e Schwartz, seguido por Heifetz, Yasargil e Scovil-Lewis (DUJOVNY, 2010). Foram avaliados a biocompatibilidade e o potencial de corrosão dos cliques, sendo que os fabricados com SS301, 302, 401, 402, 17-7 PH e N58 não foram recomendados para implantação. O único metal aceito, na época, foi a liga de cobalto-cromo. No entanto, o último material introduzido foi o titânio, com baixo efeito eletromagnético,

resultando em diminuição dos artefatos de imagem na RNM. O clipe feito com esse material não sofre nenhum tipo de interação com o campo magnético da RNM (DUJOVNY, 2010).

Atualmente, os cliques cirúrgicos modernos de AI são fabricados somente de titânio (não ligado, grau 1) e assemelham-se a um grampo. Para auxiliar o procedimento, o neurocirurgião geralmente utiliza um aplicador, para que o clipe possa ser posicionado no local exato e com maior segurança. O uso de um clipe apropriado é necessário para preservar a integridade do lúmen arterial, excluindo completamente o AI da circulação sanguínea.

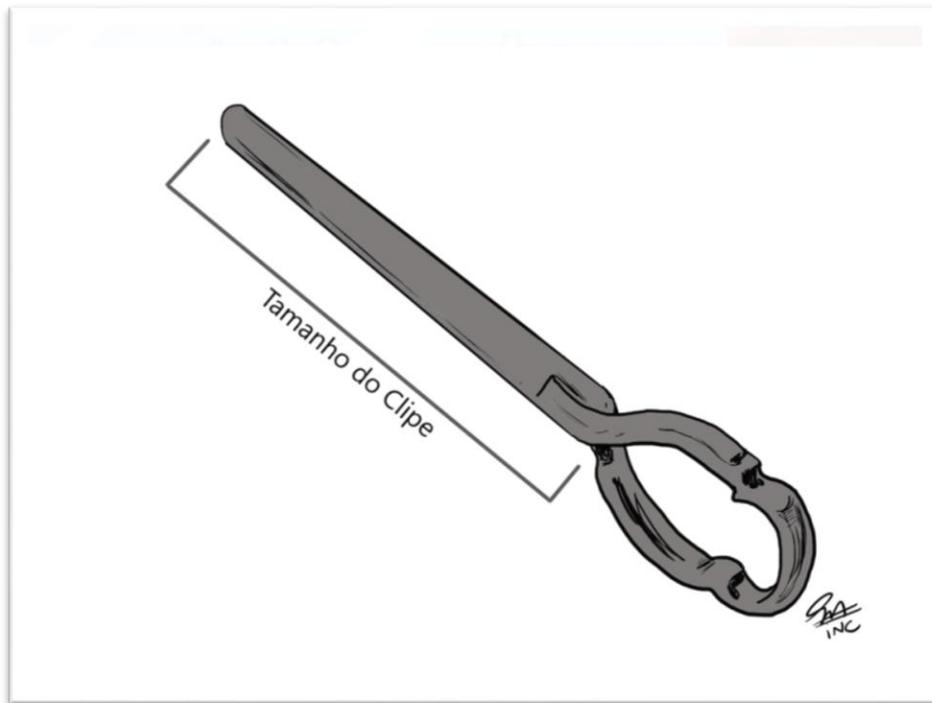
Uma variedade de tamanhos e formatos foi desenvolvida para atender às mais diversas necessidades do neurocirurgião, de acordo com a localização e o posicionamento de AI. Os principais formatos dos cliques são: reto, fenestrado, curvo e baioneta, como ilustrado na Figura 7. Os tamanhos mais utilizados são: 5, 7, 9 e 11 mm (Figura 8).

Figura 7 - Os principais formatos de cliques utilizados para o tratamento de AI: (a) reto, (b) fenestrado, (c) curvo e (d) baioneta.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 8 - Ilustração do clipe metálico e local que define o seu tamanho.



Fonte: o autor, 2017. Arte: Erasmo Barros da Silva Jr.

2.5 MANUFATURA ADITIVA (AM)

Desde a sua criação, na década de 80, a manufatura aditiva (AM), anteriormente chamada de prototipagem rápida, tem revolucionado o campo de desenvolvimento de objetos e produtos. Também denominada de prototipagem rápida (termo em desuso) ou impressão 3D (NISHIMURA et al., 2016), a AM designa um conjunto de tecnologias usadas para fabricar objetos físicos diretamente a partir de fontes de dados gerados por sistemas de projeto auxiliado por computador. Tais métodos são bastante peculiares, uma vez que eles agregam e ligam materiais, camada por camada, de forma a constituir o objeto desejado.

As tecnologias de AM permitem aos projetistas criar rapidamente protótipos concretos a partir de seus projetos, ao invés de imagens bidimensionais. Esses modelos apresentam diversos usos. Eles constituem um auxílio visual excelente durante a discussão prévia do projeto. Além disso, o protótipo pode permitir testes prévios como, por exemplo, a criação de modelos de estruturas anatômicas.

O termo "rápido" associado a esses processos é relativo. A construção de alguns protótipos pode levar de 2 a 72 h, dependendo do tamanho e complexidade do objeto. No estudo de viabilidade da produção de protótipos rápidos de AI,

realizado anteriormente pelo autor deste projeto, o tempo médio de produção dos modelos foi de aproximadamente 2 h (ERBANO et al., 2013; LEAL et al., 2016).

A impressão tridimensional é um processo de construção de objetos 3D a partir de um arquivo digital. Nesse processo, um objeto 3D digital é criado usando um software de desenho auxiliado por computador (i.e. *Computer Aided Design* (CAD)), por sistemas de digitalização 3D ou por programas de reconstrução 3D a partir de imagens obtidas por meio de TC ou RNM. O InVesalius® é um programa baseado em um conjunto de imagens 2D, obtidas por meio de equipamentos de TC e RNM, o qual permite que sejam gerados modelos 3D das regiões de interesse do corpo humano. Após reconstruir tridimensionalmente as imagens DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*), o software permite a geração de arquivos 3D no formato STL (*stereolithography*), os quais são reconhecíveis pelas impressoras 3D (VOLPATO, 2017). Também existem outros programas nos quais pode-se manipular os arquivos STL, a fim de selecionar as regiões a serem analisadas ou os segmentos do modelo 3D gerado, para posteriormente proceder para à impressão 3D, como por exemplo, o programa MeshMixer®.

O processo de AM adiciona sucessivamente camadas de material com a finalidade de se criar um objeto sólido. A natureza aditiva deste processo permite a criação de objetos com características internas complexas e difíceis de serem obtidas por meio de outros processos como, por exemplo, usinagem, fresagem, furação e torneamento, os quais são chamados de processos subtrativos (GORNÍ, 2001; VOLPATO, 2017).

Todos os processos de manufatura aditiva descritos na literatura consultada são constituídos por cinco etapas básicas (VOLPATO, 2017):

1. criação de um modelo CAD da peça que está sendo projetada;
2. conversão do arquivo CAD em formato STL;
3. fatiamento do arquivo STL em finas camadas transversais;
4. construção física do modelo, empilhando-se uma camada sobre a outra;
5. limpeza e acabamento do protótipo.

Existem vários processos de fabricação diferentes envolvidos nessa tecnologia. Dependendo do processo de impressão em 3D, segundo a norma ISO/ASTM 52900:2015, a fabricação de modelos pode ser classificada em sete categorias (INTERNATIONAL STANDARD ISO, 2015; VOLPATO, 2017):

1. **Ligação de materiais (*binder jetting*):** processo no qual um agente ligante líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó;
2. **Deposição direcionada por energia (*directed energy deposition*):** processo em que a energia térmica concentrada é usada para fundir os materiais logo após serem depositados;
3. **Extrusão de material (*material extrusion*):** processo em que o material é dispensado seletivamente através de um orifício;
4. **Jato de materiais (*material jetting*):** processo no qual gotículas de material de construção são depositadas seletivamente;
5. **Fusão em leito de pó (*powder bed fusion*):** processo em que a energia térmica seletivamente funde regiões de um leito de pó;
6. **Laminação de objetos (*sheet lamination*):** processo no qual as folhas de material são coladas para formar um bloco, e
7. **Fotopolimerização vat (*vat photopolymerization*):** processo no qual o fotopolímero líquido em um tanque é seletivamente curado por polimerização ativada por luz.

2.6 PLANEJAMENTO CIRÚRGICO EMPREGANDO MODELOS 3D

A microcirurgia para clipagem de um AI é um procedimento delicado, realizado em um espaço complexo e tridimensional. Muito antes de implantar um clipe, a anatomia única de um AI precisa ser compreendida em sua tridimensionalidade. Isso inclui a localização, formato e tamanho do colo e *domus*, bem como a relação com os vasos e estruturas intracranianas vizinhas. Essa construção espacial deve ser entendida a partir de uma perspectiva intraoperatória, permitindo a antecipação dos tamanhos, formatos e posições dos cliques mais adequados, além de considerar as limitações do acesso cirúrgico (KOCKRO et al., 2016). Para esse fim, uma série de exames de imagem, invasivos e não invasivos, estão disponíveis.

Atualmente, o planejamento cirúrgico baseia-se no entendimento global do neurocirurgião sobre a anatomia demonstrada por meio dos exames de imagens. Sendo assim, a imagem pré-operatória é o único dado disponível para o desenvolvimento de uma estratégia cirúrgica. O uso completo desse recurso requer uma compreensão abrangente da informação espacial que cada modalidade de

imagens contém. Assim sendo, a importância de compreender com precisão a tridimensionalidade dos AI antes da clipagem foi enfatizada e estudada por alguns grupos (KIMURA et al., 2009; MASHIKO et al., 2017).

Com a tecnologia de computação gráfica emergente da década de 90, a reconstrução tridimensional de exames de imagens foi cada vez mais reconhecida por gerar informações importantes para o planejamento cirúrgico (MASHIKO et al., 2015). Desde então, houve um crescente desenvolvimento na exibição de imagens 3D virtuais a partir da ATC, ARM e arteriografia com subtração digital. Porém, apesar da tridimensionalidade virtual que esses exames oferecem, nenhum deles é capaz de representar fisicamente uma estrutura anatômica, além de não permitirem uma interação semelhante à exigida no mundo real.

Para superar esse problema, o planejamento cirúrgico empregando modelos 3D proporciona a vantagem de ser uma estrutura real, a qual facilita o manuseio para a compreensão das estruturas intracranianas.

2.7 SIMULAÇÃO DE PROCEDIMENTOS NEUROCIRÚRGICOS

Os médicos residentes podem aproveitar e absorver uma vasta gama de conhecimentos durante os treinamentos práticos. O ambiente da sala cirúrgica oferece a mais proveitosa das experiências; no entanto, o maior rendimento para o aprendiz deve ser proveniente de educadores com experiência. O aprendizado pela observação de uma cirurgia não é suficiente, assim como o acesso ao conhecimento teórico não traz segurança para o neurocirurgião em formação realizar uma cirurgia com sucesso. Desta maneira, a simulação cirúrgica tem papel importante para o aprendizado contínuo desses aprendizes (KONAKONDLA et al., 2017). Embora os laboratórios com cadáveres humanos estejam disponíveis para muitos programas de residência, não são mais facilmente acessíveis em muitos lugares. Devido às leis brasileiras, esse tipo de laboratório, assim como o uso de animais para as técnicas de dissecação, estão se tornando escassos. Sabendo que as simulações são essenciais para o avanço das tarefas cognitivas, a criação de recursos para colocar em prática as habilidades técnicas e táteis vem sendo desenvolvida. Programas de simulação virtual estão em pleno desenvolvimento na era atual. O uso de modelos impressos em 3D é a última geração para a simulação cirúrgica de residentes em neurocirurgia, pois representam os procedimentos de forma mais fidedigna, uma vez que são cópias físicas realistas (LAI; MORGAN, 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para a realização da pesquisa, foram avaliados os biomodelos em 3D de AI de 10 pacientes submetidos à clipagem microcirúrgica, no Instituto de Neurologia de Curitiba (INC). Para isso, foram realizados exames de ATC cerebral, além da utilização de magnificação (microscópio cirúrgico) intraoperatória e US Doppler microvascular para verificação da oclusão de AI (LEAL; COCORULLO, 2017), logo após aplicação do clipe metálico. A confecção dos biomodelos foi realizada em parceria com empresa Forma3D, com sede em Curitiba - PR.

No centro de imagem (CETAC), instalado no INC, foram utilizados para a realização dos exames de ATC cerebral: aparelho de tomografia computadorizada GE (General Electric) Light Speed VCT® Multi Slice 128 canais (e contraste iodado não iônico) e *Workstation* HP (Hewlett-Packard) Intel Inside ADW 4.4 (e CDs para gravação das imagens).

No centro cirúrgico do INC foram utilizados para a realização das microcirurgias para clipagem dos aneurismas cerebrais, dentre os principais materiais: cliques de titânio Aesculap®, microscópio cirúrgico OPMI® Pentero® 800 (Carl Zeiss Meditec AG, Alemanha), microscópio cirúrgico Leica Wild® (Leica Microsystems, Alemanha) e Doppler pulsado microvascular DWL Box Digital® (Compumedics, Alemanha).

As imagens DICOM geradas no INC foram enviadas para a empresa Forma3D para a impressão dos biomodelos. Os seguintes materiais foram utilizados: impressora 3D RepRap Prusa I3®, *software* InVesalius® 3.1 (Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, Brasil) – responsável pela segmentação e reconstrução 3D das estruturas analisadas a partir das imagens DICOM, *software* MeshMixer® (Autodesk, EUA) – responsável pela remodelagem do modelo virtual do crânio, selecionando apenas as estruturas de interesse, como partes ósseas e determinados vasos sanguíneos; esse programa foi responsável, também, pela otimização do modelo para a impressão 3D, corrigindo possíveis defeitos provenientes das imagens DICOM, além de realizar o isolamento da região correspondente ao AI que será impressa para a confecção da peça em silicone, e *software* Repetier-Host® (Hot-World GmbH & Co. KG, Alemanha) – interface com a

máquina de impressão 3D preparando o fatiamento do modelo e permitindo a fabricação/construção do modelo físico.

O instrumental cirúrgico utilizado neste estudo também pertencia ao INC e não houve gastos adicionais ao paciente. Os exames de imagens necessários para o estudo já faziam parte da rotina pré-operatória dos pacientes com AI no INC. Para a fabricação dos 10 protótipos pela empresa Forma3D, foi gasto um valor total de R\$ 8.000,00, o qual foi custeado pelo autor.

3.2 MÉTODOS

Para realização da pesquisa proposta, o presente estudo obteve a autorização junto ao Comitê de Ética em Pesquisa do Instituto de Neurologia de Curitiba por meio do parecer nº 886.434, de 15/12/2014, conforme apresentado no Anexo 1.

Os pacientes participantes receberam um termo de consentimento livre e esclarecido (Apêndice 1), conforme solicitado pelo Conselho Nacional de Saúde, pela Resolução nº 466, de 12 de dezembro de 2012, descrevendo os detalhes e os fins da pesquisa, que foi realizada apenas após autorização e assinatura dos mesmos. O termo foi esclarecido e assinado anteriormente à aquisição das imagens de ATC dos pacientes inclusos no estudo.

A técnica de dissecação microcirúrgica e implante do clipe metálico empregada neste estudo foi a mesma utilizada rotineiramente no INC para a clipagem de aneurismas intracranianos, sem modificação, salvo pelo planejamento e simulação cirúrgicos inovadores realizado sobre os biomodelos 3D neste estudo.

Os critérios de inclusão utilizados foram:

1. voluntários de ambos os sexos, independentes da idade, com o diagnóstico prévio de AI não-roto, não importando a localização da lesão;
2. exames pré-operatórios (laboratorial, radiografia de tórax em duas incidências e eletrocardiograma) normais;
3. avaliação pré-anestésica e liberação para o procedimento documentada por anesthesiologista, e
4. avaliação cardiológica para aqueles voluntários com alterações eletrocardiográficas e/ou idade superior a 50 anos, documentado por cardiologista.

Como critério de exclusão, adotou-se:

1. voluntários com AI rotos e diagnóstico de HSA.

O desenvolvimento da pesquisa ocorreu em quatro fases, descritas na sequência.

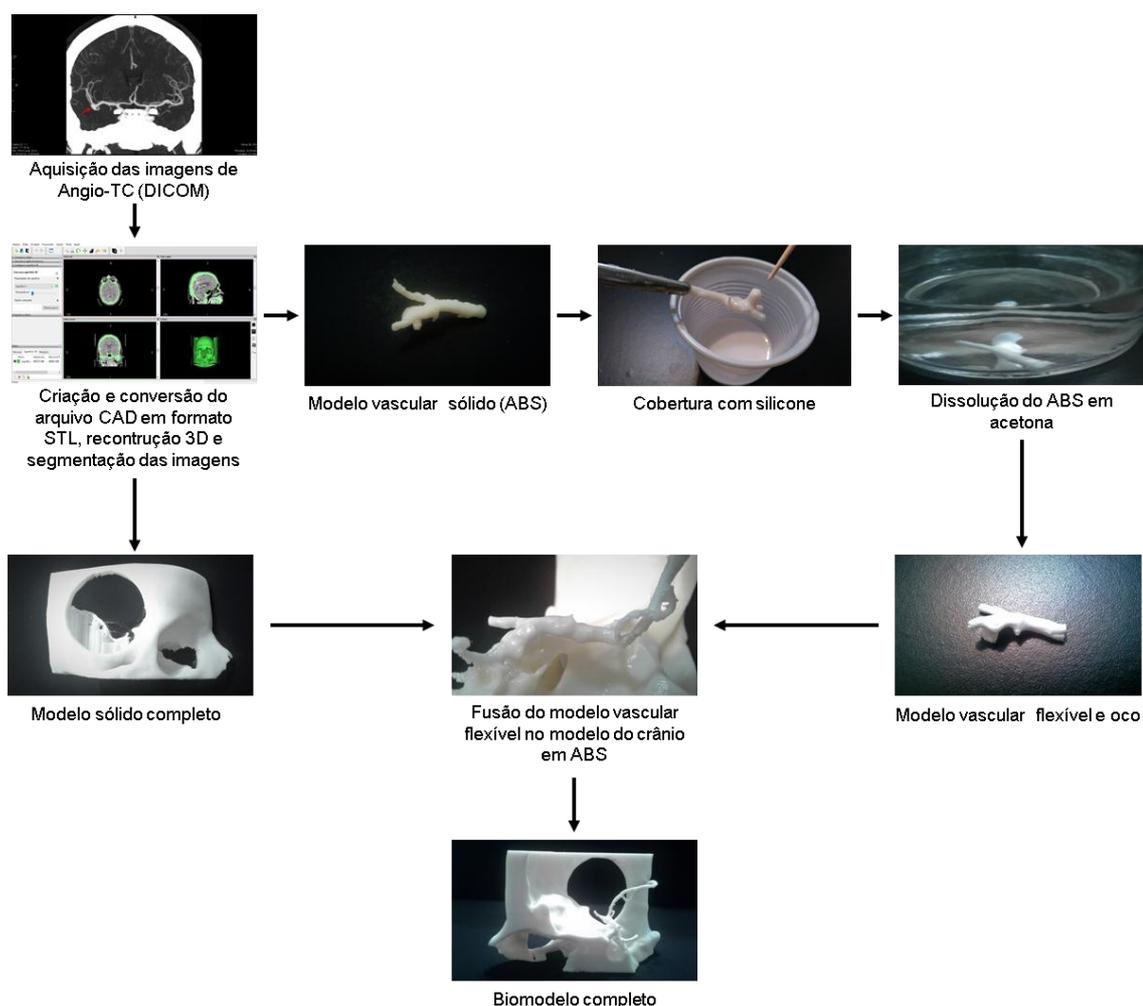
(1) Fase 1: Confeção dos biomodelos

Inicialmente, foram selecionados 10 pacientes com AI saculares não-rotos e que foram encaminhados ao tratamento microcirúrgico com clipe metálico. Os pacientes foram submetidos à ATC cerebral. As imagens obtidas no formato DICOM foram processadas pela empresa Forma3D, por meio de três programas: InVesalius®, MeshMixer® e Repetier-Host®. O primeiro foi responsável pela segmentação das imagens, reconstrução do modelo 3D virtual e geração/conversão do arquivo CAD em formato STL. O segundo (MeshMixer®) foi responsável pela modelagem 3D. Já o terceiro software (Repetier-Host®) foi utilizado para o fatiamento do modelo de modo a deixar o arquivo pronto para a impressão. Em seguida, os modelos aneurismáticos foram reproduzidos por uma impressora 3D, baseada no padrão RepRap, modelo Prusa I3®. As dimensões da impressora foram: (x) 460 x (y) 370 x (z) 510 mm; as dimensões da área de impressão foram: (x) 215 x (y) 210 x (z) 180 mm; alta resolução de impressão (100 µm), e velocidade de impressão de 50 mm/s. Nessa pesquisa, a tecnologia de AM utilizada foi a de extrusão de material, sendo o *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) o material de impressão utilizado.

Realizou-se um procedimento adicional, no qual foram confeccionados modelos de AI em silicone e com lúmen. Para isso, foram confeccionadas mais duas peças em ABS; porém, limitadas ao segmento do AI e das artérias adjacentes. Essas peças foram artesanalmente cobertas com uma fina camada de borracha de silicone de alta flexibilidade para moldes, com o auxílio de um pincel, tomando-se cuidado para não deixar excesso de material retido na peça. O tempo de manuseio variou de 5 à 7 minutos. Após a aplicação do silicone líquido, manteve-se o biomodelo suspenso para que todo o excesso do produto escorresse. A cura da borracha de silicone ocorreu em temperatura ambiente em aproximadamente 24 horas. Após, o ABS foi diluído por meio de imersão dos modelos em acetona pura

(MASHIKO et al., 2015). O resultado obtido foi um modelo de silicone oco, em material maleável. Parte da base e região lateral do crânio também foi confeccionada em impressão 3D no material ABS, servindo, assim, de suporte para o modelo feito em borracha de silicone. Na região lateral do crânio impresso, houve uma falha circular, a qual correspondia a uma craniotomia fronto-temporal, que é o acesso cirúrgico universal para os aneurismas da circulação anterior (Figura 9).

Figura 9 – Processo de fabricação do biomodelo.



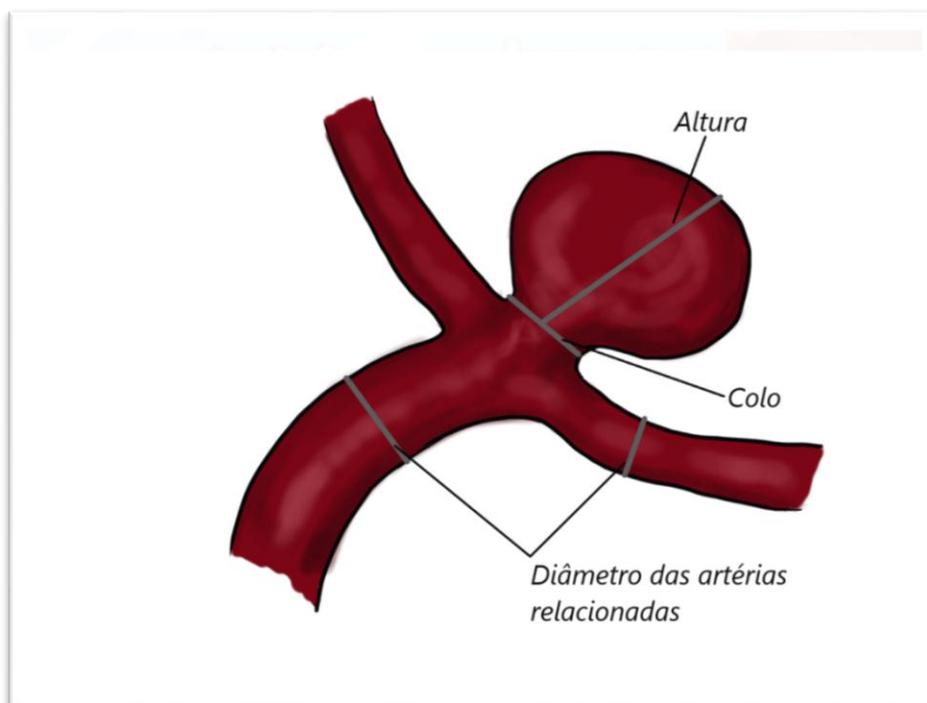
Fonte: o autor, 2017.

(2) Fase 2: Avaliação das características dimensionais dos biomodelos

A partir dos protótipos gerados na fase 1, realizou-se a avaliação das principais características dimensionais do biomodelo 3D em relação à estrutura anatômica real. O protótipo foi submetido a uma TC e, a seguir, foram observadas as seguintes medidas: diâmetro do colo aneurismático, distância do colo ao *domus* aneurismático (altura) e diâmetro das artérias relacionadas ao aneurisma (Figura

10). As medidas foram realizadas na *Workstation* do aparelho de TC. Os valores foram correlacionados com as respectivas medidas realizadas na ATC do paciente para validação.

Figura 10 - Medidas avaliadas durante a Fase 2.

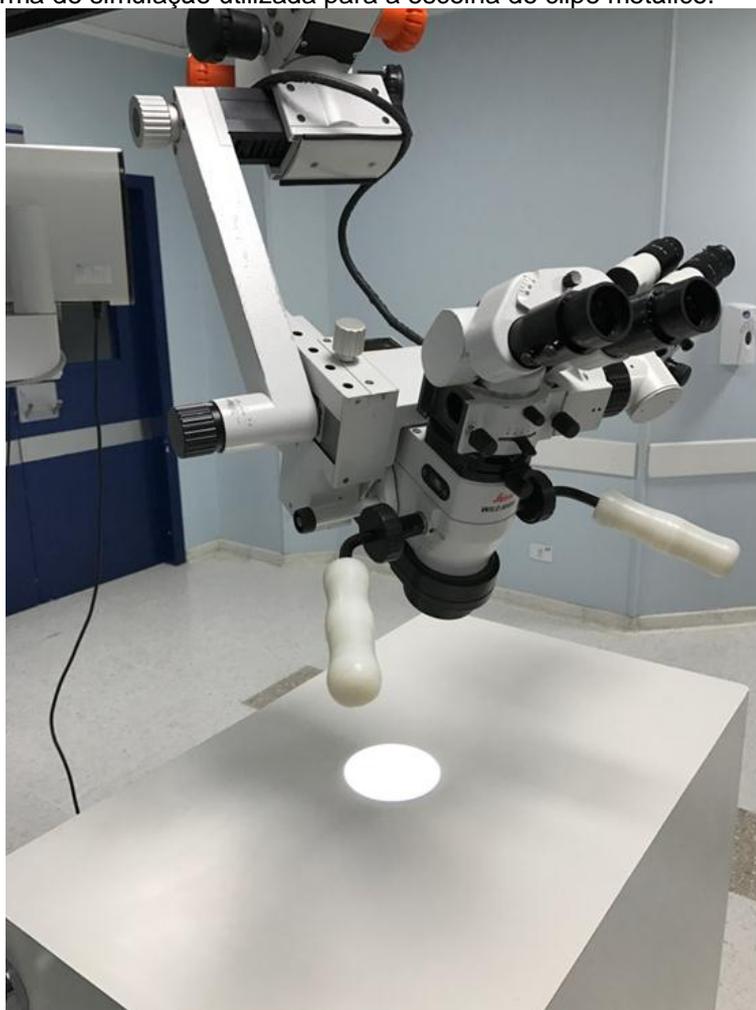


Fonte: o autor, 2017. Arte: Erasmo Barros da Silva Jr.

(3) Fase 3: Avaliação do planejamento cirúrgico com o biomodelo e efetividade da clipagem

Nesta fase, o planejamento cirúrgico com o biomodelo 3D foi avaliado pela escolha do clipe, sobre uma plataforma de simulação cirúrgica, assim como ilustrado na Figura 11. Foi selecionado um neurocirurgião apto a realizar microcirurgias de clipagem de AI, o qual, assim como o autor, utilizou os biomodelos para escolher o clipe que seria mais provavelmente utilizado na cirurgia real. As características avaliadas no clipe foram: tamanho, formato e número de unidades utilizadas. As informações foram mantidas em sigilo e somente foram reveladas ao pesquisador (cirurgião principal) após a realização do procedimento real. As características dos cliques identificadas pelos avaliadores (neurocirurgião selecionado e autor) foram comparadas com as características reais do clipe utilizado na cirurgia e foram verificados os erros relativos.

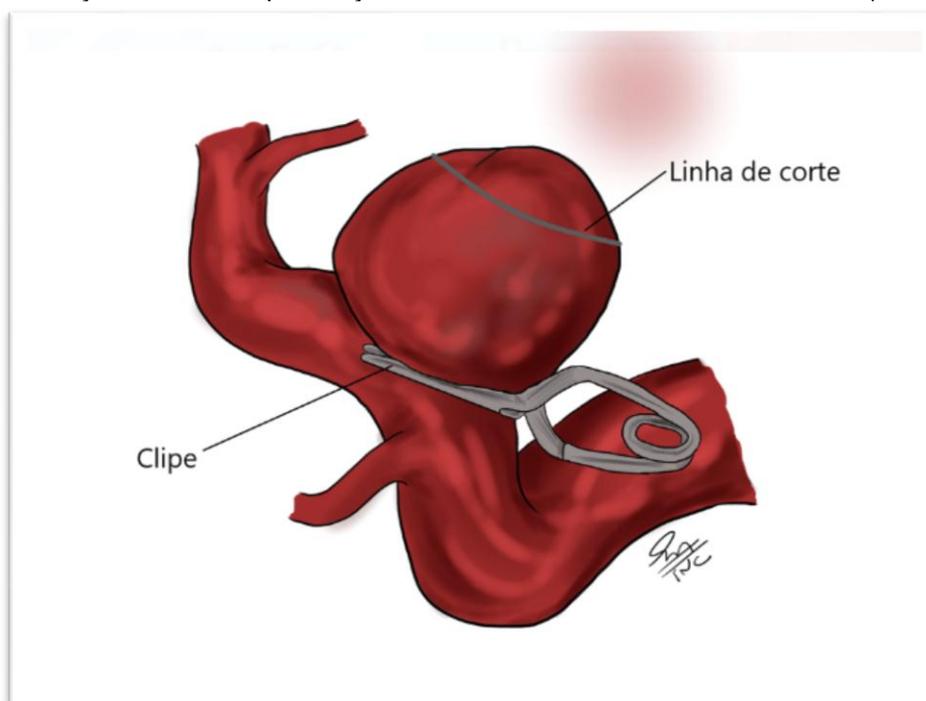
Figura 11 - Plataforma de simulação utilizada para a escolha do clipe metálico.



Fonte: o autor, 2017.

Para avaliar os resultados da simulação nos biomodelos e, conseqüentemente, avaliar a eficiência do método, foi construído um sistema que simulou a circulação sanguínea. O biomodelo em silicone foi conectado a um equipo com soro fisiológico corrente. Uma vez que o biomodelo era oco, haveria passagem de soro fisiológico no seu interior, simulando, assim, a corrente sanguínea. Após a aplicação do clipe, foi realizada uma perfuração no *domus* do aneurisma do biomodelo na linha de corte, assim como ilustrado na Figura 12. Foi considerada eficaz a clipagem que não permitia a saída de soro fisiológico pela perfuração no aneurisma.

Figura 12 - Ilustração do local de perfuração do domus do aneurisma do biomodelo (linha de corte).



Fonte: o autor, 2017. Arte: Erasmo Barros da Silva Jr.

Após a eleição pré-operatória do clipe, realizou-se a cirurgia propriamente dita pelo autor. Durante o ato cirúrgico, averiguou-se se o clipe eleito no planejamento era o mesmo utilizado no procedimento. Para a avaliação da efetividade da clipagem cirúrgica de AI, foi utilizado o DPM. A técnica possibilitou a avaliação ultrassonográfica intraoperatória do fluxo sanguíneo e da permeabilidade dos vasos após a clipagem microcirúrgica, confirmando a exclusão do AI da circulação caso ocorresse ausência de fluxo no seu interior (LEAL; COCORULLO, 2017). Foi considerada eficaz a clipagem que impossibilitasse a entrada de sangue no AI, confirmada pela ausência de fluxo no seu interior pelo DPM.

Considerou-se desfecho favorável quando o clipe metálico planejado possuísse as mesmas características do utilizado na cirurgia real.

(4) Fase 4: Avaliação da simulação cirúrgica com os biomodelos

Na fase 4, ao final da conclusão dos dez casos cirúrgicos estudados, os biomodelos foram empregados na simulação cirúrgica por neurocirurgiões em formação. Todos os biomodelos foram entregues a dois jovens neurocirurgiões em formação para que escolhessem os cliques (formato, tamanho e quantidade) mais adequados para o tratamento de cada aneurisma. Juntamente, forneceu-se uma

série de cliques metálicos com diferentes formatos e tamanhos, além de uma pinça para implante de clipe. Os modelos 3D foram dispostos sobre a mesa de simulação e, com o uso do microscópio cirúrgico, os jovens cirurgiões realizaram simulação cirúrgica para a escolha dos cliques. Os mesmos desconheciam a opção feita durante a cirurgia real, já realizada na fase anterior. O pesquisador avaliou a simulação por meio da comparação dos cliques que os neurocirurgiões escolheram para cada peça com as características do clipe metálico utilizados para tratar AI nas respectivas cirurgias reais.

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS GERAIS

Com a fase 1 do projeto, construíram-se biomodelos 3D maleáveis e com lúmen (ocos). No segmento arterial onde se localizava o aneurisma, o biomodelo era maleável, trazendo mais similaridade ao vaso real e possibilitando a aplicação do clipe. Os segmentos arteriais circundantes que não foram estudados serviram de apoio ao segmento arterial de interesse e foram fabricados com material rígido (ABS). Em conjunto com as estruturas vasculares, foi impressa, em ABS, uma porção óssea da base do crânio com a finalidade de referenciar o posicionamento das estruturas e favorecer o planejamento e simulação cirúrgicos.

Após a fase 2, os AI dos biomodelos possuíam as mesmas dimensões apresentadas pelo exame de ATC dos respectivos pacientes. Desta forma, os protótipos foram uma representação tridimensional fiel dos AI.

Ao final da terceira fase, o planejamento cirúrgico para a escolha das características do clipe, desenvolvido por um neurocirurgião, correspondeu às características do clipe utilizado na cirurgia. Do mesmo modo, o planejamento cirúrgico realizado pelo pesquisador também foi efetivo para a escolha do clipe metálico correto e foi efetivo para a exclusão do AI da circulação cerebral por meio da avaliação com o DPM. Obteve-se índice de acerto de 100%, resultando uma redução no tempo cirúrgico e na manipulação das estruturas vasculares cerebrais.

Ao final da fase 4, a simulação cirúrgica com os biomodelos, realizado pelos neurocirurgiões em formação, foi eficaz para a escolha correta dos cliques metálicos que foram utilizados nas cirurgias reais.

Ao final da investigação proposta nesta tese, a utilização de biomodelos fabricados pela técnica de AM para auxílio da clipagem nas microcirurgias de AI mostrou-se uma tecnologia adjuvante efetiva no planejamento cirúrgico dessa doença. Os biomodelos eram duráveis, possibilitando que a simulação cirúrgica fosse repetida por todos os cirurgiões deste trabalho.

4.2 ESTUDOS DE CASO

Os 10 casos estudados estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados demográficos dos voluntários, informações sobre os cliques utilizados e sobre os tempos de cirurgia.

Caso	Idade (anos)	Sexo	Localização do AI	Tamanho do AI (*)	Clipe previsto	Clipe utilizado	Oclusão total	Tempo cirúrgico (min)
1	38	Masc	Bifurcação da a. carótida int.dir.	7,3 mm x 5,1 mm	7 mm Reto 1 un.	7 mm Reto 1 un.	Sim	210
2	65	Fem	Bifurcação da a. cerebral média esq.	3,6 mm x 3,9 mm	5 mm Reto 1 un.	5 mm Reto 1 un.	Sim	190
3	71	Masc	A. comunicante anterior	4,3 mm x 3,4 mm	7 mm Baioneta 1 un.	7 mm Baioneta 1 un.	Sim	240
4	73	Fem	Bifurcação da a. carótida int.dir.	3,3 mm x 4,5 mm	5 mm Curvo 1 un.	5 mm Curvo 1 un.	Sim	200
5	70	Fem	Bifurcação da a. carótida int. esq.	5,9 mm x 5,6 mm	7 mm Curvo 1 un.	7 mm Curvo 1 un.	Sim	225
6	69	Fem	Bifurcação da a. carótida int.dir.	7,6 mm x 3,9 mm	5 mm Reto 1 un.	5 mm Reto 1 un.	Sim	230
7	64	Masc	Segmento comunicante da a. carótida int.dir.	2,6 mm x 3,1 mm	5 mm Reto 1 un.	5 mm Reto 1 un.	Sim	185
8	63	Fem	Bifurcação da a. carótida int. esq.	3,8 mm x 2,4 mm	5 mm Curvo 1 un.	5 mm Curvo 1 un.	Sim	205
9	55	Fem	Bifurcação da a. carótida int.dir.	4,8 mm x 2,5 mm	7 mm Curvo 1 un.	7 mm Curvo 1 un.	Sim	220
10	67	Fem	Segmento comunicante da a. carótida int.dir.	1,3 mm x 2,0 mm	5 mm Reto 1 un.	5 mm Reto 1 un.	Sim	190

(*) = diâmetro do colo x distância colo/*domus*; a = artéria; int. = interna; dir. = direita; esq. = esquerda; un. = unidade. Fonte: o autor, 2017.

Caso 1

Trata-se de um paciente do sexo masculino, 38 anos, com quadro de cefaleia

refratária, submetido a exames de imagem que identificaram um AI na bifurcação da artéria carótida interna direita (Figuras 13, 14 e 15). O AI possuía as seguintes medidas: 7,3 mm de diâmetro de colo e 5,1 mm de distância entre o colo e o *domus*.

Após a assinatura do TCLE, as imagens DICOM da ATC cerebral do paciente foram processadas com os programas InVesalius® (Figura 16), MeshMixer® e Repetier-Host®. Os arquivos em formato STL foram utilizadas para a impressão 3D do biomodelo, em ABS. A seguir, foram confeccionados os modelos em borracha de silicone (Figuras 17 e 18).

Figura 13 - Imagem de ATC cerebral, formato DICOM, corte coronal, ilustrando o aneurisma na bifurcação da artéria carótida interna direita (seta).



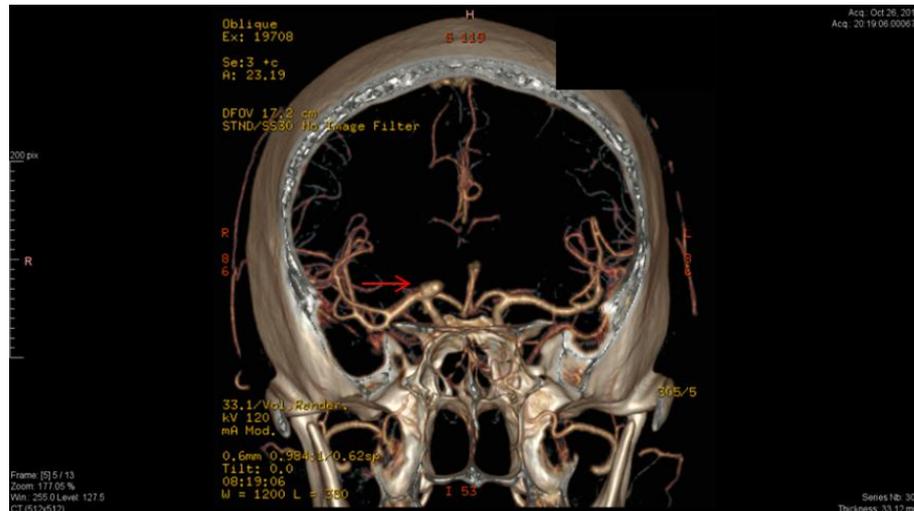
Fonte: o autor, 2017.

Figura 14 - Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o AI na bifurcação da artéria carótida interna direita (seta).



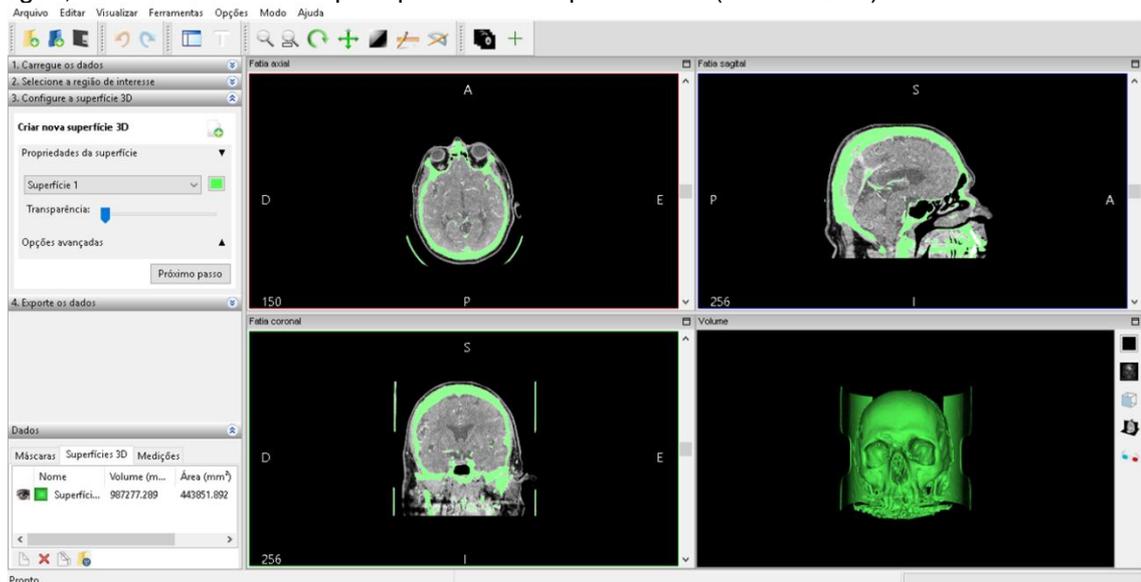
Fonte: o autor, 2017.

