

Simulazione biomeccanica delle coronarie con origine anomala

Relatore : Prof. Michele Conti

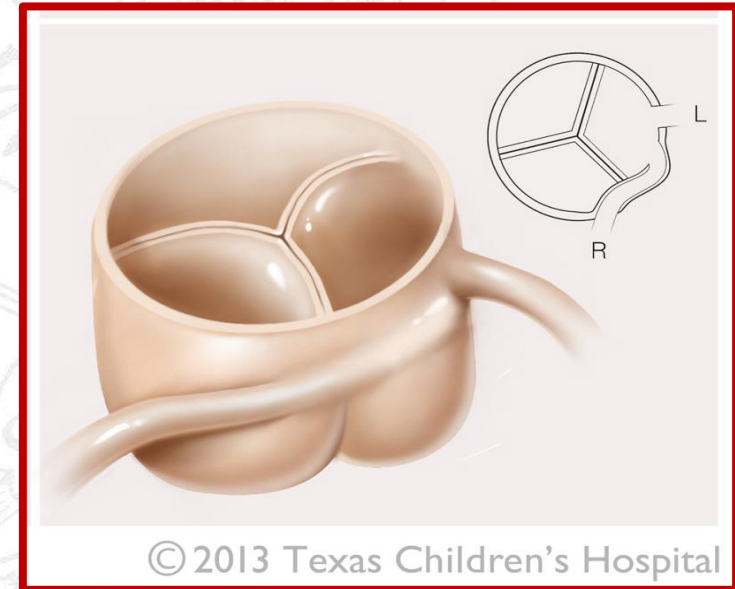
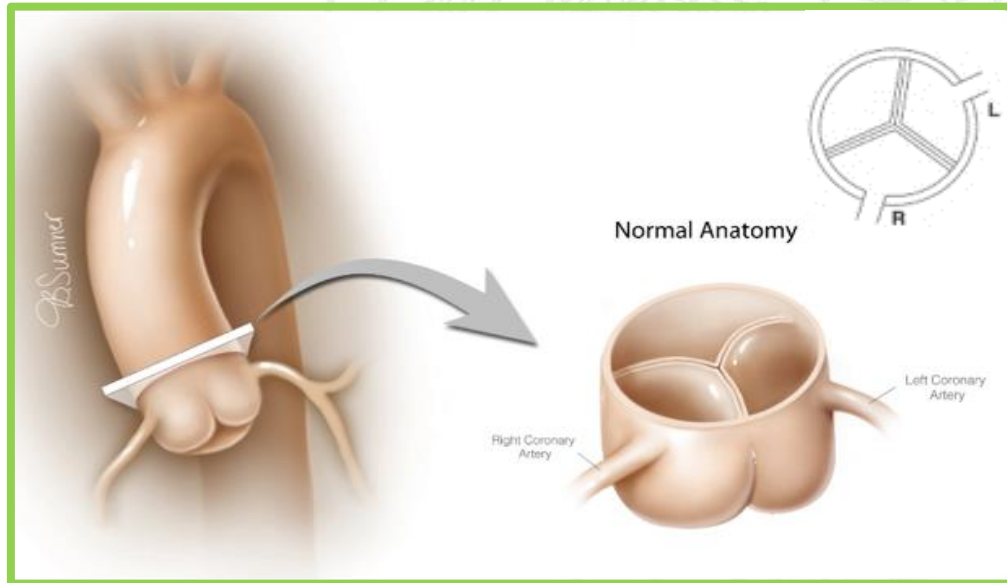
Correlatore : Ing. Giovanni Maria Formato

Candidato : Antonio Rosato

A.A. 2017-2018

Anomalie delle Coronarie

- Le coronarie, destra e sinistra, sono le arterie che riforniscono di sangue ossigenato il cuore
- In condizioni normali hanno origine ognuna da un seno di Valsalva del bulbo aortico, solitamente appena sopra la valvola aortica
- Le anomalie coronariche si caratterizzano per origine, decorso e terminazione
- Tipicamente un' **origine anomala (AAOCA)** porta la coronaria ad avere anche un percorso non fisiologico

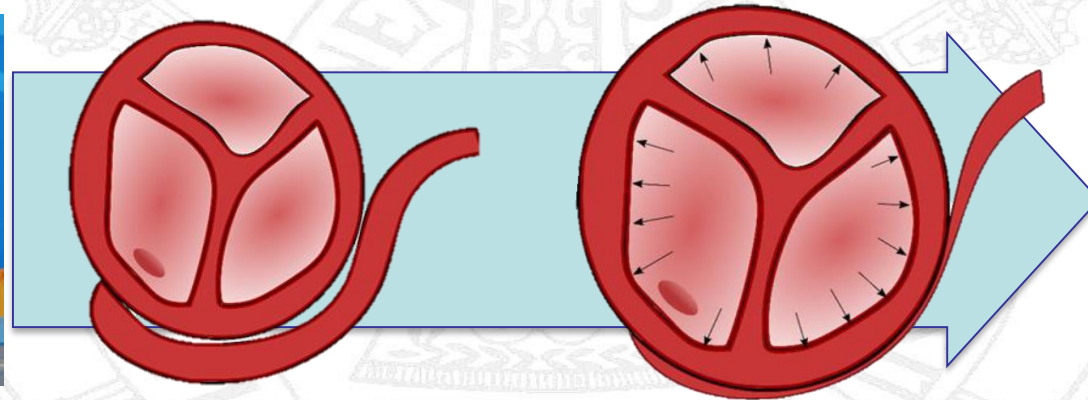


Caso d'interesse : coronarie con origine anomala dal seno opposto e con decorso intramurale (all'interno della parete aortica)

AAOCA e Morte Improvvisa

Tra i vari tipi di anomalie coronariche le AAOCA sono quelle che più frequentemente causano morte improvvisa

- Prevalenza nella popolazione: 0.1 – 1.07%
- **Soggetti a rischio : giovani atleti → 11% dei casi di morte improvvisa**
- Patologia silente e ipotesi contrastanti nella comunità scientifica



IPOTESI

L'espansione dell'aorta durante la sistole comprime la coronaria anomala, causando un restringimento del vaso e un ridotto apporto di sangue al muscolo cardiaco



MODELLO BIOMECCANICO



I.R.C.C.S.
POLICLINICO SAN DONATO
Gruppo ospedaliero San Donato

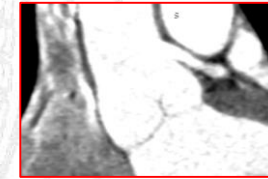
Obiettivo e Workflow

Sviluppo di un modello patient-specific per simulare l'espansione aortica e analizzare il restringimento (eventuale) del lume coronarico

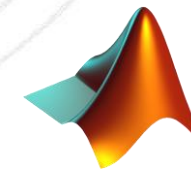
✓ **Realizzazione del modello *parametrico* CAD patient-specific della radice aortica e delle coronarie**



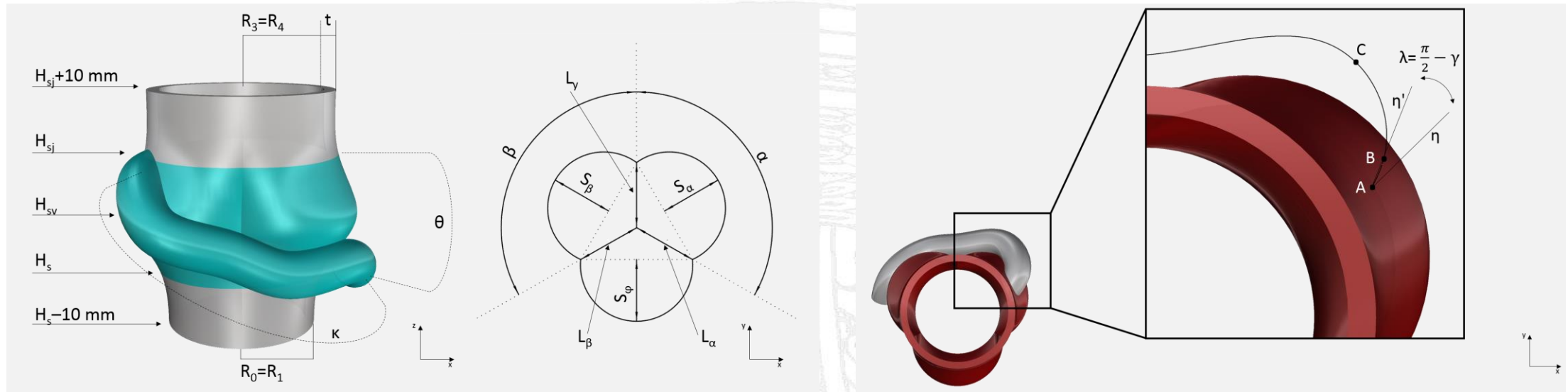
✓ **Simulazione espansione aorta tramite FEA**



