



# Impacto das condições de contorno da Aorta na simulação hemodinâmica

## IMPACT OF AORTA'S BOUNDARY CONDITIONS IN HEMODYNAMICS SIMULATION

Kenny de Vasconcelos Nunes\*, Ricardo de Vasconcelos Salvo†

### RESUMO

De acordo com a OMS, doenças cardíacas permanecem sendo a principal causa de morte em todo o mundo nos últimos 20 anos e, com a pandemia causada pelo surto de SARS-CoV-2, as mortes por esse mesmo motivo aumentaram em até 132%. Mediante tal situação, estudos para compreender o escoamento no interior do vaso sanguíneo são de suma importância para o desenvolvimento de soluções para a problemática existente. O objeto do presente estudo é analisar os efeitos das variações das condições de contorno utilizadas para a simulação de um modelo computacional em um *software open source*, *SimVascular*, a partir de modelos cardiovasculares disponibilizados como objetos de estudo. Para análise, foram feitas comparações entre o que se espera fisiologicamente e o que foi obtido por meio das variações. A pesquisa é focada no processo de simulação fluidodinâmica, utilizando técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional. Este estudo pode concluir que as variações nas condições de contorno geram alterações significativas no fluxo sanguíneo e na estabilidade do sistema cardiovascular, além de notar-se que a simulação unidimensional se aproxima satisfatoriamente do caso tridimensional.

**Palavras-chave:** Hemodinâmica, Simulações 1D, Simulações 3D, Parede Deformável, Parede Rígida

### ABSTRACT

According to the WHO, heart diseases still leading worldwide causes of for the past 20 years and, with the pandemic caused by SARS-CoV-2, deaths by the same reason have increased up to 132%. Through this, studies to understand the blood flow inside of vessels are of paramount importance to develop solutions for the issue. The object of this is study is the analysis of the effects of changing boundary conditions used to simulate a computational model in an open source software, *SimVascular*, whereby cardiovascular models are available as study objects. For the analysis, comparisons were made between what physiologically is expected and what is formalized through variations. The research is focused on the fluid dynamics simulation process, using CFD techniques. This study can conclude that variations in boundary conditions provide significant changes in blood flow and cardiovascular system, in addition that one dimensional simulations satisfactorily approaches to three dimensional cases.

**Keywords:** Hemodynamics, 1D Simulation, 3D Simulation, Rigid Wall, Deformable Wall

## 1 INTRODUÇÃO

Problemas cardiovasculares são recorrentes na sociedade e, mediante a isso, torna-se necessário estudos que possam realizar a análise e a compreensão de doenças cardiovasculares de forma não invasiva. Com isso, simulações computacionais são utilizadas para se realizar a análise e reproduzir, de forma fidedigna, resultados que descrevam o comportamento do escoamento no interior dos vasos sanguíneos.

Com isso, surge a seguinte questão: Quais seriam, então, as condições de contorno corretas, afim de se obter dados que sejam condizentes com a realidade e que possam ser utilizados para tratar as complicações cardiovasculares? Fuchs et al., 2021 relata extrema dificuldade de se determinar as condições de contorno corretas, uma vez que fatores como a taxa de contração do ventrículo esquerdo pode variar entre corações,

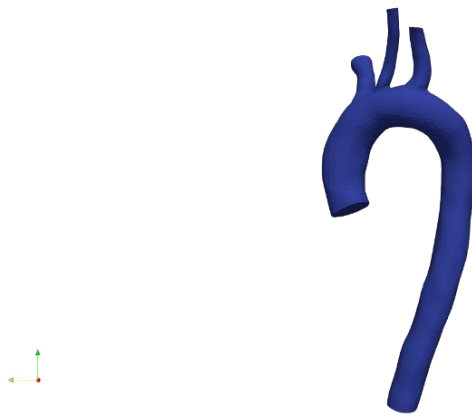
\* Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil; [kennynunes@alunos.utfpr.edu.br](mailto:kennynunes@alunos.utfpr.edu.br)