Figura 15 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, ilustrando o AI na bifurcação da artéria carótida interna direita (seta).



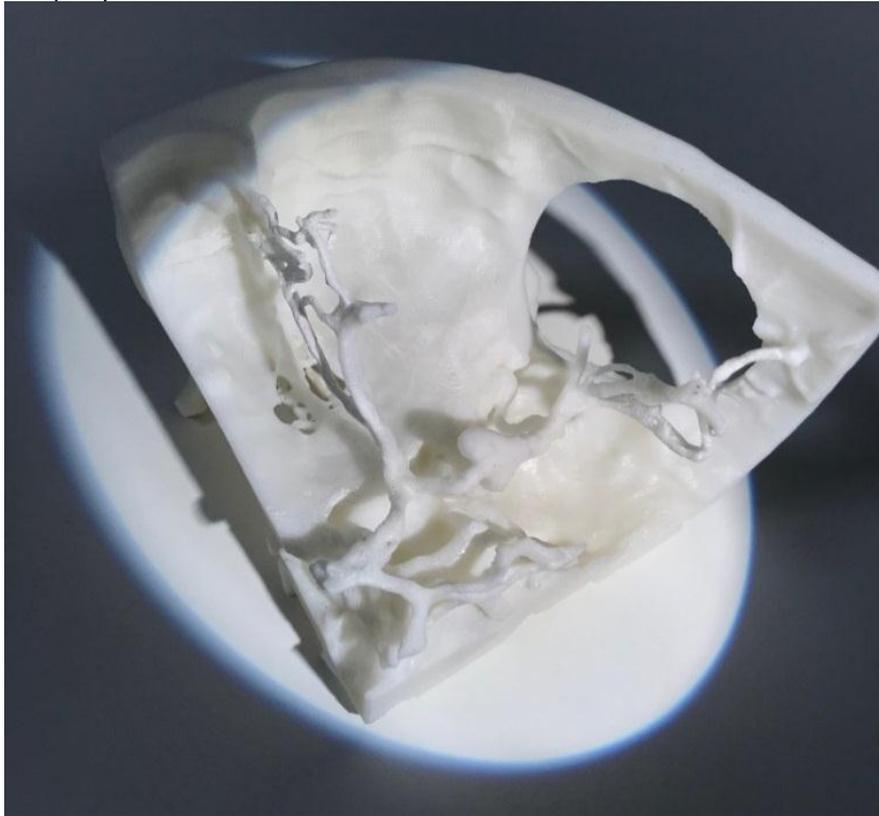
Fonte: o autor, 2017.

Figura 16 - As imagens de ATC no formato DICOM foram processadas pelo programa InVesalius® e, a seguir, transformadas em arquivo passível de impressão 3D (formato STL).



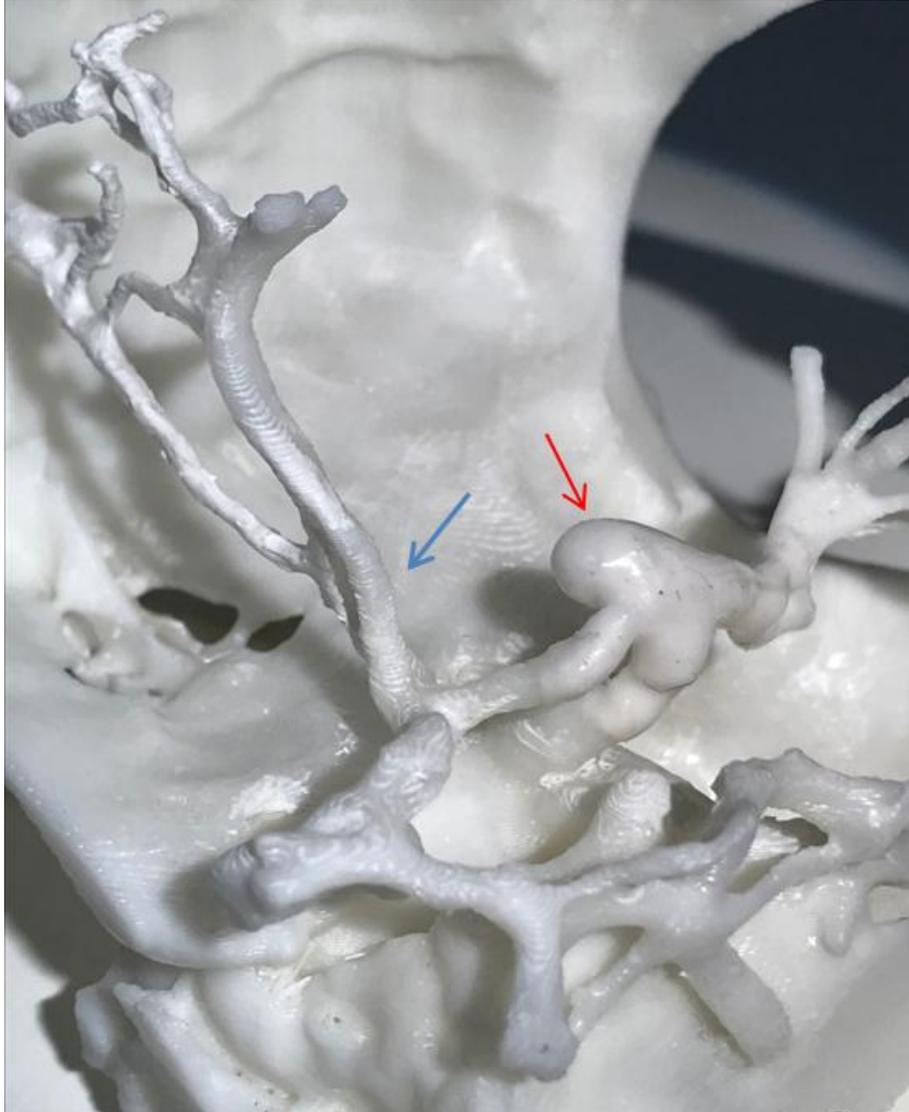
Fonte: o autor, 2017.

Figura 17 - Aspecto final do biomodelo 3D de ABS e borracha de silicone, manufacturado pela impressora 3D RepRap, modelo Prusa I3®.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 18 - Segmento do biomodelo 3D em ABS (seta azul), manufaturado pela impressora 3D Prusa I3®, e segmento maleável e oco, em silicone (seta vermelha), representando o AI.



Fonte: o autor, 2017.

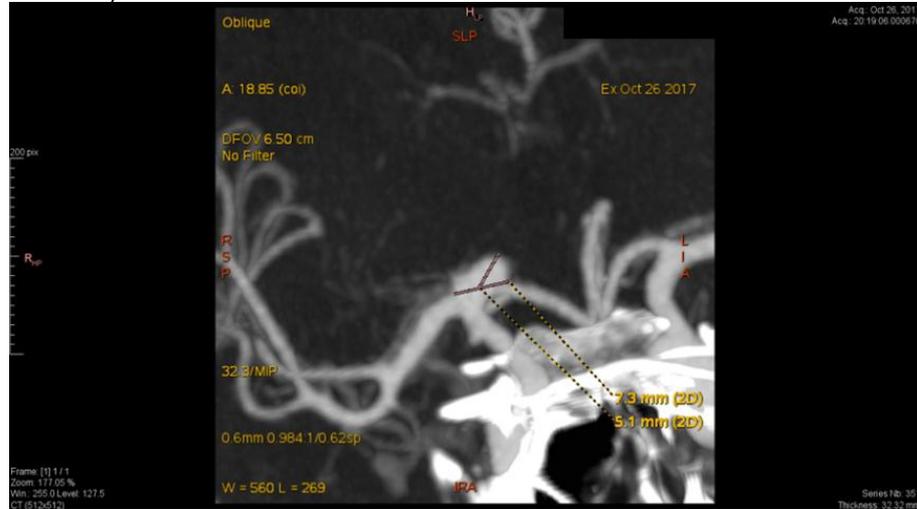
Na fase 2 - Avaliação das características dimensionais do biomodelo - o mesmo foi submetido à TC (Figura 19). As medidas nas imagens obtidas foram comparadas com as medidas obtidas nas imagens de ATC do paciente (Figuras 20, 21, 22 e 23). As medidas obtidas encontram-se na Tabela 2.

Figura 19 - Imagem ilustrando um momento do procedimento de realização da TC do biomodelo.



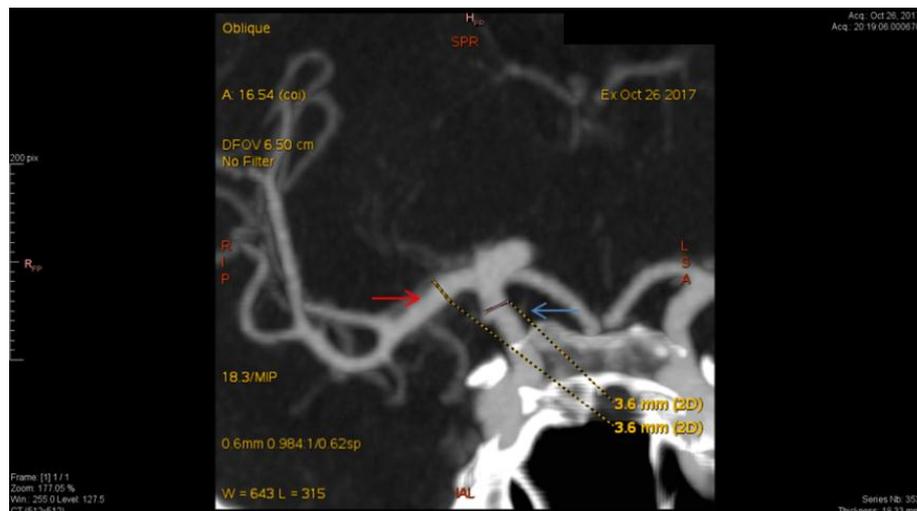
Fonte: o autor, 2017.

Figura 20 - Imagem de ATC cerebral do paciente, indicando as medidas do AI (diâmetro do colo e distância colo-domus).



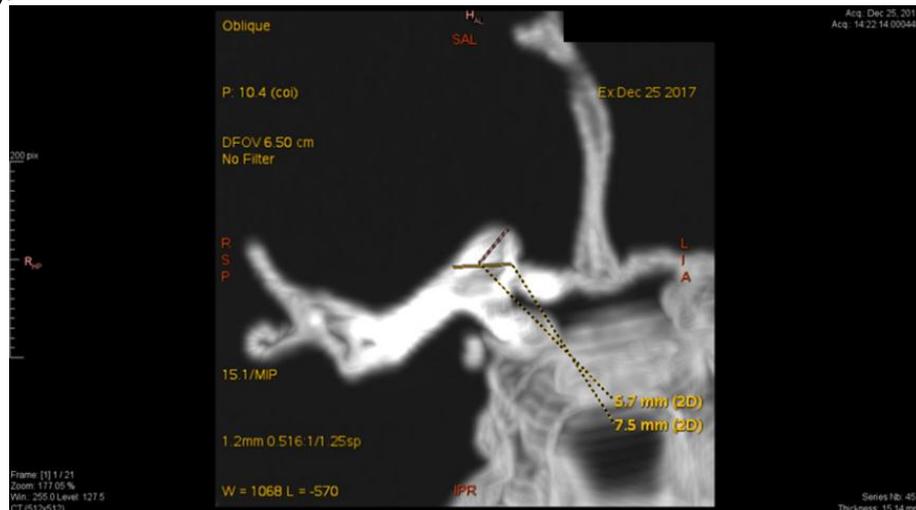
Fonte: o autor, 2017.

Figura 21 - Imagem de ATC cerebral do paciente, indicando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artérias carótida interna (seta azul) e cerebral média (seta vermelha).



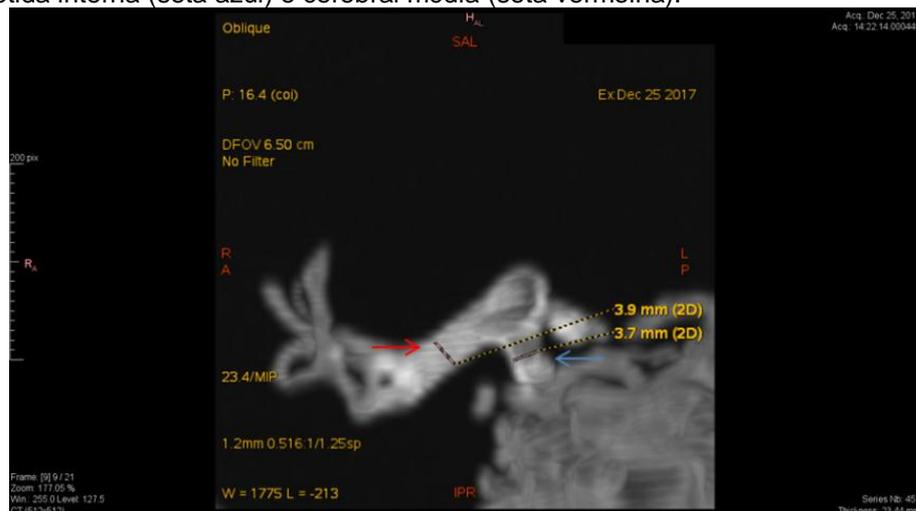
Fonte: o autor, 2017.

Figura 22 - Imagem de TC do biomodelo 1, indicando as medidas do AI (diâmetro do colo e distância colo-domus).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 23 - Imagem de TC do biomodelo 1, indicando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artérias carótida interna (seta azul) e cerebral média (seta vermelha).



Fonte: o autor, 2017.

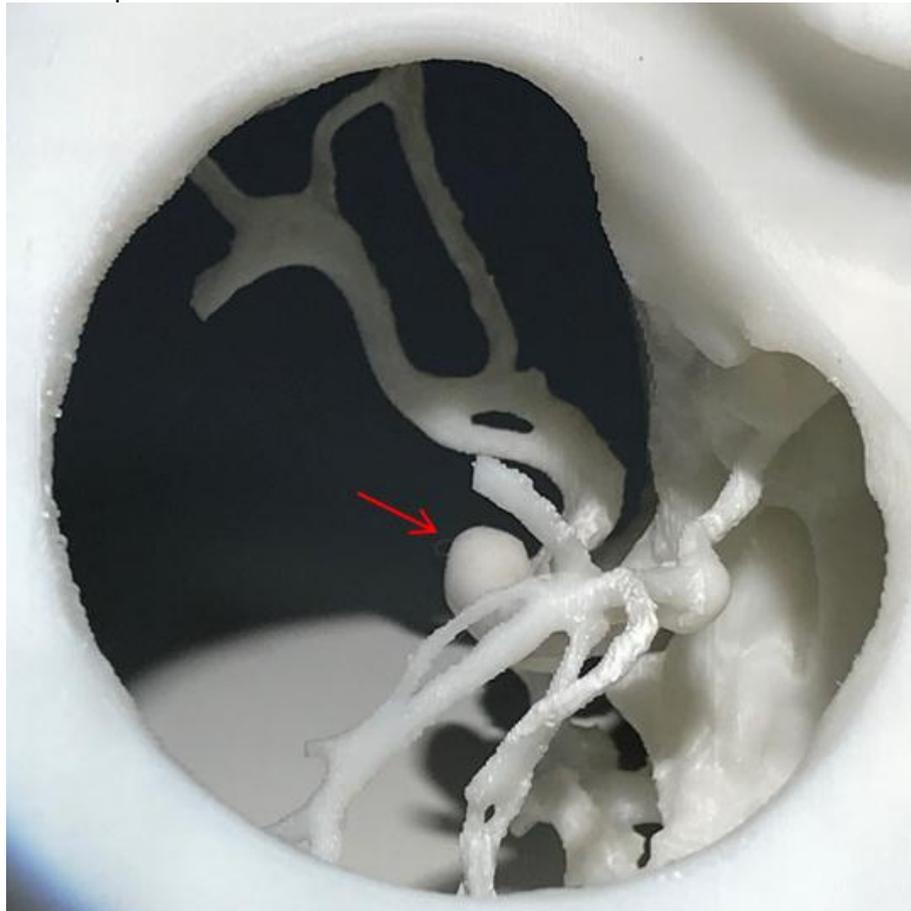
Tabela 2 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo do primeiro caso e o erro relativo encontrado (%).

Medidas	Diâmetro do colo (mm)	Distância colo-domus (mm)	Diâmetro da artéria carótida interna (mm)	Diâmetro da artéria cerebral média (mm)
Paciente 1	7,3	5,1	3,6	3,6
Biomodelo 1	7,5	5,7	3,7	3,9
Erro (%)	2,7	11,8	2,8	8,3

Na fase 3 - Avaliação do planejamento cirúrgico com o biomodelo e efetividade da clipagem - o autor e outro neurocirurgião receberam o biomodelo completo (Figura 24), juntamente com outro biomodelo de borracha oco, o qual foi acoplado ao sistema de circulação com soro fisiológico corrente (Figura 25). Com o uso da plataforma de simulação cirúrgica, a escolha dos cliques ocorreu a seguir (Figuras 26 e 27).

Após a eleição dos cliques, os mesmos foram aplicados no biomodelo de borracha de silicone, conectados ao sistema de circulação artificial. Após o implante do clipe, realizou-se uma perfuração sobre o *domus* do aneurisma, não sendo observada saída de soro fisiológico pela mesma (Figuras 28 e 29). As características dos cliques escolhidos no planejamento são apresentadas na Tabela 3.

Figura 24 - Posição cirúrgica do biomodelo completo para a realização da fase 3 desta pesquisa, onde o AI é indicado pela seta.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 25 - Sistema de circulação com soro fisiológico acoplado ao biomodelo 3D de borracha de silicone, para a avaliação da escolha do clipe metálico e verificação do método.



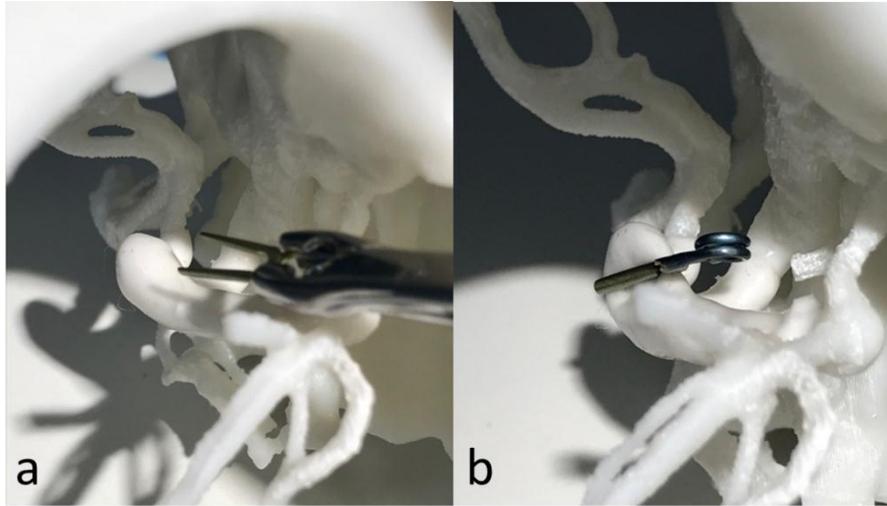
Fonte: o autor, 2017.

Figura 26 - Etapa da escolha do clipe metálico pelo neurolocirurgião.



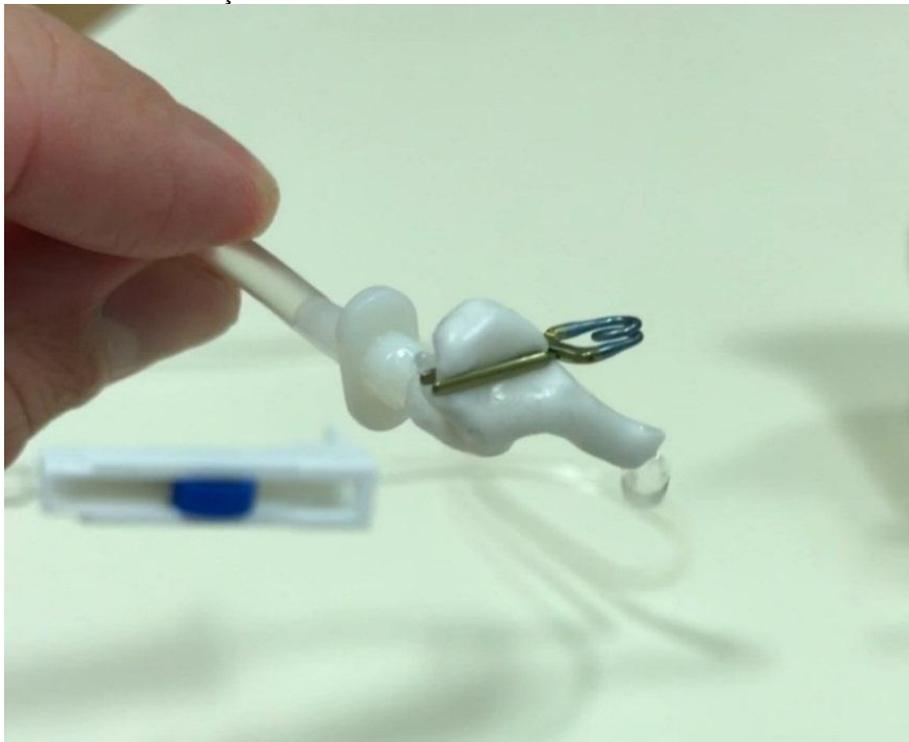
Fonte: o autor, 2017.

Figura 27 - Ilustração do clipe metálico antes (a) e após (b) a aplicação no colo do aneurisma do biomodelo 1.



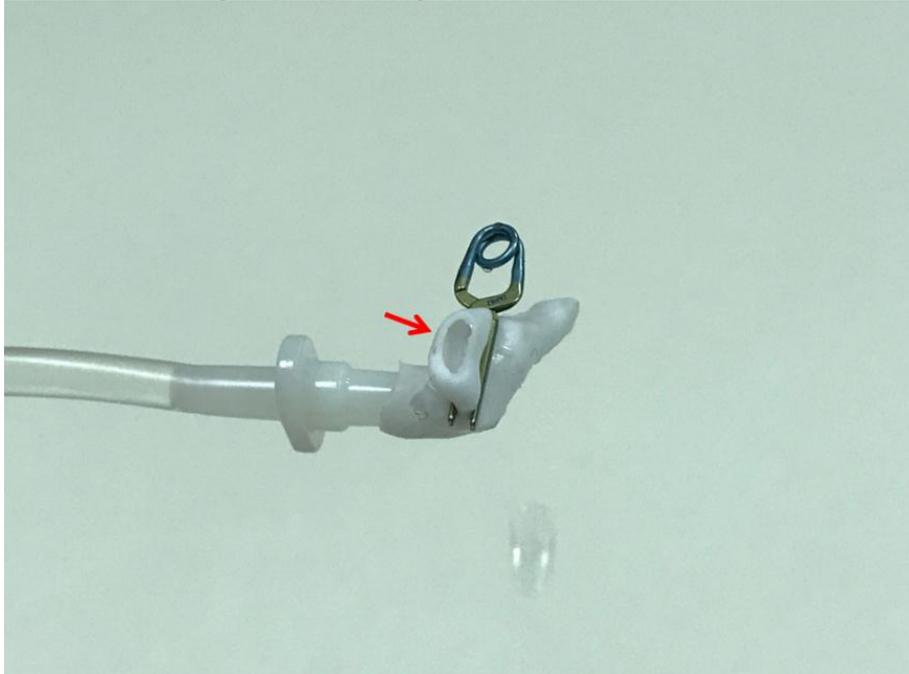
Fonte: o autor, 2017.

Figura 28 - Ilustração da aplicação do clipe metálico no colo do aneurisma do biomodelo em silicone, acoplado ao sistema de circulação artificial.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 29 - Ilustração da perfuração do domus aneurismático (seta) do biomodelo 3D de borracha de silicone acoplado ao sistema de circulação artificial, após o implante do clipe metálico. Não se constatou saída de soro fisiológico pela perfuração.



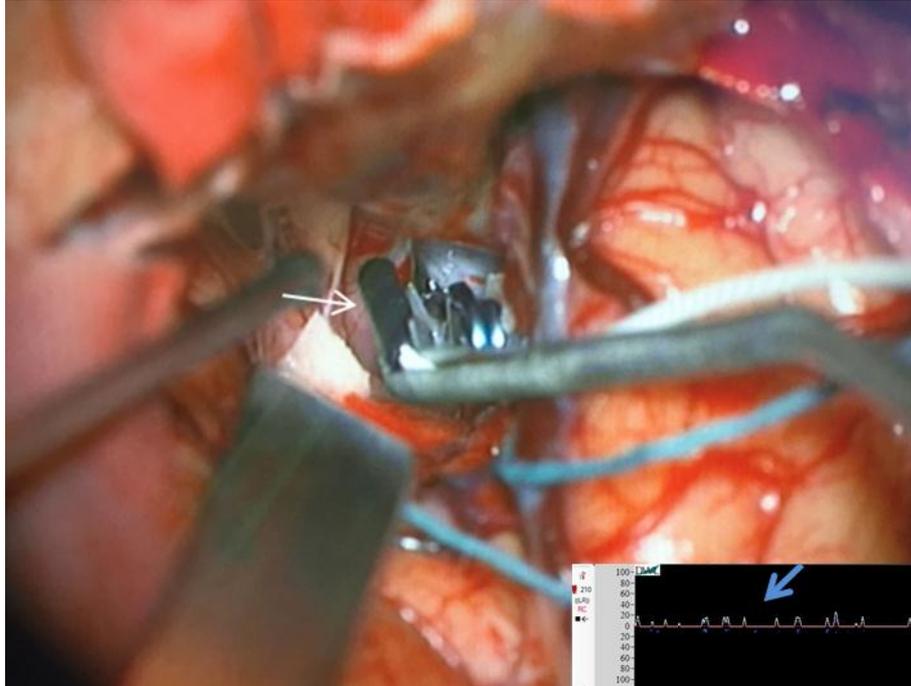
Fonte: o autor, 2017.

Tabela 3 - Característica dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo 1 na fase 3 desta tese de doutorado.

	Formato	Tamanho (mm)	Quantidade
Autor	Reto	7	1
Neurocirurgião	Reto	7	1

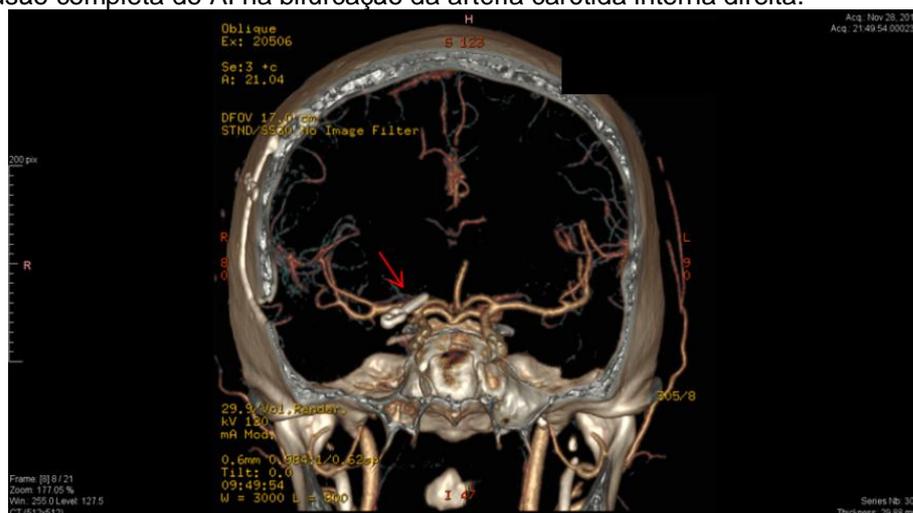
Ao final da fase 3, observou-se que as características dimensionais do clipe metálico eleito no planejamento realizado pelo autor e por um segundo neurocirurgião foram iguais às do clipe utilizado na cirurgia. A eficiência da clipagem durante o ato cirúrgico foi realizada com o auxílio de DPM (Figura 30). O tempo operatório total foi de 210 min. O clipe utilizado pode ser observado pelos exames de imagem pós-operatórios (Figuras 31 e 32).

Figura 30 - Uso do Ultrassom Doppler pulsado microvascular (DPM) (seta) para avaliação da eficácia do tratamento logo após o implante do clipe cirúrgico. A seta azul ilustra a ausência de fluxo no interior do aneurisma, pelo DPM.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 31 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, pós-operatória, ilustrando o clipe cirúrgico (seta) e oclusão completa do AI na bifurcação da artéria carótida interna direita.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 32 - Imagem de ATC cerebral, corte coronal, expandido, para uma melhor visualização do clipe metálico (seta) utilizado para oclusão do AI na bifurcação da artéria carótida interna direita.

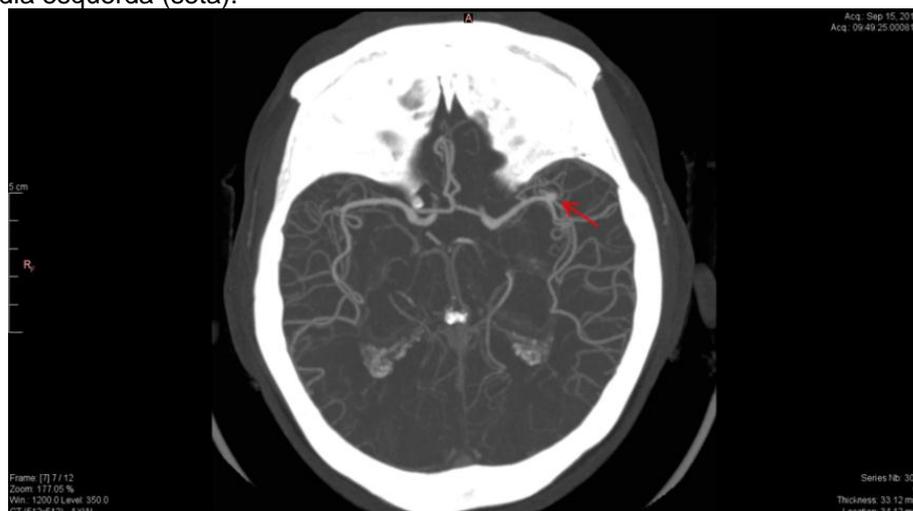


Fonte: o autor, 2017.

Caso 2

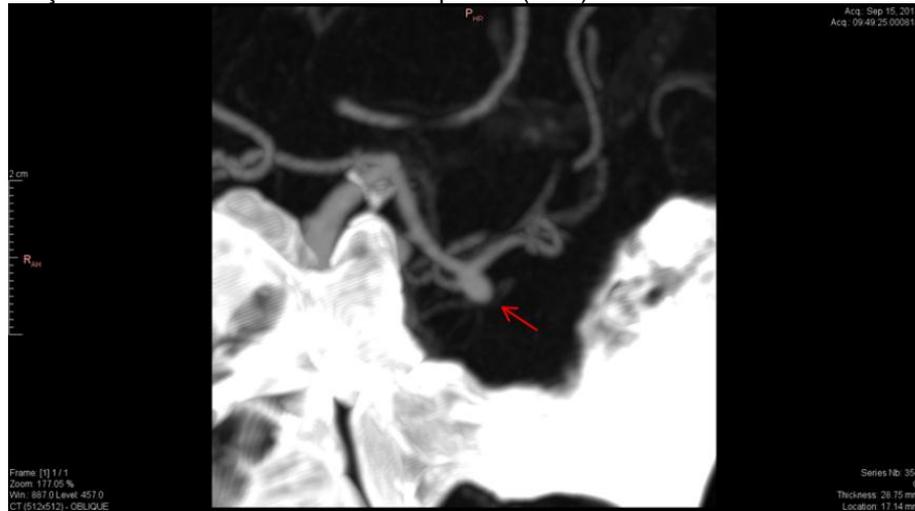
O segundo paciente era do sexo feminino, com queixa de vertigem. Exames de imagem do crânio (ATC) foram utilizados para investigação, sendo identificado um AI incidental na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (Figuras 33, 34 e 35). O AI possuía as seguintes dimensões: 3,6 mm de diâmetro de colo e 3,9 mm de distância entre o colo e o *domus*.

Figura 33 - Imagem de ATC cerebral, corte axial, ilustrando o aneurisma na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (seta).



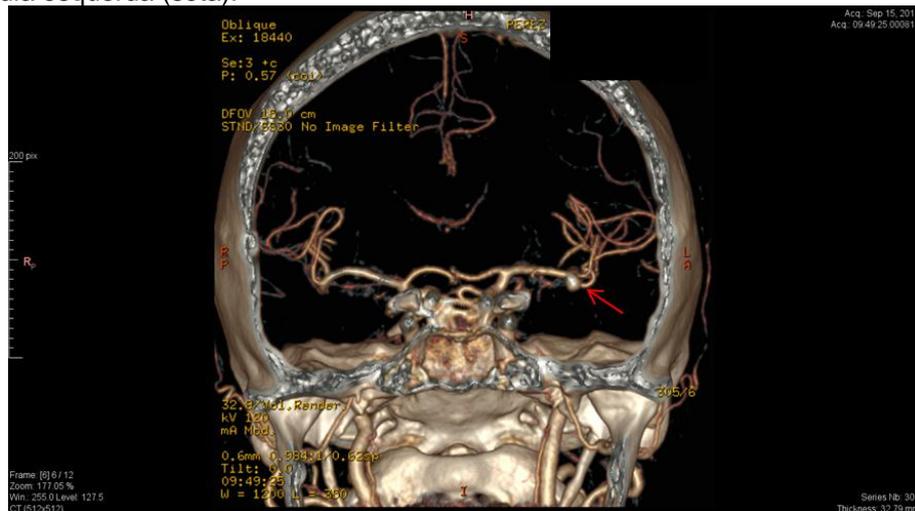
Fonte: o autor, 2017.

Figura 34 - Imagem de ATC cerebral, reconstrução na posição oblíqua para uma melhor visualização do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (seta).



Fonte: o autor, 2017.

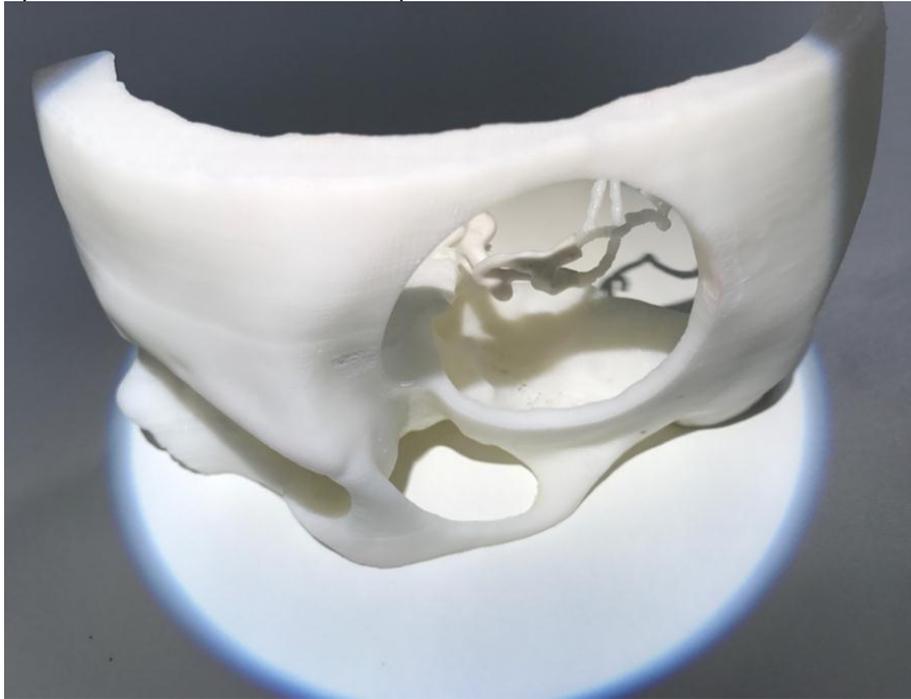
Figura 35 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, mostrando o AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (seta).



Fonte: o autor, 2017.

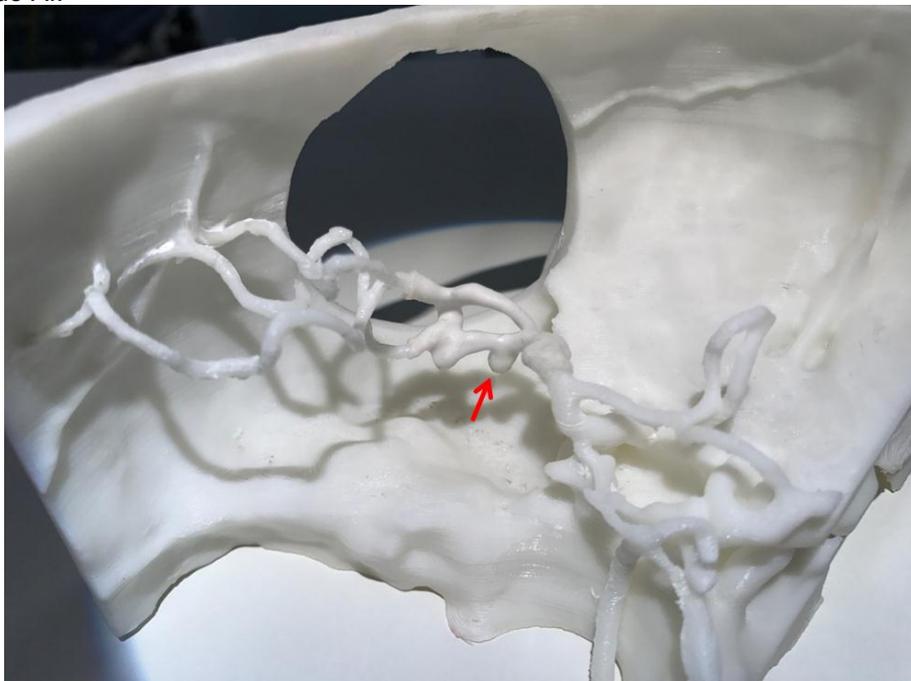
Assim como no caso anterior, após a assinatura do TCLE, as imagens da ATC em formato DICOM foram processadas pelos programas de segmentação (InVesalius®). A seguir, o arquivo STL foi encaminhado à impressora 3D e o modelo foi manufaturado. Ao final desta fase 1, obtiveram-se os biomodelos em ABS e modelos de borracha de silicone (Figuras 36 e 37).

Figura 36 - Aspecto final do biomodelo 3D do paciente 2, visão externa.



Fonte: o autor, 2017.

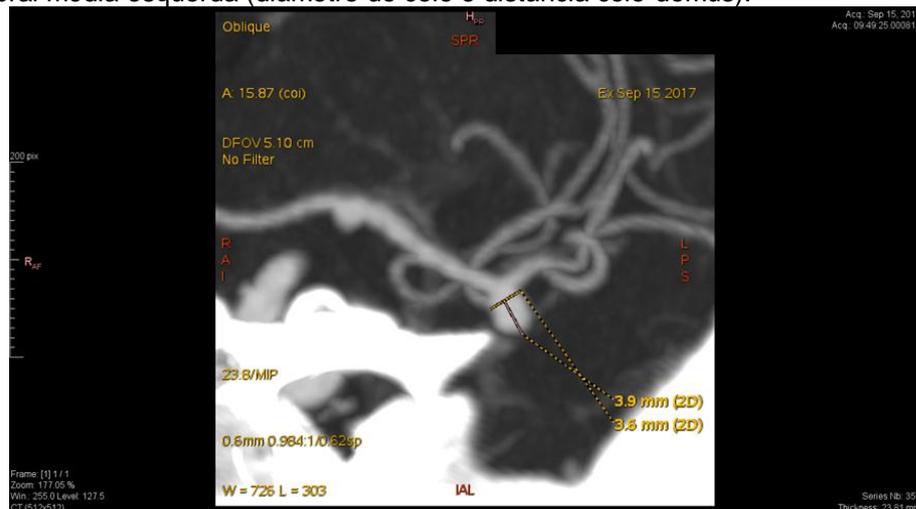
Figura 37 - Aspecto final do biomodelo 3D do paciente 2, visão da região interna, onde a seta indica a localização do AI.



Fonte: o autor, 2017.