✓ **Analisi lume della coronaria anomala**



Modello parametrico CAD iniziale



Modello idealizzato di radice aortica e coronaria anomala *

- Costruito sulla base di **22 parametri** che definiscono e regolano la geometria
 - **Valori dei parametri presi dalla letteratura medica**



Vantaggi

- Utile per simulare come il cambiamento di uno o più parametri, a parità degli altri, possa influire sull'eventuale restringimento della coronaria anomala

Svantaggi

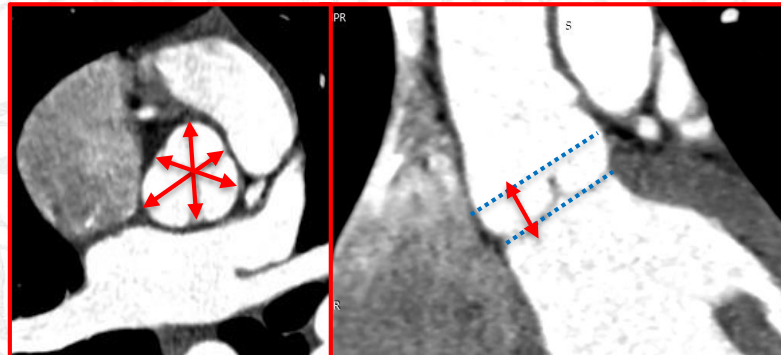
- Generato sulla base di valori medi, rappresenta un soggetto ideale
- Le misure di alcuni parametri non sono disponibili in letteratura

(*) Formato G, Lo Rito M, Auricchio F, Frigiola A, Conti M. Aortic Expansion Induces Lumen Narrowing in Anomalous Coronary Arteries: A Parametric Structural Finite Element Analysis. ASME. J Biomech Eng. 2018;140(11):111008-111008-9.

Verso il modello *patient-specific*

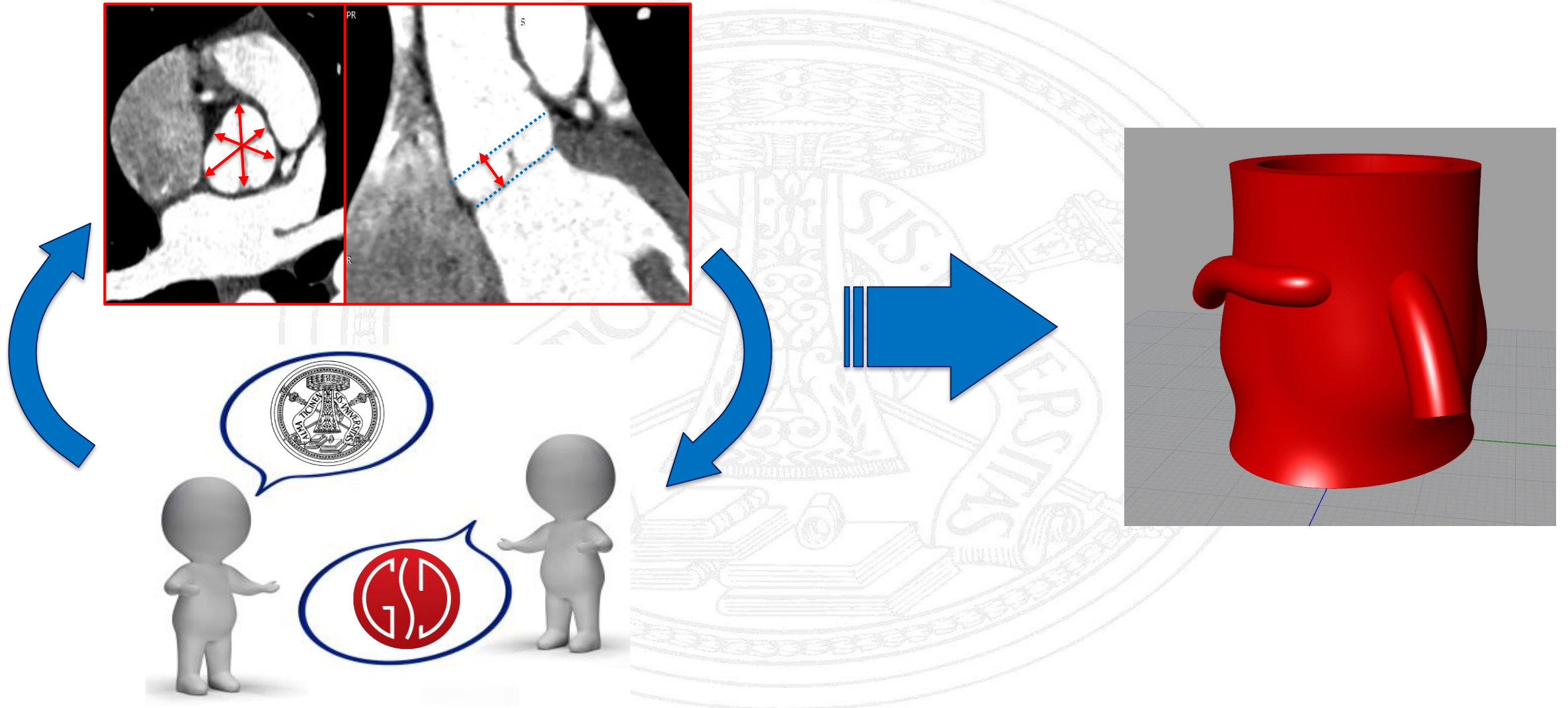
I parametri per la costruzione geometrica del modello possono essere estratti da imaging medico ottenendo una rappresentazione patient-specific

- Seguendo le indicazioni di radiologi e cardiocirurghi del Policlinico San Donato è stato concordato un set iniziale di **17 parametri**
 - **Misurati da 2 osservatori** su immagini CT di un paziente che presenta origine anomala della coronaria destra dal seno sinistro e decorso intramurale



- 17 parametri si sono dimostrati non sufficienti per la generazione del modello
 - Sono stati ipotizzati altri 16 parametri in seguito sottoposti a validazione clinica

Verso il modello *patient-specific*



Nuovo Modello

Costruito con un totale di 33 PARAMETRI

- 9 ereditati dal modello di partenza
- 24 definiti in maniera alternativa

Principali modifiche al modello iniziale:

➤ **RADICE AORTICA (19 parametri)**

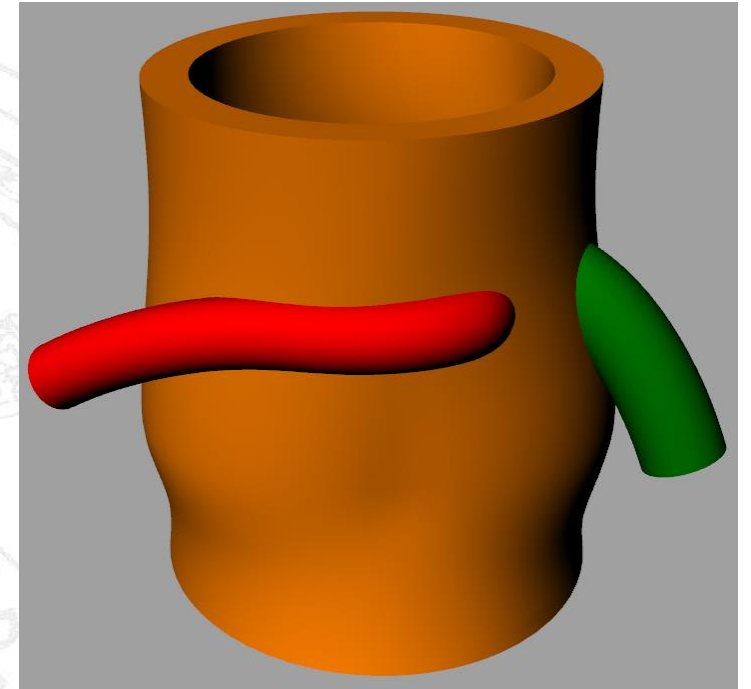
- *Tratto di efflusso del ventricolo sinistro e annulus di forma ellittica*
- *Possibilità di regolare in maniera indipendente l'altezza a cui ogni seno di Valsalva si innesta sulla radice aortica*