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina; [ricardosalvo@utfpr.edu.br](mailto:ricardosalvo@utfpr.edu.br)



desencadeando uma variação nos ciclos cardíacos, além da variação do fluxo sanguíneo entre indivíduos, de acordo com idade, sexo etc. Com isso, o artigo escrito por Youssefi et al., 2018 corrobora para que cada caso seja analisado de forma cautelosa, ao aplicar condições específicas de um paciente e comparar com um caso idealizado generalizado. Além das condições de contorno nas entradas e saídas do escoamento em uma simulação hemodinâmica, se faz necessário analisar a forma com a qual as paredes dos vasos sanguíneos são tratadas. Parte da literatura aponta que o deslocamento causado pelas deformações devido a um pulso cardiovascular é desprezível para fins de análise, tratando o vaso como um elemento rígido conforme Looyenga (2018, apud Kenneth et al., 2021) e Mohamad et al., 2021. Por outro lado, autores como Alishahi et al., 2012 e Gao et al., 2006 sugerem a necessidade de modelar a deformação causada pelo deslocamento arterial e, ainda, existem grupos de pesquisa que ressaltam a relevância em avaliar ambos casos Youssefi et al., 2018.

**Figura 1 – Modelo de artéria analisado**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

O objetivo deste estudo consiste em analisar os diferentes resultados obtidos ao aplicar-se diferentes condições de contorno, explicitando principalmente a influência da deformação das paredes para diferentes valores de módulo de elasticidade. O domínio computacional utilizado para a obtenção dos resultados é uma geometria real, Fig 1.

## **2 MÉTODO**

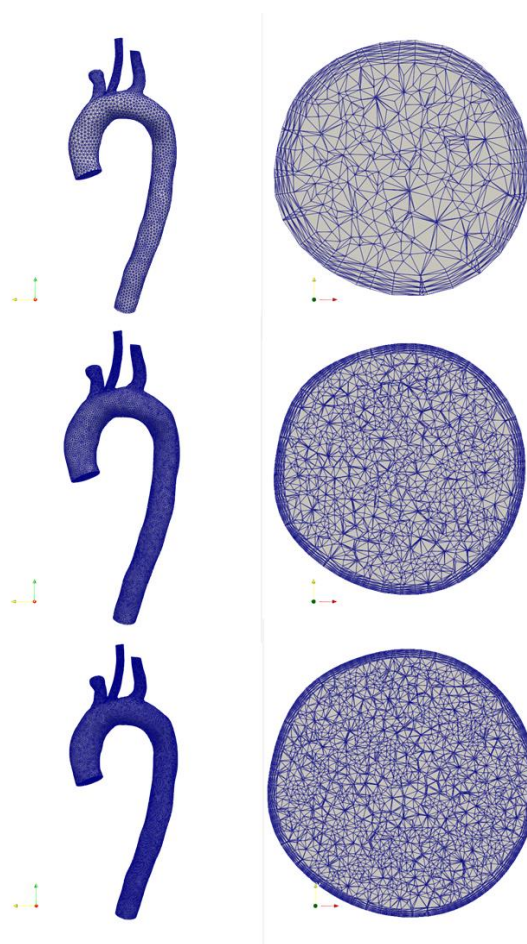
Nesse trabalho optou-se pela utilização do software de código aberto SimVascular, o qual se baseia no Método dos Elementos Finitos. A geração da malha foi realizada com o software TetGen, um gerador de malhas não estruturadas de código aberto disponibilizado junto ao instalador do SimVascular

Inicialmente foram realizados testes para a familiarização com o SimVascular. Adotou-se uma geometria que corresponde à região da aorta abdominal e realizou-se um estudo de independência da malha, considerando tanto o número de elementos quanto a distribuição dos mesmos e buscando utilizar um espaço de tempo que garantisse a convergência do modelo e um Número de Courant menor que 3 para a malha mais refinada. Nessa etapa foi possível observar que o software SimVascular apresentou instabilidade ao trabalhar com malhas que combinavam o refinamento da malha na região da camada limite com refinamentos locais (esferas de influência) utilizados nas ramificações. Com isso, optou-se por discretizar o modelo somente com refinamento na camada limite.



A partir do conhecimento do funcionamento do software, escolheu-se uma geometria disponibilizada de forma gratuita no site do próprio desenvolvedor, que compreende a região da aorta torácica. Desse modo, foram geradas três malhas para um único modelo, as quais diferem entre si no quesito de número de elementos empregados em cada repartição, sendo, em ordem crescente, 263.562 elementos, 1.833.985 elementos e 3.400.249 elementos.