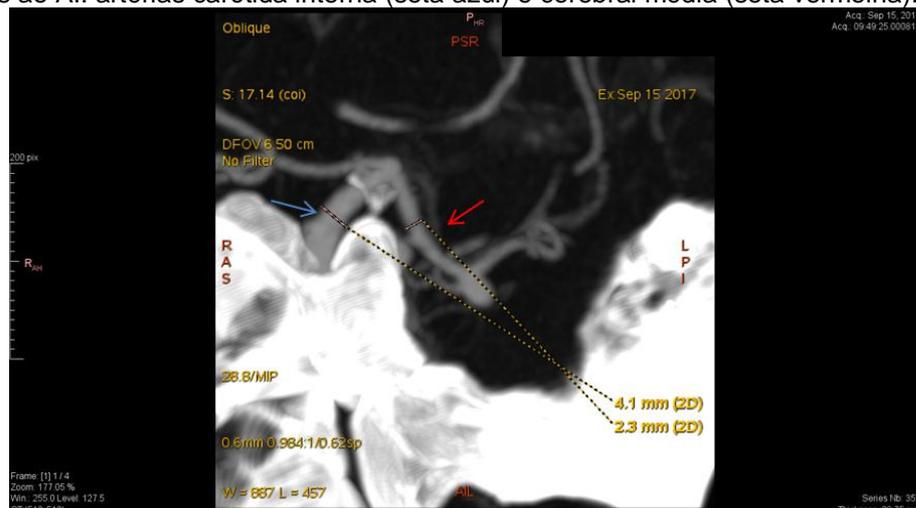
Na fase 2, o biomodelo 3D do caso 2 foi submetido à TC. As medidas nas imagens de ATC do paciente (Figuras 38 e 39) foram confrontadas com as medidas obtidas nas imagens de TC do biomodelo (Figuras 40 e 41) e estão resumidas na Tabela 4.

Figura 38 - Imagem de ATC cerebral do paciente 2, ilustrando as medidas do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (diâmetro do colo e distância colo-domus).



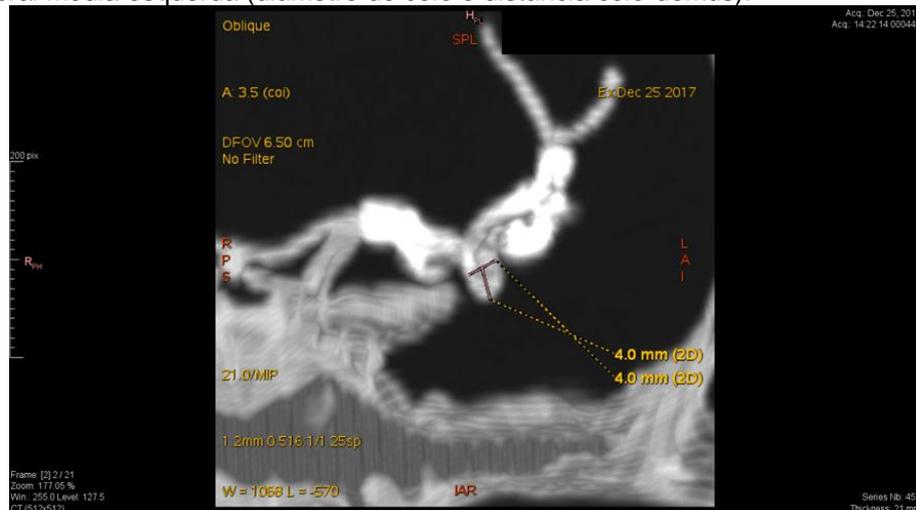
Fonte: o autor, 2017.

Figura 39 - Imagem de ATC cerebral do paciente 2, ilustrando as dimensões das artérias relacionadas ao AI: artérias carótida interna (seta azul) e cerebral média (seta vermelha).



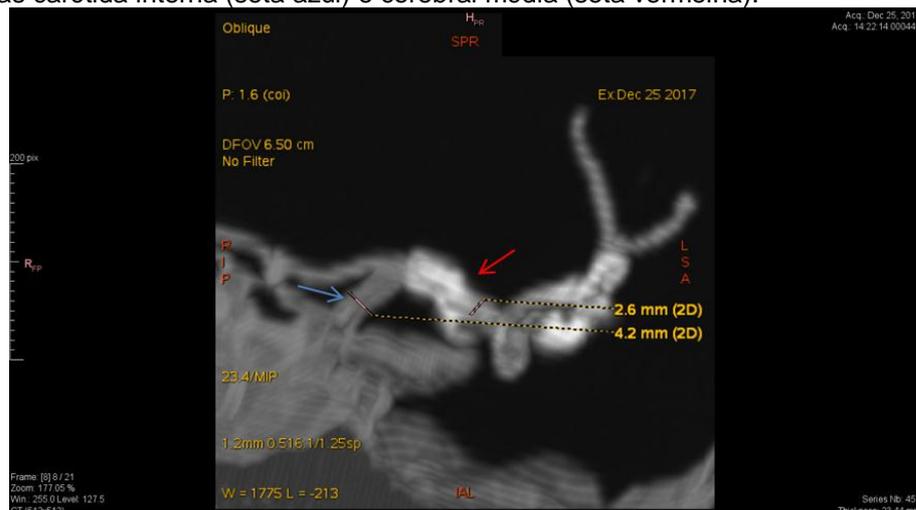
Fonte: o autor, 2017.

Figura 40 - Imagem de TC do biomodelo 3D (caso 2), ilustrando as medidas do AI da bifurcação da artéria cerebral média esquerda (diâmetro do colo e distância colo-domus).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 41 - Imagem de TC do biomodelo 3D (caso 2), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artérias carótida interna (seta azul) e cerebral média (seta vermelha).



Fonte: o autor, 2017.

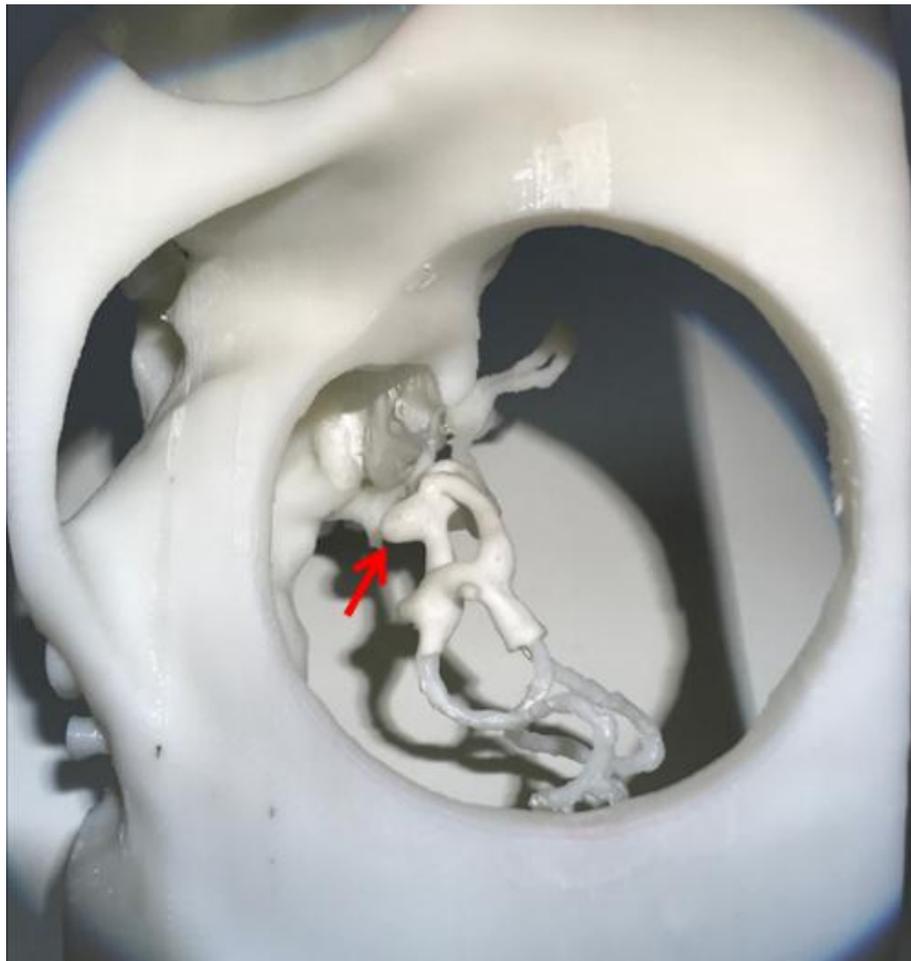
Tabela 4 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do segundo caso e o erro relativo encontrado (%).

Medidas	Diâmetro do colo (mm)	Distância colo-domus (mm)	Diâmetro da artéria carótida interna (mm)	Diâmetro da artéria cerebral média (mm)
Paciente 2	3,6	3,9	4,1	2,3
Biomodelo 2	4,0	4,0	4,2	2,6
Erro (%)	11,1	2,5	2,4	13,0

Na fase 3, o pesquisador e um neurocirurgião receberam o biomodelo 3D completo (Figuras 42), juntamente com o biomodelo de borracha oco acoplado ao

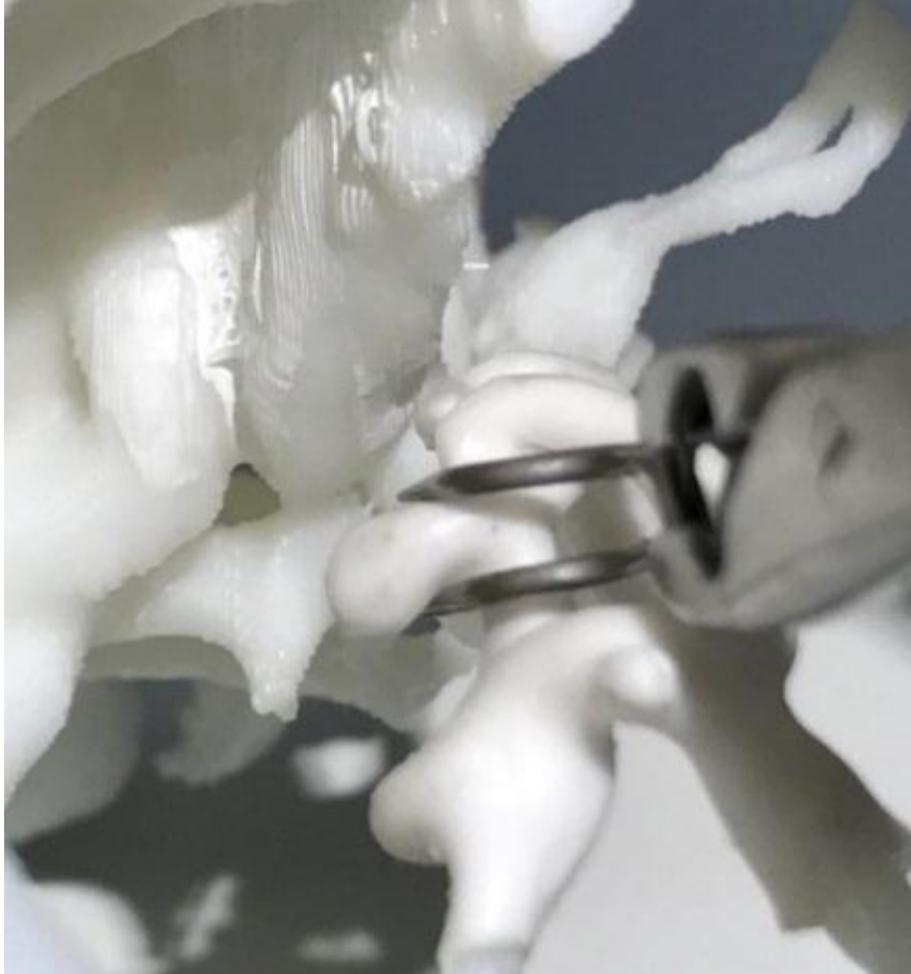
sistema de circulação artificial. A seguir, ocorreu a etapa de escolha dos cliques (Figura 43 e 44), cujas características estão listadas na Tabela 5.

Figura 42 - Posição cirúrgica do biomodelo (caso 2) para a realização da fase 3 deste estudo. Al (seta).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 43 - Ilustração do início da aplicação do clipe metálico no aneurisma do biomodelo (caso 2).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 44 - Ilustração do clipe metálico aplicado no colo do aneurisma do biomodelo 3D (caso 2): vista superior.



Fonte: o autor, 2017.

Tabela 5 - Característica dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo 3D (caso 2) na fase 3 deste estudo.

	Formato	Tamanho	Quantidade
Autor	Reto	5 mm	1
Neurocirurgião	Reto	5 mm	1

Ao final da fase 3, observou-se que as características dimensionais do clipe metálico eleito no planejamento realizado pelo autor e por um segundo neurocirurgião foram compatíveis com as características do clipe utilizado na cirurgia. Da mesma forma que o caso 1, a eficiência da oclusão do aneurisma no biomodelo foi avaliada pela verificação de vazamento de líquido por meio da

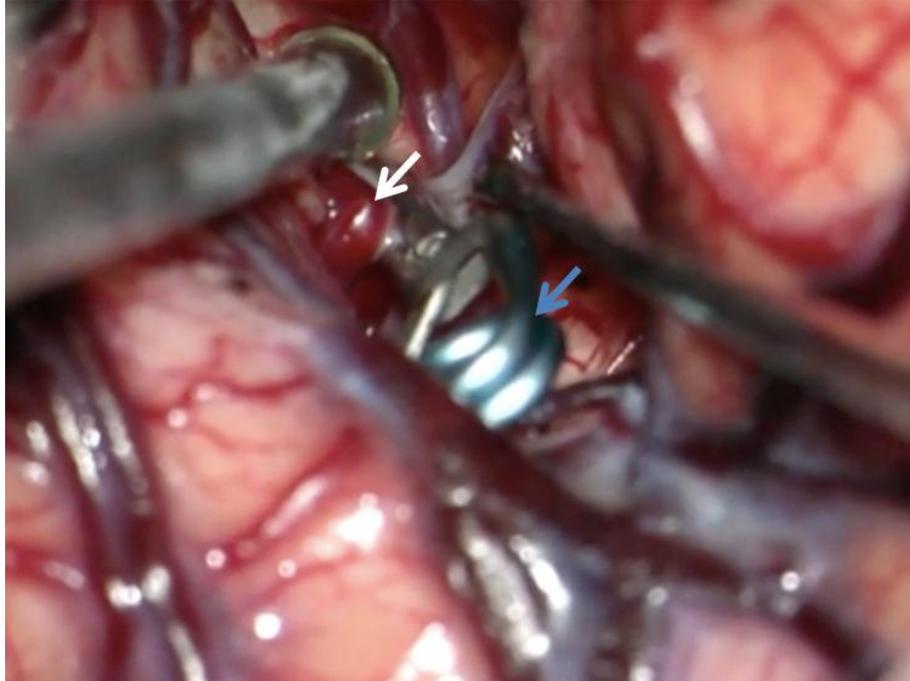
perfuração do *domus* aneurismático (sistema de circulação artificial) e, no intraoperatório, pela verificação de ausência de fluxo sanguíneo por meio de DPM. O tempo cirúrgico total foi de 190 min. O clipe utilizado pode ser comprovado pela cirurgia (Figura 46) e pelos exames de imagens pós-operatórios (Figuras 47 e 48).

Figura 45 - Ilustração do clipe metálico aplicado no colo do aneurisma do biomodelo 3D (caso 2): vista inferior.



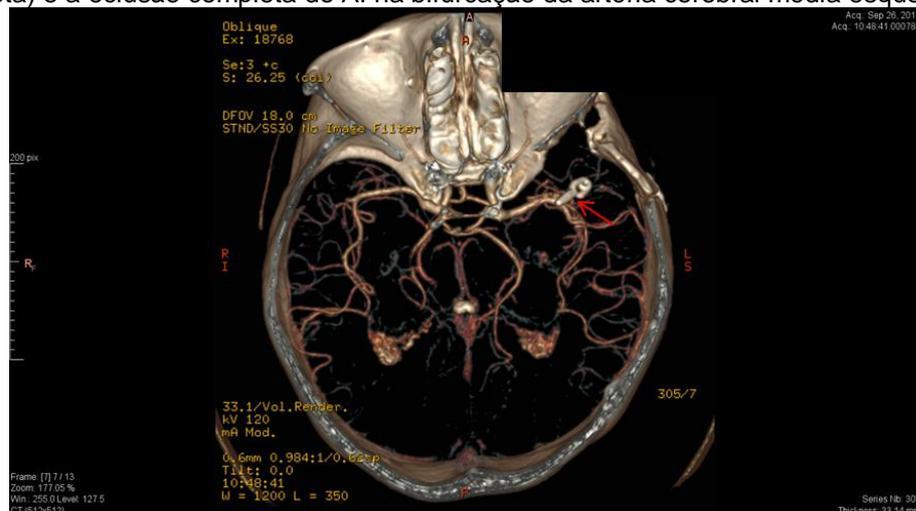
Fonte: o autor, 2017.

Figura 46 – Imagem cirúrgica, acesso fronto-temporal, ilustrando o clipe cirúrgico (seta azul) e oclusão completa do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (seta branca).



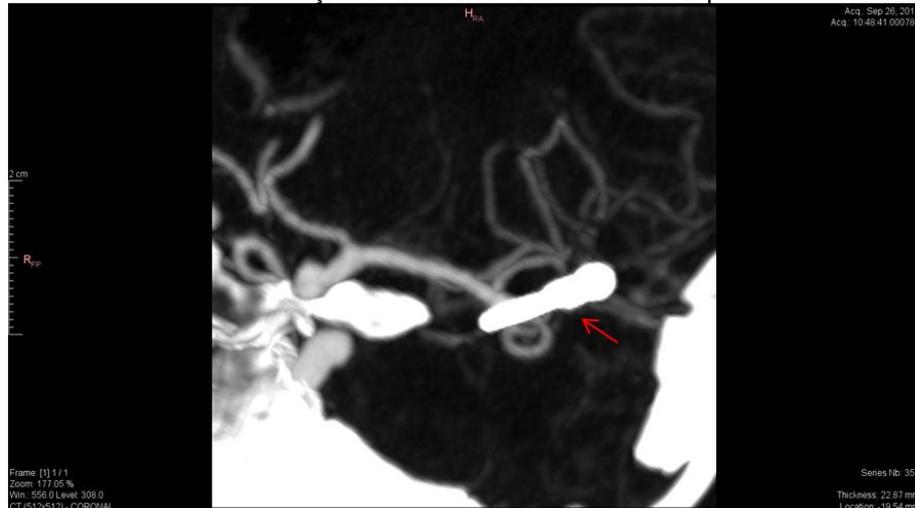
Fonte: o autor, 2017.

Figura 47 – Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, pós-operatória, ilustrando o clipe cirúrgico (seta) e a oclusão completa do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 48 - Imagem de ATC cerebral, reconstrução em oblíquo, ilustrando o clipe metálico (seta) utilizado para oclusão do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda.

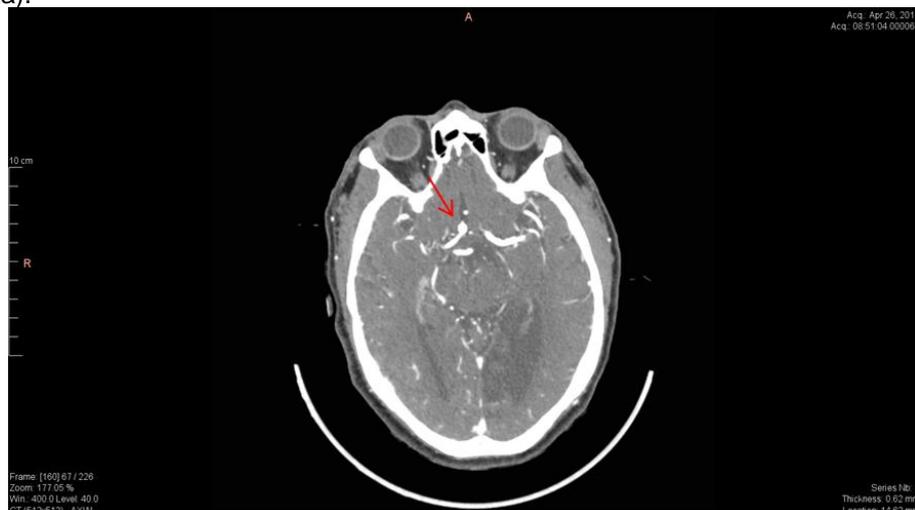


Fonte: o autor, 2017.

Caso 3

Trata-se de um homem, 71 anos, com história de acidente vascular encefálico isquêmico e, durante a investigação vascular com exames de imagem, constatou-se um AI incidental na artéria comunicante anterior (Figura 49 e 50). O AI possuía as seguintes medidas: 4,3 mm de diâmetro de colo e 3,4 mm de distância entre o colo e o *domus*.

Figura 49 – Imagem de ATC cerebral, corte axial, ilustrando o aneurisma na artéria comunicante anterior (seta).

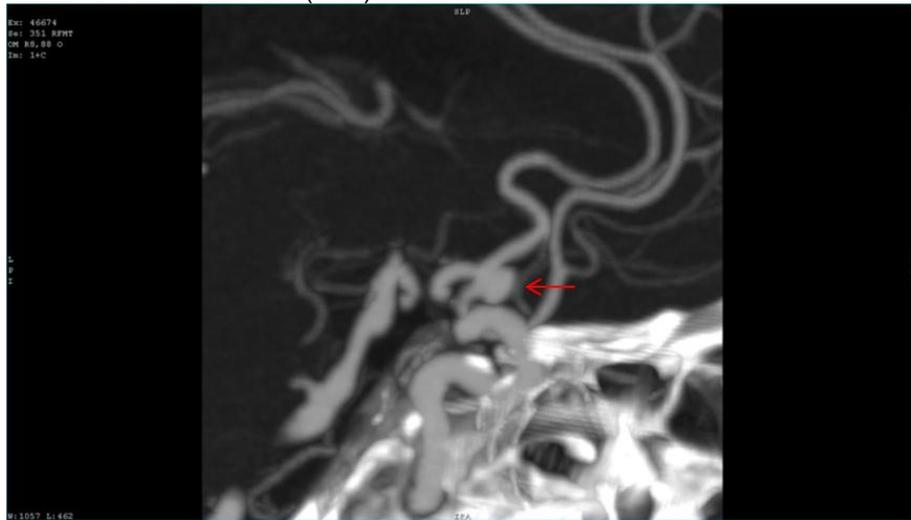


Fonte: o autor, 2017.

As imagens DICOM da ATC cerebral do paciente foram processadas com os programas de segmentação (InVesalius®) já apresentados e preparadas para a impressão 3D.

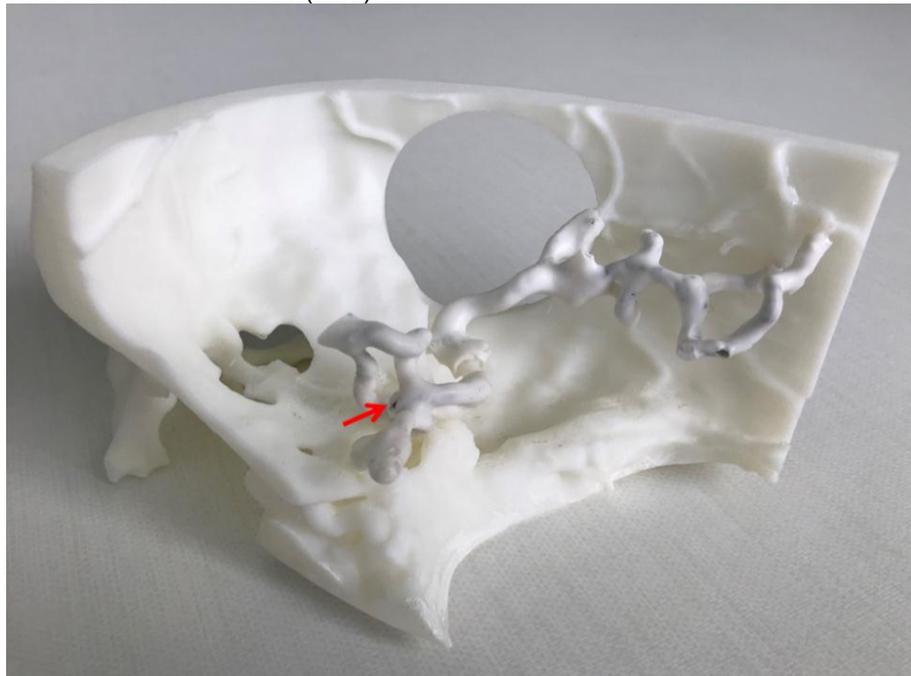
Após a segmentação e reconstrução 3D, foram confeccionados o biomodelo em ABS e seus respectivos modelos em borracha de silicone (Figura 51).

Figura 50 - Imagem de ATC cerebral, reconstrução na posição oblíqua para uma melhor visualização do AI na artéria comunicante anterior (seta).



Fonte: o autor, 2017.

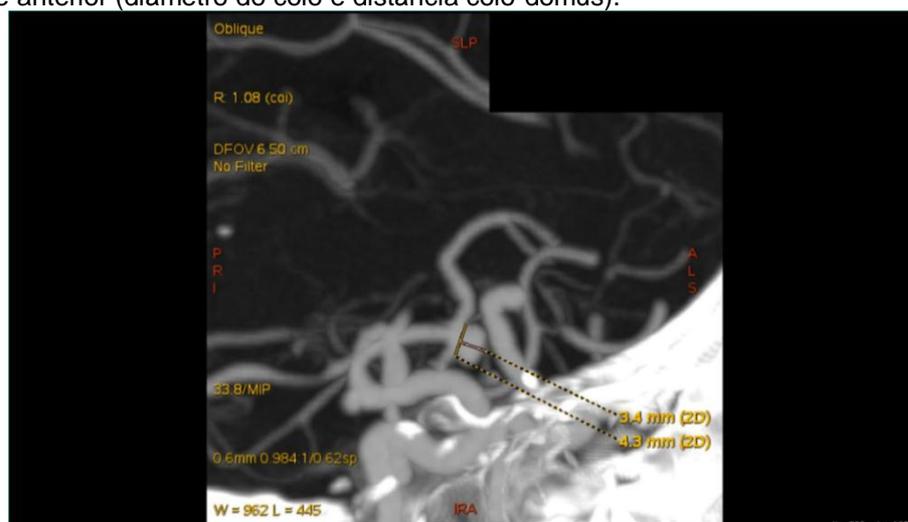
Figura 51 - Imagem de ATC cerebral, reconstrução na posição oblíqua para uma melhor visualização do AI na artéria comunicante anterior (seta).



Fonte: o autor, 2017.

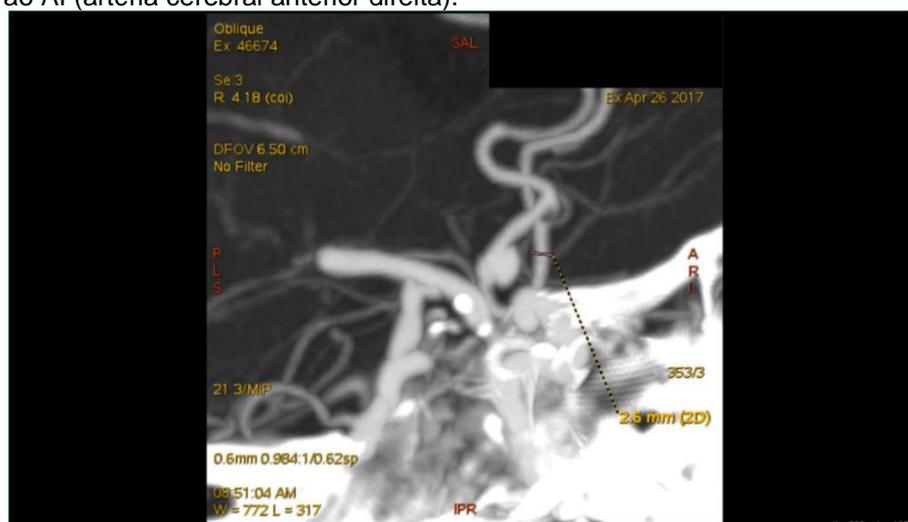
Na segunda fase metodológica, o biomodelo 3 foi submetido à TC. As medidas nas imagens de ATC do paciente (Figuras 52 e 53) foram confrontadas com as medidas obtidas nas imagens da TC do biomodelo (Figuras 54 e 55), as quais estão resumidas na Tabela 6.

Figura 52 - Imagem de ATC cerebral do paciente (caso 3), ilustrando as medidas do AI na artéria comunicante anterior (diâmetro do colo e distância colo-domus).



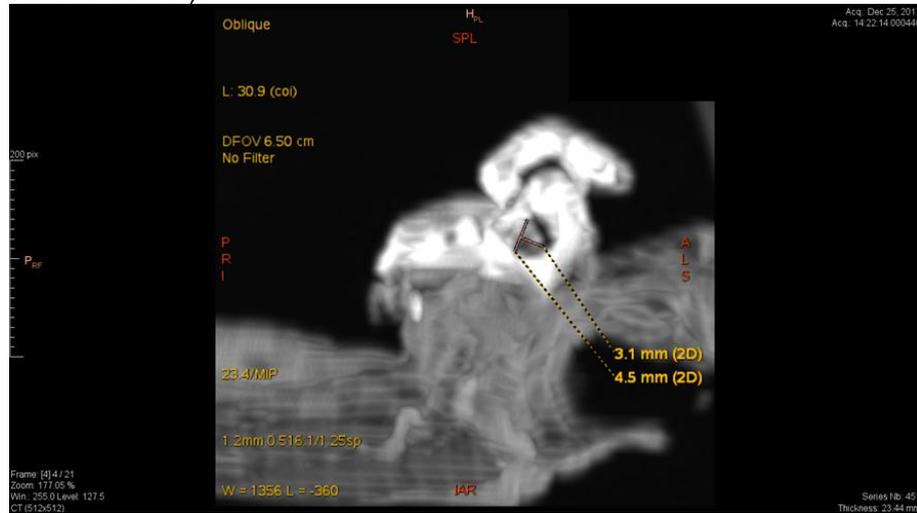
Fonte: o autor, 2017.

Figura 53 - Imagem de ATC cerebral do paciente (caso 3), ilustrando as dimensões da artéria relacionada ao AI (artéria cerebral anterior direita).



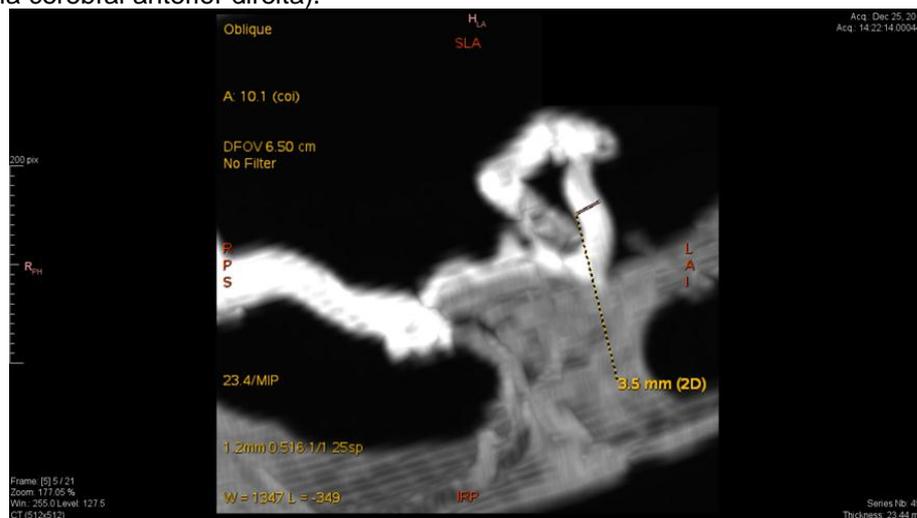
Fonte: o autor, 2017.

Figura 54 - Imagem de TC do biomodelo 3D (caso 3), mostrando as dimensões do AI (diâmetro do colo e distância colo-domus).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 55 - Imagem de TC do biomodelo 3D (caso 3), indicando as dimensões da artéria relacionada ao AI (artéria cerebral anterior direita).



Fonte: o autor, 2017.

Tabela 6 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do terceiro caso e o erro relativo encontrado (%).

Medidas	Diâmetro do colo (mm)	Distância colo-domus (mm)	Diâmetro da artéria cerebral anterior (mm)
Paciente 3	4,3	3,4	2,6
Biomodelo 3	4,5	3,1	3,5
Erro (%)	4,6	-8,8	34,6

Na fase 3, o biomodelo foi utilizado sobre a plataforma de simulação cirúrgica, para escolha dos cliques metálicos (Figuras 56 a 60), cujas características encontram-se na Tabela 7.

Figura 56 - Imagem ilustrando o uso da plataforma de simulação cirúrgica com o biomodelo (caso 3) posicionado.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 57 - Posição cirúrgica do biomodelo (caso 3) durante a realização da fase 3 deste estudo. Al (seta).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 58 - Etapa da escolha do clipe metálico do biomodelo (caso 3), pelo pesquisador.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 59 - Ilustração da colocação do clipe metálico no aneurisma do biomodelo (caso 3).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 60 - Ilustração do clipe metálico colocado no colo do aneurisma do biomodelo (caso 3).



Fonte: o autor, 2017.

Tabela 7 - Característica dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo 3D (caso 3) na fase 3 deste estudo.

	Formato	Tamanho (mm)	Quantidade
Autor	Baioneta	5	1
Neurocirurgião	Baioneta	5	1

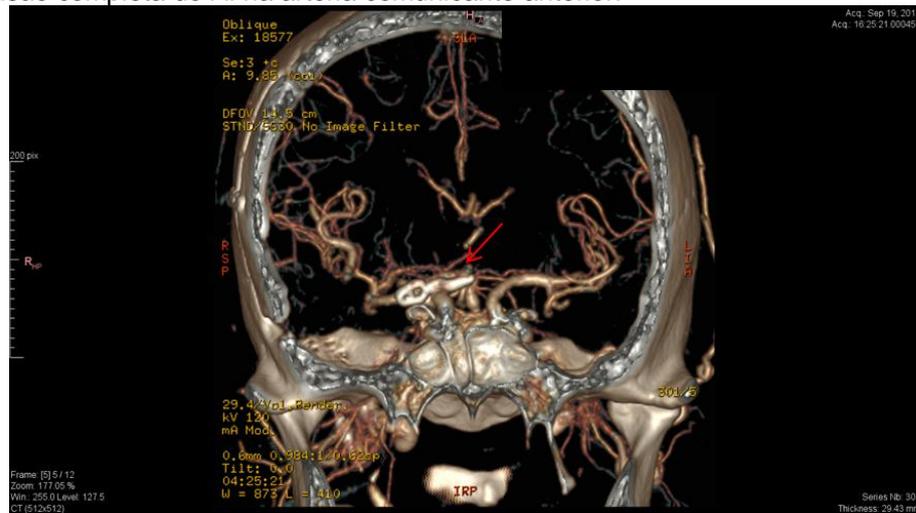
Ao final da terceira fase metodológica, observou-se que as características dimensionais do clipe metálico selecionado foram iguais às do clipe utilizado na cirurgia. As avaliações da eficiência da oclusão do aneurisma no biomodelo e no paciente foram realizadas de acordo com o procedimento proposto e já descrito. O tempo operatório total foi de 240 min. O clipe utilizado, assim como a oclusão do AI, pôde ser comprovado pela imagem cirúrgica (Figura 61) e pelos exames de imagem pós-operatórios (Figuras 62 e 63).

Figura 61 - Imagem cirúrgica, acesso fronto-temporal, ilustrando o clipe cirúrgico (seta preta) e oclusão completa do AI (seta branca).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 62 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, pós-operatória, ilustrando o clipe cirúrgico (seta) e oclusão completa do AI na artéria comunicante anterior.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 63 - Imagem de ATC cerebral, corte coronal, com visualização do clipe metálico (seta) colocado para oclusão do AI na bifurcação da artéria comunicante anterior.

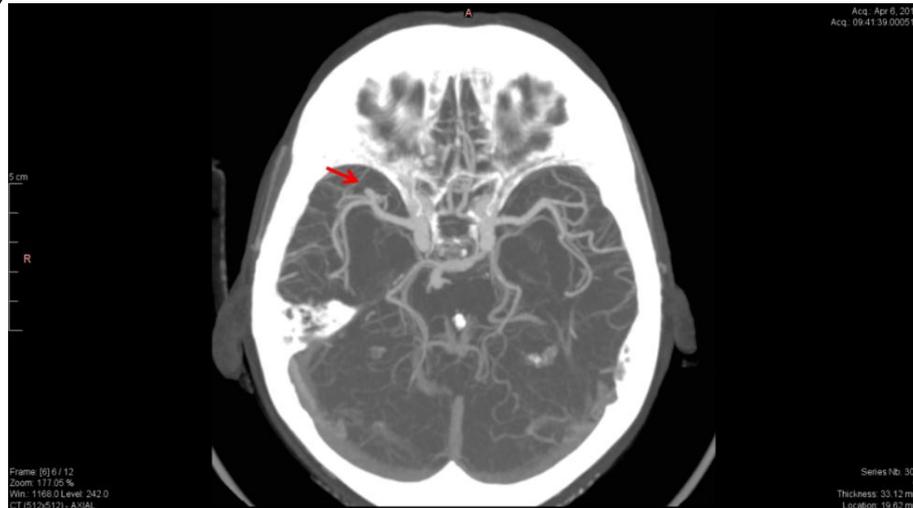


Fonte: o autor, 2017.

Caso 4

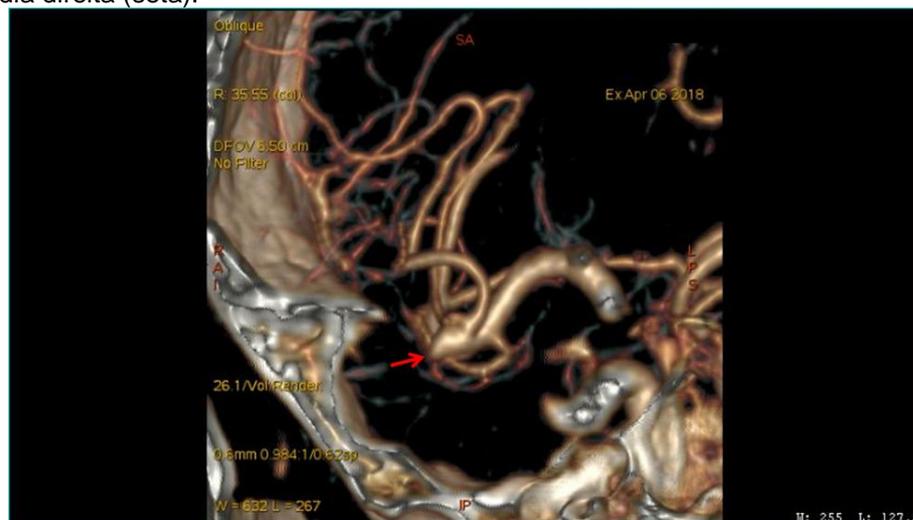
O quarto paciente era do sexo feminino, 73 anos, com queixa de cefaleia e um episódio de perda de consciência. Foi submetida a exames de imagem do crânio, sendo identificado um AI incidental na bifurcação da artéria cerebral média direita (Figuras 64 e 65). O AI possuía as seguintes dimensões: 3,3 mm de diâmetro de colo e 4,5 mm de distância entre o colo e o *domus*.

Figura 64 - Imagem de ATC cerebral, corte axial, ilustrando o aneurisma na artéria cerebral média direita (seta).



Fonte: o autor, 2017.

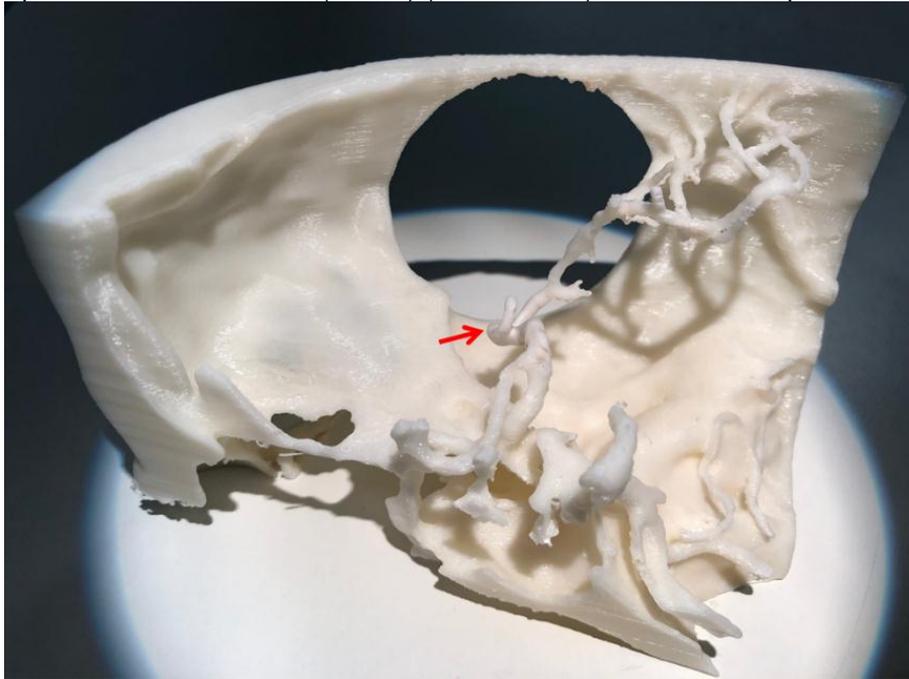
Figura 65 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, ilustrando o AI na bifurcação da artéria cerebral média direita (seta).