➤ **CORONARIA SANA (6 parametri)**

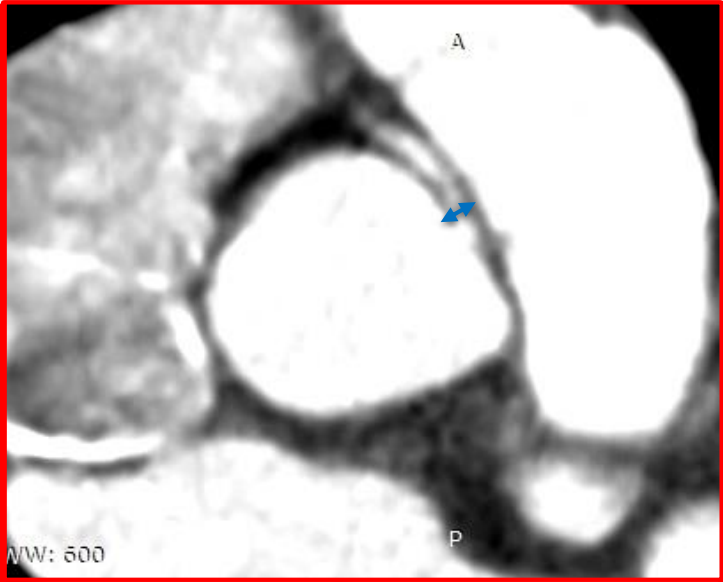
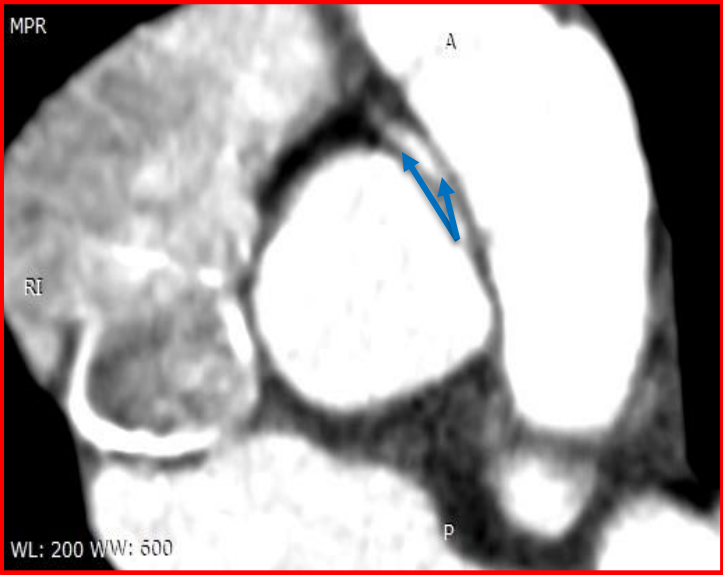
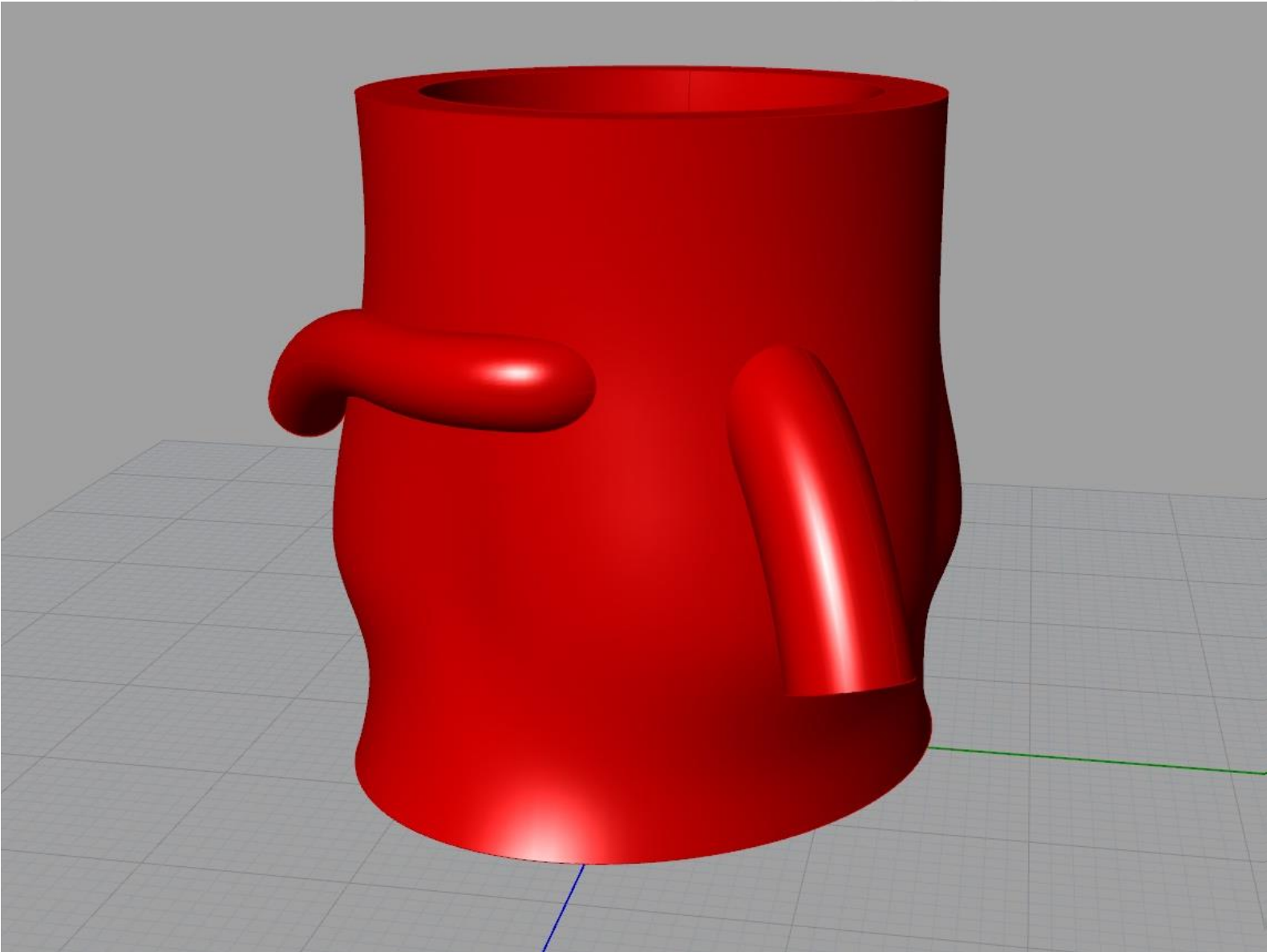
- *Possibilità di regolare inclinazione e punto di origine sulla radice aortica*