**Figura 2 – Malhas geradas, em ordem crescente da quantidade de elementos.**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Foi imposta a vazão volumétrica obtida de Youssefi et al., 2018, com a utilização do software *Digitizer*, que permite a extração de valores a partir de gráficos e imagens. Na sequência, foram determinadas as condições de contorno que a serem assumidas para cada saída do escoamento. A tabela 1 mostra os valores utilizados para cada ramificação, obtidos de Youssefi et al., onde  $R_p$  é a resistência periférica da circulação sistêmica,  $R_d$  é a resistência vascular distal,  $C$  é a complacência arterial, baseado no modelo de Efeito de Windkessel.

**Tabela 1 – Dados das condições para o modelo arterial de Windkessel.**

Ramificações	CASO 1			CASO 2		
	$R_p \times 10^3$	$C \times 10^{-6}$	$R_d \times 10^3$	$R_p \times 10^3$	$C \times 10^{-6}$	$R_d \times 10^3$
Unidades	dinas.s/cm <sup>5</sup>	cm <sup>5</sup> /dinas	dinas.s/cm <sup>5</sup>	dinas.s/cm <sup>5</sup>	cm <sup>5</sup> /dinas	dinas.s/cm <sup>5</sup>
Aorta Descendente	0,25	208	2,14	0,17	109	4,69
Braquicefálica	1,36	48,3	9,23	0,79	28,2	18,2
Carótida Comum Esquerda	2,46	29,2	15,3	1,15	20,5	24,9
Subclávia Esquerda	1,74	39,3	11,3	1,29	18,6	27,6

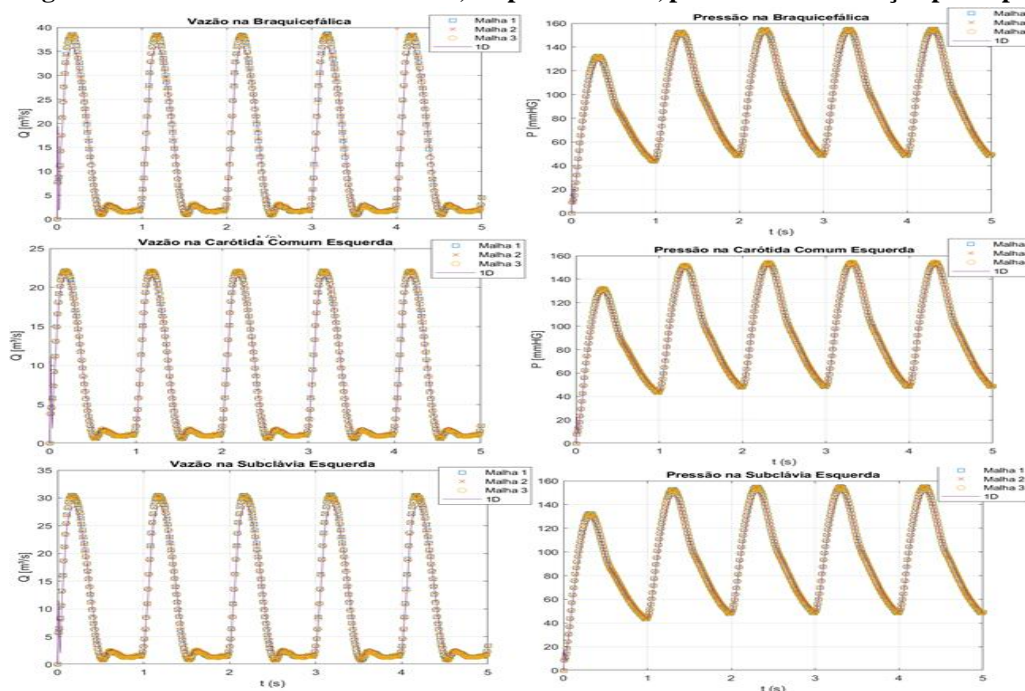
Fonte: Adaptado de Youssefi et al., (2018).

Além dos valores de condições de contorno de entrada e saída para as ramificações, é necessário, também, valores que determinem as propriedades mecânicas das artérias, quando a parede é tratada como um elemento deformável. Para isso, foram utilizados diferentes valores para o Módulo de Elasticidade, bem como propriedades físicas retiradas da literatura, afim de se verificar a influência deste parâmetro no comportamento do escoamento no interior das artérias.