Fonte: o autor, 2017.

As imagens DICOM da ATC cerebral do quarto paciente estudado foram processadas e preparadas para a impressão 3D. Foram confeccionados o biomodelo em ABS (Figura 66) e seus respectivos modelos em borracha de silicone.

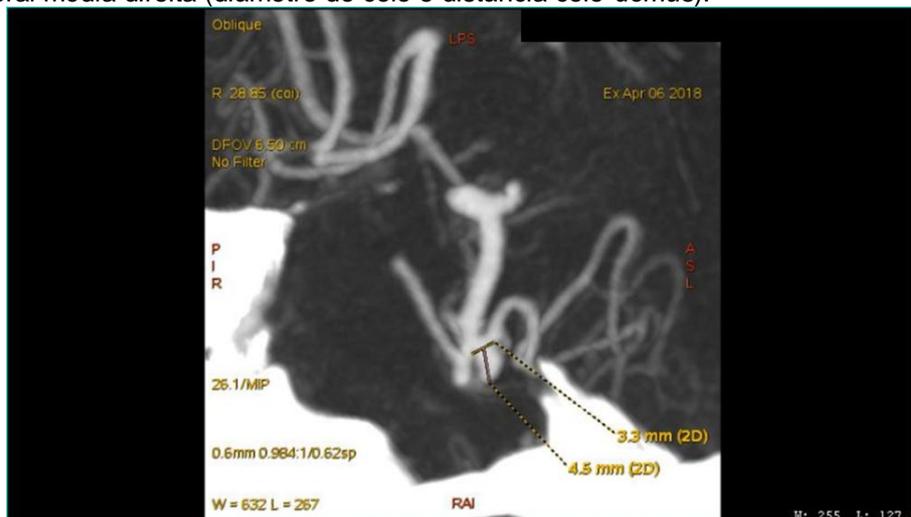
Figura 66 - Aspecto final do biomodelo (caso 4) (visão interna), indicando o AI pela seta.



Fonte: o autor, 2017.

Na fase 2, o biomodelo 3D foi submetido à TC. As medidas nas imagens de ATC do paciente (Figuras 67 e 69) foram comparadas com as medidas obtidas nas imagens de TC do biomodelo (Figuras 68 e 70) e estão resumidas na Tabela 8.

Figura 67 - Imagem de ATC cerebral do quarto paciente estudado, ilustrando as medidas do AI na artéria cerebral média direita (diâmetro do colo e distância colo-domus).



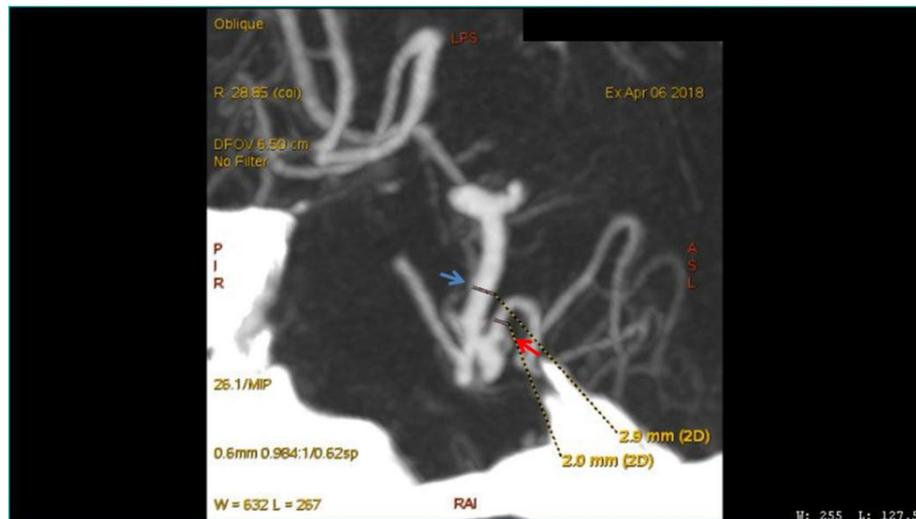
Fonte: o autor, 2017.

Figura 68 - Imagem de TC do biomodelo (caso 4), ilustrando as dimensões do AI (diâmetro do colo e distância colo-domus).



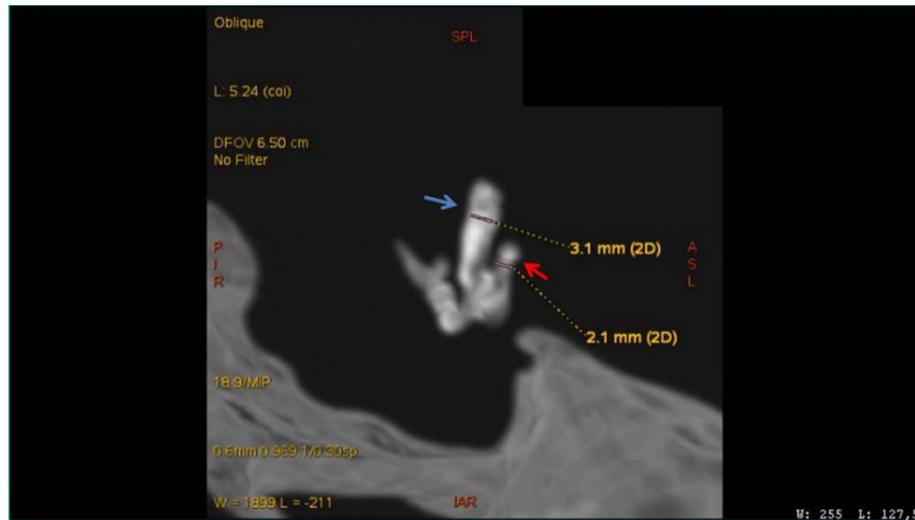
Fonte: o autor, 2017.

Figura 69 - Imagem de TC do biomodelo 3D do quarto paciente estudado, ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta azul).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 70 - Imagem de TC do biomodelo (caso 4), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta azul) e tronco superior da artéria cerebral média direita (seta vermelha).



Fonte: o autor, 2017.

Tabela 8 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do caso 4 e o erro relativo encontrado (%).

Medidas	Diâmetro do colo (mm)	Distância colo-domus (mm)	Diâmetro da artéria cerebral média (mm)	Diâmetro do tronco superior da artéria cerebral média (mm)
Paciente 4	3,3	4,5	2,9	2,0
Biomodelo 4	3,5	4,6	3,1	2,1
Erro (%)	6,0	2,2	6,9	5,0

Na fase 3, o pesquisador e um neurocirurgião receberam o biomodelo 3D completo (Figuras 71, 72 e 73), juntamente com o biomodelo de borracha flexível e oco acoplado ao sistema de circulação artificial. A seguir, ocorreu a etapa de escolha dos cliques (Figuras 74 e 75), cujas características estão descritas na Tabela 9. Ao final da fase 3, observou-se que o clipe metálico eleito no planejamento foi igual ao clipe utilizado na cirurgia. O tempo operatório total foi de 200 min. Utilizou-se o DMP para avaliar a efetividade da clipagem (Figura 76). O clipe utilizado pode ser comprovado pelos exames de imagem pós-operatórios (Figuras 77 e 78).

Figura 71 - Posição cirúrgica do biomodelo (caso 4) completo para a realização da fase 3 desta pesquisa, sendo o AI indicado pela seta.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 72 - Etapa da escolha do clipe metálico do biomodelo (caso 4), pelo pesquisador.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 73 - Etapa da escolha do clipe metálico do biomodelo (caso 4) pelo neurocirurgião convidado.



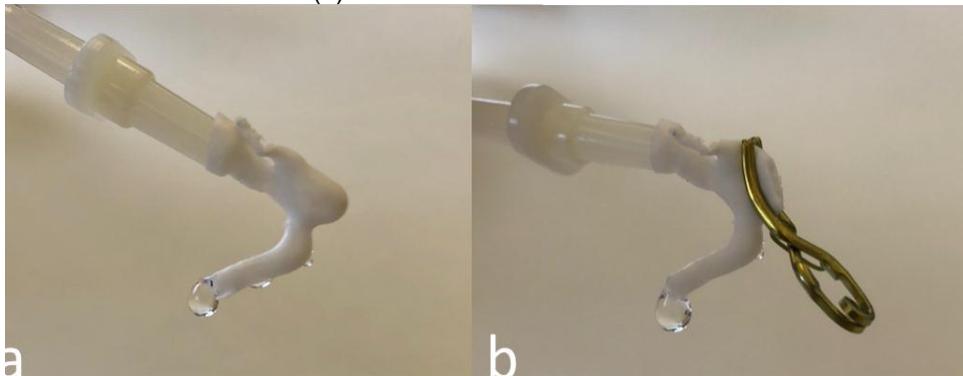
Fonte: o autor, 2017.

Figura 74 - Imagem do clipe metálico colocado no colo do aneurisma do biomodelo (caso 4).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 75 - Sistema de circulação com soro fisiológico acoplado ao molde de borracha de silicone do biomodelo (caso 4) (a). Após a aplicação do clipe, não se constatou saída de soro fisiológico pela perfuração no *domus* do aneurisma (b).

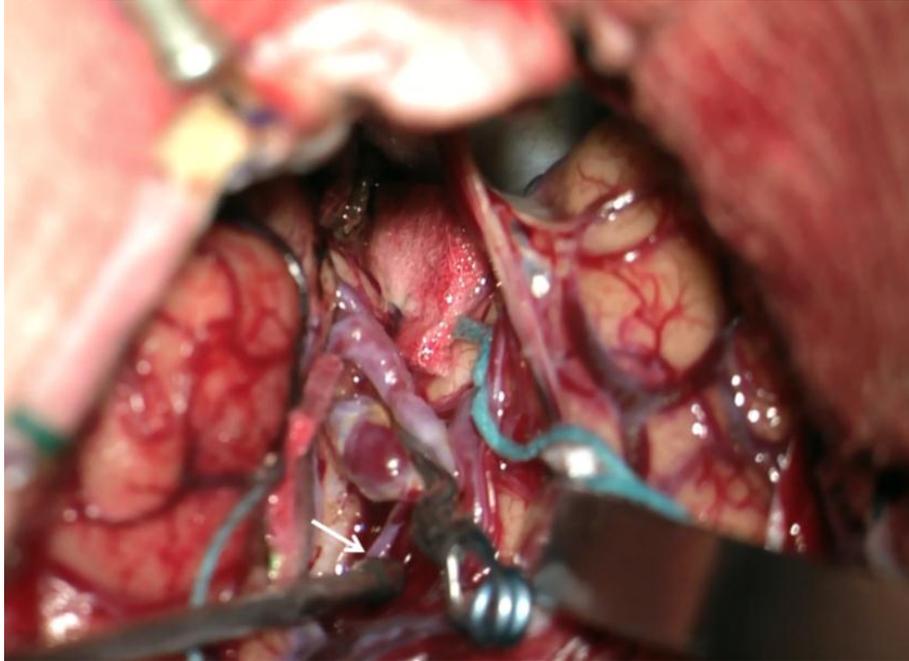


Fonte: o autor, 2017.

Tabela 9 - Característica dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo (caso 4) na fase 3 deste estudo.

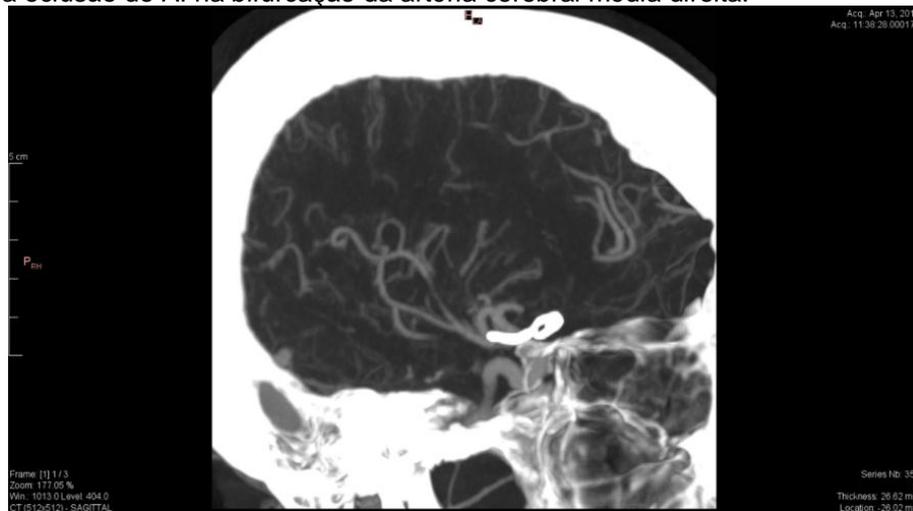
	Formato	Tamanho (mm)	Quantidade
Autor	Curvo	5	1
Neurocirurgião	Curvo	5	1

Figura 76 - Uso do Doppler pulsado microvascular (seta) para avaliação da eficácia do tratamento logo após o implante do clipe cirúrgico.



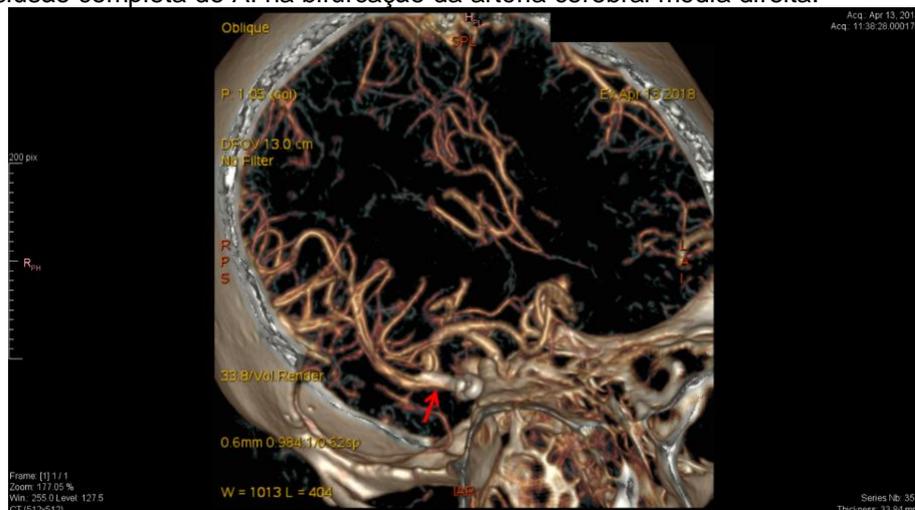
Fonte: o autor, 2017.

Figura 77 - Imagem de ATC cerebral, reconstrução em oblíquo, ilustrando o clipe metálico (seta) utilizado para oclusão do AI na bifurcação da artéria cerebral média direita.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 78 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, pós-operatória, ilustrando o clipe cirúrgico (seta) e a oclusão completa do AI na bifurcação da artéria cerebral média direita.

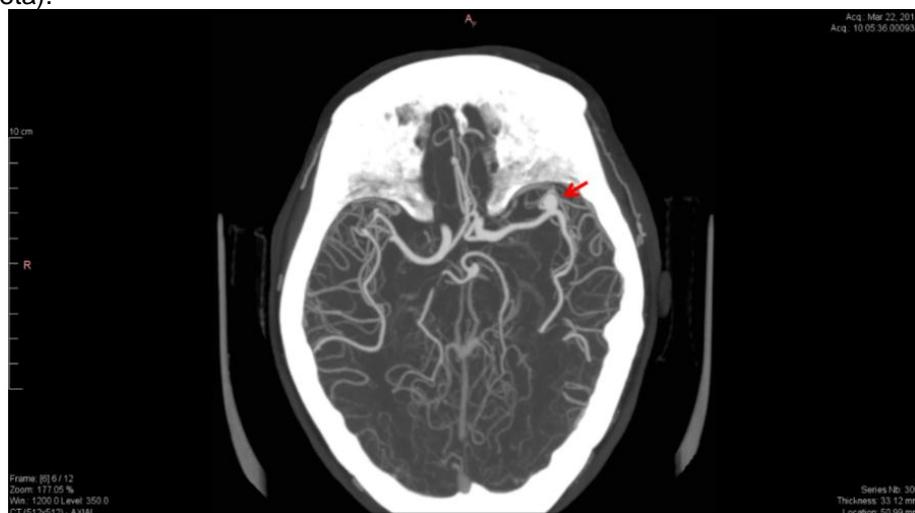


Fonte: o autor, 2017.

Caso 5

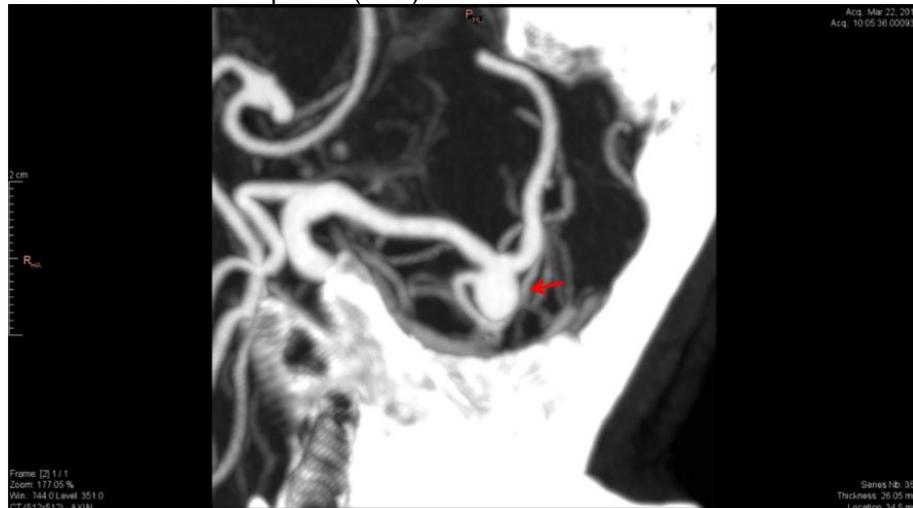
Paciente do sexo feminino, 70 anos, com história de enxaqueca. Após consulta com neurologista, realizou uma RNM de crânio, a qual identificou um AI, sendo o mesmo complementado com exame e ATC cerebral, que caracterizou melhor a lesão na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (Figuras 79, 80 e 81). O AI possuía as seguintes dimensões: 5,9 mm de diâmetro de colo e 5,6 mm de distância entre o colo e o *domus*. Na fase 1, as imagens DICOM da ACT cerebral (Figura 81) foram processadas e preparadas para a impressão 3D.

Figura 79 - Imagem de ATC cerebral, corte axial, ilustrando o aneurisma na artéria cerebral média esquerda (seta).



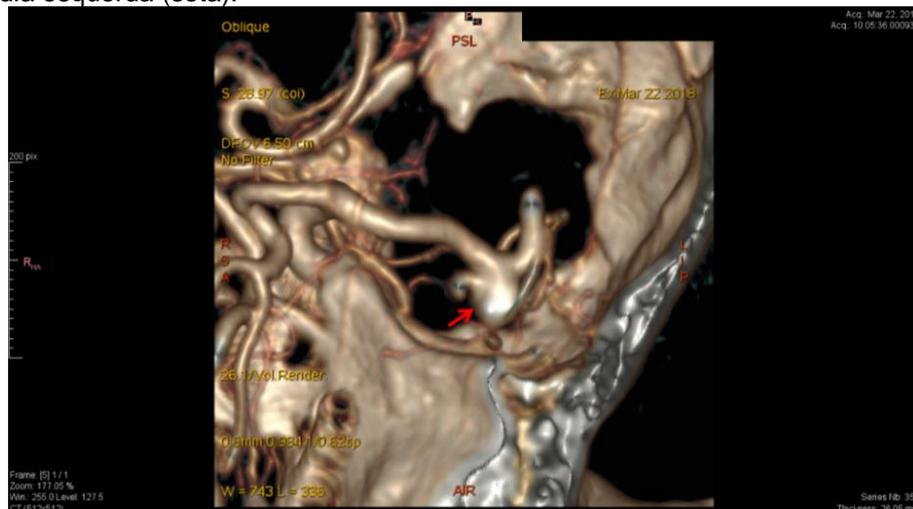
Fonte: o autor, 2017.

Figura 80 - Imagem de ATC cerebral, reconstrução na posição oblíqua para uma melhor visualização do AI na artéria cerebral média esquerda (seta).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 81 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, ilustrando o AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (seta).

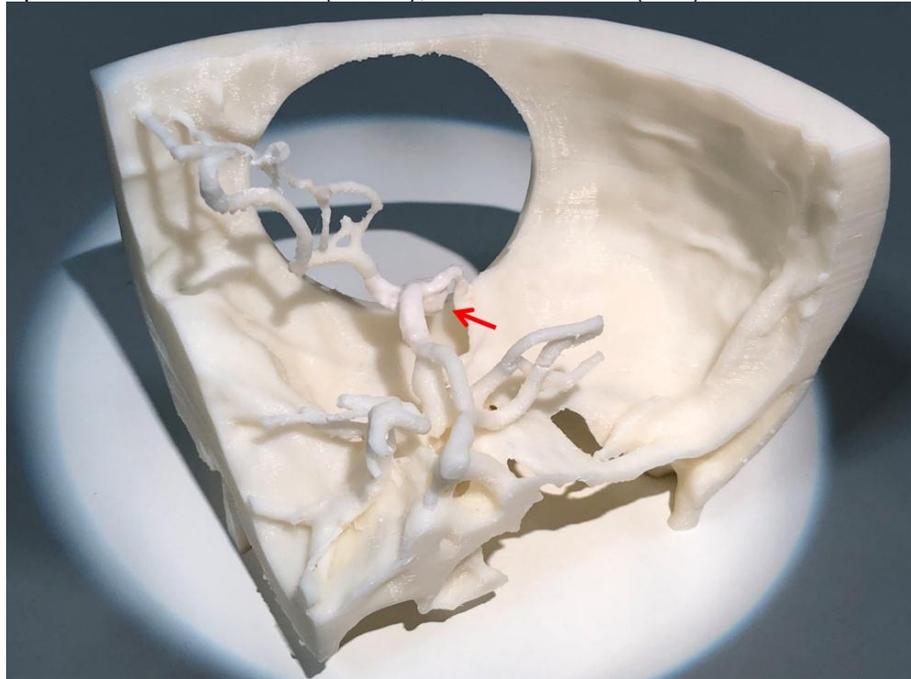


Fonte: o autor, 2017.

Em seguida, foram confeccionados o biomodelo em ABS (Figura 82) e seus respectivos modelos em borracha de silicone, assim como na fase anterior. Na fase 2, o biomodelo 3D 5 foi submetido à TC. As medidas nas imagens de ATC do paciente (Figuras 83 e 85) foram confrontadas com as medidas obtidas nas imagens de TC do biomodelo (Figuras 84 e 86) e estão resumidas na Tabela 10. Na fase 3, o pesquisador e um neurocirurgião receberam o biomodelo completo (Figuras 87 e 88). A seguir, ocorreu a etapa de escolha dos cliques (Figura 89 e 90), cujas características estão ilustradas na Tabela 11. Utilizou-se o DMP para avaliar a

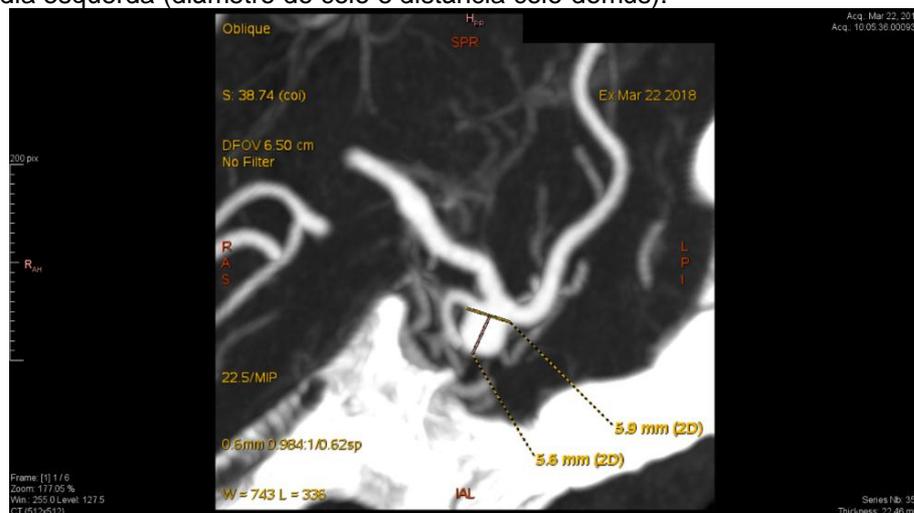
efetividade da clipagem (Figura 91). O clipe utilizado pode ser comprovado pelos exames de imagem pós-operatórios (Figuras 92 e 93). O tempo cirúrgico total foi de 225 min.

Figura 82 - Aspecto final do biomodelo (caso 5), visão interna. AI (seta).



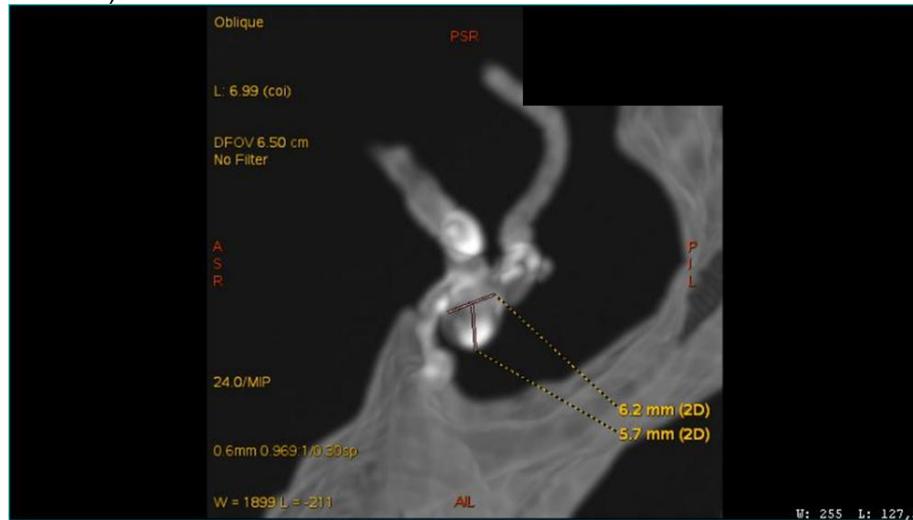
Fonte: o autor, 2017.

Figura 83 - Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 5, ilustrando as medidas do AI na artéria cerebral média esquerda (diâmetro do colo e distância colo-domus).



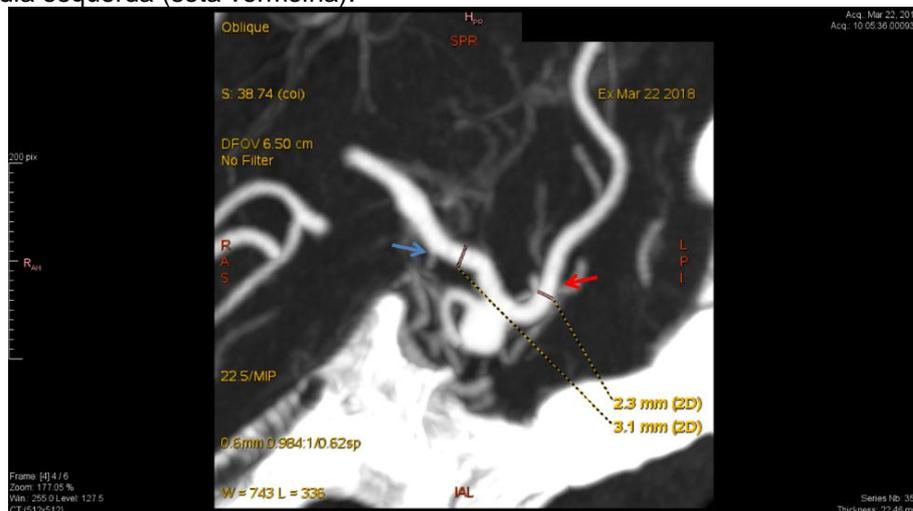
Fonte: o autor, 2017.

Figura 84 - Imagem de TC do biomodelo (caso 5), ilustrando as dimensões do AI (diâmetro do colo e distância colo-domus).



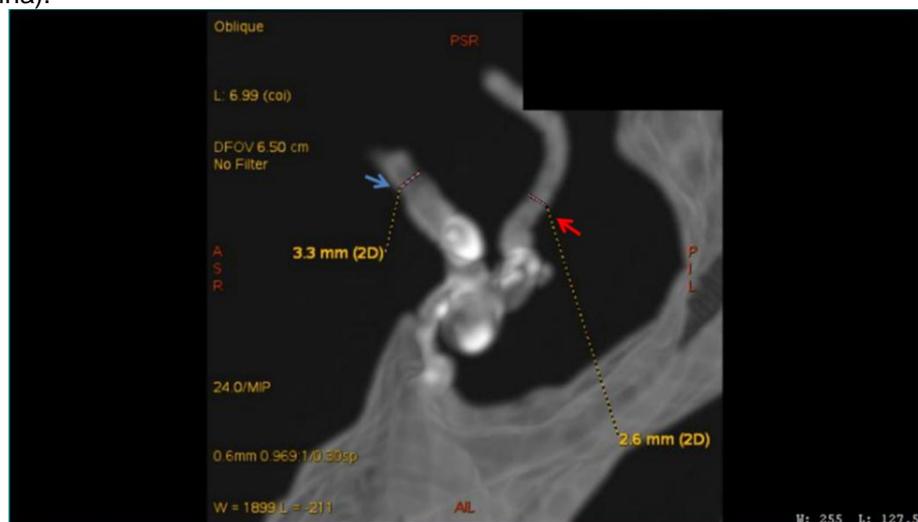
Fonte: o autor, 2017.

Figura 85 - Imagem de TC do biomodelo 3D do paciente do caso 5, ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média esquerda (seta azul) e tronco superior da artéria cerebral média esquerda (seta vermelha).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 86 - Imagem de TC do biomodelo (caso 5), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média esquerda (seta azul) e tronco superior da artéria cerebral média esquerda (seta vermelha).



Fonte: o autor, 2017.

Tabela 10 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do caso 5 e o erro relativo encontrado (%).

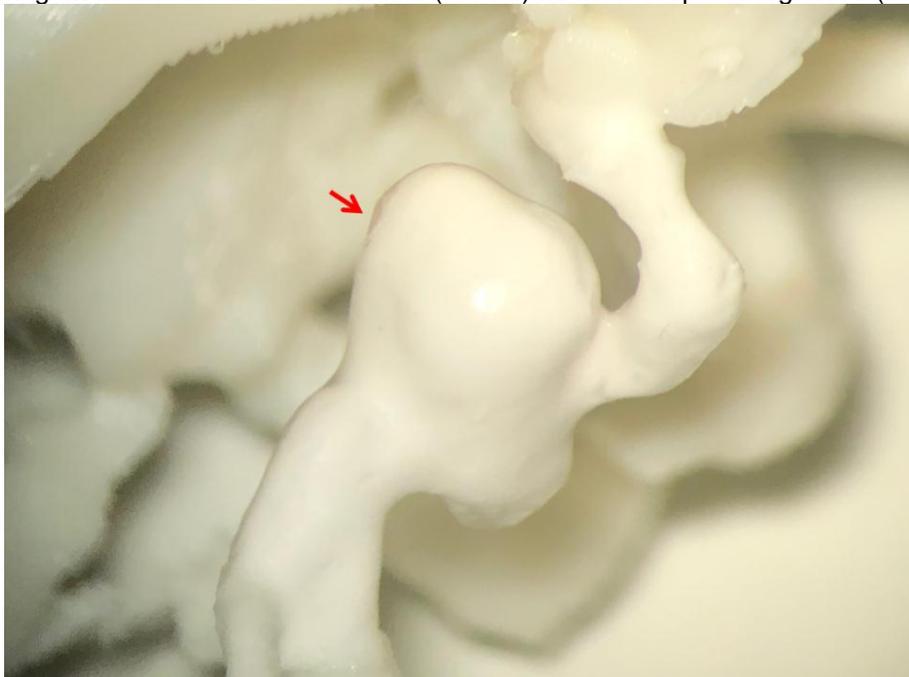
Medidas	Diâmetro do colo (mm)	Distância colo-domus (mm)	Diâmetro da artéria cerebral média (mm)	Diâmetro do tronco superior da artéria cerebral média (mm)
Paciente 5	5,9	5,6	3,1	2,3
Biomodelo 5	6,2	5,7	3,3	2,6
Erro (%)	5,1	1,8	6,4	13,0

Figura 87 - Posição cirúrgica do biomodelo (caso 5) completo para a realização da Fase 3 desta pesquisa. AI (seta).



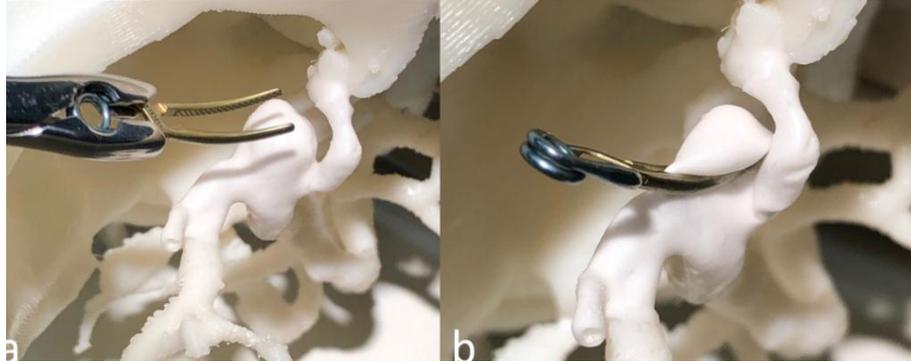
Fonte: o autor, 2017.

Figura 88 - Imagem do aneurisma do biomodelo (caso 5) no microscópio cirúrgico. AI (seta).



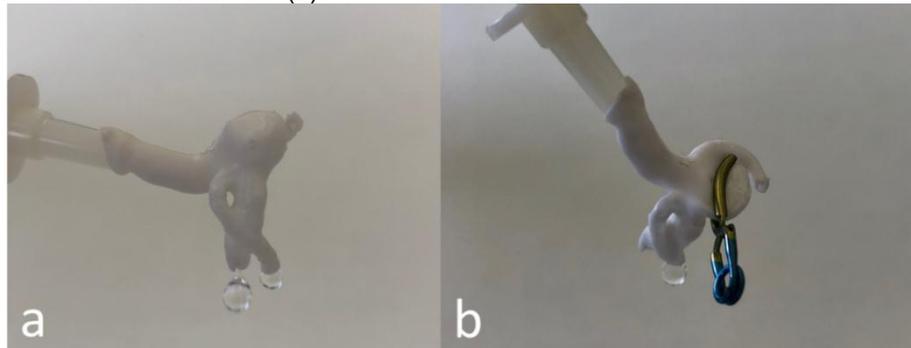
Fonte: o autor, 2017.

Figura 89 - Ilustração do clipe metálico antes (a) e após (b) a aplicação no colo do aneurisma do biomodelo (caso 5).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 90 - Sistema de circulação com soro fisiológico acoplado ao molde de borracha de silicone do biomodelo (caso 5) (a). Após a aplicação do clipe, não se constatou saída de soro fisiológico pela perfuração no domus do aneurisma (b).

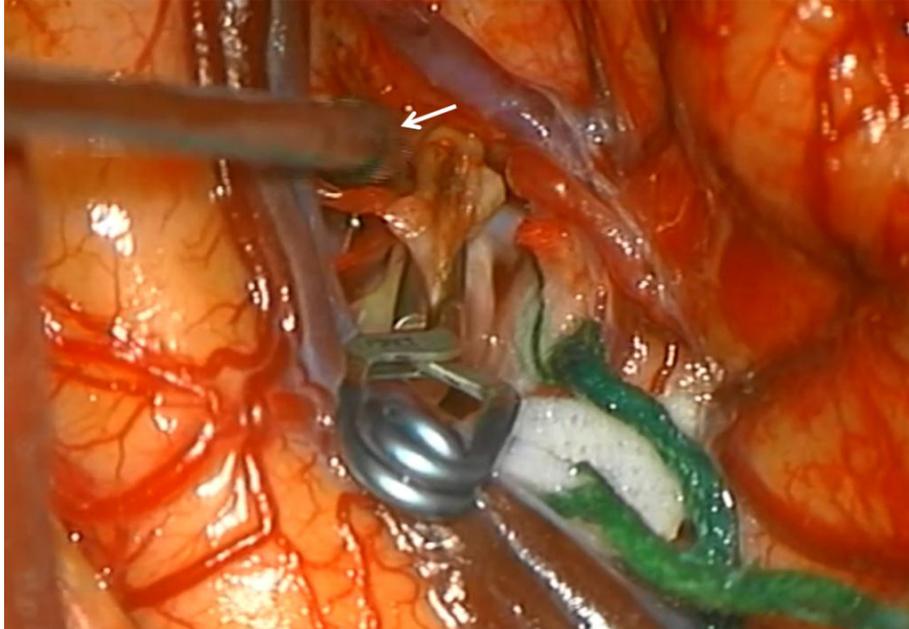


Fonte: o autor, 2017.

Tabela 11 - Característica dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo (caso 5) na Fase 3 deste estudo

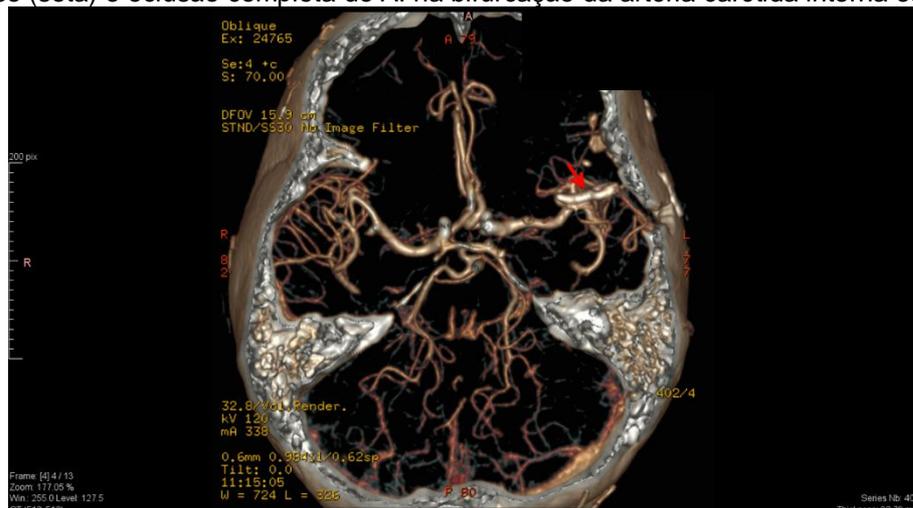
	Formato	Tamanho (mm)	Quantidade
Autor	Curvo	7	1
Neurocirurgião	Curvo	7	1

Figura 91 - Uso de Doppler pulsado microvascular (seta) para avaliação da eficácia do tratamento logo após o implante do clipe cirúrgico.



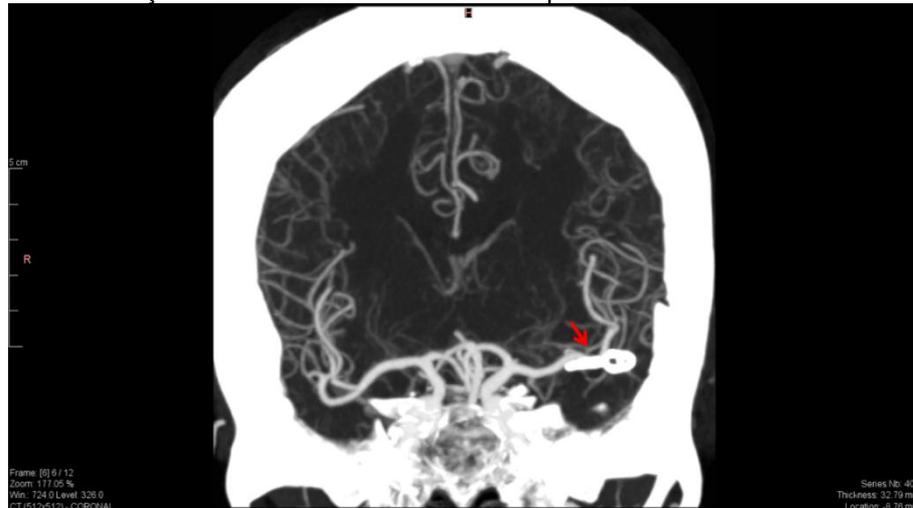
Fonte: o autor, 2017.

Figura 92 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, corte axial, pós-operatória, mostrando o clipe cirúrgico (seta) e oclusão completa do AI na bifurcação da artéria carótida interna esquerda.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 93 - Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o clipe metálico (seta) utilizado para oclusão do AI na bifurcação da artéria carótida interna esquerda.