➤ **CORONARIA ANOMALA (8 parametri)**

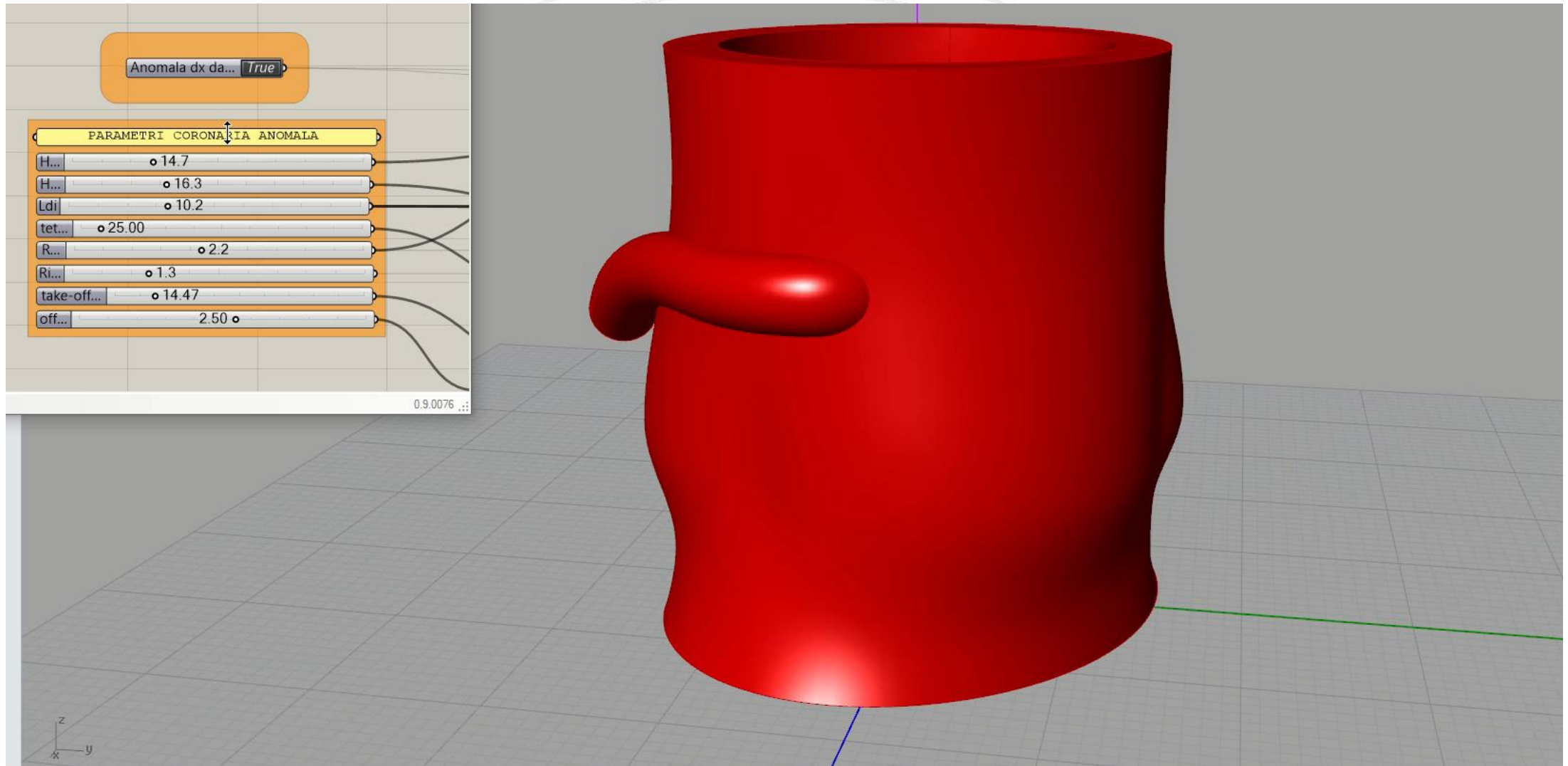
- *Possibilità di regolare il punto di origine sulla radice aortica → si può simulare una coronaria anomala destra che si origina dal seno sinistro, una sinistra dal seno destro e anche un'origine anomala dal seno non coronarico*



Costruzione Nuovo Modello



Nuovo Modello Parametrico



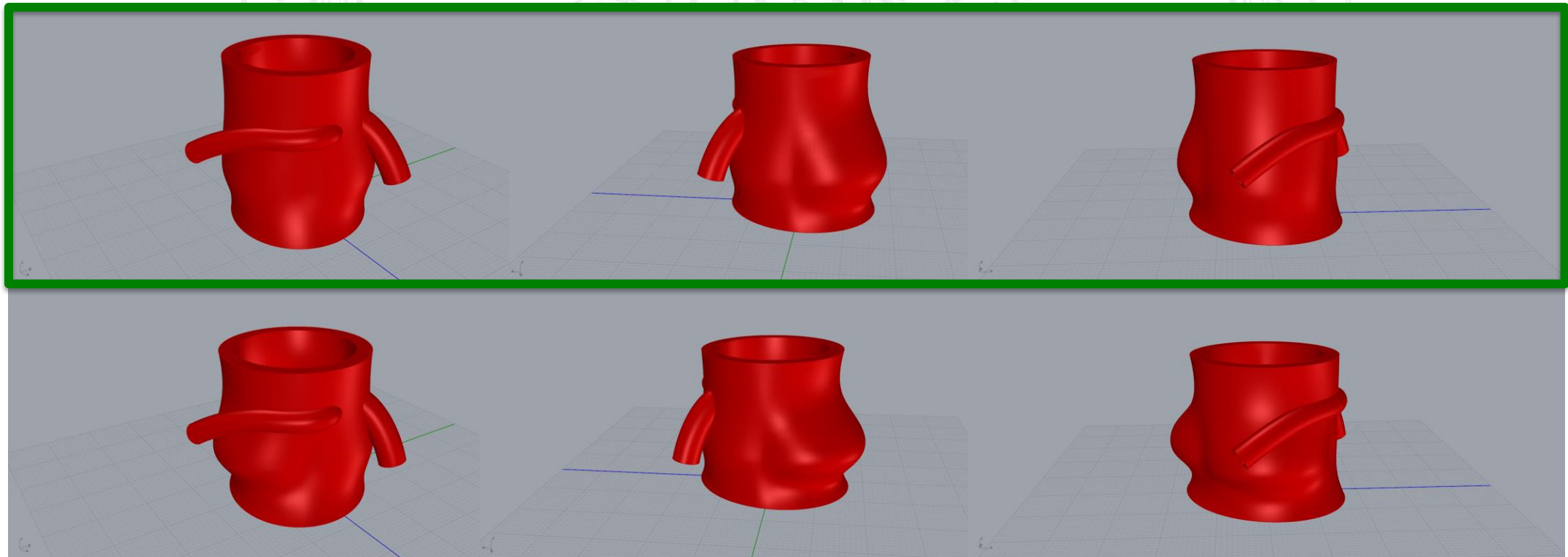
Modelli Patient-Specific

- 2 osservatori → 2 modelli patient-specific dello stesso soggetto ottenuti dalle misure dei parametri

	D_{max0}	D_{min0}	D_{max1}	D_{min1}	H_{sv}	S_{nc}	S_d	S_s	H_{sin}	D_3	H_{cs}	θ_s	H_{ca}	H_{fdi}	L_{di}	θ_a	θ_{off}
p1ob1	2,69	2,09	2,78	2,27	0,531	2,73	2,4	2,52	1,86	2,28	1,49	61,34	1,47	1,63	1,02	25	14,47
p1ob2	2,8	2,1	2,9	2,3	0,5	2,9	2,6	2,5	1,5	2,4	1,4	62	1,4	1,55	1	24	15
Differenza %	4,1%	0,5%	4,3%	1,3%	-5,8%	6,2%	8,3%	-0,8%	-19,4%	5,3%	-6,0%	1,1%	-4,8%	-4,9%	-2,0%	-4,0%	3,7%

Confronto effettuato per i primi 17 parametri concordati e misurati dagli observers (lunghezze in cm, angoli in gradi)