### 3 RESULTADOS

Na Figura 3, são apresentados os perfis de vazão e pressão para as ramificações ao longo de cinco ciclos cardíacos para o caso de parede rígida e, adicionalmente, uma simulação unidimensional - Ordem de Modelo Reduzida (ROM). É possível notar que, ainda que haja uma notável diferença na quantidade de elementos entre as malhas, não ocorrem variações significativas entre as três malhas tridimensionais. Ainda, é possível observar que o comportamento gráfico para os perfis de pressão e vazão para simulação unidimensional se aproxima consideravelmente ao perfil gerado pelos modelos tridimensionais.

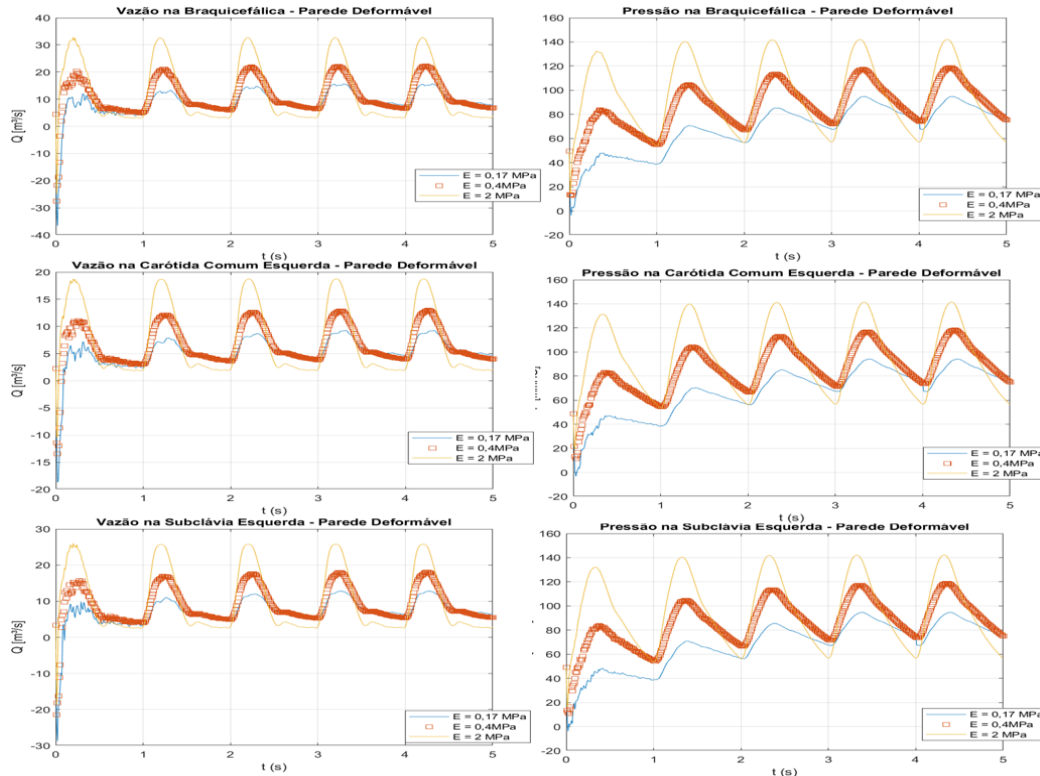
**Figura 3 – Perfis de vazão e velocidade, respectivamente, para cada ramificação principal.**



Fonte: Autoria própria (2021).



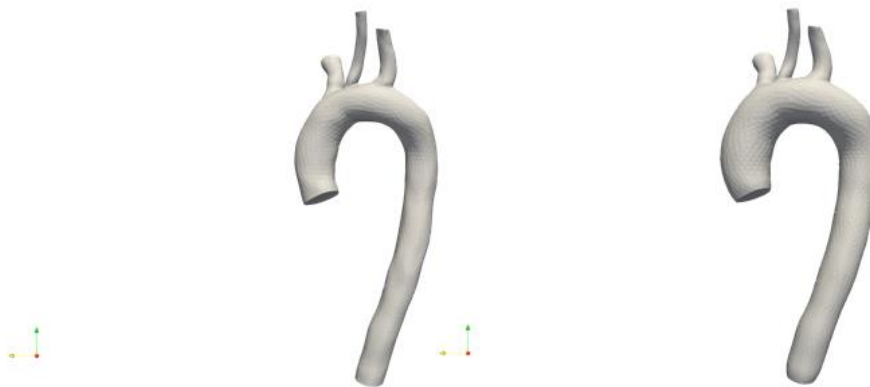
**Figura 4 – Perfis de vazão e velocidade, respectivamente, para o caso de parede deformável.**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