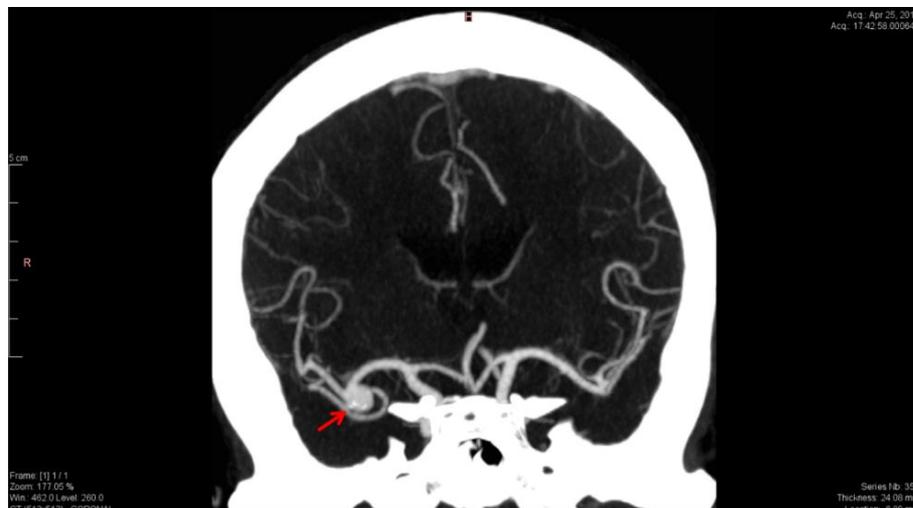


Fonte: o autor, 2017.

Caso 6

Trata-se de um voluntário do sexo feminino, 69 anos, com um episódio de confusão mental e desorientação tempo-espacial com duração de poucos minutos. Foi submetida a uma série de exames complementares, dentre eles, uma ATC cerebral, que identificou um AI na bifurcação da artéria cerebral média direita (Figuras 94, 95 e 96). O AI possuía as seguintes dimensões: 7,6 mm de diâmetro de colo e 3,9 mm de distância entre o colo e o *domus*.

Figura 94 - Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o AI na artéria cerebral média direita (seta).



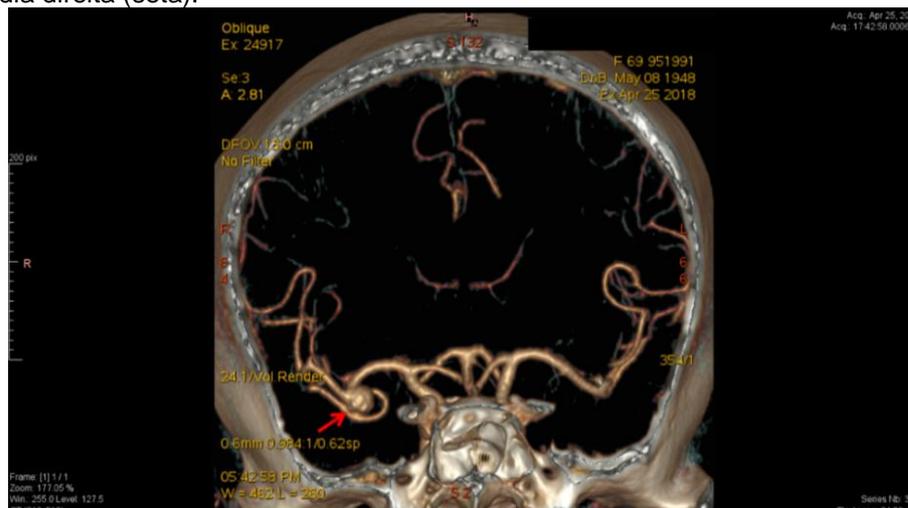
Fonte: o autor, 2017.

Figura 95 - Imagem de ATC cerebral, reconstrução em oblíquo para melhor definição do aneurisma na artéria cerebral média direita (seta).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 96 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, ilustrando o AI na bifurcação da artéria cerebral média direita (seta).



Fonte: o autor, 2017.

As imagens DICOM da ACT cerebral do paciente 6 foram processadas e preparadas para a impressão 3D. O biomodelo em ABS foi confeccionado (Figura 97 e 98). Na fase 2, o biomodelo 3D (caso 6) foi submetido à TC e as medidas nas imagens de ATC do paciente (Figuras 99 e 101) foram confrontadas com as medidas obtidas nas imagens de TC do biomodelo (Figuras 100 e 102). As medidas encontram-se resumidas na Tabela 12. Na fase 3, o pesquisador e um neurocirurgião receberam o biomodelo completo (Figuras 103 e 104), juntamente com o biomodelo de borracha oco acoplado ao sistema de circulação artificial. A

seguir, ocorreu a etapa de escolha dos cliques (Figura 105 e 106), cujas características estão ilustradas na Tabela 13. Ao final dessa, observou-se que as características dimensionais do clipe metálico eleito no planejamento foram semelhantes às características do clipe utilizado na cirurgia. O clipe utilizado pode ser comprovado pela cirurgia (Figura 107) e pelos exames de imagem pós-operatórios (Figuras 108 e 109). O tempo operatório total foi de 230 min.

Figura 97 - Aspecto final do biomodelo 3D do paciente do caso 6, visão externa. AI (seta).



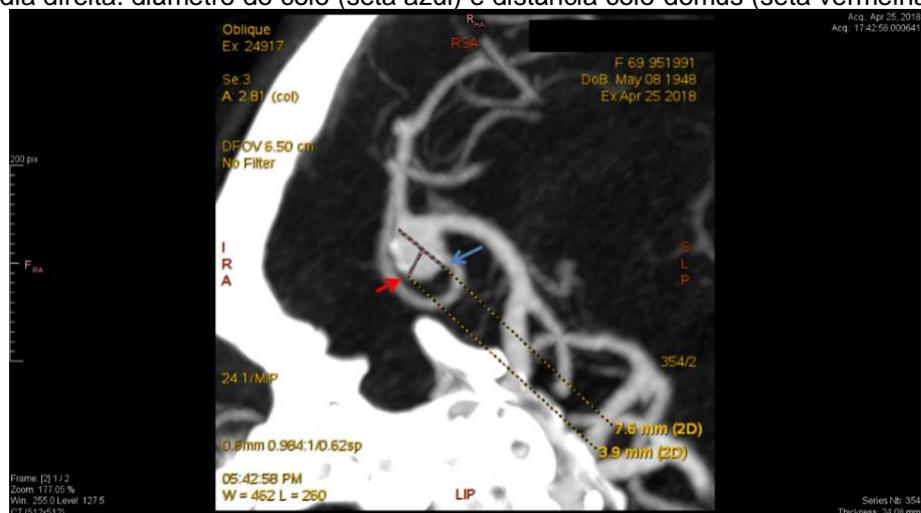
Fonte: o autor, 2017.

Figura 98 - Aspecto final do biomodelo 3D do paciente do caso 6, visão interior. AI (seta).



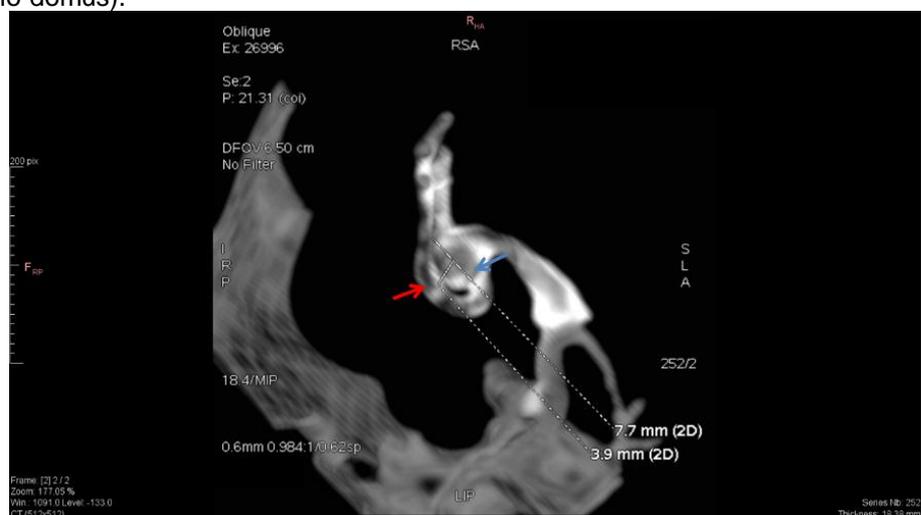
Fonte: o autor, 2017.

Figura 99 - Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 6, ilustrando as medidas do AI na artéria cerebral média direita: diâmetro do colo (seta azul) e distância colo-domus (seta vermelha).



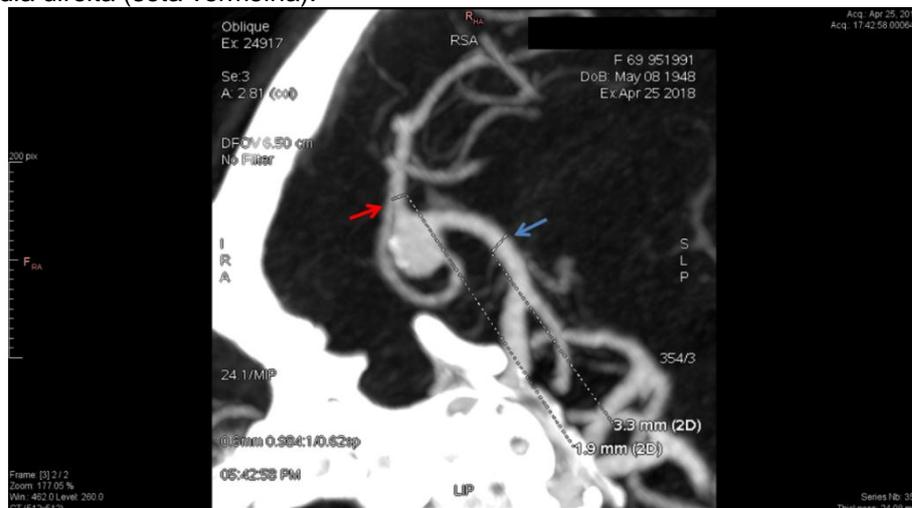
Fonte: o autor, 2017.

Figura 100 - Imagem de TC do biomodelo (caso 6), ilustrando as dimensões do AI (diâmetro do colo e distância colo-domus).



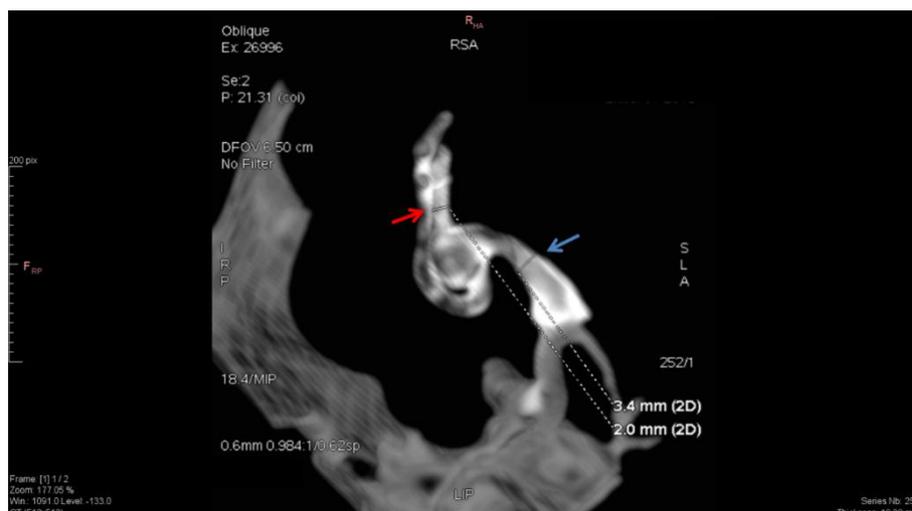
Fonte: o autor, 2017.

Figura 101 - Imagem de TC do biomodelo 3D do paciente do caso 6, ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta azul) e tronco superior da artéria cerebral média direita (seta vermelha).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 102 - Imagem de TC do biomodelo (caso 6), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta azul) e tronco superior da artéria cerebral média direita (seta vermelha).



Fonte: o autor, 2017.

Tabela 12 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do caso 6 e o erro relativo encontrado (%).

Medidas	Diâmetro do colo (mm)	Distância colo-domus (mm)	Diâmetro da artéria cerebral média (mm)	Diâmetro do tronco superior da artéria cerebral média (mm)
Paciente 6	7,6	3,9	3,3	1,9
Biomodelo 6	7,7	3,9	3,4	2,0
Erro (%)	1,3	0,0	3,0	5,3

Figura 103 - Posição cirúrgica do biomodelo (caso 6) completo para a realização da Fase 3 desta pesquisa, onde a seta indica o AI.



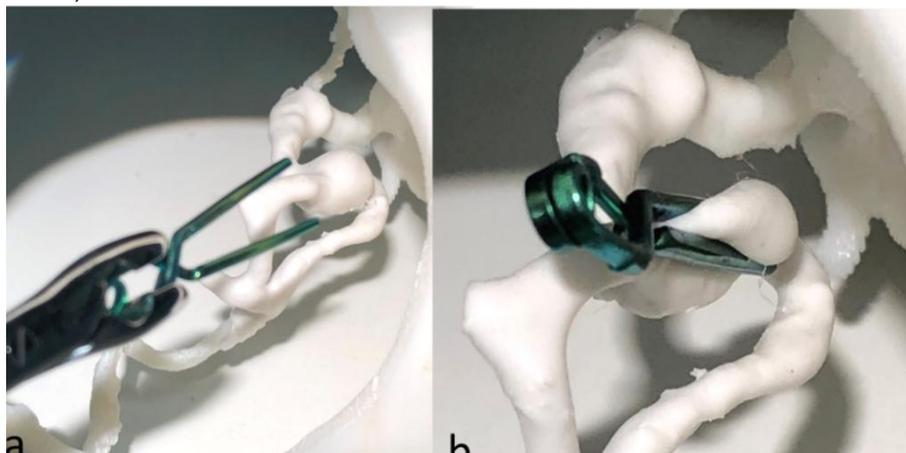
Fonte: o autor, 2017.

Figura 104 - Imagem mostrando o aneurisma do biomodelo (caso 6) no microscópio cirúrgico.



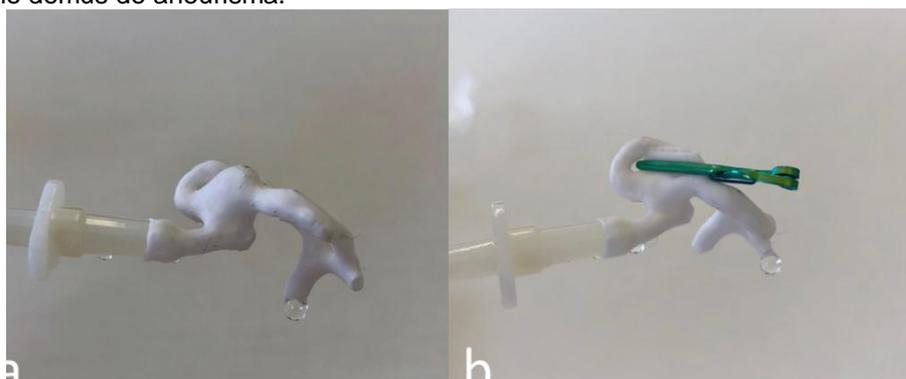
Fonte: o autor, 2017.

Figura 105 - Ilustração do clipe metálico antes (a) e após (b) a aplicação no colo do aneurisma do biomodelo (caso 6).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 106 - Sistema de circulação com soro fisiológico acoplado ao molde de borracha de silicone do biomodelo (caso 6) (a). Após a aplicação do clipe, não se constatou saída de soro fisiológico pela perfuração no domus do aneurisma.



Fonte: o autor, 2017.

Tabela 13 - Característica dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo (caso 6) na fase 3 deste estudo.

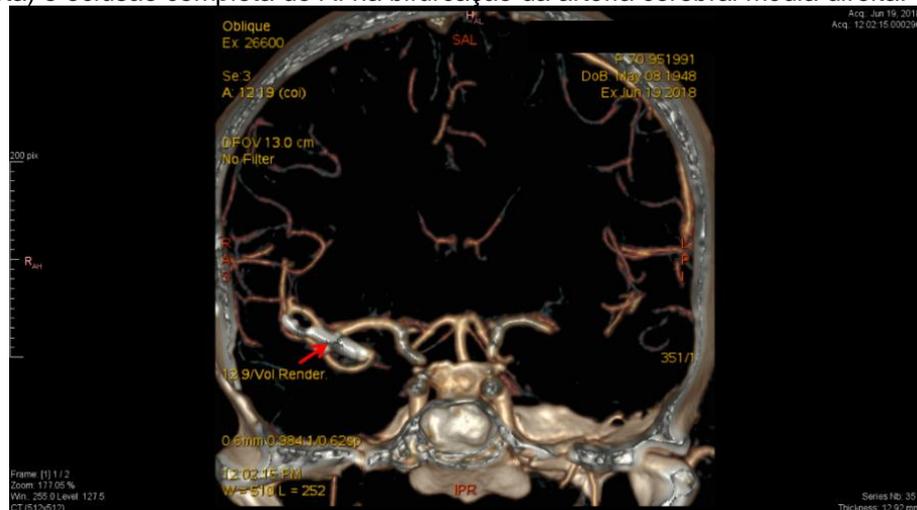
	Formato	Tamanho (mm)	Quantidade
Autor	Reto	5	1
Neurocirurgião	Reto	5	1

Figura 107 - Imagem cirúrgica, acesso fronto-temporal, ilustrando o clipe cirúrgico (seta azul) e oclusão completa do AI na bifurcação da artéria cerebral média (seta branca).



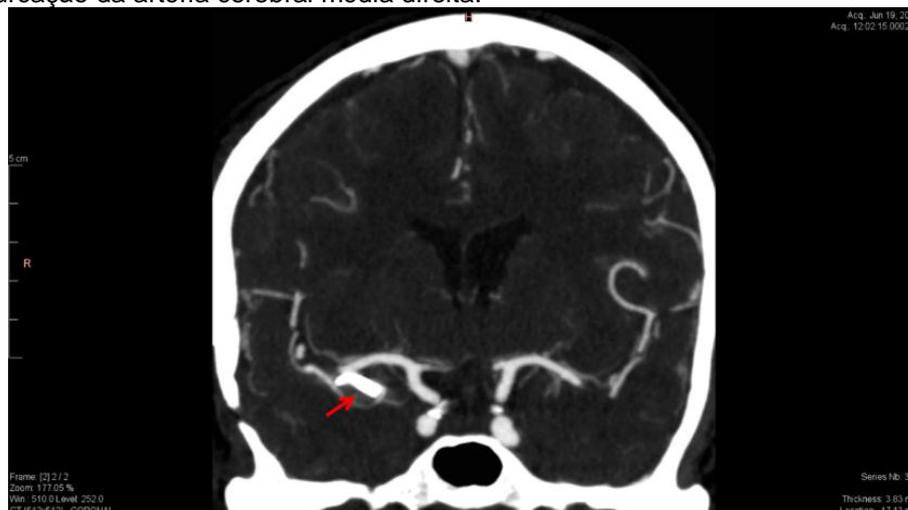
Fonte: o autor, 2017.

Figura 108 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, pós-operatória, ilustrando o clipe cirúrgico (seta) e oclusão completa do AI na bifurcação da artéria cerebral média direita.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 109 - Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o clipe (seta) utilizado para oclusão do AI na bifurcação da artéria cerebral média direita.

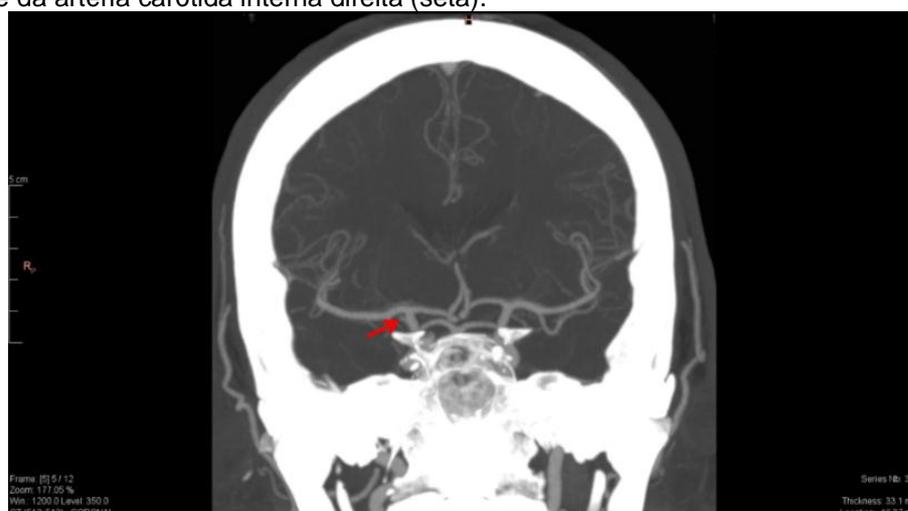


Fonte: o autor, 2017.

Caso 7

O sétimo voluntário era do sexo masculino, 64 anos, com queixa de vertigem refratária. Veio encaminhado ao hospital com o diagnóstico de AI incidental no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (Figuras 110, 111 e 112), identificado pelo exame de ARM. O AI possuía as seguintes dimensões: 2,6 mm de diâmetro de colo e 3,1 mm de distância entre o colo e o *domus*.

Figura 110 - Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o aneurisma no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (seta).



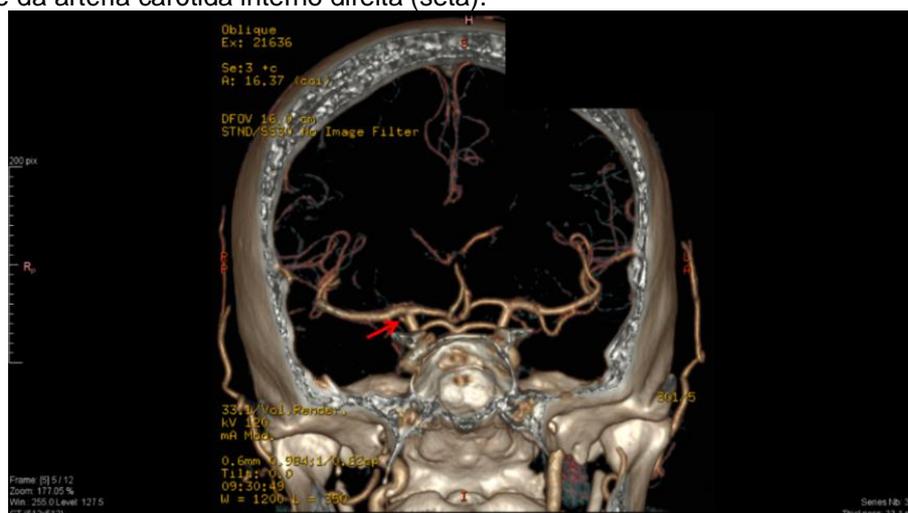
Fonte: o autor, 2017.

Figura 111 - Imagem de ATC cerebral, reconstrução na posição oblíqua para melhor visualização do AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (seta).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 112 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, ilustrando o AI no segmento comunicante da artéria carótida interno direita (seta).



Fonte: o autor, 2017.

O biomodelo em ABS foi confeccionado da mesma forma que os casos anteriores (Figura 113 e 114). A seguir, foi submetido à TC e as medidas nas imagens de ATC do paciente (Figuras 115 e 116) foram confrontadas com as medidas obtidas nas imagens de TC do biomodelo (Figuras 117 e 118). As medidas estão resumidas na Tabela 14. Para a terceira fase metodológica, o pesquisador e um neurocirurgião receberam o biomodelo para a escolha dos cliques (Figura 119 e 120), cujas características estão ilustradas na Tabela 15. Ao final dessa, observou-se que as características dimensionais do clipe metálico eleito no planejamento foram semelhantes às características do clipe utilizado na cirurgia. O tempo

operatório total foi de 185 min. O clipe utilizado pode ser comprovado pela cirurgia (Figura 121) e pelos exames de imagem pós-operatórios (Figuras 122).

Figura 113 - Aspecto final do biomodelo 3D do paciente do caso 7, visão externa. Aneurisma intracraniano (seta).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 114 - Aspecto final do biomodelo 3D do paciente do caso 7, visão interior. Aneurisma intracraniano (seta).



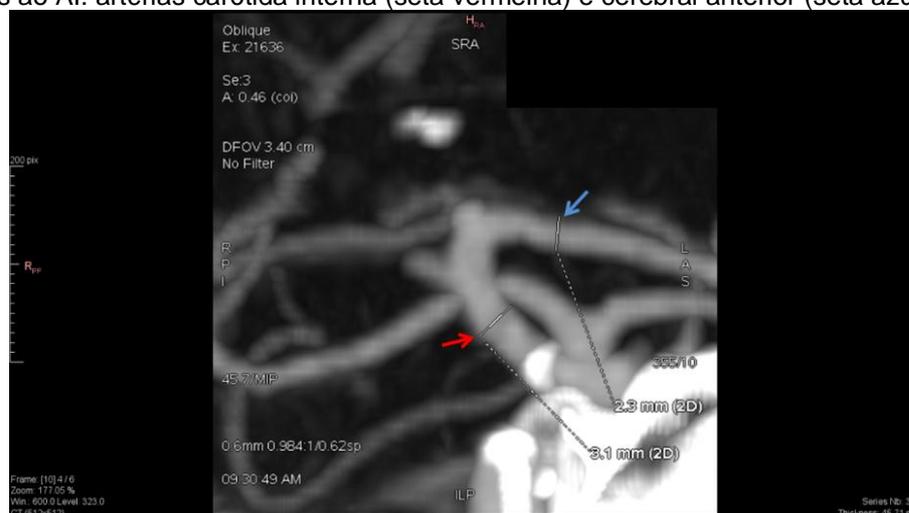
Fonte: o autor, 2017.

Figura 115 - Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 7, ilustrando as medidas do AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (diâmetro do colo e distância colo-domus).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 116 - Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 7 ilustrando as dimensões das artérias relacionadas ao AI: artérias carótida interna (seta vermelha) e cerebral anterior (seta azul).



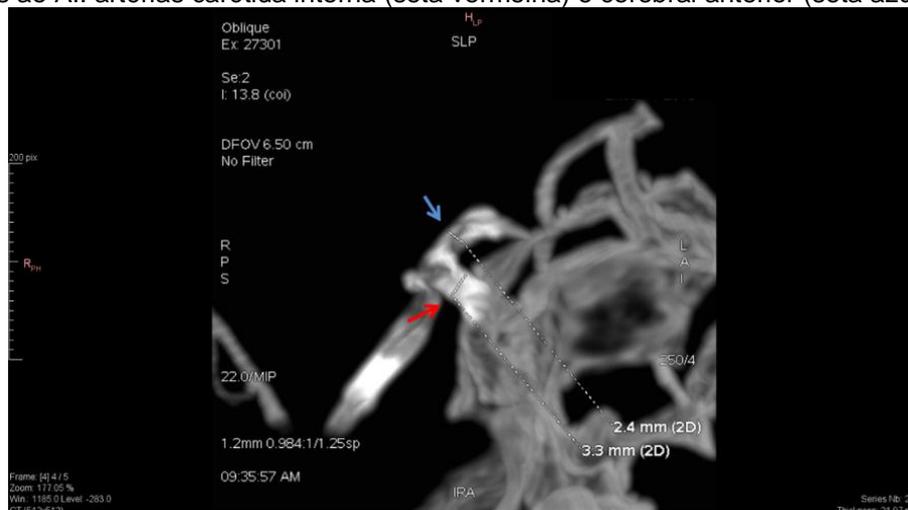
Fonte: o autor, 2017.

Figura 117 - Imagem de TC do biomodelo 3D (caso 7), ilustrando as medidas do AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (diâmetro do colo e distância colo-domus).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 118 - Imagem de TC do biomodelo 3D (caso 7), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artérias carótida interna (seta vermelha) e cerebral anterior (seta azul).

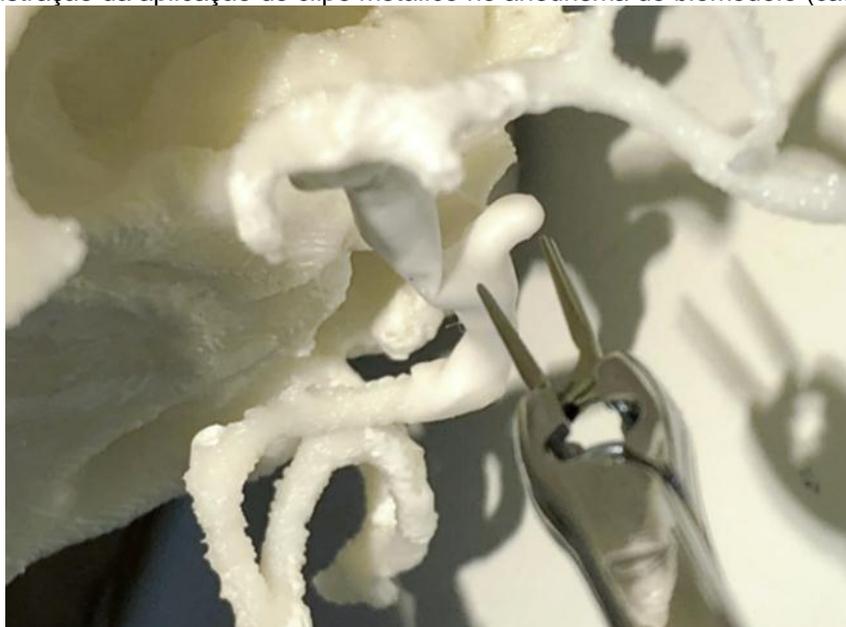


Fonte: o autor, 2017.

Tabela 14 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do sétimo caso e o erro relativo encontrado (%).

Medidas	Diâmetro do colo (mm)	Distância colodoma (mm)	Diâmetro da artéria carótida interna (mm)	Diâmetro da artéria cerebral anterior (mm)
Paciente 7	2,6	3,1	3,1	2,3
Biomodelo 7	2,7	3,1	3,3	2,4
Erro (%)	3,8	0,0	6,5	4,3

Figura 119 - Ilustração da aplicação do clipe metálico no aneurisma do biomodelo (caso 7).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 120 - Ilustração do clipe metálico aplicado no colo do aneurisma do biomodelo (caso 7).

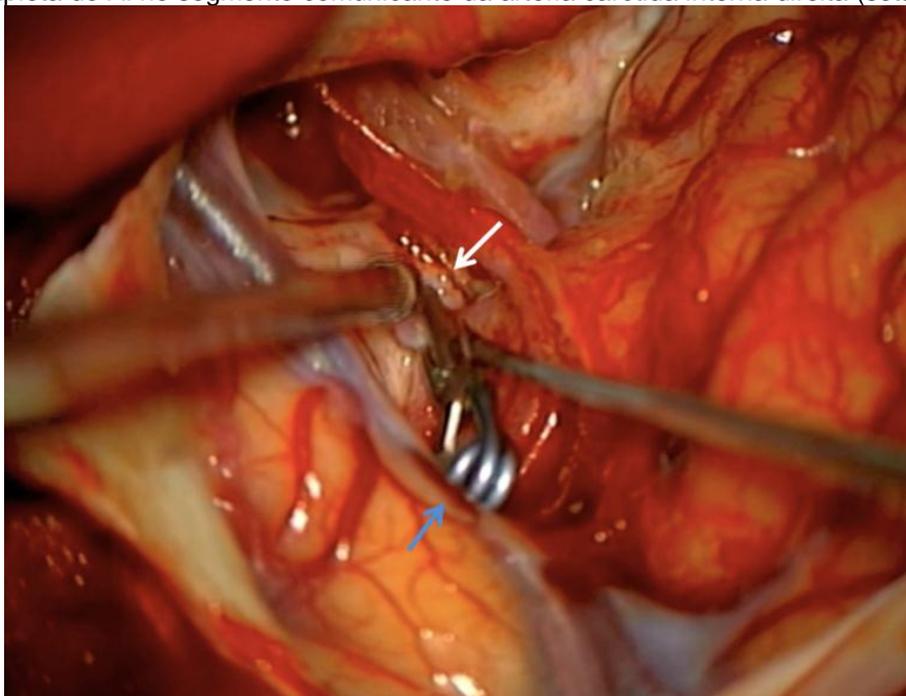


Fonte: o autor, 2017.

Tabela 15 – Características dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo 3D do paciente do caso 7, na fase 3 deste estudo

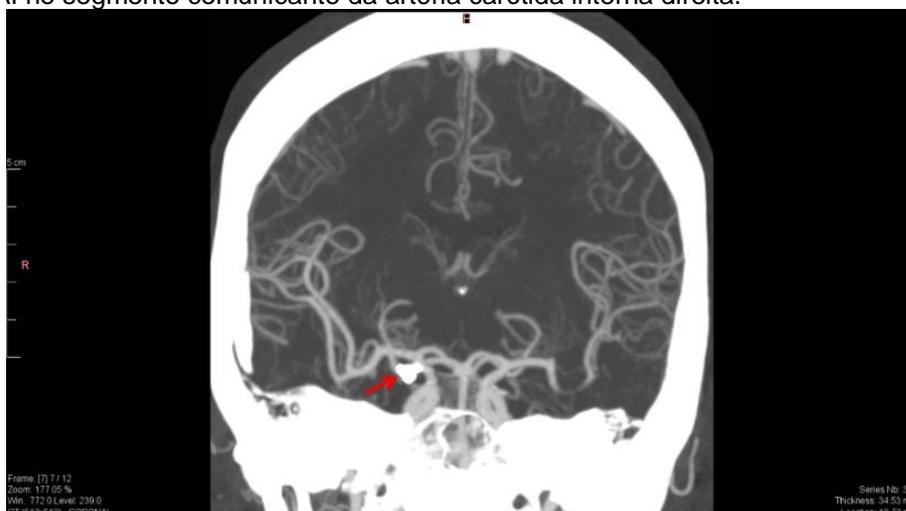
	Formato	Tamanho	Quantidade
Autor	Reto	5mm	1
Neurocirurgião	Reto	5mm	1

Figura 121 - Imagem cirúrgica, acesso fronto-temporal, ilustrando o clipe cirúrgico (seta azul) e oclusão completa do AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (seta branca).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 122 - Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o clipe metálico (seta) utilizado para oclusão do AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita.



Fonte: o autor, 2017.

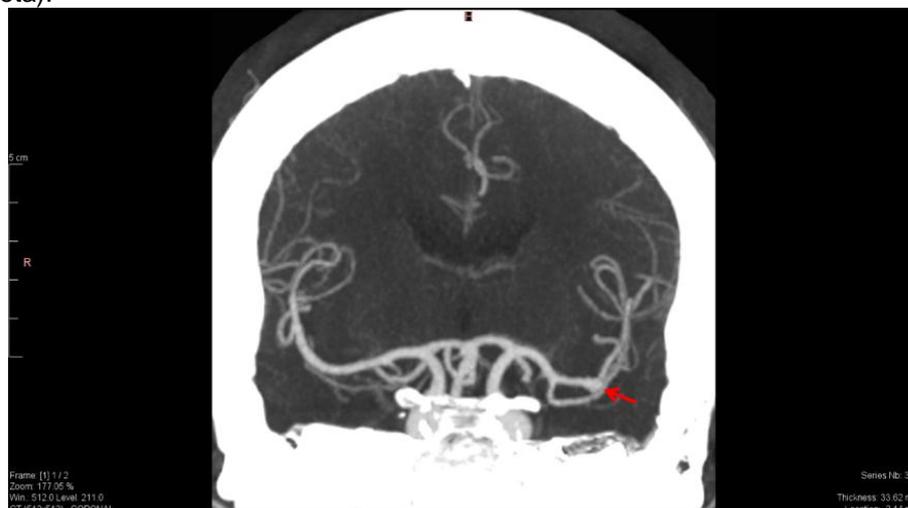
Caso 8

Trata-se de um voluntário do sexo feminino, 63 anos, com história de cefaleia súbita. Após entrada no pronto atendimento, foi submetida a uma TC de crânio, que não identificou sangramento. Foi investigada, posteriormente, com ATC cerebral, o qual identificou um AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (Figuras

123, 124 e 125). O AI possuía as seguintes dimensões: 3,8 mm de diâmetro de colo e 2,4 mm de distância entre o colo e o *domus*.

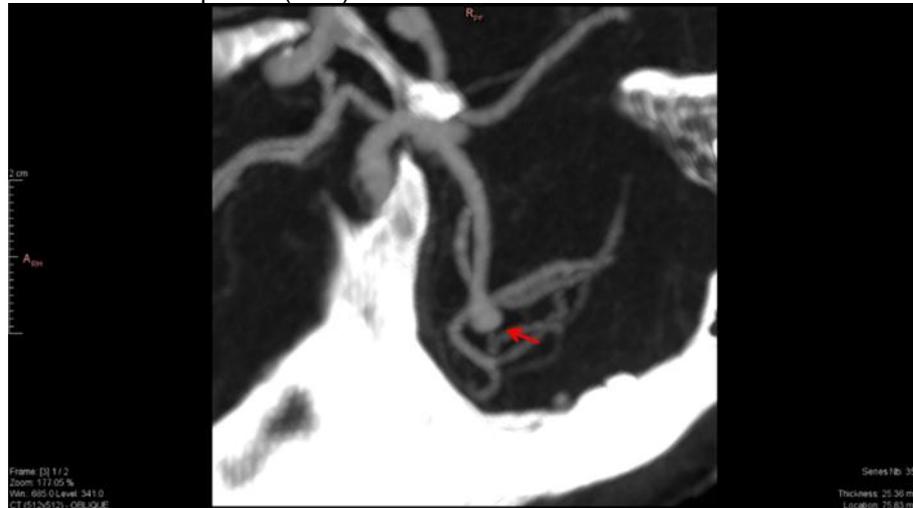
O biomodelo em ABS foi confeccionado da mesma forma que os casos anteriores (Figura 126 e 127). A seguir, o biomodelo foi submetido à TC e as suas medidas foram comparadas com as medidas nas imagens de ATC do paciente (Figuras 128, 129, 130 e 131). O resumo das medidas encontra-se na Tabela 16. Para a terceira fase metodológica, o pesquisador e um neurocirurgião receberam o biomodelo para a escolha dos cliques (Figura 132, 133, 134 e 135), cujas características estão ilustradas na Tabela 17. Ao final dessa etapa, observou-se que as características dimensionais do clipe metálico eleito no planejamento foram semelhantes às características do clipe utilizado na cirurgia. O tempo operatório total foi de 205 min. O clipe utilizado pode ser comprovado pela cirurgia (Figura 136) e pelos exames de imagem pós-operatórios (Figuras 137 e 138).

Figura 123 - Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o AI na artéria cerebral média esquerda (seta).



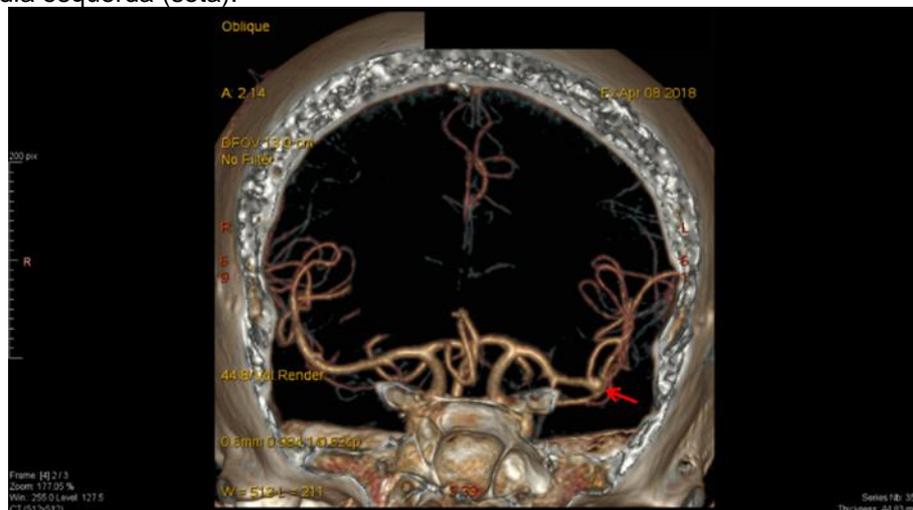
Fonte: o autor, 2017.

Figura 124 - Imagem de ATC cerebral, reconstrução em oblíquo para melhor definição do aneurisma na artéria cerebral média esquerda (seta).



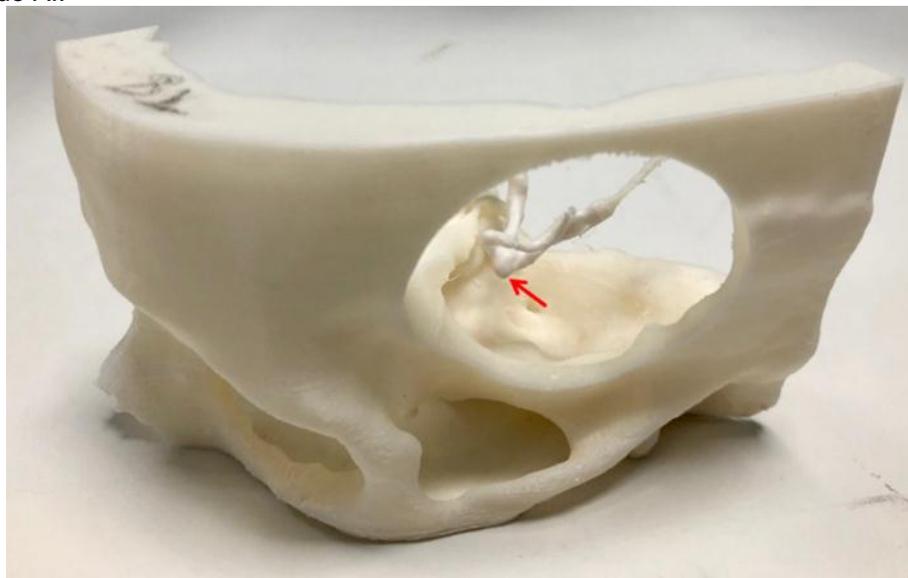
Fonte: o autor, 2017.