■ differenze maggiori del 5%
■ differenze maggiori del 10%



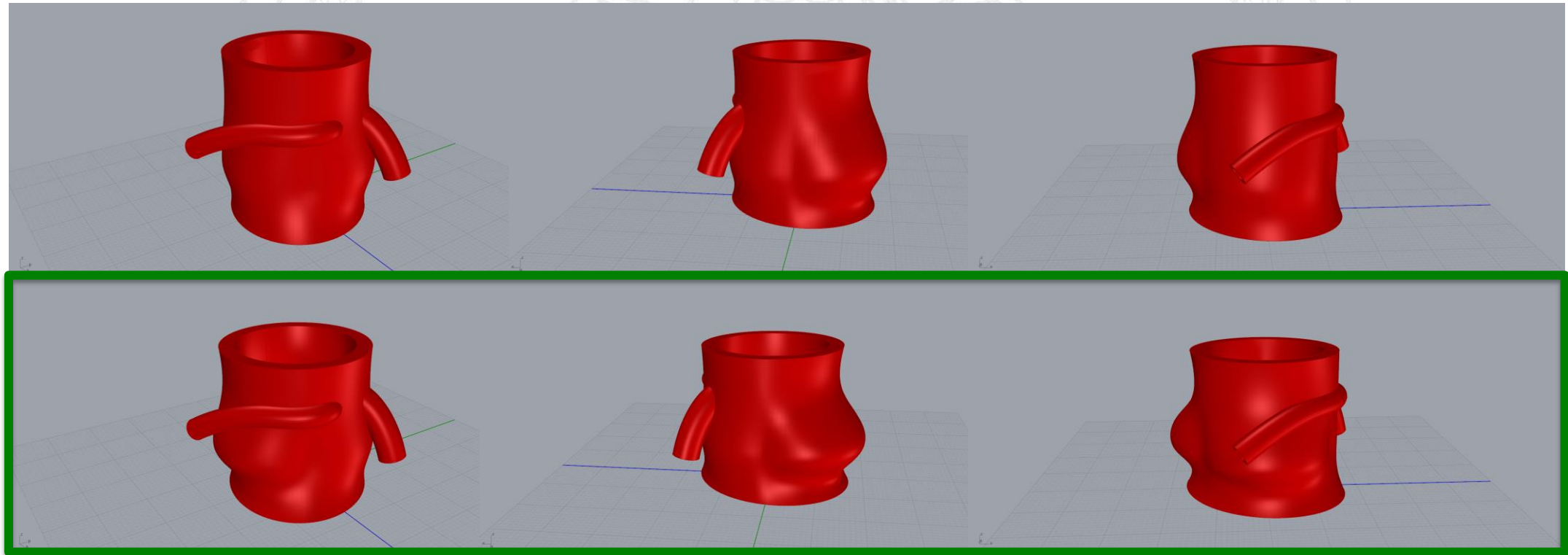
Modelli Patient-Specific

➤ 2 osservatori → 2 modelli patient-specific dello stesso soggetto ottenuti dalle misure dei parametri

	<i>Dmax0</i>	<i>Dmin0</i>	<i>Dmax1</i>	<i>Dmin1</i>	<i>Hsv</i>	<i>Snc</i>	<i>Sd</i>	<i>Ss</i>	<i>Hsin</i>	<i>D3</i>	<i>Hcs</i>	θ_s	<i>Hca</i>	<i>Hfdi</i>	<i>Ldi</i>	θ_a	θ_{off}
p1ob1	2,69	2,09	2,78	2,27	0,531	2,73	2,4	2,52	1,86	2,28	1,49	61,34	1,47	1,63	1,02	25	14,47
p1ob2	2,8	2,1	2,9	2,3	0,5	2,9	2,6	2,5	1,5	2,4	1,4	62	1,4	1,55	1	24	15
Differenza %	4,1%	0,5%	4,3%	1,3%	-5,8%	6,2%	8,3%	-0,8%	-19,4%	5,3%	-6,0%	1,1%	-4,8%	-4,9%	-2,0%	-4,0%	3,7%

Confronto effettuato per i primi 17 parametri concordati e misurati dagli observers (lunghezze in cm, angoli in gradi)

■ differenze maggiori del 5%
■ differenze maggiori del 10%



Confronto Modelli

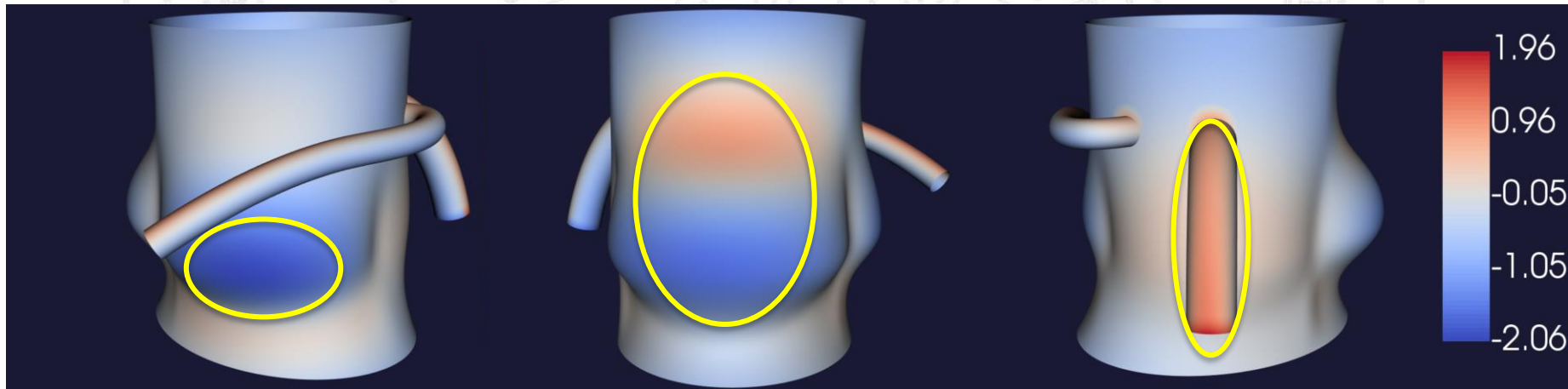
➤ 2 osservatori → 2 modelli patient-specific dello stesso soggetto ottenuti dalle misure dei parametri

	<i>Dmax0</i>	<i>Dmin0</i>	<i>Dmax1</i>	<i>Dmin1</i>	<i>Hsv</i>	<i>Snc</i>	<i>Sd</i>	<i>Ss</i>	<i>Hsin</i>	<i>D3</i>	<i>Hcs</i>	θ_s	<i>Hca</i>	<i>Hfdi</i>	<i>Ldi</i>	θ_a	θ_{off}
p1ob1	2,69	2,09	2,78	2,27	0,531	2,73	2,4	2,52	1,86	2,28	1,49	61,34	1,47	1,63	1,02	25	14,47
p1ob2	2,8	2,1	2,9	2,3	0,5	2,9	2,6	2,5	1,5	2,4	1,4	62	1,4	1,55	1	24	15
Differenza %	4,1%	0,5%	4,3%	1,3%	-5,8%	6,2%	8,3%	-0,8%	-19,4%	5,3%	-6,0%	1,1%	-4,8%	-4,9%	-2,0%	-4,0%	3,7%

Confronto effettuato per i primi 17 parametri concordati e misurati dagli observers (lunghezze in cm, angoli in gradi)

■ differenze maggiori del 5%
■ differenze maggiori del 10%

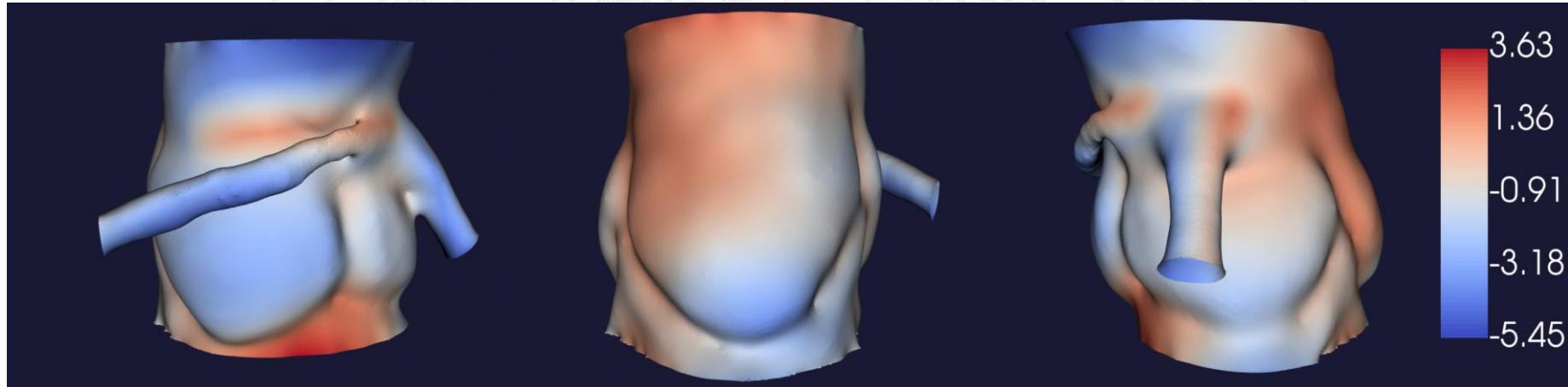
Discrepanza tra le superfici interne dei 2 modelli (in mm)