A Figura 4 mostra os mesmos perfis, aplicados às mesmas condições de contorno, mas variando o Módulo de Elasticidade. Nota-se que a variação deste parâmetro influencia, significativamente, os perfis de vazão e pressão. Conforme este valor aumenta, nota-se a tendência dos perfis obtidos se aproximarem ao caso cujas paredes são tomadas como rígidas. A Figura 5 mostra o efeito da deformação nos tempos de sístole (máxima deformação) e diástole (mínima deformação).

**Figura 5 – Deformações mínimas e máximas causadas pelo módulo de elasticidade  $E = 0,4MPa$ .**



**Fonte: Autoria própria (2021).**



## 4 CONCLUSÃO

Baseado nos resultados acima, observa-se que, ainda que se trate de uma geometria complexa, foi possível atingir a independência dos resultados em relação ao número de elementos que compõe a malha, uma vez que não houve variação do perfil ao longo de cada ciclo do caso de paredes rígidas. Nota-se, ainda, que a simulação do tipo unidimensional apresentou comportamento extremamente próximo ao apresentado pelos resultados tridimensionais. Para o Caso 2, foi utilizado somente a simulação unidimensional, entretanto o mesmo não é retratado neste artigo devido a limitação da quantidade de páginas.

No que diz a respeito do módulo de elasticidade, fica evidente que a variação deste parâmetro influencia notoriamente no comportamento dos perfis de vazão e pressão de cada vaso. Isso contribui que a correta utilização do módulo de elasticidade pode surtir efeitos significativos nos resultados obtidos, uma vez que, para este estudo, foi considerado um único valor para todas as ramificações. Estudos futuros serão feitos para que se analise o efeito da variação do módulo de elasticidade, individualmente, em cada ramificação e o impacto que isso causa nos resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS

- ALISHANI, Marzieh; ALISHANI, Mohammad Mehdi; EMDAD, Homayon. *Numerical simulation of blood flow in a flexible stenosed abdominal real aorta*. Journal of biomechanics, v. 18, n. 6, p. 1297-1305, dez. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1026309811002264>.
- GAO, Feng; GUO, Zhigong; SAKAMOTO, Makoto. *Fluid-structure Intereaction within a Layered Aortic Arch Model*. Journal of Biological Physics. v. 32 n. 5. P. 435-454. 2006. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2651537/>
- TRAN, Kenneth, YANG, Weiguang, MARDSEN, Alison; LEE, Jason T. *patient-specific computational flow modelling for assessing hemodynamic changes following fenestrated endovascular aneurysm repair*. Journal of Vascular Science, v. 2, p. 53-69, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666350320300596>
- YOUSSEFI, Pouya; GOMEZ, Alberto; ARTHURS, Christopher; SHARMA, Rajan; JAHANGIRI, Marjan, FIGUEROA, Carlos Alberto. *Impact of Patient-Specific Inflow Velocity Profile on Hemodynamics of the Thoracic Aorta*. Journal of Biomechanical Engineering, v.1, n. 140, 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/319630645\\_Impact\\_of\\_Patient-Specific\\_Inflow\\_Velocity\\_Profile\\_on\\_Hemodynamics\\_of\\_the\\_Thoracic\\_Aorta](https://www.researchgate.net/publication/319630645_Impact_of_Patient-Specific_Inflow_Velocity_Profile_on_Hemodynamics_of_the_Thoracic_Aorta)
- FUCHS, Alexander; BERG, Niclas, WITTEBERG, Lisa Prah. *Pulsatile Aortic Blood Flow—A Critical Assessment of Boundary Conditions*. ASME Journal of Medical Diagnostics. v. 4. n. 1, 2020. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/medicaldiagnostics/article/4/1/011002/1089628/Pulsatile-Aortic-Blood-Flow-A-Critical-Assessment>