Figura 125 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D ilustrando o AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda (seta).



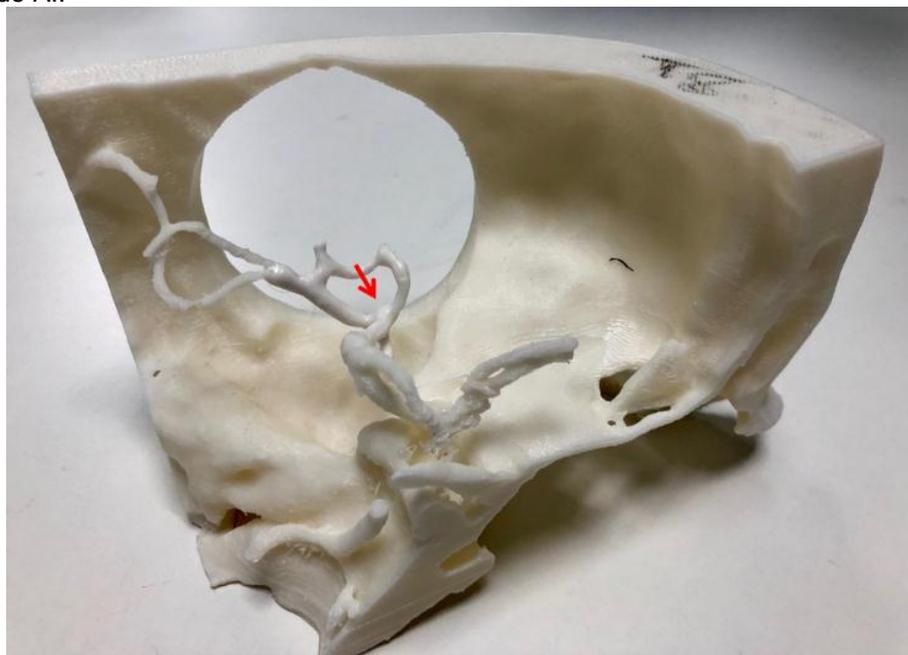
Fonte: o autor, 2017.

Figura 126 - Aspecto final do biomodelo 3D (caso 8), visão a partir do exterior. A seta indica a localização do AI.



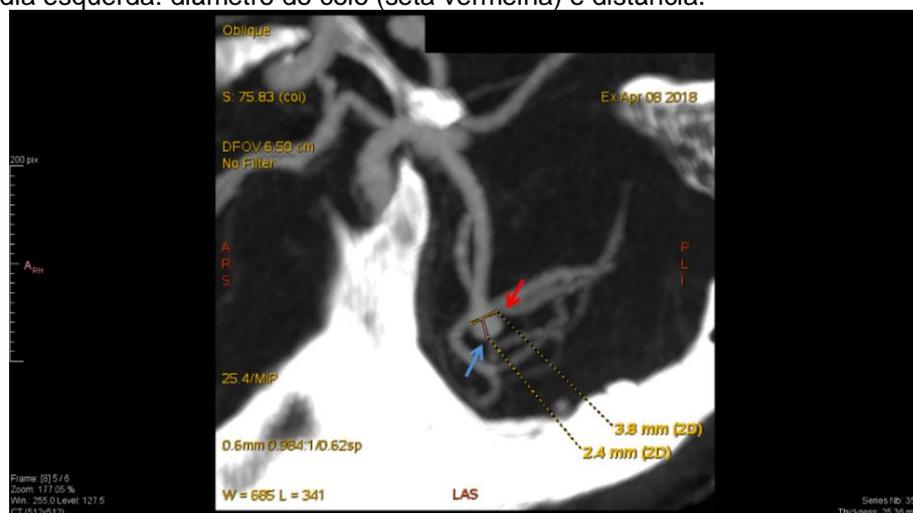
Fonte: o autor, 2017.

Figura 127 - Aspecto final do biomodelo 3D (caso 8), visão a partir do interior. A seta indica a localização do AI.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 128 - Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 8, ilustrando as medidas do AI na artéria cerebral média esquerda: diâmetro do colo (seta vermelha) e distância.



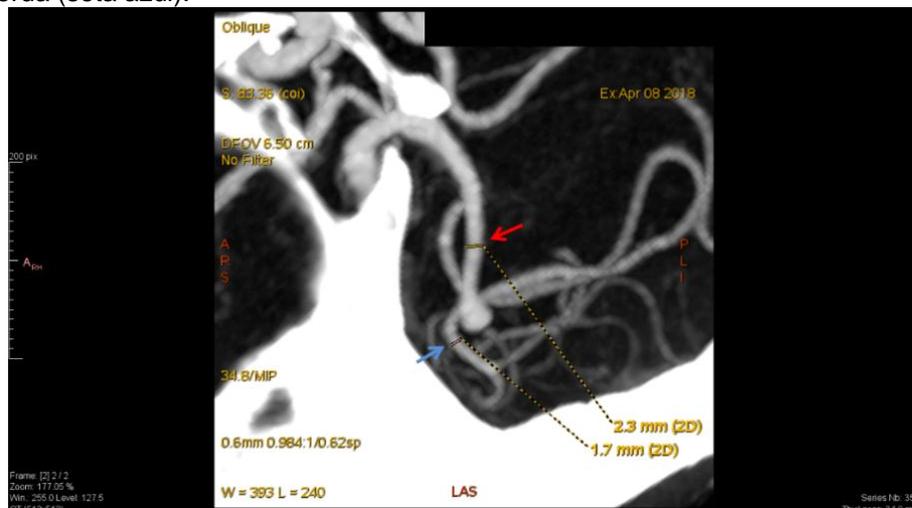
Fonte: o autor, 2017.

Figura 129 - Imagem de TC do biomodelo (caso 8), ilustrando as dimensões do AI diâmetro do colo (seta vermelha) e distância colo-domus (seta azul).



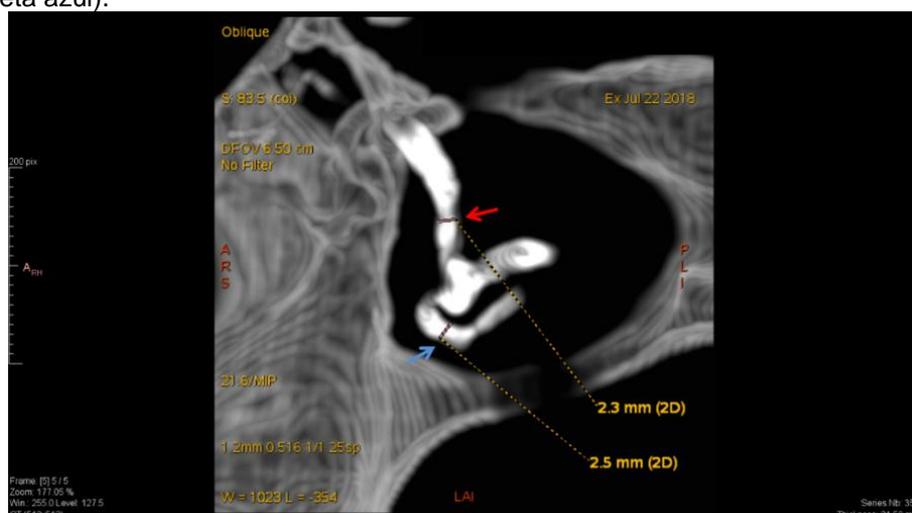
Fonte: o autor, 2017.

Figura 130 - Imagem de TC do biomodelo 3D (caso 8), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta vermelha) e tronco inferior da artéria cerebral média esquerda (seta azul).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 131 - Imagem de TC do biomodelo (caso 8), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta vermelha) e tronco inferior da artéria cerebral média esquerda (seta azul).



Fonte: o autor, 2017.

Tabela 16 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D (caso 8) e o erro relativo encontrado (%).

Medidas	Diâmetro do colo (mm)	Distância colo-domus (mm)	Diâmetro da artéria cerebral média (mm)	Diâmetro do tronco inferior da artéria cerebral média (mm)
Paciente 8	3,8	2,4	2,3	1,7
Biomodelo 8	3,9	2,4	2,3	2,5
Erro (%)	2,6	0,0	0,0	47,1

Figura 132 - Posição cirúrgica do biomodelo (caso 8) para a realização da Fase 3 desta pesquisa. A seta indica a localização do AI.



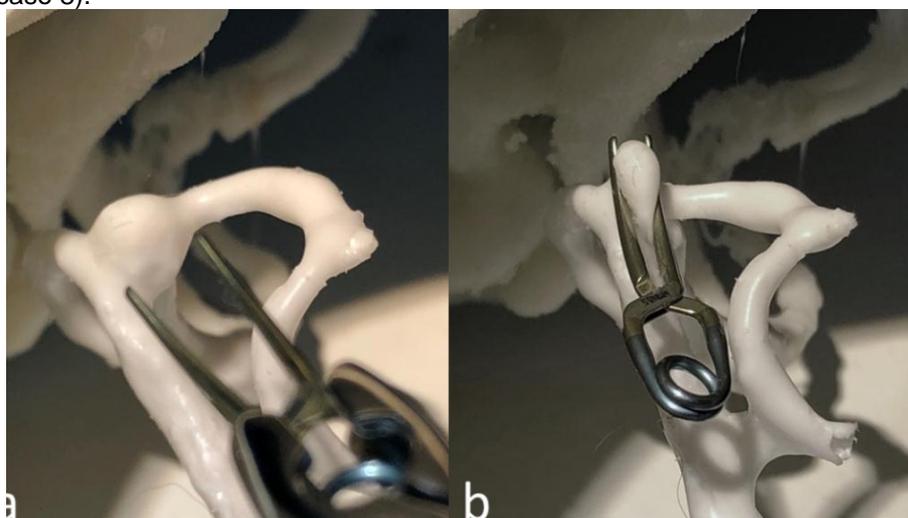
Fonte: o autor, 2017.

Figura 133 - Imagem ilustrando o aneurisma (seta) do biomodelo (caso 8) no microscópio cirúrgico.



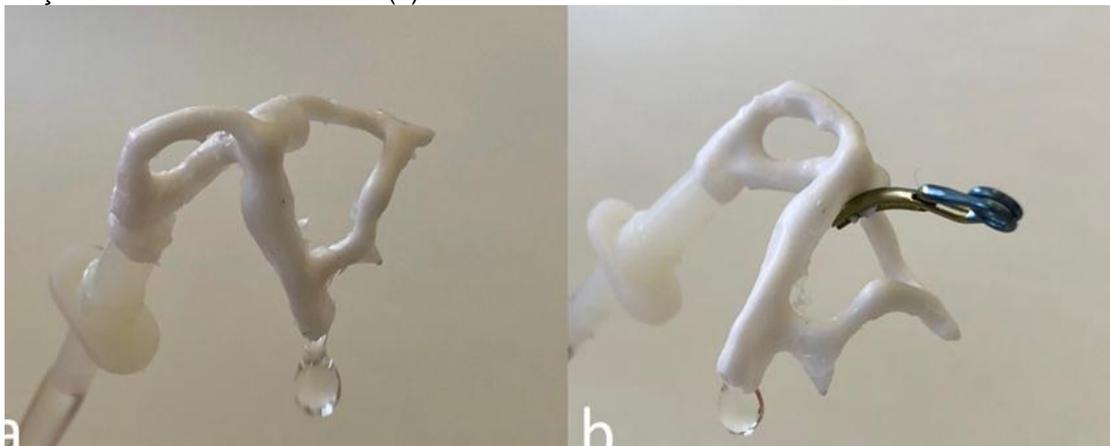
Fonte: o autor, 2017.

Figura 134 - Ilustração do clipe metálico antes (a) e após (b) a aplicação no colo do aneurisma do biomodelo (caso 8).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 135 - Sistema de circulação com soro fisiológico acoplado ao molde de borracha de silicone do biomodelo (caso 8) (a). Após a aplicação do clipe, não se constatou saída de soro fisiológico pela perfuração no domus do aneurisma (b).

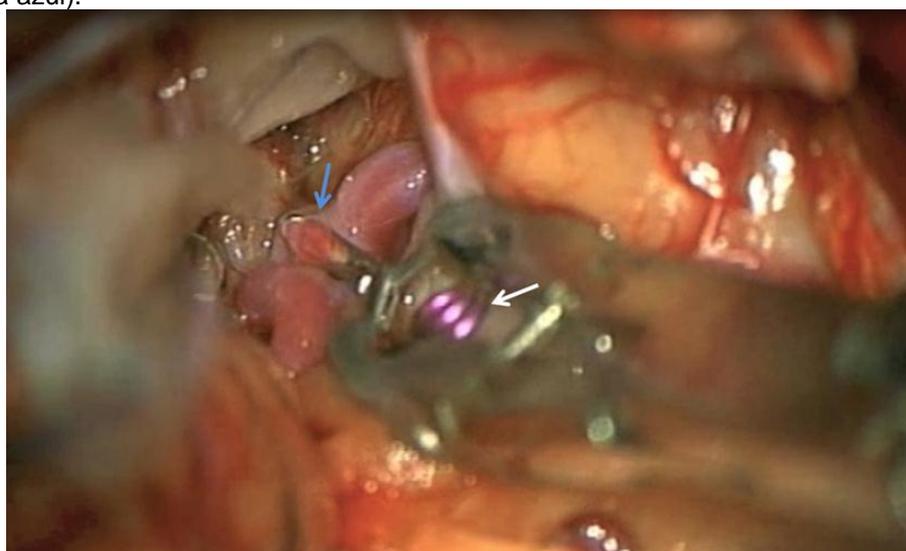


Fonte: o autor, 2017.

Tabela 17 - Características dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo (caso 8) na fase 3 deste estudo.

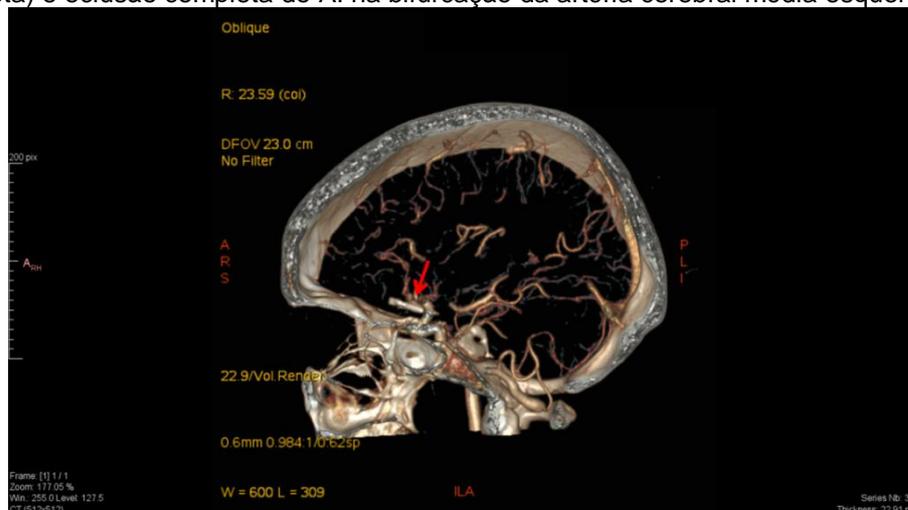
	Formato	Tamanho (mm)	Quantidade
Autor	curvo	5 mm	1
Neurocirurgião	curvo	5 mm	1

Figura 136 - Imagem cirúrgica, acesso fronto-temporal, ilustrando o clipe cirúrgico (seta branca) e o AI ocluído (seta azul).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 137 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, pós-operatória, mostrando o clipe cirúrgico (seta) e oclusão completa do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 138 - Imagem de ATC cerebral, corte coronal, mostrando o clipe (seta) utilizado para oclusão do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda.

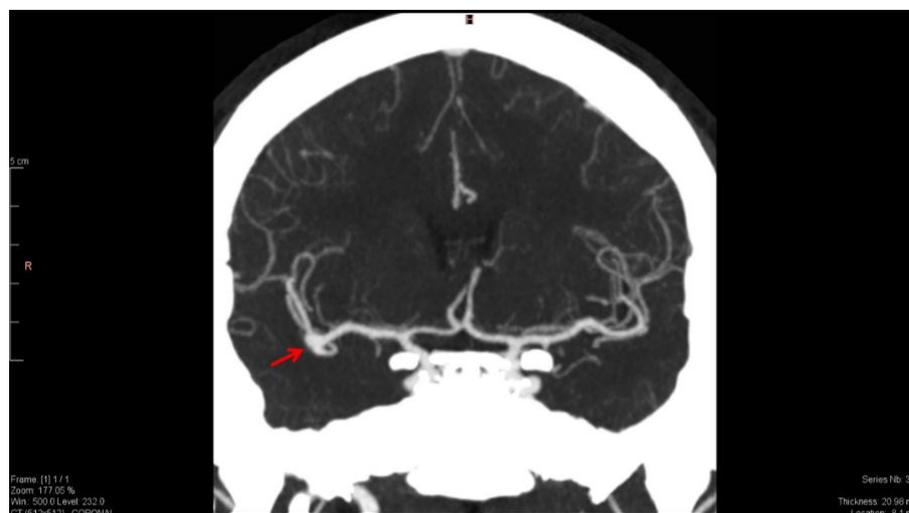


Fonte: o autor, 2017.

Caso 9

Trata-se de voluntário do sexo feminino, 55 anos, com história de vertigem e cefaleia refratária, foi submetida à RNM do crânio que identificou um AI na bifurcação da artéria cerebral média direita (Figura 139, 140 e 141). O AI possuía as seguintes dimensões: 4,8 mm de diâmetro de colo e 2,5 mm de distância entre o colo e o *domus*. As imagens DICOM da ACT cerebral (Figura 139) foram processadas e preparadas para a impressão 3D. Foram confeccionados o biomodelo em ABS (Figura 142 e 143) e seus respectivos modelos em borracha de silicone, assim como nos estudos dos casos anteriores.

Figura 139 - Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o AI na artéria cerebral média direita (seta).



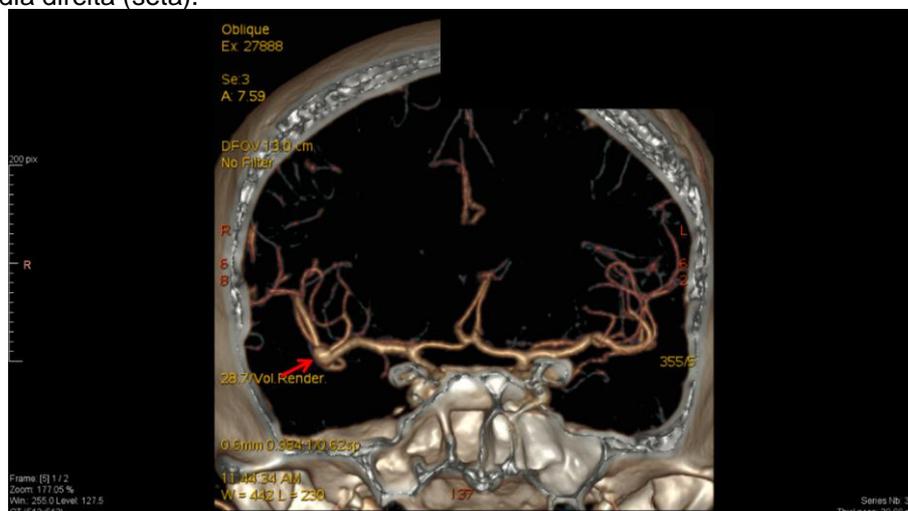
Fonte: o autor, 2017.

Figura 140 - Imagem de ATC cerebral, reconstrução em oblíquo para melhor definição do aneurisma na artéria cerebral média direita (seta).



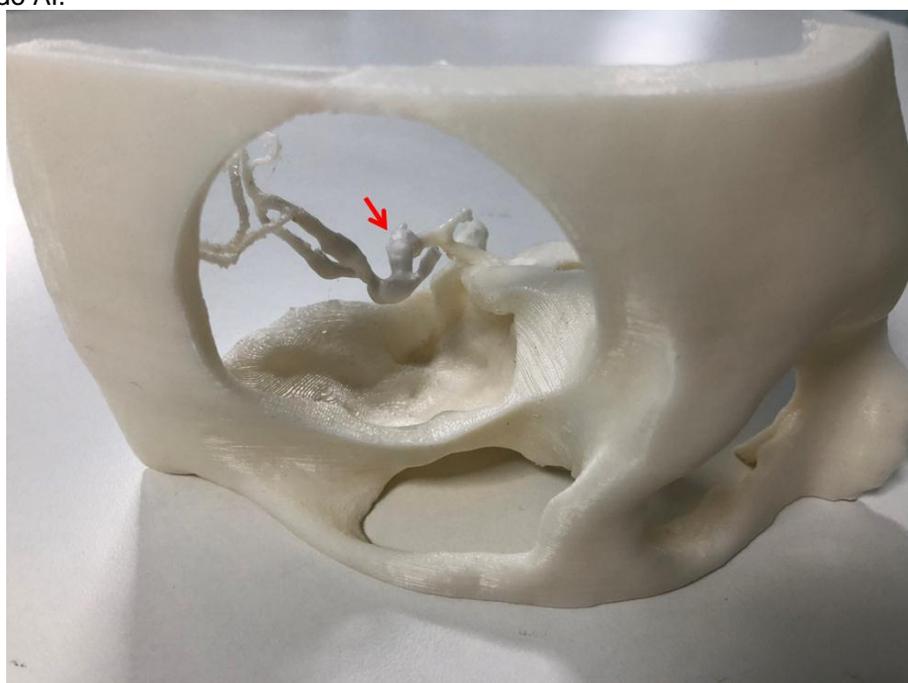
Fonte: o autor, 2017.

Figura 141 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D ilustrando o AI na bifurcação da artéria cerebral média direita (seta).



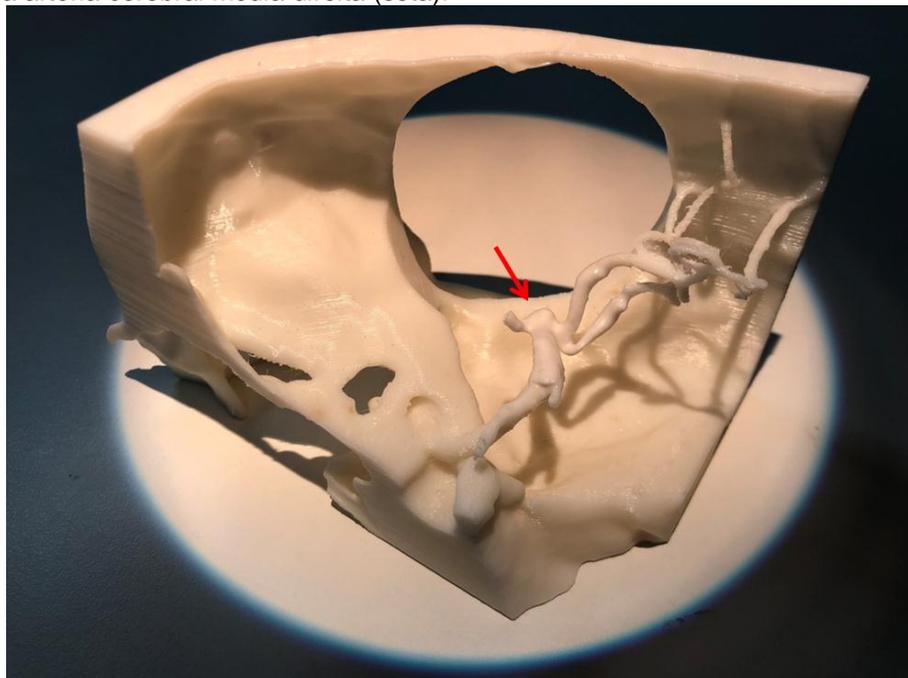
Fonte: o autor, 2017.

Figura 142 - Aspecto final do biomodelo 3D (caso 9), visão pelo lado externo. A seta indica a localização do AI.



Fonte: o autor, 2017.

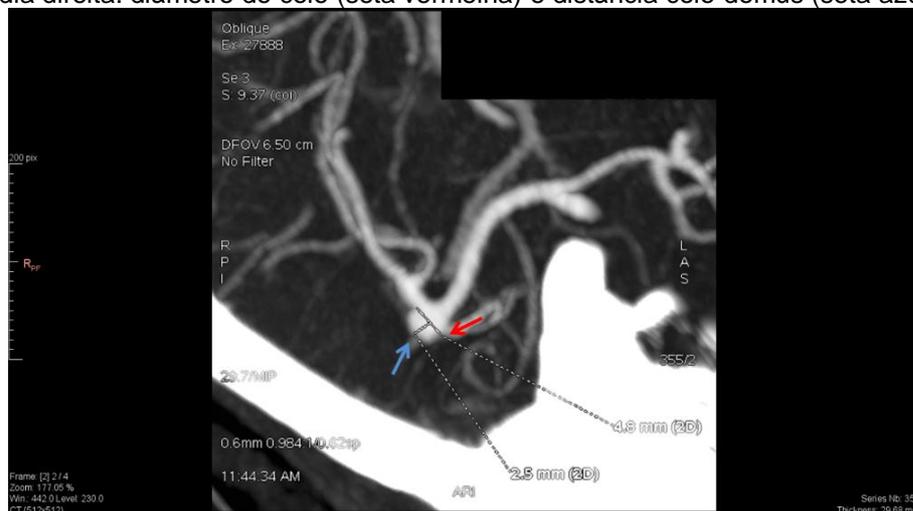
Figura 143 - Aspecto final do biomodelo 3D (caso 9), visão pelo lado interior. Al encontra-se na bifurcação da artéria cerebral média direita (seta).



Fonte: o autor, 2017.

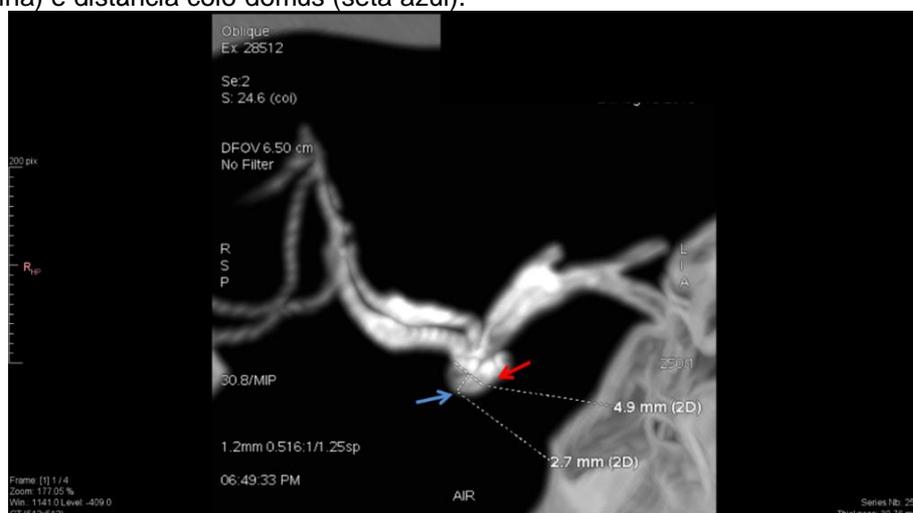
Na segunda fase metodológica, o biomodelo 3D (caso 9) foi submetido à TC. As medidas nas imagens de ATC do paciente (Figuras 144 e 146) foram confrontadas com as medidas obtidas nas imagens de TC do biomodelo (Figuras 145 e 147) e estão resumidas na Tabela 18. Na fase 3, o pesquisador e um neurocirurgião receberam o biomodelo completo (Figuras 148 e 149). A seguir, ocorreu a etapa de escolha dos cliques (Figura 150 e 151), cujas características estão ilustradas na Tabela 19. O tempo operatório total foi de 220 min. Utilizou-se o DMP para avaliar a efetividade da clipagem (Figura 152). O clipe utilizado pode ser comprovado pelos exames de imagem pós-operatórios (Figuras 153 e 154).

Figura 144 - Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 9 ilustrando as medidas do AI na artéria cerebral média direita: diâmetro do colo (seta vermelha) e distância colo-domus (seta azul).



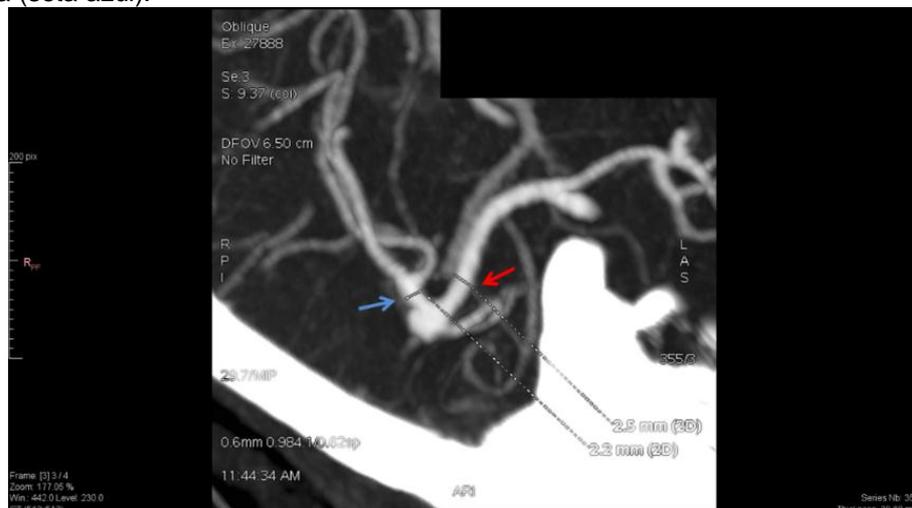
Fonte: o autor, 2017.

Figura 145 - Imagem de TC do biomodelo (caso 9), ilustrando as dimensões do AI: diâmetro do colo (seta vermelha) e distância colo-domus (seta azul).



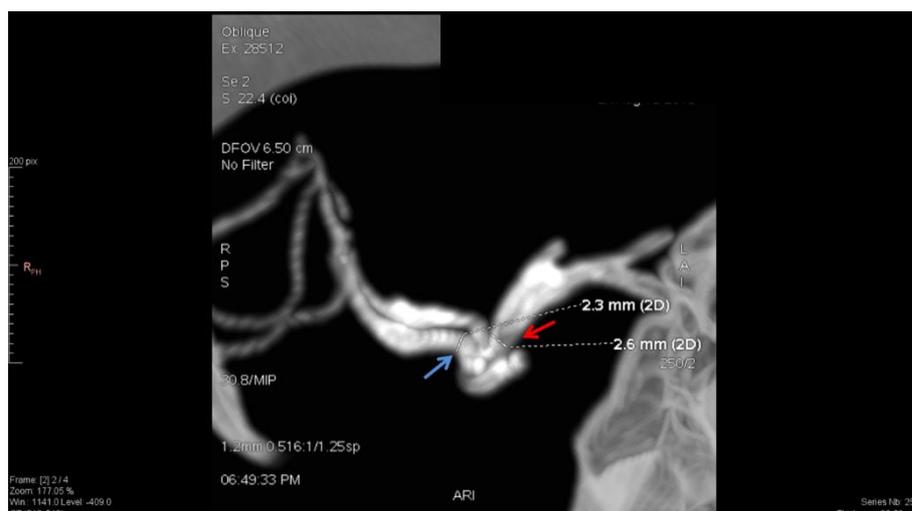
Fonte: o autor, 2017.

Figura 146 - Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 9, ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta vermelha) e tronco superior da artéria cerebral média direita (seta azul).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 147 - Imagem de TC do biomodelo (caso 9), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria cerebral média direita (seta vermelha) e tronco superior da artéria cerebral média direita (seta azul).

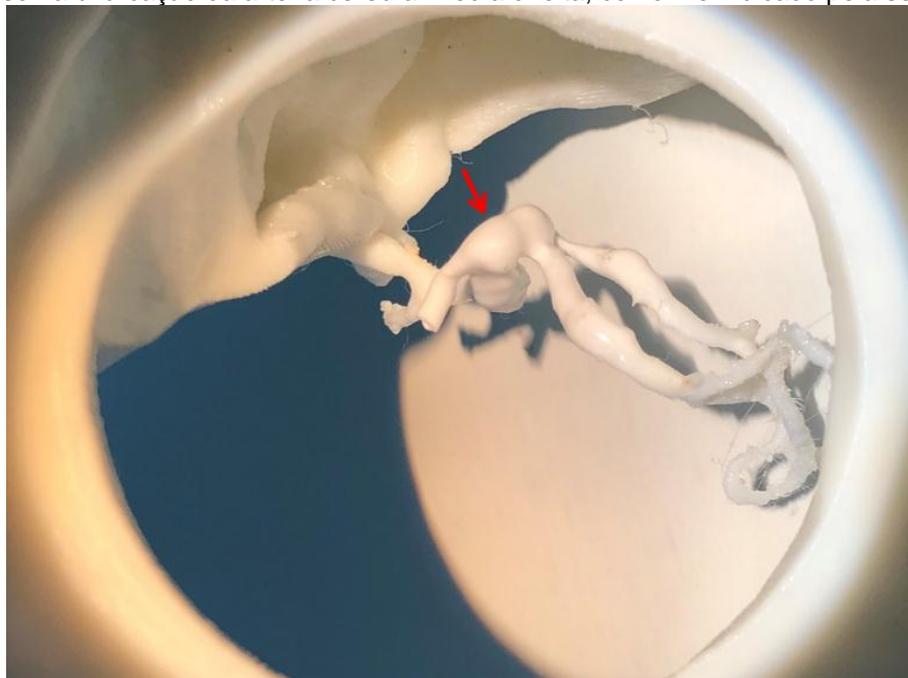


Fonte: o autor, 2017.

Tabela 18 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do caso 9 e o erro relativo encontrado (%).

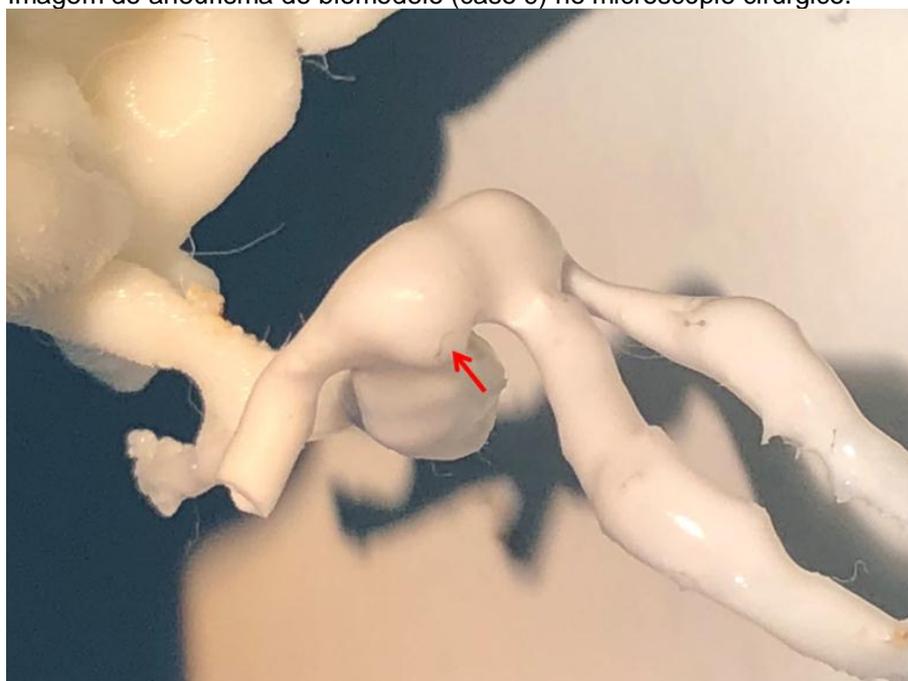
Medidas	Diâmetro do colo (mm)	Distância colododus (mm)	Diâmetro da artéria cerebral média (mm)	Diâmetro do tronco supeior da artéria cerebral média (mm)
Paciente 9	4,8	2,5	2,5	2,2
Biomodelo 9	4,9	2,7	2,6	2,3
Erro (%)	2,1	8,0	4,0	4,5

Figura 148 - Posição cirúrgica do biomodelo (caso 9) para a realização da Fase 3 desta pesquisa. O AI encontra-se na bifurcação da artéria cerebral média direita, conforme indicado pela seta.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 149 - Imagem do aneurisma do biomodelo (caso 9) no microscópio cirúrgico.



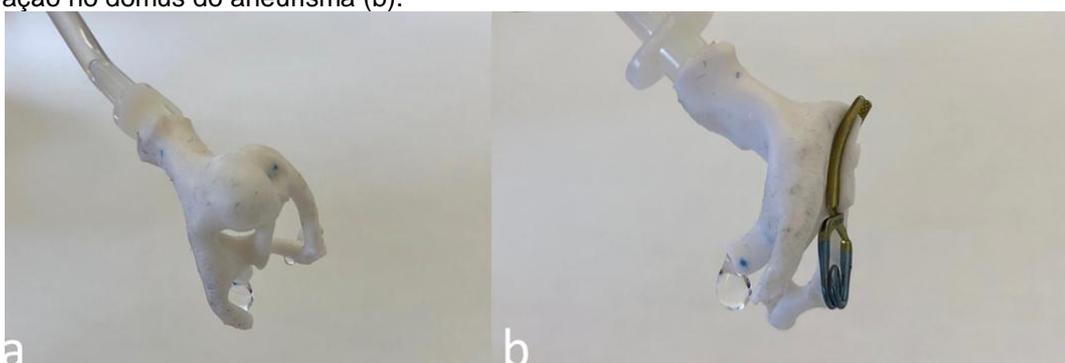
Fonte: o autor, 2017.

Figura 150 - Ilustração do clipe metálico antes (a) e após (b) a aplicação no colo do aneurisma do biomodelo (caso 9).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 151 - Sistema de circulação com soro fisiológico acoplado ao molde de borracha de silicone do biomodelo (caso 9) (a). Após a aplicação do clipe, não se constatou saída de soro fisiológico pela perfuração no domus do aneurisma (b).

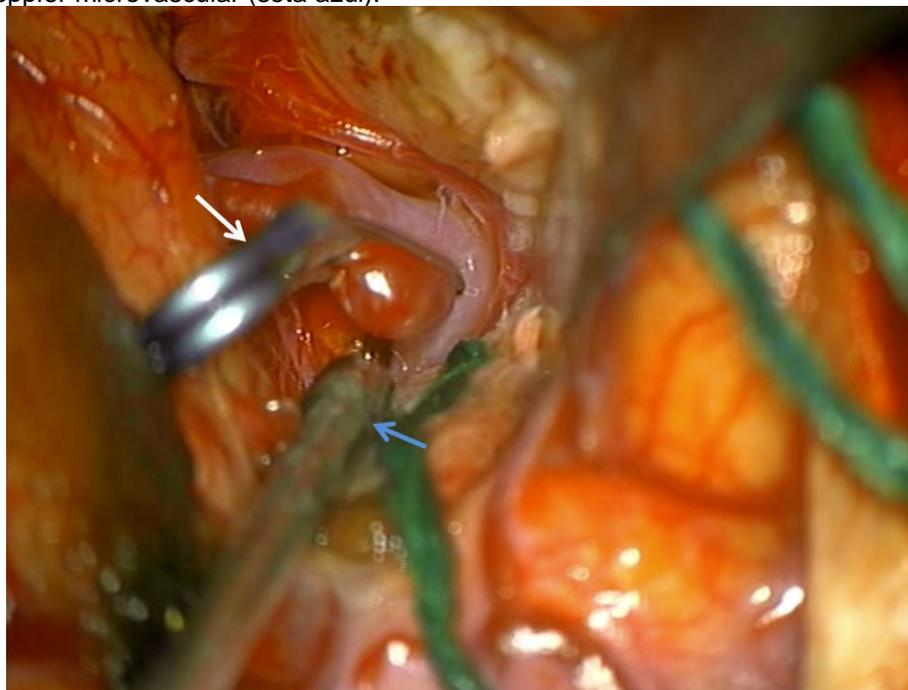


Fonte: o autor, 2017.

Tabela 19 - Características dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo (caso 9) na fase 3 deste estudo.

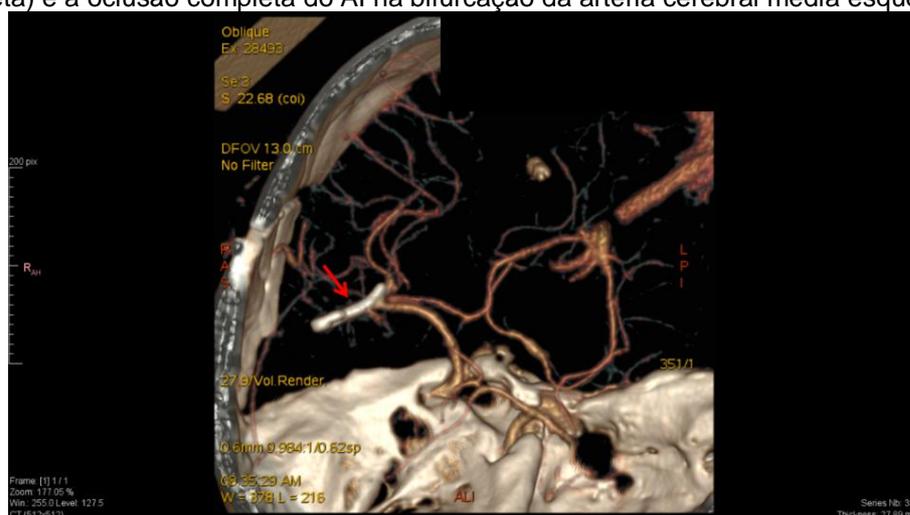
	Formato	Tamanho (mm)	Quantidade
Autor	curvo	7	1
Neurocirurgião	curvo	7	1

Figura 152 - Imagem cirúrgica, acesso fronto-temporal, ilustrando o clipe cirúrgico (seta branca) e a sonda do Doppler microvascular (seta azul).