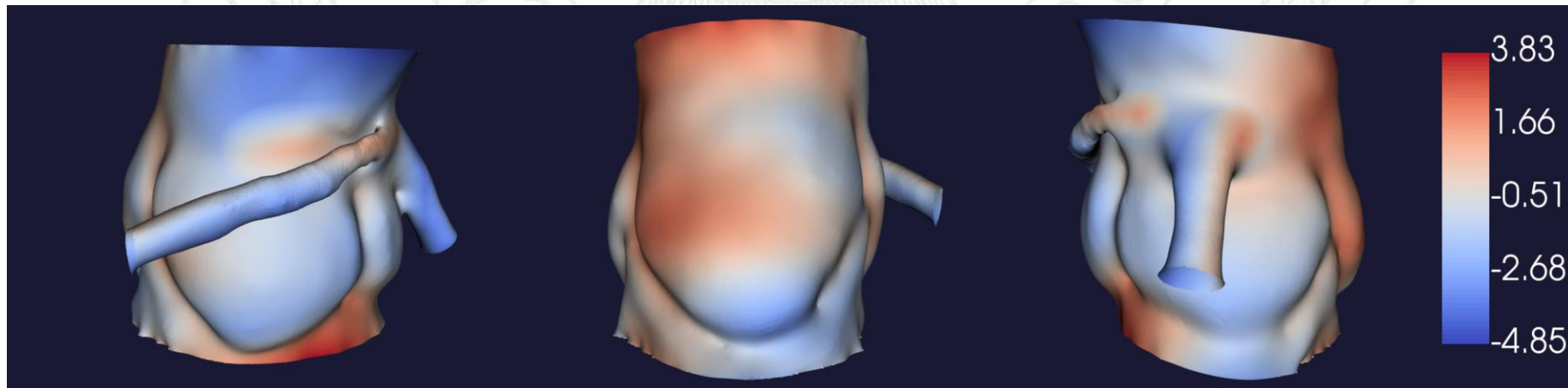
La superficie ottenuta dalle misure dell'osservatore 1 (non visibile) è stata presa come riferimento

Confronto con Ricostruzione 3D

- I modelli patient-specific ottenuti sono stati confrontati con la ricostruzione 3D ricavata tramite **segmentazione delle immagini tomografiche**
 - Differenze maggiori intorno ai 5 mm per entrambi i modelli



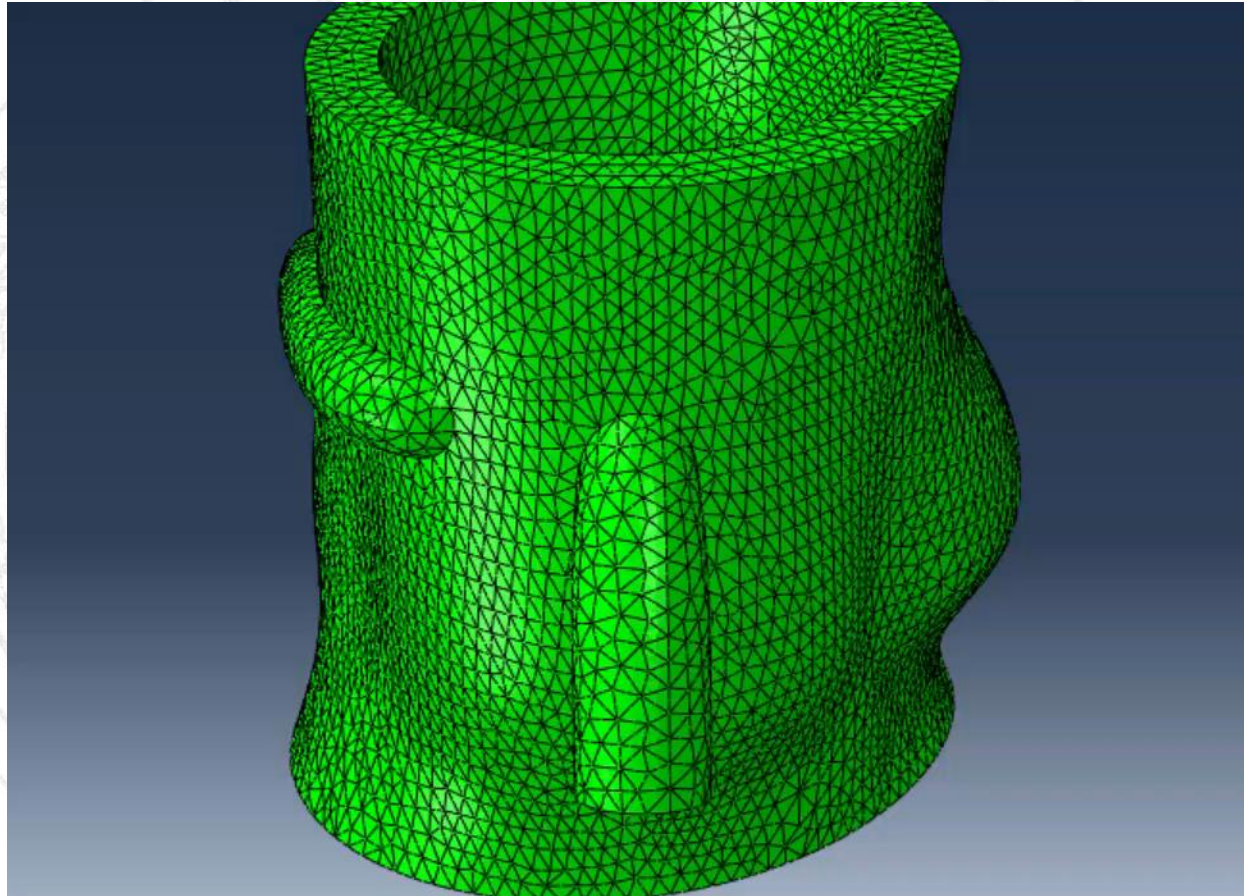
Distanza dalla superficie interna ottenuta con le misure dell'osservatore 1 (non visibile)



Distanza dalla superficie interna ottenuta con le misure dell'osservatore 2 (non visibile)

Simulazione Espansione Aorta

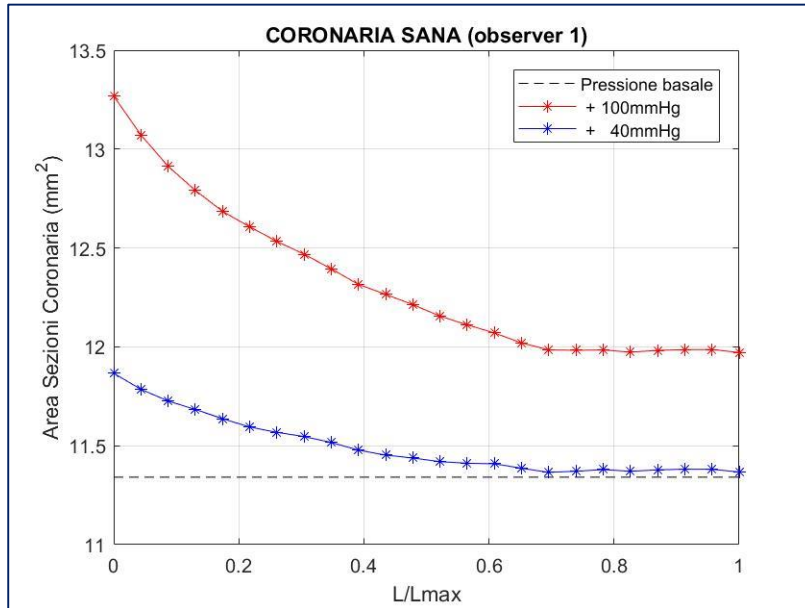
- **Analisi FE** per simulare l'espansione in fase sistolica



Simulazione di una pressione sistolica di 180 mmHg (sforzo intenso) sul modello ottenuto dalle misure dell'osservatore 1

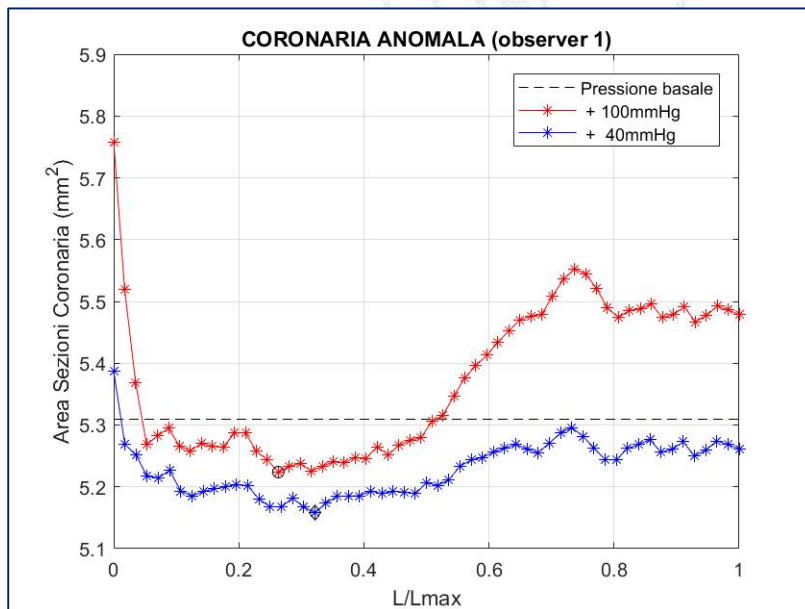
- **Estrazione della superficie interna delle coronarie deformate** → **Analisi area sezioni**

Lume Coronarie (observer 1)



- Riferimento basale → area sezioni costante
- La **coronaria normale** mostra una maggiore espansione all'inizio che si riduce in maniera graduale fino al livello distale
 - *Non si nota riduzione della sezione rispetto al riferimento basale*

	120 mmHg	180 mmHg
Espansione prossimale	4,6%	17,0%
Espansione distale	0,2%	5,6%



- La **coronaria anomala** si espande all'origine ma immediatamente dopo mostra un **restringimento rispetto alla sezione al livello basale**
 - *Alla pressione di 120 mmHg per tutta la lunghezza della coronaria*

	120 mmHg	180 mmHg
Espansione prossimale	1,5%	8,4%
Espansione distale	- 0,9%	3,2%
Massimo restringimento	- 2,9%	- 1,6%

Conclusioni

Le simulazioni condotte sui modelli patient-specific ottenuti hanno mostrato:

- *Restringimento massimo della coronaria anomala non superiore al 3%*
- *Assenza dell'occlusione del lume*
- ***Differente espansione della coronaria anomala rispetto alla sana***

Sviluppi futuri

- **Validazione clinica del modello con un numero maggiore di soggetti**
 - *In programma col Policlinico San Donato di testare il modello su **5 pazienti con l'anomalia e 5 pazienti sani***
- **Miglioramento del modello parametrico CAD**
 - *Spessore variabile della parete aortica*
 - *Inclusione nel modello della valvola aortica*
- **Analisi fluidodinamica, validazione sperimentale delle simulazioni**



*Nel lungo periodo → **ottenere un tool di supporto per i medici** nella decisione sull'intervento chirurgico*