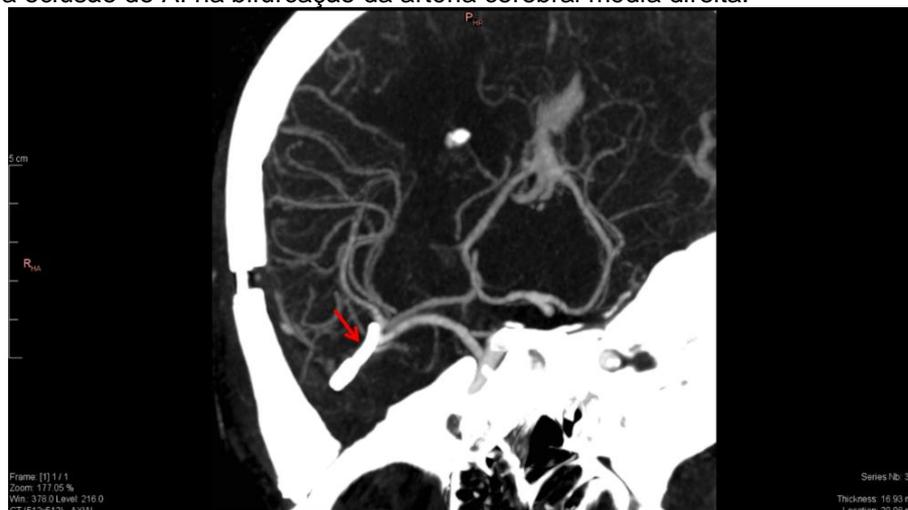
Fonte: o autor, 2017.

Figura 153 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, pós-operatória, ilustrando o clipe cirúrgico (seta) e a oclusão completa do AI na bifurcação da artéria cerebral média esquerda.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 154 - Imagem de ATC cerebral pós-operatória, com reconstrução axial, ilustrando o clipe (seta) utilizado para oclusão do AI na bifurcação da artéria cerebral média direita.

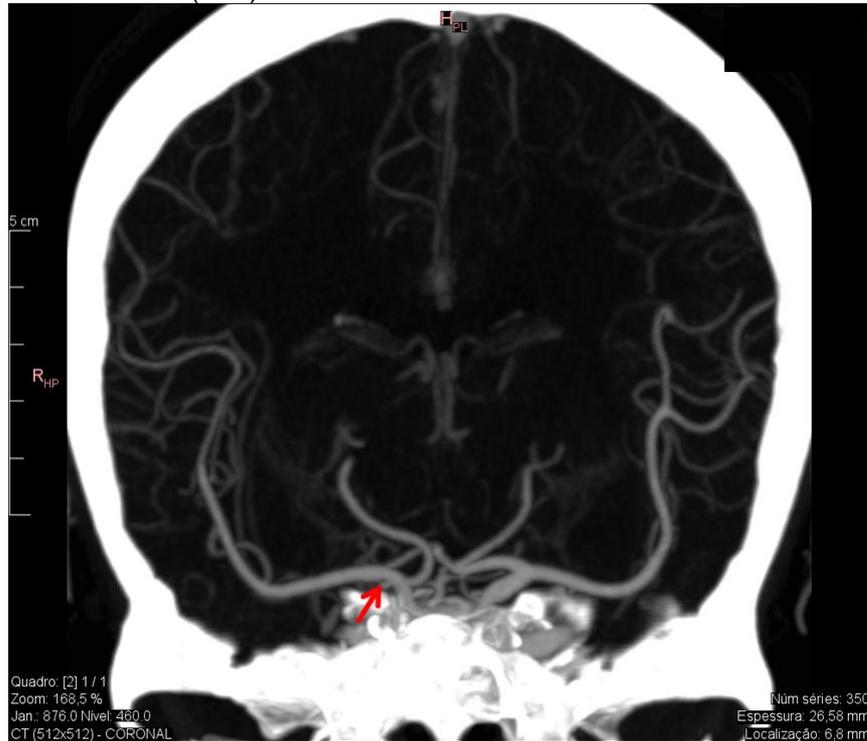


Fonte: o autor, 2017.

Caso 10

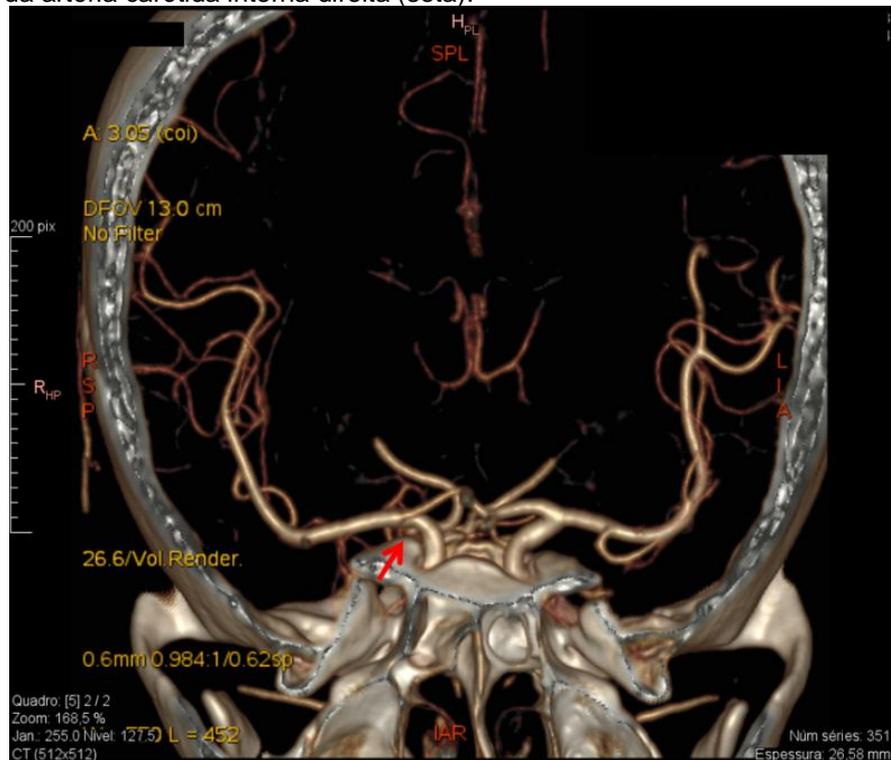
Trata-se de um voluntário do sexo feminino, 67 anos, tabagista e hipertensa, com história de vertigem há longa data, com piora recente. Foi investigada com ATC cerebral, que mostrou um AI incidental no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (Figuras 155, 154 e 157). O AI possuía as seguintes dimensões: 1,3 mm de diâmetro de colo e 2,0 mm de distância entre o colo e o *domus*. As imagens DICOM da ACT cerebral (Figura 155) foram processadas e preparadas para a impressão 3D. Foram confeccionados o biomodelo em ABS (Figura 158 e 159) e seus respectivos modelos em borracha de silicone, assim como nas fases anteriores.

Figura 155 - Imagem de ATC cerebral, corte coronal, ilustrando o AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (seta).



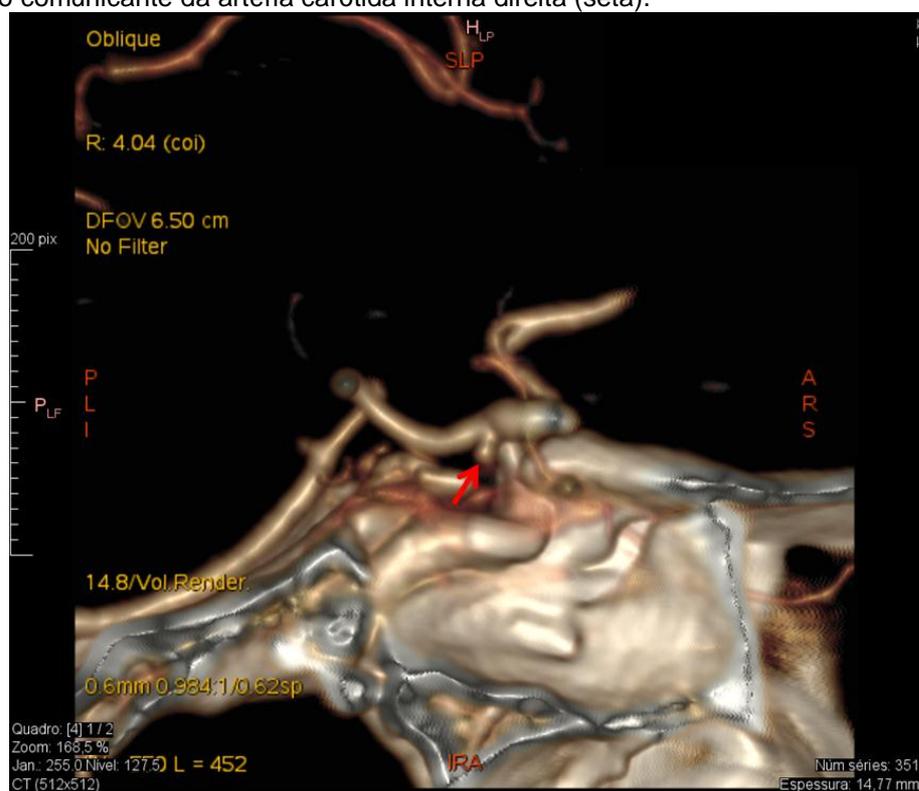
Fonte: o autor, 2017.

Figura 156 - Imagem de ATC cerebral com reconstrução 3D, ilustrando o AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (seta).



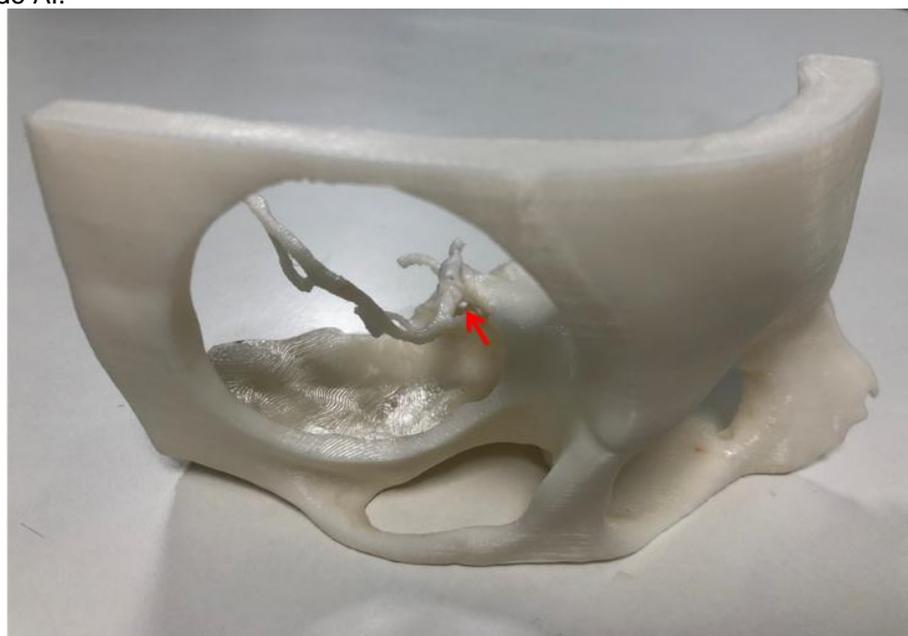
Fonte: o autor, 2017.

Figura 157 - Imagem de ATC cerebral, reconstrução em oblíquo para melhor definição do aneurisma no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (seta).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 158 - Aspecto final do biomodelo 3D (caso 10), visão a partir do exterior. A seta indica a localização do AI.



Fonte: o autor, 2017.

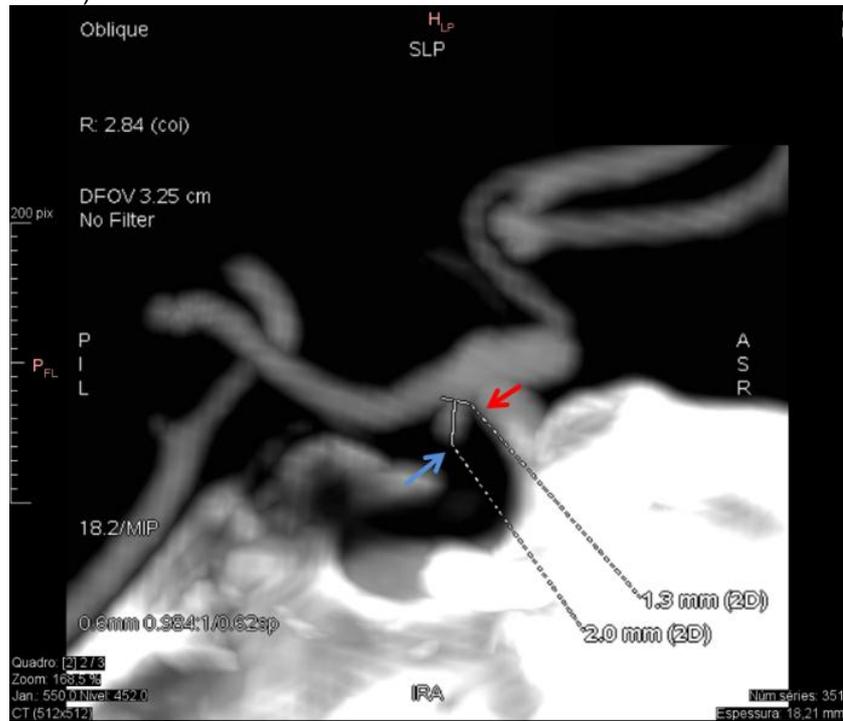
Figura 159 - Aspecto final do biomodelo 3D (caso 10), visão interior. AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita (seta).



Fonte: o autor, 2017.

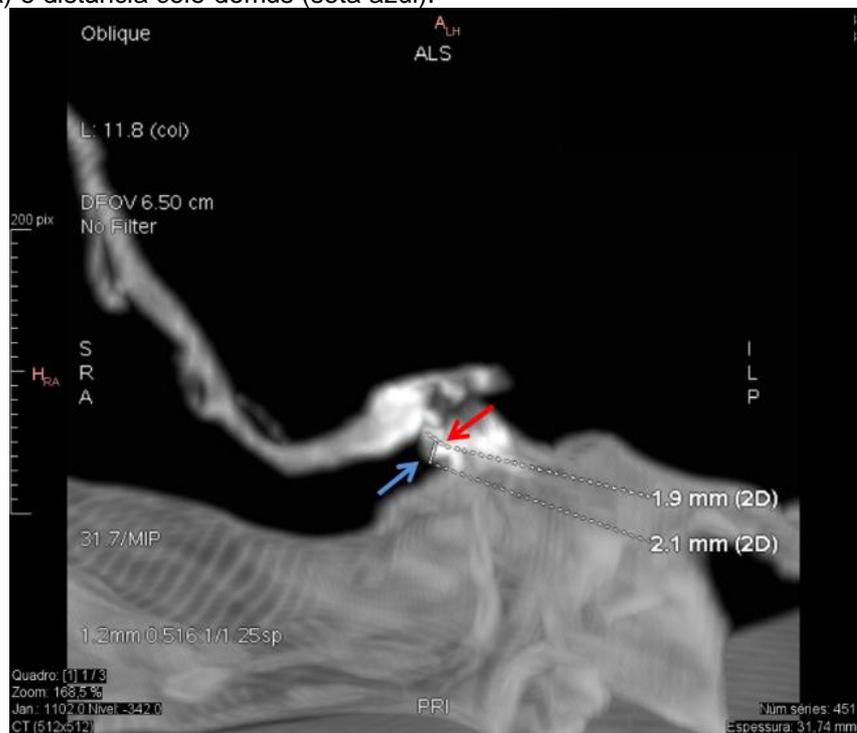
Na segunda fase metodológica, o biomodelo 3D foi submetido à TC. As medidas nas imagens de ATC do paciente (Figuras 160 e 162) foram confrontadas com as medidas obtidas nas imagens de TC do biomodelo (Figuras 161 e 163) e estão resumidas na Tabela 20. Na fase 3, o pesquisador e um neurocirurgião receberam o biomodelo completo (Figuras 164). A seguir, ocorreu a etapa de escolha dos cliques (Figura 165 e 166), cujas características estão ilustradas na Tabela 21. O tempo cirúrgico total foi de 190 min. O clipe utilizado pode ser comprovado pela cirurgia (Figura 167) e pelos exames de imagem pós-operatórios (Figuras 168).

Figura 160 - Imagem de ATC cerebral do paciente do caso 10, ilustrando as medidas do AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita: diâmetro do colo (seta vermelha) e distância colo-domus (seta azul).



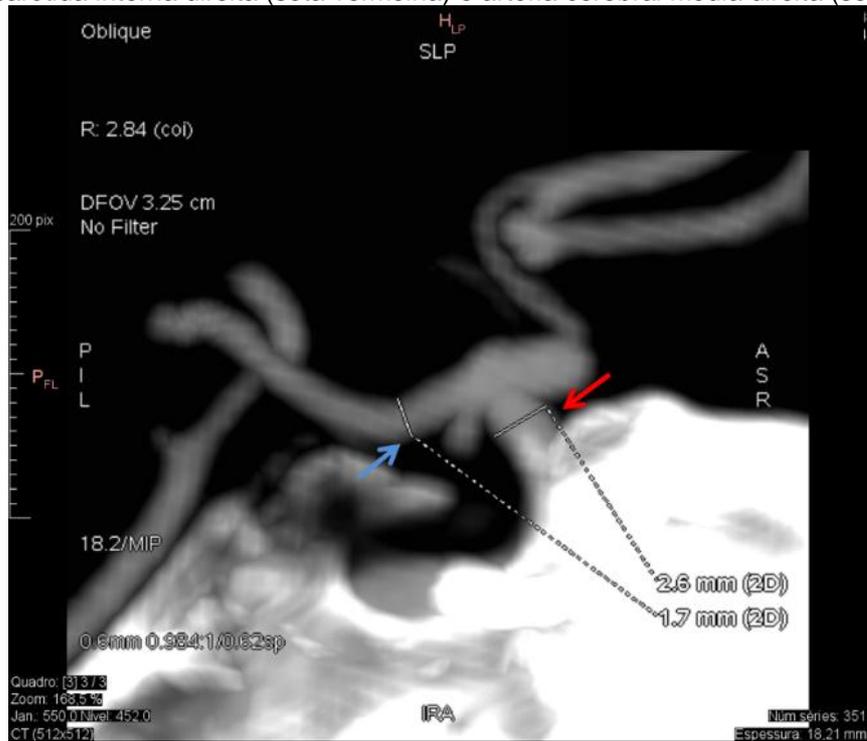
Fonte: o autor, 2017.

Figura 161 - Imagem de TC do biomodelo (caso 10), ilustrando as dimensões do AI: diâmetro do colo (seta vermelha) e distância colo-domus (seta azul).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 162 - Imagem de ATC do paciente do caso 10, ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria carótida interna direita (seta vermelha) e artéria cerebral média direita (seta azul).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 163 - Imagem de TC do biomodelo (caso 10), ilustrando as medidas das artérias relacionadas ao AI: artéria carótida interna direita (seta vermelha) e artéria cerebral média direita (seta azul).



Fonte: o autor, 2017.

Tabela 20 - Medidas obtidas na ATC cerebral do paciente e na TC do biomodelo 3D do caso 10 e o erro relativo encontrado (%).

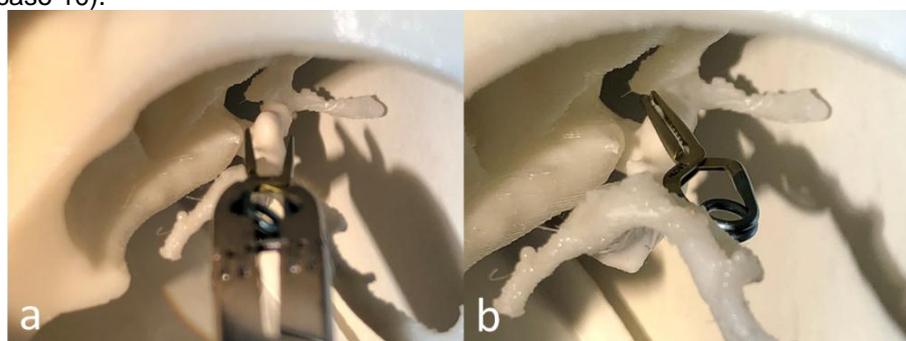
Medidas	Diâmetro do colo (mm)	Distância colo-domus (mm)	Diâmetro da artéria carótida interna (mm)	Diâmetro da artéria cerebral média (mm)
Paciente 10	1,3	2,0	2,6	1,7
Biomodelo 10	1,9	2,1	3,3	2,1
Erro (%)	46,2	5,0	26,9	23,5

Figura 164 - Imagem do aneurisma do biomodelo (caso 10) no microscópio cirúrgico.



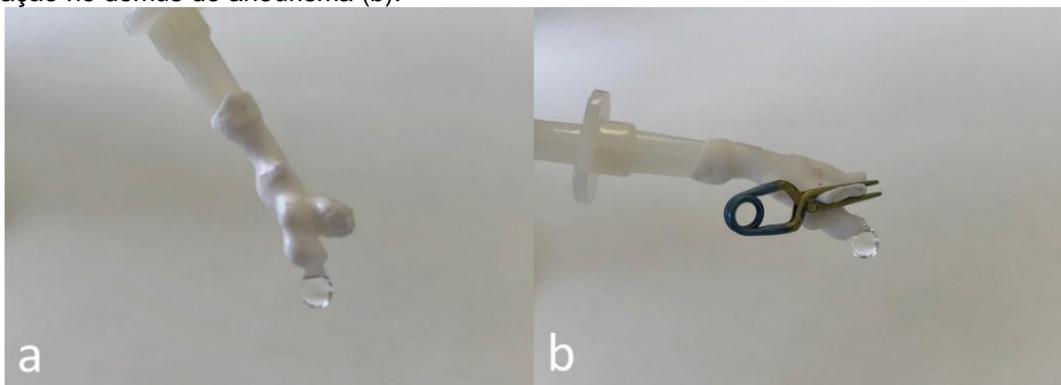
Fonte: o autor, 2017.

Figura 165 - Ilustração do clipe metálico antes (a) e após (b) a aplicação no colo do aneurisma do biomodelo (caso 10).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 166 - Sistema de circulação com soro fisiológico acoplado ao molde de borracha de silicone do biomodelo (caso 10) (a). Após a aplicação do clipe, não se constatou saída de soro fisiológico pela perfuração no domus do aneurisma (b).

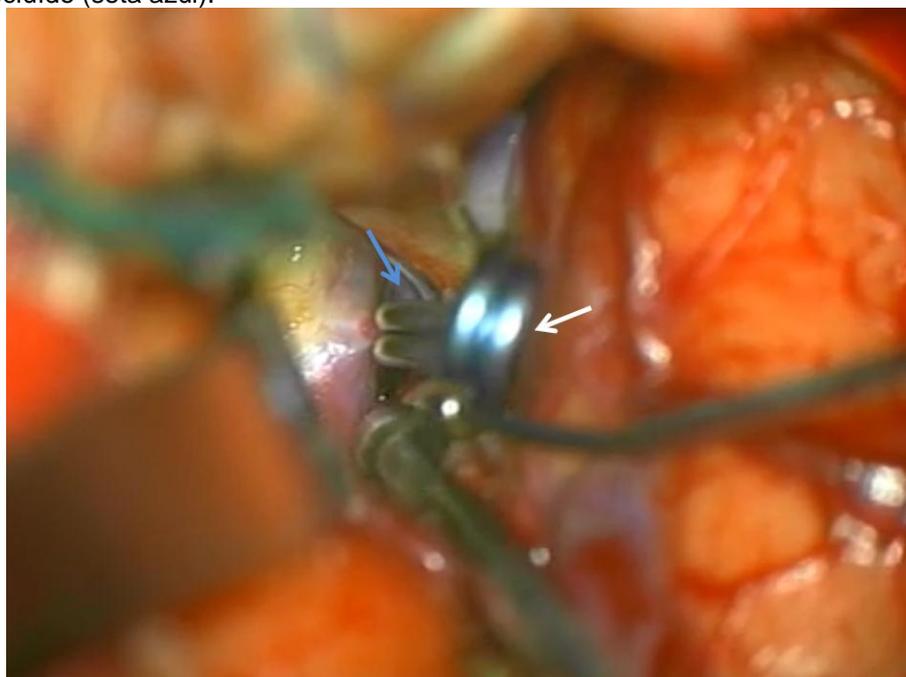


Fonte: o autor, 2017.

Tabela 21 - Característica dos cliques metálicos escolhidos para o biomodelo (caso 10) na fase 3 deste estudo.

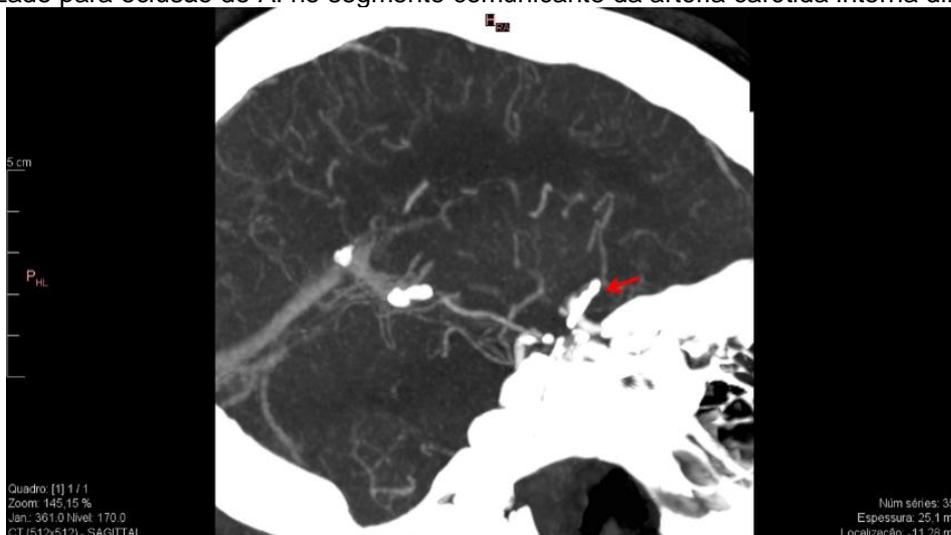
	Formato	Tamanho (mm)	Quantidade
Autor	reto	5	1
Neurocirurgião	reto	5	1

Figura 167 - Imagem cirúrgica, acesso fronto-temporal, ilustrando o clipe cirúrgico (seta branca) e o aneurisma ocluído (seta azul).



Fonte: o autor, 2017.

Figura 168 - Imagem de ATC cerebral pós-operatória com reconstrução em oblíquo, ilustrando o clipe (seta) utilizado para oclusão do AI no segmento comunicante da artéria carótida interna direita.



Fonte: o autor, 2017.

4.3 FASE DE SIMULAÇÃO CIRÚRGICA E AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO COM OS BIOMODELOS (FASE 4)

A fase de simulação cirúrgica e avaliação da simulação com os biomodelos (Fase 4) ocorreu após a realização de todos os casos desta tese de doutorado. Todos os 10 biomodelos previamente estudados foram dispostos sobre a mesa de simulação cirúrgica (Figura 169) em conjunto com uma pinça para clipe e uma grade de cliques metálicos (12), inclusive com unidades semelhantes àquelas que foram utilizadas nas cirurgias reais (Figura 170). Com o auxílio do microscópio de treinamento, os dois neurocirurgiões em formação, em conjunto e sem a participação do pesquisador, elegeram os cliques que mais provavelmente utilizariam na cirurgia real (Figura 171). Os jovens cirurgiões possuíam habilidades básicas nas técnicas neurocirúrgicas; porém, sem a experiência necessária para a realização de clipagem de AI nas microcirurgias vasculares. Essa técnica só é adquirida no final do programa de residência médica.

O pesquisador avaliou a simulação cirúrgica por meio da comparação dos cliques que os neurocirurgiões em formação escolheram para cada peça, com as características do clipe metálico utilizados para tratar os AI nas respectivas cirurgias reais. Após a confrontação dos dados, observou-se que as peças escolhidas correspondiam em formato, tamanho e quantidade com as utilizadas nas cirurgias da fase 3 desta pesquisa, resultando em 100% de eficácia (Tabela 22).

Figura 169 - Biomodelos dispostos sobre a mesa de simulação cirúrgica para realização da Fase 4 deste estudo.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 170 - Mesa de simulação cirúrgica com os biomodelos e cliques metálicos para a realização da Fase 4 deste estudo.



Fonte: o autor, 2017.

Figura 171 - Etapa da simulação cirúrgica e escolha do clipe metálico.



Fonte: o autor, 2017.

Tabela 22 - Característica dos cliques metálicos escolhidos na Fase 4 e a correspondência com os utilizados nas cirurgias reais. (continua)

Caso	Simulação cirúrgica: eleição do clipe com base no biomodelo (ambos os jovens neurocirurgiões)	Correspondência com o clipe utilizado
1	7 mm Reto 1 unidade	Sim
2	5 mm Reto 1 unidade	Sim
3	7 mm Baioneta 1 unidade	Sim
4	5 mm Curvo 1 unidade	Sim
5	7 mm Curvo 1 unidade	Sim
6	5 mm Reto 1 unidade	Sim
7	5 mm Reto 1 unidade	Sim

Tabela 23 - Característica dos cliques metálicos escolhidos na Fase 4 e a correspondência com os utilizados nas cirurgias reais. (continuação).

Caso	Simulação cirúrgica: eleição do clipe com base no biomodelo (ambos os jovens neurocirurgiões)	Correspondência com o clipe utilizado
8	5 mm Curvo 1 unidade	Sim
9	7 mm Curvo 1 unidade	Sim
10	5 mm Reto 1 unidade	Sim

5 DISCUSSÃO

Embora os exames de imagens disponíveis garantam ao cirurgião uma visualização da morfologia do AI (KIMURA et al., 2009), não existia um método de planejamento do tratamento em que se obtém não somente uma visualização 3D do AI, mas também um modelo real propiciando a manipulação dos vasos sanguíneos. Além disso, não existia um método físico que permitisse a escolha do clipe metálico apropriado a ser utilizado na cirurgia. A visualização 3D virtual, apesar de muito utilizada atualmente, tem um *feedback* tátil limitado e depende da cognição do examinador, pois a interpretação das imagens necessita da experiência do mesmo, o qual deve transformar as imagens projetadas em duas dimensões (2D) em imagens 3D virtuais. Sendo assim, a única alternativa é por meio da impressão 3D das estruturas vasculares, que representem o AI, utilizando-se das técnicas de manufatura aditiva. Os exames de imagens servem para guiar o profissional durante o planejamento pré-operatório; no entanto, a escolha do clipe é realizada apenas após a exposição cirúrgica do AI (MASHIKO et al., 2015).

Uma variedade de modelos de cliques cirúrgicos (tamanhos e formatos) foi desenvolvida para atender às necessidades do neurocirurgião, de acordo com a localização, tamanho e o posicionamento do AI. No entanto, a escolha do modelo a ser utilizado em cada cirurgia é reservada para o ato cirúrgico principal. O uso de biomodelos 3D expande a compreensão das estruturas vasculares antes da cirurgia. Desta maneira, um planejamento pré-operatório adequado, combinado com técnicas microcirúrgicas precisas evita a manipulação excessiva e impede a ruptura aneurismática intraoperatória, a qual pode atingir uma taxa de 3,8%, conforme descrito por Chen et al. (2016). Além disso, essa abordagem propicia uma duração cirúrgica mais curta e um menor número de reposicionamentos do clipe, também diminuindo a taxa de ruptura intraoperatória, resultando em uma consequente diminuição da morbidade e mortalidade (CHEN et al., 2016; FEIGIN et al. 2005; ERBANO et al., 2013).

Além disso, a avaliação intraoperatória precisa da oclusão do aneurisma e da patência arterial é crucial durante a clipagem de um AI. Para este propósito específico, a ultrasonografia com DPM foi utilizada para verificar a ausência de fluxo no interior dos aneurismas após a aplicação do clipe. Constatou-se neste trabalho que com o planejamento cirúrgico baseado em biomodelos 3D, a taxa de

reposicionamento do clipe foi nula em comparação com a taxa total de reposicionamento do clipe descrita na literatura, que pode chegar a 17,1%, de acordo com Fong et al. (2018).

Anteriormente a este estudo, o tempo médio de uma microcirurgia para clipagem de um AI de circulação no Instituto de Neurologia de Curitiba era de $265 \pm 28,9$ min (para 10 cirurgias realizadas); por outro lado, o tempo cirúrgico médio obtido durante os pacientes avaliados nesta pesquisa, utilizando os biomodelos 3D, foi de $209,5 \pm 18,8$ min, 20,75% menor. Para confirmar, foram avaliados outros estudos de caso, também publicados pelo autor dessa pesquisa (LEAL et al., 2018). Pode-se inferir que, as cirurgias que têm seu planejamento baseado nos biomodelos requerem menor duração e, por extensão, acarretam em menores índices de complicações (ACIK et al., 2017).

Biomodelos têm sido utilizados em neurocirurgia desde 1999. D'Urso et al. (1999) publicaram um estudo prospectivo de manufatura aditiva em cirurgia cerebrovascular, para investigar a viabilidade e utilidade clínica desse novo método de exibição. Foram estudados pacientes com AI e malformações arteriovenosas, com base em suas ATC ou ARM. Os biomodelos foram utilizados para informação ao paciente, simulação e planejamento cirúrgico. Concluíram que os biomodelos cerebrovasculares eram úteis em casos complexos e quando os métodos de imagens padrão não eram suficientemente claros para a realização do planejamento cirúrgico. Müller et al. (2003) analisaram a validade de modelos prototipados de crânios durante a prática cirúrgica. Ambos os estudos anteriores utilizaram protótipos 3D em tipos restritos de doenças vasculares. Os resultados demonstraram uma melhor compreensão da anatomia cirúrgica, além de possibilitar a simulação pré-operatória, mas nenhum propósito específico foi investigado. No presente estudo, os biomodelos foram úteis tanto para os casos complexos quanto para os simples, facilitando a escolha do material correto.

Em 2004, Wurm et al. (2004) estudaram modelos cerebrovasculares prototipados e descreveram a sua experiência com uma série de pacientes. Os biomodelos foram utilizados para o diagnóstico, planejamento, simulação cirúrgica, instrução de neurocirurgiões menos experientes e informação ao paciente. A correspondência entre o biomodelo e os achados intraoperatórios foi verificada de forma qualitativa comparando-se todos os casos por meio do vídeo da cirurgia; diferentemente desta tese, na qual a avaliação proposta foi, além de qualitativa,

quantitativa. Os biomodelos apresentados nesse estudo são mais realistas do que os produzidos por Wurm et al. (2004). Além disso, as características encontradas nos biomodelos, devido ao uso de borracha de silicone, facilitaram a eleição pré-operatória e a aplicação dos cliques. A borracha de silicone é um elastômero composto de silicone (polímero), contendo silício juntamente com carbono, hidrogênio e oxigênio (RAJESH et al., 2010). Devido às suas propriedades como alongamento, flexão cíclica, resistência à tração e compressão, a borracha de silicone oferece a maleabilidade e flexibilidade necessária para a aplicação do clipe cirúrgico de forma muito semelhante à realidade.

Em 2009, Kimura et al. criaram biomodelos para treinar o implante de cliques metálicos nas cirurgias de AI. Um modelo 3D oco de AI foi criado para simulação pré-operatória e treinamento cirúrgico. Da mesma forma que os resultados obtidos no presente estudo, eles demonstraram que usando modelos 3D para simular a clipeagem cirúrgica, foi possível tratar o AI com mais confiança durante a cirurgia. Assim como observado nesta tese, os modelos permitiram o reconhecimento fácil e seguro do AI e das artérias envolvidas. Nesse trabalho utilizaram apenas um método visual (endoscopia) para avaliação da eficácia da clipeagem no biomodelo e não realizaram avaliação da clipeagem durante a cirurgia real e sua correspondência com o clipe planejado, assim como realizado nesta tese, a qual utilizou um sistema de circulação artificial no modelo 3D e DPM no voluntário que foi submetido ao procedimento cirúrgico, e lhe conferiu um caráter científico.

Mais tarde, Ishikawa et al. (2014) criaram um modelo 3D de AI para simulação cirúrgica e propósitos educacionais. Eles demonstraram que os modelos flexíveis eram úteis para aplicação prática do clipe metálico, particularmente para simular a aplicação de cliques fenestrados em AI paraclinoideos da artéria carótida interna. Ao contrário do presente estudo, os biomodelos produzidos por Ishikawa et al. (2014) incluíram apenas o aneurisma e os vasos afetados, sem a impressão de regiões de referência, como a fossa média da base do crânio e os processos clinoides. A impressão de pontos de referência, juntamente com as estruturas vasculares a serem manipuladas durante a cirurgia, auxiliaram na escolha correta do posicionamento do clipe, bem como a escolha do tipo de clipe mais apropriado.

Posteriormente, Mashiko et al. (2015) desenvolveram um método para fabricar um modelo 3D maleável e oco de AI que fosse útil para simulação cirúrgica. Foram realizadas simulações utilizando o modelo em 12 pacientes. Em todos os

casos, a clipagem prosseguiu conforme prevista. Eles concluíram que a simulação utilizando o modelo elástico oco seria útil para a compreensão anatômica dos AI e das estruturas vasculares relacionadas. Paralelamente ao desenvolvimento desta tese, iniciada em 2016, esses mesmos autores publicaram um artigo sobre o uso de modelos aneurismáticos elásticos ocos para simulação pré-operatória (MASHIKO et al., 2017). Assim como nesta tese, Mashiko et al. (2017) também fabricaram os biomodelos 3D a partir de imagens DICOM de ATC e apresentaram excelentes correlações entre os modelos e a anatomia intraoperatória. Na cirurgia, foram utilizados cliques semelhantes aos aplicados na simulação, exceto em 3 casos, nos quais foram necessários cliques adicionais (MASHIKO et al., 2017). Por outro lado, assim como no artigo publicado pelo autor dessa tese (LEAL et al., 2019), no qual foram mostrados 8 casos, e incluindo os resultados adicionais (totalizando os 10 casos completos e validados dessa tese), obteve-se 100% de assertividade entre os cliques eleitos e os utilizados na cirurgia real. Entretanto, a equipe de Mashiko não avaliou, no pré-operatório, a efetividade da clipagem nos modelos 3D, como realizado no presente estudo.

Nos últimos anos, as simulações 3D de procedimentos neurocirúrgicos têm se tornado cada vez mais popular nos programas de treinamento médico (CLARK et al. 2017). Assim sendo, após o término do planejamento pré-operatório e realização das cirurgias propriamente ditas, os mesmos biomodelos foram utilizados para treinamento de neurocirurgiões em formação. Além deles poderem aprender como lidar com cliques e pinças aplicadoras de cliques, possuíram um meio físico para praticar e otimizar a técnica cirúrgica. Com o uso do microscópio de treinamento, puderam simular uma microcirurgia de clipagem aneurismática e reconhecer a importância da escolha exata do melhor modelo a fim de que o AI fosse completamente excluído da circulação e para que as artérias adjacentes não fossem danificadas. Mesmo com a inexperiência cirúrgica, os cliques escolhidos pelos jovens neurocirurgiões corresponderam com os utilizados pelo pesquisador (autor) durante as cirurgias reais, inferindo o potencial benefício que os biomodelos 3D trazem, de modo a proporcionar um aumento na eficiência do procedimento, na segurança e na diminuição das complicações operatórias (KONAKONDLA et al., 2017).

Os principais pré-requisitos para o uso de réplicas da anatomia humana 3D específicas são rapidez de produção e baixo custo de fabricação. Os modelos produzidos nesta pesquisa são de baixo custo (US\$ 100), diferentemente dos

produzidos por Kimura et al. (2009) (US\$ 300 - 400) e Mashiko et al. (2017) (US\$ 200). Como demonstrado pelo autor, modelos maciços e flexíveis podem ser gerados em menos de 2 h (LEAL et al., 2018); por outro lado, os modelos de AI elásticos e ocos necessitam de mais tempo para serem produzidos, uma vez que requerem um tempo de cura da borracha de silicone aplicada posteriormente à impressão 3D propriamente dita. Apesar das técnicas de aquisição dos biomodelos serem parecidas, os modelos fabricados por Kimura et al. (2009) e Mashiko et al. (2017) demoraram cerca de 3 a 7 dias para serem produzidos (impressão 3D e fabricação do molde em silicone), enquanto que neste trabalho levaram em torno de 24 h para serem fabricados. Esse tempo de fabricação reduzido aperfeiçoa o agendamento do procedimento, reduzindo o tempo de espera do paciente para a realização da cirurgia.