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

**Simulazione biomeccanica delle
coronarie con origine anomala**

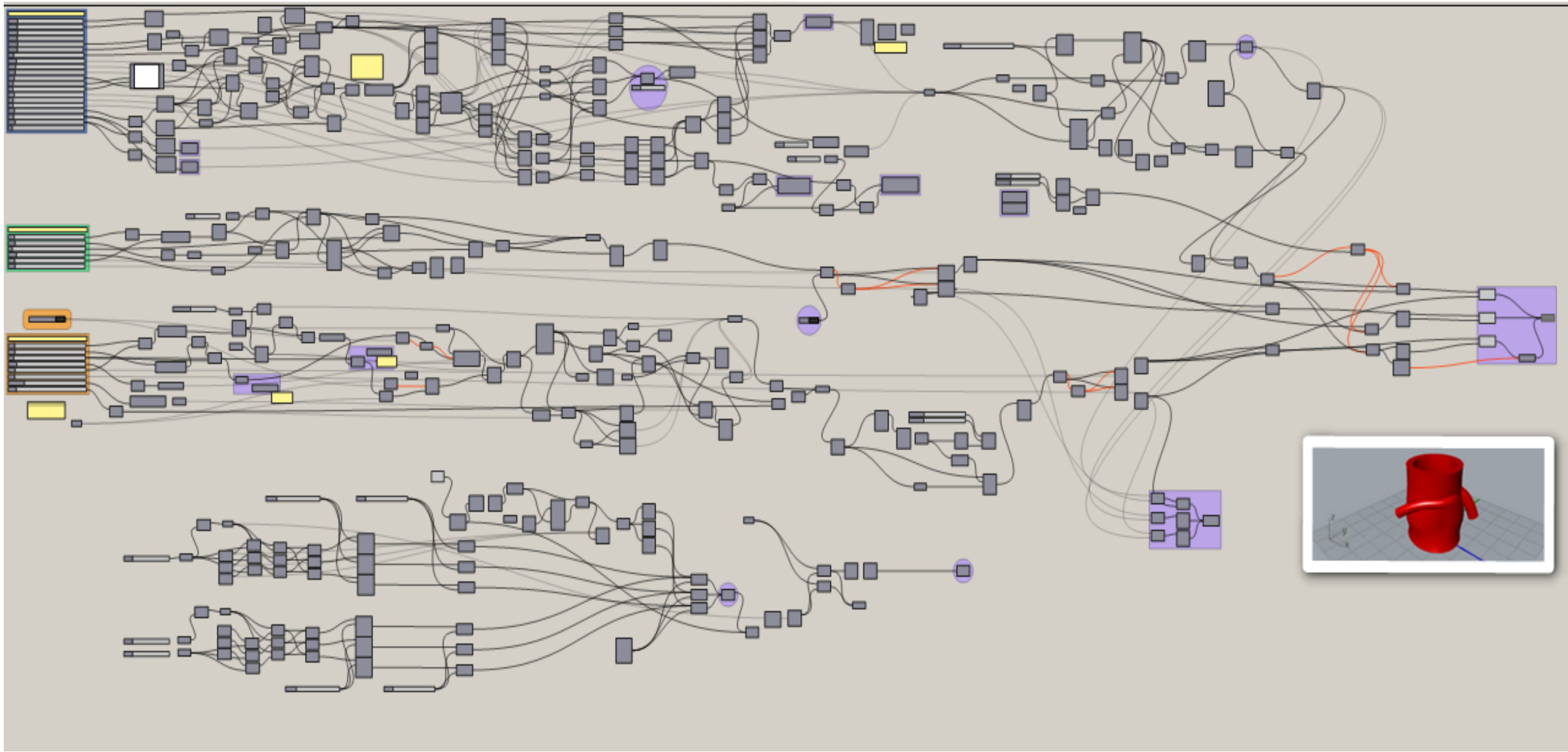
Relatore : Prof. Michele Conti

Correlatore : Ing. Giovanni Maria Formato

Candidato : Antonio Rosato

A.A. 2017-2018

Appendice - Grasshopper



Appendice - Tabella Parametri Modello

33 PARAMETRI

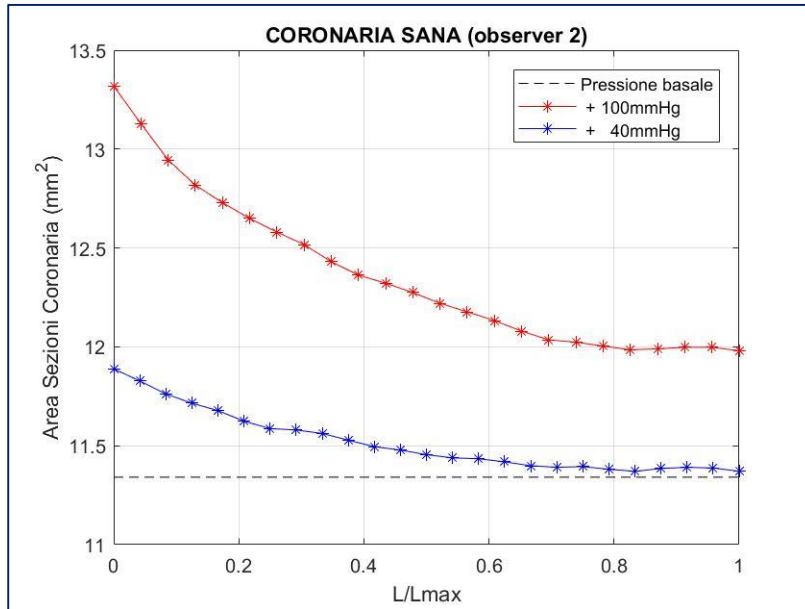
- 9 parametri del modello di partenza
- 24 nuovi

Descrizione parametri	Simbolo	Unità di misura
<i>Diametro massimo al tratto di efflusso del ventricolo sinistro</i>	<i>Dmax0</i>	<i>mm</i>
<i>Diametro minimo al tratto di efflusso del ventricolo sinistro</i>	<i>Dmin0</i>	<i>mm</i>
<i>Diametro massimo alla base dei seni</i>	<i>Dmax1</i>	<i>mm</i>
<i>Diametro minimo alla base dei seni</i>	<i>Dmin1</i>	<i>mm</i>
<i>Altezza apici triangoli intercuspidali</i>	<i>H2</i>	<i>mm</i>
<i>Diametro in corrispondenza degli apici dei triangoli intercuspidali</i>	<i>D2</i>	<i>mm</i>
<i>Altezza punto più basso del seno non coronarico (nadir cusvide non coronarica)</i>	<i>Hsnc</i>	<i>mm</i>
<i>Altezza punto più basso del seno destro (nadir cusvide destra)</i>	<i>Hsd</i>	<i>mm</i>
<i>Altezza punto più basso del seno sinistro (nadir cusvide sinistra)</i>	<i>Hss</i>	<i>mm</i>
<i>Altezza della massima protrusione dei seni di Valsalva</i>	<i>Hsv</i>	<i>mm</i>
<i>Distanza tra il punto di massima protrusione del seno destro e la commissura opposta</i>	<i>Sd</i>	<i>mm</i>
<i>Distanza tra il punto di massima protrusione del seno sinistro e la commissura opposta</i>	<i>Ss</i>	<i>mm</i>
<i>Distanza tra il punto di massima protrusione del seno non coronarico e la commissura opposta</i>	<i>Snc</i>	<i>mm</i>
<i>Distanza tra le commissure nel seno non coronarico</i>	<i>Lnc</i>	<i>mm</i>
<i>Distanza tra le commissure nel seno destro</i>	<i>Ld</i>	<i>mm</i>
<i>Distanza tra le commissure nel seno sinistro</i>	<i>Ls</i>	<i>mm</i>
<i>Altezza della giunzione sinotubulare</i>	<i>Hsin</i>	<i>mm</i>
<i>Diametro giunzione sinotubulare</i>	<i>D3</i>	<i>mm</i>
<i>Spessore parete radice aortica</i>	<i>t</i>	<i>mm</i>
<i>Altezza ostio coronaria sana</i>	<i>Hcs</i>	<i>mm</i>
<i>Angolo tra la coronaria sana e Snc</i>	θ_s	$^\circ$
<i>Lunghezza coronaria sana nel tratto prossimale</i>	<i>L</i>	<i>mm</i>
<i>Inclinazione coronaria sana</i>	β	$^\circ$
<i>Diametro interno coronaria sana</i>	<i>Dis</i>	<i>mm</i>
<i>Spessore parete coronaria sana</i>	<i>ts</i>	<i>mm</i>
<i>Altezza ostio coronaria anomala</i>	<i>Hca</i>	<i>mm</i>
<i>Altezza di fine decorso intramurale della coronaria anomala</i>	<i>Hfdi</i>	<i>mm</i>
<i>Lunghezza del decorso intramurale della coronaria anomala</i>	<i>Ldi</i>	<i>mm</i>
<i>Angolo tra la coronaria anomala e Snc</i>	θ_a	$^\circ$
<i>Angolo di take-off della coronaria anomala</i>	θ_{off}	$^\circ$
<i>Diametro interno coronaria anomala</i>	<i>Dia</i>	<i>mm</i>
<i>Spessore parete coronaria anomala</i>	<i>ta</i>	<i>mm</i>
<i>Distanza tra parete aortica e parete della coronaria anomala nel tratto intramurale</i>	<i>offset</i>	<i>mm</i>

Ipotesi principali:

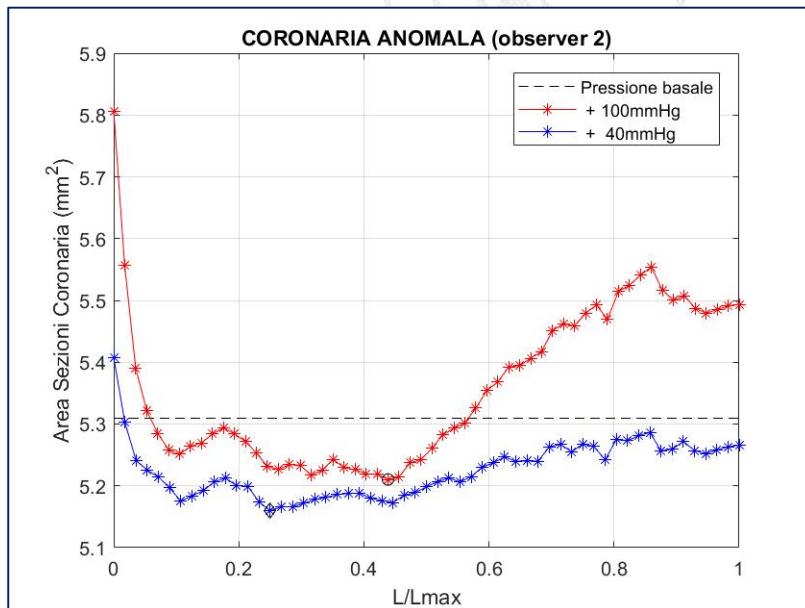
- Il modello ottenuto rappresenta radice aortica e coronarie alla **fine della fase diastolica** (pressione interna: 80 mmHg)
- Vincolati movimenti longitudinali e circonferenziali
- Caricato con una **pressione uniforme** applicata sulla parete interna dell'aorta e delle coronarie
 - *Pressione aorta = Pressione coronarie + 30 mmHg*
- Stesse proprietà meccaniche per l'aorta e le 2 coronarie
 - *Materiale omogeneo isotropo elastico lineare con **modulo di Young = 1 MPa** e coefficiente **di Poisson = 0.45***

Appendice - Lume Coronarie (observer 2)



- La coronaria normale mostra una maggiore espansione all'inizio che si riduce in maniera graduale fino al livello distale
 - *Non si nota riduzione della sezione rispetto al riferimento basale*

	120 mmHg	180 mmHg
Espansione prossimale	4,8%	17,4%
Espansione distale	0,3%	5,6%



- La coronaria anomala si espande all'origine ma immediatamente dopo mostra un restringimento rispetto alla sua sezione al livello basale
 - *Alla pressione di 120 mmHg per tutta la lunghezza della coronaria*

	120 mmHg	180 mmHg
Espansione prossimale	1,9%	9,4%
Espansione distale	-0,8%	3,5%
Massimo restringimento	-2,8%	-1,9%