A avaliação dos resultados da simulação e da clipagem cirúrgica foi realizada neste estudo, diferentemente dos trabalhos de Kimura et al. (2009) e Mashiko et al. (2017). Nesta tese de doutorado, a avaliação da eficiência da clipagem no biomodelo foi realizada por meio da perfuração do *domus* do AI prototipado, conectado a um sistema de circulação artificial, contendo soro fisiológico. A presença de um pertuito em um aneurisma não clipado adequadamente, traria o escape de líquido de forma objetiva. Da mesma forma, a avaliação da clipagem na cirurgia real foi realizada pela detecção da ausência de fluxo no interior do AI pelo DPM, até então nunca utilizada em nenhum trabalho científico. Dessa forma inédita, a avaliação dos resultados pode ser determinada de forma objetiva e precisa.

Alguns detalhes da fabricação e manipulação dos biomodelos maleáveis e ocos foram desenvolvidos e descobertos durante a elaboração deste trabalho, os quais não foram descritos por outros autores. Quando são necessárias várias aplicações dos cliques durante a fase de simulação cirúrgica, os modelos maleáveis e ocos podem mudar de conformação, devido à fragilidade do material e por representar uma falsa anatomia das artérias relacionadas, assim como apontado pelo autor (LEAL et al., 2019). Além disso, modelos elásticos e ocos podem não replicar adequadamente o colo aneurismático, devido ao acúmulo de silicone de borracha nesta região. Deve-se ter cuidado no momento da cura, a fim de evitar que isso ocorra. Outro pré-requisito para o uso de réplicas da anatomia humana em 3D é que a mesma seja precisa, assim como demonstrado nesta tese, na qual os biomodelos de AI produzidos por AM cumpriram com esses requisitos. Para avaliar a

fidedignidade do modelo vascular 3D, foram avaliadas as principais características dimensionais do biomodelo em relação à estrutura anatômica real (diâmetro do colo, do colo-*domus* e das artérias envolvidas com os AI), não quantificadas na literatura anteriormente. Por meio da série de casos descritos nessa tese, observou-se um erro médio relativamente baixo das medidas ($8,56 \pm 13,49$ % nos diâmetros dos colos; $2,25 \pm 5,46$ % nas distâncias colo-*domus* e $9,35 \pm 11,62$ % nos diâmetros das artérias correlacionadas), com exceção da superestimação do diâmetro da artéria relacionada ao AI dos biomodelos dos voluntários 3, 8 e 10 (Tabelas 6, 16 e 20), provavelmente devido a uma parede vascular mais espessa pelo acúmulo de silicone. Apesar disso, o erro relativo foi considerado aceitável nessa aplicação em neurocirurgia. Nesse caso, o valor alto dos casos citados não comprometeu o resultado final, pois os cliques escolhidos no pré-operatório foram os mesmos utilizados com sucesso nas cirurgias.

Devido ao tamanho reduzido do lúmen das artérias perfurantes, comumente encontradas próximas às origens dos AI, pode não ser possível, no momento, a representação das mesmas com silicone e, às vezes, nem são reproduzidas por impressoras 3D de baixa resolução. Novas técnicas de manufatura aditiva devem ser desenvolvidas para que a impressão de artérias de pequenos calibres seja possível, uma vez que a clipagem inadvertida desses vasos podem trazer déficits importantes ao paciente no pós-operatório. Os biomodelos maleáveis e ocos, devido à extrema flexibilidade, são de difícil manipulação, o que pode acarretar numa distorção da angioarquitetura no momento da sua construção. Deste ponto de vista, os modelos maciços são superiores aos ocos (LEAL et al., 2019).

As principais vantagens do uso de modelos prototipados de AI são permitir o estudo da complexa anatomia cerebrovascular, sob qualquer perspectiva, por meio da realidade obtida com os modelos físicos 3D, possibilitando a simulação de situações intraoperatórias, além de proporcionar a antecipação de desafios cirúrgicos, especialmente na escolha pré-operatória de cliques metálicos nas microcirurgias de AI. Com o desenvolvimento da fabricação dos biomodelos, espera-se que esse método propicie melhorias na educação cirúrgica dos neomédicos e auxilie na resolução de casos difíceis e desafiadores aos neurocirurgiões.

6 CONCLUSÕES

Com o objetivo de investigar a utilização de modelos 3D, fabricados por manufatura aditiva, para a eleição de clipe cirúrgico nas microcirurgias de AI e para simulação cirúrgica por neurocirurgiões em formação, realizou-se o estudo descrito, partir do qual se pode concluir que:

1. as características dimensionais dos biomodelos 3D em relação às estruturas anatômicas reais, na sua maioria, apresentaram baixo erro relativo, conforme pode-se verificar pelas medidas efetuadas e descritas nas tabelas 3, 5, 9, 11, 13, 15 e 19;
2. o planejamento cirúrgico realizado com base nos biomodelos 3D, incluindo a escolha do clipe, mostrou-se correto nos estudos de caso realizados, pois produziu eficientemente a oclusão dos AI manufaturados, conforme avaliado por meio da técnica de perfuração do AI do biomodelo em conjunto com o sistema de circulação artificial;
3. os cliques utilizados para exclusão dos AI durante as cirurgias reais foram efetivos, conforme avaliado por meio do uso da técnica de Ultrassom Doppler pulsado microvascular, e corresponderam unanimemente aos selecionados na fase de planejamento, o que permite inferir que o uso do biomodelo foi útil para a escolha do clipe; e
4. a simulação nos biomodelos foi efetiva, pois os cliques escolhidos pelos neocirurgiões corresponderam 100 % com os cliques utilizados nas cirurgias reais.

Portanto, os biomodelos 3D gerados por meio de manufatura aditiva mostraram-se aplicáveis para a eleição de clipe cirúrgico nas microcirurgias de aneurismas intracranianos, aumentando a compreensão da angioarquitetura cerebral e trazendo uma maior rapidez e segurança nesse tipo de cirurgia.

7 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

Como contribuições tecnológicas da tese, destaca-se o desenvolvimento e avaliação de um método de planejamento e simulação cirúrgicos para microcirurgias de clipagem de AI. Além disso, a geração de modelos 3D de AI por meio de manufatura aditiva tornou-se conhecida pelos neurocirurgiões do Brasil, servindo como melhoria da educação cirúrgica e como auxílio na resolução de casos difíceis. No Instituto de Neurologia e Cardiologia de Curitiba (INC), por exemplo, os biomodelos 3D de AI, assim como o uso de exames de imagens de TC e RNM, passaram a fazer parte do arsenal pré-operatório utilizado rotineiramente pelos neurocirurgiões. Com isso, ampliou-se o nível de segurança cirúrgica e reduziu-se o tempo de realização das cirurgias, conseqüentemente, minimizando o custo de internamento. Isso já trouxe um impacto positivo nos convênios de saúde.

Com a ratificação dos resultados aqui obtidos em futuros estudos multicêntricos e em parcerias com o Sistema Único de Saúde (SUS), será possível ampliar o acesso da população à nova tecnologia e gerar mais evidências científicas sobre seus benefícios à sociedade.

8 TRABALHOS FUTUROS

Como perspectiva, é necessário avançar além do estado atual dos biomodelos 3D de AI que representam reconstruções anatômicas 3D fiéis à realidade. As próximas pesquisas devem-se basear no desenvolvimento de biomodelos ainda mais realísticos. O uso de materiais com consistência semelhante ao parênquima cerebral e à simulação de sangramentos ainda precisa ser desenvolvido. Existem várias formas nas quais isso pode ser alcançado, incluindo:

1. criação e desenvolvimento de biomodelos que incluam o parênquima cerebral, nos quais sejam possíveis a realização de dissecação da fissura silviana e retração do tecido cerebral;
2. desenvolvimento de biomodelos com parênquima cerebral e aracabouço ósseo completo para o cálculo dos ângulos de acesso e posicionamento dos cliques metálicos nas cirurgias de AI;
3. desenvolvimento de sistema de circulação com líquido similar ao sangue, inclusive com as características de pulsatilidade sanguínea;
4. estudo comparativo entre realidade virtual e o uso de biomodelos para a escolha de cliques metálicos;
5. desenvolvimento de biomodelos resistentes ao calor, nos quais seja possível o uso de materiais de coagulação, a fim de realizar a hemostasia em caso de ruptura aneurismática intraoperatória;
6. desenvolvimento de cliques personalizados a partir do planejamento em biomodelos fabricados pelos exames de pacientes, e
7. aprimoramento do processo para torná-lo reproduzível.

REFERÊNCIAS

- ACIK, V.; CAVUS, G.; BILGIN, E.; ARSLAN, A.; GEZERCAN, Y.; OKTEN A.İ. Surgical treatment of mirror MCA aneurysms: bilateral and unilateral approach. *World Neurosurg.* [s.l.], v. 108, p.774–822017, Dec, 2017.
- Andrade, G.C.; Teixeira, P.A.D.; Alves, H.F.P.; Donato, E.E., Moreira, C.A.A.; Faria, R.C.S.; Dias, L.A. Cerebral aneurysms diagnosis by three-dimensional CT angiography. **Arq. Neuropsiquiatria**, [s.l.], v. 61, n. 1, p. 74-78, Mar. 2003.
- BERRY, E.; BROWN, J.M.; CONNELL, M.; CRAVEN, C.M.; EFFORD, N.D.; RADJENOVIC, A.; SMITH, M.A. Preliminary experience with medical applications of rapid prototyping by selective laser sintering. **Medical Engineering & Physics**, [s.l.], v. 19, n. 1, p.90-96, 1997.
- CHEN, S.F.; KATO, Y.; KUMAR, A.; TAN, G.W.; OGURI, D.; ODA, J.; WATABE, T.; IMIZU, S.; SANO, H.; WANG, Z.X. Intraoperative rupture in the surgical treatment of patients with intracranial aneurysms. **J Clin Neurosci**, [s.l.], v. 34, p. 63-69, 2016.
- CLARK, A.D.; BARONE, D.G.; CANDY, N.; GUILFOYLE, M.; BUDOHOSKI, K.; HOFMANN, R.; SANTARIUS, T.; KIROLLOS, R.; TRIVEDI, R.A. The Effect of 3-Dimensional Simulation on Neurosurgical Skill Acquisition and Surgical Performance: A Review of the Literature. **J Surg Educ.**, [s.l.], v. 74, n. 5, p.828-836, Set – Out 2017.
- D'URSO, P.S.; Thompson, R.G.; ATKINSON, R.L.; WEIDMANN, M.J.; REDMOND, M.J.; HALL, B.I.; JEAUVONS, S.J.; BENSON, M.D.; EARWAKER, W.J. Cerebrovascular biomodelling: a technical note. **Surgical Neurology**, [s.l.], v. 52, n. 5, p.490-500, nov. 1999.
- DANDY, W.E. Intracranial aneurysm of the internal carotid artery: cured by operation. **Ann Surg**, [s.l.], v. 107, n. 5, p.654-659, 1938.
- DAWSON, D.L; MEYER, J.; LEE, E.S.; PEVEC, W.C. Training with simulation improves residents' endovascular procedure skills. **J. Vasc. Surg**, [s.l.], v. 45, p.149–154, 2007.
- DUJOVNY, M.; AGNER, C.; IBE, O; PERLIN, A. Self-closing aneurysm clip: a historical review. **Neurological Research** [s.l.], v. 32, n. 10, p. 1011-1020, 2010.
- EARNEST, F. 4TH; FORBES, G.; SANDOK, B.A.; PIEPGRAS, D.G.; FAUST, R.J.; ILSTRUP, D.M.; ARNDT, L.J. Complications on cerebral angiography prospective assessment of risk. **AJR**, [s.l.], v.14, p.247-253, 1984.

ERBANO, B.O.; OPOLSKI, A.C.; OLANDOSKI, M.; FOGGIATTO, J.A.; KUBRUSLY, L.F.; DIETZ, U.A.; ZINI, C.; MARINHO, M.M.; LEAL, A.G.; RAMINA, R. Rapid prototyping of three-dimensional biomodels as an adjuvant in the surgical planning for intracranial aneurysms. **Acta Cirurgica Brasileira**, [s.l.], v. 28, n. 11, p.756-761, nov. 2013.

FEIGIN, V.L.; RINKEL, G.J.; LAWES, C.M.; ALGRA, A.; BENNETT, D.A.; VAN GIJN, J.; ANDERSON, C.S. Risk Factors for Subarachnoid Hemorrhage: An Updated Systematic Review of Epidemiological Studies. **Stroke**, [s.l.], v. 36, n. 12, p.2773-2780, 10 nov. 2005.

FISHER, C.M.; KISTLER, J.P.; DAVIS, J.M. Relation of Cerebral Vasospasm to Subarachnoid Hemorrhage Visualized by Computerized Tomographic Scanning. **Neurosurgery**, [s.l.], v. 6, n. 1, p.1-9, jan. 1980.

FOGELHOLM, R.; HERNESNIEMI, J.; VAPALAHTI, M. Impact of early surgery on outcome after aneurysmal subarachnoid hemorrhage. A population-based study. **Stroke**, [s.l.], v. 24, n. 11, p.1649-1654, 1 nov. 1993.

FONG, Y.W.; HSU, S.K.; HUANG, C.T.; HSIEH, C.T.; CHEN, M.H.; HUANG, J.S.; CHANG, C.J.; SU, I.C. Impact of intraoperative 3-dimensional volume-rendering rotational angiography on clip repositioning rates in aneurysmal surgery. **World Neurosurg.**, [s.l.], v. S1878–8750, n. 18, p. 30513–30518, 14 mar. 2018.

GORNI, A.A. Introdução à prototipagem rápida e seus processos. **Plástico Industrial**, [s.l.], p.230-239, mar. 2001. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/protrap.html>. Acesso em: 15 set. 2013.

GRIMM, T. **User's guide to rapid prototyping**. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2004.

GUGLIELMI, G.; VIÑUELA, F.; DUCKWILER, G.; DION, J.; LYLK, P.; BERENSTEIN, A.; STROTHER, C.; GRAVES, V.; HALBACH, V.; NICHOLS, D.; ET AL. Endovascular treatment of posterior circulation aneurysms by electrothrombosis using electrically detachable coils. **J Neurosurg**, [s.l.], v. 77, n. 4, p.515-524, out. 1992.

GUGLIELMI, G.; VIÑUELA, F.; SEPETKA, I.; MACELLARI, V. Electrothrombosis of saccular aneurysms via endovascular approach: Part 1: Electrochemical basis, technique, and experimental results. **J Neurosurg**, [s.l.], v. 75, n. 1, p.1-7, jul. 1991.

HOP, J.W.; RINKEL, G.J.; ALGRA, A.; VAN GIJN, J. Case-Fatality Rates and Functional Outcome After Subarachnoid Hemorrhage: A Systematic Review. **Stroke**, [s.l.], v. 28, n. 3, p.660-664, 1 mar. 1997.

HUNT, W.E.; HESS, R.M. Surgical risk as related to time of intervention in the repair of intracranial aneurysms. **J Neurosurg**, [s.l.], v. 28, n. 1, p.14-20, jan. 1968.

ISHIKAWA, T.; MORITA, A.; FUKUSHIMA, T.; ONO, H. Three-Dimensional cerebral aneurysm models for surgical simulation and education - development of aneurysm models with perforating arteries and for application of fenestrated clips. **Open Journal of Modern Neurosurg**, [s.l.], v. 04, n. 02, p.59-63, 2014.

ISOLAN, G.R. A construção do conhecimento pelo jovem neurocirurgião: ética, ciência e a importância do treinamento em laboratório de microcirurgia. **J Bras Neurocirurg**, [s.l.], v. 20, n. 3, p. 314-334, 2009.

ISSENBERG, S.B.; MCGAGHIE, W.C.; HART, I.R.; MAYER, J.W.; FELNER, J.M.; PETRUSA, E.R.; WAUGH, R.A.; BROWN, D.D.; SAFFORD, R.R.; GESSNER, I.H.; GORDON, D.L.; EWY, G.A. Simulation technology for health care professional skills training and assessment. **JAMA**, [s.l.], v. 282, p. 861–866, 1999.

JOHNSTON, S.C.; SELVIN, S.; GRESS, D.R. The burden, trends, and demographics of mortality from subarachnoid hemorrhage. **Neurology**, [s.l.], v. 50, n. 5, p.1413-1418, 1 maio 1998.

JUVELA, S. Prehemorrhage Risk Factors for Fatal Intracranial Aneurysm Rupture. **Stroke**, [s.l.], v. 34, n. 8, p.1852-1857, 26 jun. 2003. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health).

JUVELA, S. Risk Factors for Aneurysmal Subarachnoid Hemorrhage. **Stroke**, [s.l.], v. 33, n. 9, p.2152-2153, 1 set. 2002.

KIMURA, T.; MORITA, A.; NISHIMURA, K.; AIYAMA, H.; ITOH, H.; FUKAYA, S.; SORA, S.; OCHIAI, C. Simulation of and training for cerebral aneurysm clipping with 3-dimensional models. **Neurosurgery**, [s.l.], v. 65, n. 4, p.719-726, out. 2009.

KOCKRO, R.A.; KILLEEN, T.; AYYAD, A.; GLASER, M.; STADIE, A.; REISCH, R.; GIESE, A.; SCHWANDT, E. Aneurysm Surgery with Preoperative Three-Dimensional Planning in a Virtual Reality Environment: Technique and Outcome Analysis. **World Neurosurgery**, [s.l.], v. 96, p.489-499, dez. 2016.

KONAKONDLA, S.; FONG, R.; SCHIRMER, C.M. Simulation training in neurosurgery: advances in education and practice. **Adv Med Educ Pract.**, [s.l.], v. 8, p.465–473, 14 Jul 2017.

KOROSEC, F.R. Princípios de angiografia por ressonância magnética. In: RUBIN, G.D., ROFSKY, N.M. (Ed). **Angiografia por TC e RM. Avaliação vascular abrangente**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010. p.45-73.

LAI, L.; MORGAN, M.K. The impact of changing intracranial aneurysm practice on the education of cerebrovascular neurosurgeons. **J Clin. Neurosci**, [s.l.], v. 19, p. 81–84, 2012.

LAWTON MT, HAMILTON MG, MORCOS JJ, SPETZLER RF. Revascularization and Aneurysm Surgery: Current Techniques, Indications, and Outcome. **Neurosurgery**, [s.l.], v. 38, n. 1, p.83-94, jan. 1996.

LAWTON, M.T.; SPETZLER, R.F. Surgical management of giant intracranial aneurysms: experience with 171 patients. **Clin Neurosurg**, [s.l.], v. 42, p.245-266, 1995.

LEAL, A.; SOUZA, M.; NOHAMA, P. Additive Manufacturing of 3D Biomodels as Adjuvant in Intracranial Aneurysm Clipping. **Artificial Organs**. 2019;00:000–000. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/aor.13303>.

LEAL, A.G.; AGNOLETTO, G.J.; MENESES, M.S. de. Tratamento endovascular dos aneurismas cerebrais da circulação anterior. In: Aguiar P.H.P.; ANTUNES, A.C.M.; Maldaun M.V.C.; Zicarelli, C.A.M.; Canheu, A.C.; Isolan, G.R.; Lehmann, M.F.; Ramina, R. (Org.). **Princípios Técnicos de Neurocirurgia: Atlas e Texto**. São Paulo: DiLivros, 2016. p. 47-58.

LEAL, A.G.; COCORULLO, S.V. Monitorização transoperatória e em procedimentos cirúrgicos. In: LANGE, M.C. (Ed.). **Neurossonologia: Aplicação Prática**. São Paulo: DiLivros, 2017. p. 89-100.

LEAL, A.G.; PAGNAN, L.B.; KONDO, R.T.; FOGGIATTO, J.A.; AGNOLETTO, G.J.; RAMINA, R. Elastomers three-dimensional biomodels proven to be a trustworthy representation of the angiotomographic images. **Arq. Neuropsiquiatria**, [s.l.], v. 74, n. 9, p.713-717, set. 2016.

LI, H.; PAN, R.; WANG, H.; RONG, X.; YIN, Z.; MILGROM, D.P.; SHI, X.; TANG, Y.; PENG, Y. Clipping Versus Coiling for Ruptured Intracranial Aneurysms: A Systematic Review and Meta-Analysis. **Stroke**, [s.l.], v. 44, n. 1, p.29-37, 13 dez. 2012.

LOUW, D.F.; ASFORA, W.T.; SUTHERLAND, G.R. A brief history of aneurysm clips. **Neurosurg Focus**, [s.l.], v. 11, n. 2, Article 4, 2001.

MARKL, M.; SCHUMACHER, R.; KÜFFER, J.; BLEY, T.A.; HENNIG, J. Rapid vessel prototyping: vascular modeling using 3t magnetic resonance angiography and rapid prototyping technology. **Magnetic Resonance Materials In Physics, Biology And Medicine**, [s.l.], v. 18, n. 6, p.288-292, dez. 2005.

MASHIKO, T.; KANEKO, N.; KONNO, T.; OTANI, K.; NAGAYAMA, R.; WATANABE, E. Training in Cerebral Aneurysm Clipping Using Self-Made 3-Dimensional Models. **Journal of Surgical Education**, [s.l.], v. 74, n. 4, p.681-689, jul. 2017.

MASHIKO, T.; OTANI, K.; KAWANO, R.; KONNO, T.; KANEKO, N.; ITO, Y.; WATANABE, E. Development of Three-Dimensional Hollow Elastic Model for Cerebral Aneurysm Clipping Simulation Enabling Rapid and Low Cost Prototyping. **World Neurosurgery**, [s.l.], v. 83, n. 3, p.351-361, mar. 2015.

MAYBERG, M.R.; WINN, R. The history of neurosurgical technique. **Neurosurgery Clinics of North America**. Philadelphia: Saunders, p.1-228, 2001.

MOLYNEUX, A.; KERR R; INTERNATIONAL SUBARACHNOID ANEURYSM TRIAL (ISAT) COLLABORATIVE GROUP; STRATTON, I.; SANDERCOCK, P.; CLARKE, M.; SHRIMPTON, J.; HOLMAN, R. International Subarachnoid Aneurysm Trial (ISAT) of neurosurgical clipping versus endovascular coili: a randomised trial. **The Lancet**, [s.l.], v. 360, n. 9342, p.1267-1274, out. 2002.

MÜLLER, A.; KRISHNAN, K.G.; UHL, E.; MAST, G. The application of rapid prototyping techniques in cranial reconstruction and preoperative planning in neurosurgery. **J Craniofac Surg**, [s.l.], v. 14, n. 6, p.899-914, nov. 2003.

NAIDECH, A.M.; JANJUA, N.; KREITER, K.T.; OSTAPKOVICH, N.D.; FITZSIMMONS, B.F.; PARRA, A.; COMMICHAU, C.; CONNOLLY, E.S.; MAYER, S.A. Predictors and Impact of Aneurysm Rebleeding After Subarachnoid Hemorrhage. **Arch Neurol**, [s.l.], v. 62, n. 3, p.410-416, 1 mar. 2005.

NISHIMURA, P.L.G, RODRIGUES, O.V.; BOTURA JR, G.; SILVA, L. A. Prototipagem rápida: um comparativo entre uma tecnologia aditiva e uma subtrativa. **Blucher Design Proceedings**, [s.l.], p.4481-4491, dez. 2016.

OSAWA, M., HONGO, K.; TANAKA, Y.; NAKAMURA, Y.; KITAZAWA, K.; KOBAYASHI, S. Results of direct surgery for aneurysmal subarachnoid haemorrhage: outcome of 2055 patients who underwent direct aneurysm surgery and profile of ruptured intracranial. **Acta Neurochir**, [s.l.], v. 143, n. 7, p.655-664, 2001.

PARK, J.; TARI, M.J.; HAHN, H.T. Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process. **Rapid Prototyping Journal**, [s.l.], v. 6, n. 1, p.36-50, mar. 2000.

PECHLIVANIS, I.; SCHMIEDER, K.; SCHOLZ, M.; KÖNIG, M.; HEUSER, L.; HARDERS, A. 3-Dimensional computed tomographic angiography for use of surgery planning in patients with intracranial aneurysms. **Acta Neurochirurgica**, [s.l.], v. 147, n. 10, p.1045-1053, 29 jul. 2005.

PROKOP, M. Princípios de angiografia por tomografia computadorizada. In: RUBIN, G.D., ROFSKY, N.M. (Ed). **Angiografia por TC e RM. Avaliação vascular abrangente**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010. p.3-44.

RAJESH, G.; MAJI P.K.; BHATTACHARYA M.; CHOUDHURY A.; ROY N.; SAXENA A.; BHOWMICK A. K. Liquid Silicone Rubber Vulcanizates: Network Structure – Property Relationship and Cure Kinetics. **Polymers & Polymer Composites**, [s.l.], v.18, n. 9, p.477-488, 2010.

RINKEL, G.J.E., DJIBUTI, M.; ALGRA, A.; VAN GIJN, J. Prevalence and Risk of Rupture of Intracranial Aneurysms: A Systematic Review. **Stroke**, [s.l.], v. 29, n. 1, p.251-256, 1 jan. 1998.

RINNE, J.; HERNESNIEMI, J.; NISKANEN, M.; VAPALAHTI, M. Management outcome for multiple intracranial aneurysms. **Neurosurgery**, [s.l.], v. 36, n. 1, p.31-37, 1995.

RINNE, J.; RINNE, J.; HERNESNIEMI, J.; NISKANEN, M.; VAPALAHTI, M. Analysis of 561 Patients with 690 Middle Cerebral Artery Aneurysms: Anatomic and Clinical Features As Correlated to Management Outcome. **Neurosurgery**, [s.l.], v. 38, n. 1, p.2-9, jan. 1996.

RONKAINEN, A.; HERNESNIEMI, J.; PURANEN, M.; NIEMITUKIA, L.; VANNINEN, R.; RYYNÄNEN, M.; KUIVANIEMI, H.; TROMP, G. Familial intracranial aneurysms. *Lancet.*, v. 349, n. 9049, p.380-384, Feb 8 1997.

STEINER, T.; JUVELA, S.; UNTERBERG, A.; JUNG. C.; FORSTING, M.; RINKEL, G.; EUROPEAN STROKE ORGANIZATION. European Stroke Organization Guidelines for the Management of Intracranial Aneurysms and Subarachnoid Haemorrhage. **Cerebrovascular Diseases**, [s.l.], v. 35, n. 2, p.93-112, 2013.

SUAREZ, J.I.; TARR, R.W.; SELMAN, W.R. Aneurysmal subarachnoid hemorrhage. **N Engl J Med**, [s.l.], v. 354, n. 4, p.387-396, 2006.

TENJIN, H.; OKANO, Y. Training model for cerebral aneurysm clipping. **Interdisciplinary Neurosurg**, [s.l.], v. 10, p.114–118, 2017.

THE ACROSS GROUP. Epidemiology of Aneurysmal Subarachnoid Hemorrhage in Australia and New Zealand: Incidence and Case Fatality From the Australasian Cooperative Research on Subarachnoid Hemorrhage Study (ACROSS). **Stroke**, [s.l.], v. 31, n. 8, p.1843-1850, 1 ago. 2000.

TUKURU, N.; SHIVALINGE G. K.P.; SYED M.A.; BADAMI, S. Rapid Prototype Technique in Medical Field. **Research J. Pharm. and Tech**, [s.l.], v. 1, n. 4, p.341-344, 2008

VLOEBERGHES, M., GLOVER, A.; BENFORD, S.; JONES, A.; WANG P.; BECKER, A. Virtual neurosurgery, training for the future. **British J Neurosurg**, [s.l.], v. 21, n. 3, p.262-267, jan. 2007.

VOLPATO, N. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Blucher, 2017. 272 p.

WINDER, J.; BIBB, R. Medical Rapid Prototyping Technologies: State of the Art and Current Limitations for Application in Oral and Maxillofacial Surgery. **J Oral and Maxillofacial Surgery**, [s.l.], v. 63, n. 7, p.1006-1015, jul. 2005.

WURM, G., TOMANCOK, B.; POGADY, P.; HOLL, K.; TRENKLER, J. Cerebrovascular stereolithographic biomodeling for aneurysm surgery. **J Neurosurg**, [s.l.], v. 100, n. 1, p.139-145, jan. 2004.

YASARGIL MG. From the microsurgical laboratory to the operating theatre. **Acta Neurochir** (Wien), v. 147, p.465-468, 2005.

YASUI, T.; KISHI, H.; KOMIYAMA, M.; IWAI, Y.; YAMANAKA, K.; NISHIKAWA, M.; NAKAJIMA, H.; MORIKAWA, T. The limitations of three-dimensional CT angiography (3D-CTA) in the diagnosis of cerebral aneurysms. **No Shinkei Geka**, [s.l.], v. 28, n. 11, p.975-981, 2000.

APÊNDICE 1**TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO****INVESTIGAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE BIOMODELOS 3D FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA PARA ELEIÇÃO DE CLIPE E SIMULAÇÃO CIRÚRGICA NAS MICROCIRURGIAS DE ANEURISMAS INTRACRANIANOS**

Eu, Dr. André Giacomelli Leal, pesquisador do INC (Instituto de Neurologia de Curitiba), estou lhe convidando a participar de um estudo intitulado: INVESTIGAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE BIOMODELOS 3D FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA PARA ELEIÇÃO DE CLIPE E SIMULAÇÃO CIRÚRGICA NAS MICROCIRURGIAS DE ANEURISMAS INTRACRANIANOS, cujo objetivo é a reprodução por meio de impressão tridimensional de réplica (cópia) em resina (espécie de material plástico) do aneurisma (dilatação de vaso sanguíneo arterial de paredes frágeis e com tendência à romper-se) cerebral que foi detectado nos seus exames.

No que consiste a minha participação no estudo?

Para que você participe deste estudo não se faz necessário nenhum exame adicional a aqueles que já seriam realizados em virtude da detecção de seu aneurisma cerebral. Caso concorde, você será submetido (a) a um exame de angio-tomografia cerebral, o qual consiste em imagens dos vasos sanguíneos cerebrais obtidas por um aparelho de tomografia computadorizada, após a injeção de contraste iodado endovenoso (50 ml). As imagens obtidas através de seu exame serão utilizadas para uma finalidade de pesquisa, além do uso médico das mesmas. A pesquisa visa contribuir com o tratamento de seu aneurisma cerebral, caso este necessite de tratamento cirúrgico.

O que pode ocorrer comigo em decorrência dos procedimentos da pesquisa?

A injeção de contraste endovenoso durante o exame de angio-tomografia implica em uma punção venosa, a qual eventualmente pode ser dolorosa. Ainda que raramente, durante a injeção de contraste endovenoso, é possível ocorrer extravasamento do mesmo para baixo da pele, levando à inflamação, a qual pode demorar dias e necessitar de tratamento com pomadas. Caso você seja alérgico ao iodo, o contraste iodado pode causar alergias variáveis, que variam desde manchas na pele

até o inchaço do rosto e de estruturas do pescoço. Por este motivo, você deve sempre informar o seu médico sobre as suas alergias, para que medidas preventivas possam ser tomadas com a devida antecedência. Uma vez feito o exame, não há qualquer aspecto negativo na análise dos dados do mesmo ou do procedimento que será feito através dele com o intuito de criar um modelo plástico de seu aneurisma cerebral.

Existem outras formas de exame ou de tratamento além dos propostos pela pesquisa?

Ainda que o exame de angio-tomografia seja atualmente considerado como o melhor exame não invasivo, existe a opção de que você seja submetido a um exame de arteriografia digital cerebral para a determinação das características do seu aneurisma e para que seja realizado um plano para o seu tratamento. O exame de arteriografia digital implica em uma punção arterial ao invés de uma punção venosa. Esta punção é feita na altura da virilha e um cateter (caninho) é enfiado pela artéria femoral e sobe pelas grandes artérias até o seu pescoço, onde ele entra na artéria carótida para que seja então administrado um contraste iodado igual a aquele utilizado no exame de angio-tomografia. As complicações deste procedimento em si são potencialmente mais graves do que àquelas da angio-tomografia, porém as complicações alérgicas são as mesmas. Existe outro exame denominado angio-ressonância magnética de crânio, o qual pode também fazer imagens dos vasos (artérias e veias) intracranianos. Por causa da sua pior resolução, esse exame não é habitualmente utilizado no planejamento cirúrgico ou endovascular de aneurismas cerebrais atualmente, sendo apenas utilizado quando os dois procedimentos previamente mencionados são absolutamente contraindicados. Quanto à forma de tratamento dos aneurismas cerebrais, esses também podem ser tratados por meio endovascular, ou seja, através de um cateter (caninho) enfiado na virilha; porém, esta forma de tratamento não se aplica a todos os aneurismas e você deve discutir a indicação do tipo de tratamento (se cirúrgico ou endovascular) com o seu médico.

Quais são as vantagens que terei em participar do estudo?

A vantagem que você terá em participar do estudo será a de que o investigador principal (Dr. André Giacomelli Leal) poderá realizar a impressão plástica de seu aneurisma, permitindo a simulação cirúrgica da clipagem (colocação de um grampo

de metal inerte (titânio) em seu aneurisma, minimizando a possibilidade de ruptura do mesmo. Esta simulação poderá aumentar a facilidade da cirurgia, uma vez que o neurocirurgião poderá diminuir o tempo cirúrgico, a manipulação dos vasos e do cérebro, e, por conseguinte diminuir a taxa de complicações cirúrgicas de qualquer natureza.

O que acontece comigo se eu não participar?

Você será tratado da mesma maneira que seria e será submetido aos mesmos exames. Apenas as informações acima não serão obtidas e o planejamento do tratamento de seu aneurisma cerebral será feito com base apenas nos seus exames de imagem. Seu médico irá continuar a atendê-lo de forma profissional e com boa vontade.

O meu nome será divulgado?

Não. A confidencialidade (caráter anônimo das informações a seu respeito) será observada. Seus dados estarão codificados em um banco de dados de forma que o seu nome será omitido deles. Em todas as planilhas, tabelas, imagens e filmes deste estudo, o seu nome será omitido. Apenas o investigador terá acesso a esta informação e ela não será compartilhada com uma segunda pessoa (exemplo, com o estatístico). Caso as informações obtidas desta pesquisa sejam divulgadas em eventos científicos ou publicadas em revistas médicas, o seu nome será igualmente omitido.

Caso eu entre no estudo, poderei desistir?

Sim, você pode se recusar a participar do estudo ou retirar o seu consentimento (pedir para que as informações obtidas não sejam utilizadas) a qualquer momento, sem precisar justificar e sem que ocorram retaliações, por parte da equipe médica.

Consentimento Livre e Esclarecido

Eu,....., li,
juntamente com o Dr. André Giacomelli Leal, e tive a oportunidade de esclarecer todas as minhas dúvidas com o mesmo. Portanto, recebi esclarecimentos necessários e detalhados sobre a os procedimentos da pesquisa. Estou ciente de que minha privacidade (anonimato) será respeitada, ou seja, nome ou qualquer dado

que possa de qualquer forma me identificar, será mantido em sigilo. Também fui informado de que posso me recusar a participar do estudo ou retirar meu consentimento a qualquer momento, sem precisar justificar e que, desejando sair da pesquisa, não implicará em qualquer prejuízo à assistência que venho recebendo. Da mesma forma, sei que é garantido a mim o livre acesso a todas as informações e esclarecimentos adicionais sobre o estudo, enfim, tudo o que eu queira saber antes, durante e depois da minha participação.

Sei que caso tenha novas dúvidas ou caso queira retirar o meu consentimento em participar, poderei fazê-lo a qualquer momento com o Dr. André Giacomelli Leal pelo telefone (41) 99171-0102, ou com o Comitê de Ética em Pesquisa em Seres Humanos do INC, através do telefone 3028-8545, ramal 9542, com a secretária Cibele, ou junto ao endereço do Instituto de Neurologia de Curitiba, rua Jeremias Maciel Perretto 300, Ecoville, Curitiba, PR.

Tendo sido orientado quanto ao teor de todo o aqui mencionado e tendo compreendido a natureza e o objetivo do já referido estudo, manifesto livre consentimento em participar, estando totalmente ciente de que não há nenhum valor econômico a receber ou a pagar, pela participação, e que devo receber e manter comigo uma copia idêntica deste termo, igualmente assinada e datada.

Nome do Participante:

Assinatura do Participante:

Local e data:

Nome do Investigador:

Assinatura do Investigador:

Local e data:

ANEXO 1

HOSPITAL ECOVILLE/
INSTITUTO DE NEUROLOGIA
DE CURITIBA S/C LTDA



PARECER DO COLEGIADO

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: PROTOTIPAGEM RÁPIDA PARA SIMULAÇÃO DE CLIPAGEM MICRO CIRÚRGICA DE ANEURISMAS INTRACRANIANOS

Pesquisador: Andre Giacomelli Leal

Área Temática:

Versão: 2

CAAE: 38996414.3.0000.5227

Instituição Proponente: Hospital ECOVILLE/ Instituto de Neurologia de Curitiba S/C Ltda

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 886.434

Data da Relatoria: 15/12/2014

Apresentação do Projeto:

O tratamento cirúrgico dos AI consiste da exclusão do aneurisma da circulação cerebral, através da clipagem microcirúrgica ou da embolização endovascular. Para orientar o tratamento, bem como auxiliar na escolha da técnica e estratégia cirúrgicas, vários métodos de imagem, invasivos e não invasivos, são utilizados. Entre os métodos não invasivos, a angiotomografia cerebral (ATC) é a mais utilizada, pois atinge quase 100% de especificidade e 95% de sensibilidade para a avaliação dos AI. No entanto, por apresentar as estruturas cerebrais em imagens bidimensionais, a ATC pode limitar a visualização do colo aneurismático, que é a principal região a ser claramente identificada pelo cirurgião durante o procedimento cirúrgico.

As principais dificuldades durante o tratamento microcirúrgico dos AI incluem a escolha de materiais apropriados a serem utilizados devido às variações anatômicas. É bem conhecido, em particular nos AI de colo largo e/ou complexos, que o planejamento cirúrgico é essencial a fim de evitar a manipulação excessiva dos vasos intracranianos e um tempo cirúrgico prolongado, os quais são fatores que predisõem à ruptura aneurismática intraoperatória, à infecção e ao aumento das taxas de morbidade e mortalidade. Prototipagem rápida (PR) é composto por um conjunto de tecnologias e processos automatizados capazes de gerar objetos em três dimensões (3D), a partir de imagens bidimensionais. É um

Endereço: Rua Jeremias Maciel Perreto, 300

Bairro: Campo Comprido

CEP: 81.210-310

UF: PR

Município: CURITIBA

Telefone: (41)3028-9542

Fax: (41)3028-8580

E-mail: cep@inc-neuro.com.br

HOSPITAL ECOVILLE/
INSTITUTO DE NEUROLOGIA
DE CURITIBA S/C LTDA



Continuação do Parecer: 886.434

processo ordenado de sobreposição de camadas de resina líquida, que possibilita a produção de estruturas 3D de uma maneira automatizada e barata.

Já foi estabelecida a viabilidade de fabricação de biomodelos em 3D de AI saculares e demonstrado o seu uso como coadjuvante no planejamento cirúrgico em um estudo previamente realizado pelo autor deste Projeto de Doutorado.

Objetivo da Pesquisa:

O objetivo do presente estudo é refinar a fabricação de biomodelos em 3D de AI saculares com um novo tipo de resina (maleável), a fim de permitir a escolha do clipe cirúrgico (tamanho e forma) e simular o seu implante, além de testá-lo momentos antes do seu implante real. Tais biomodelos serão comparados com imagens cirúrgicas reais, ao contrário do estudo de viabilidade que comparou os protótipos com imagens de angiografia cerebral com subtração digital. A amostra do estudo atual será ampliada.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Os riscos e benefícios são os mesmos da cirurgia como se não realizasse o estudo e é informado ao paciente no termo de consentimento.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

Projeto muito bem elaborado.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Os termos e documentação necessária para realização do projeto se encontram de acordo com as regras.

Recomendações:

Nenhuma.

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

Diante do exposto o Comitê de Ética em Pesquisa do Instituto de Neurologia de Curitiba de acordo com suas atribuições definidas pela Resolução 466/12 CNS manifesta-se pela aprovação do projeto conforme proposto para o início da pesquisa.

Solicitamos que seja apresentado a este CEP, relatórios semestrais sobre o andamento da pesquisa, bem como informações relativas às modificações do protocolo, cancelamento, encerramento e destino dos conhecimentos obtidos.

É dever do CEP acompanhar o desenvolvimento do projeto por meio de relatórios semestrais dos pesquisadores e de outras estratégias de monitoramento de acordo com o risco inerente a pesquisa.

Endereço: Rua Jeremias Maciel Perreto, 300
Bairro: Campo Comprido **CEP:** 81.210-310
UF: PR **Município:** CURITIBA
Telefone: (41)3028-9542 **Fax:** (41)3028-8580 **E-mail:** cep@inc-neuro.com.br

HOSPITAL ECOVILLE/
INSTITUTO DE NEUROLOGIA
DE CURITIBA S/C LTDA



Continuação do Parecer: 886.434

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

CURITIBA, 26 de Novembro de 2014

Assinado por:
PEDRO ANDRÉ KOWACS
(Coordenador)

Endereço: Rua Jeremias Maciel Perreto, 300
Bairro: Campo Comprido **CEP:** 81.210-310
UF: PR **Município:** CURITIBA
Telefone: (41)3028-9542 **Fax:** (41)3028-8580 **E-mail:** cep@inc-neuro.com.br

