

Universidade Federal de Juiz de Fora
Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional

Igor Pires dos Santos

**Uma Ferramenta Computacional para Simulação de Escoamento Pulsátil em
Modelos de Árvores Arteriais 1D**

Juiz de Fora
2021

Igor Pires dos Santos

**Uma Ferramenta Computacional para Simulação de Escoamento Pulsátil em
Modelos de Árvores Arteriais 1D**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Modelagem Computacional.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Alves Bonfim de Queiroz

Coorientador: Prof. Dr. Ruy Freitas Reis

Coorientador: Prof. D.Sc. Nome Coorientador Dois

Juiz de Fora

2021

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração
automática da Biblioteca Universitária da UFJF,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Reis, Ruy Freitas.

Modelagem mecânica da formação de edemas / Ruy Freitas
Reis. -- 2018.

120 f. : il.

Orientador: Marcelo Lobosco

Coorientadores: Rodrigo Weber dos Santos, Bernardo Martins
Rocha

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Juiz de Fora,
ICE/Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Modelagem
Computacional, 2018.

1. Imunologia Computacional. 2. Modelagem Matemática. 3.
Edema. 4. Poroelasticidade. 5. Biomecânica. I. Lobosco, Marcelo,
orient. II. Santos, Rodrigo Weber dos, coorient. III. Rocha, Bernardo
Martins, coorient. IV. Título.

*Dedico este trabalho
primeiramente a Deus, que
me possibilitou a vida e
consequências dela. A minha
família que nunca deixou de
me amparar nesse processo
evolutivo, minha esposa, e a
todos que me acompanharam
durante essa caminhada.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ...

*“A vida é curta demais pra
gente aprender só com os nossos
erros.”*

*(Sebastião Roberto Pereira
Ramon)*

RESUMO

O fenômeno do escoamento sanguíneo em modelos de árvores arteriais do sistema circulatório é frequentemente utilizado para melhor entender este complexo sistema, ao simular o escoamento é observado como a onda é alterada pelo modelo geométrico bem como cenários de escoamento específicos. Através da simulação é possível extrair dados analíticos sem a realização de exames invasivos e correlacionar corretamente as características do fluxo e modelo com efeitos observados na onda de pressão. Neste trabalho, apresentam-se: (i) modelo matemático da literatura que descreve o escoamento sanguíneo pulsátil em modelos de árvores arteriais 1D, (ii) uma ferramenta computacional desenvolvida que calcula a pressão e fluxo em cada vaso a partir do modelo matemático . A ferramenta computacional desenvolvida conta com uma estrutura de dados própria que concilia os conceitos de uma linguagem orientada à objetos e bibliotecas adicionais com o modelo matemático e geométrico proposto. A estrutura de dados foi utilizada no desenvolvimento de dois ambientes, um console e uma interface gráfica de usuário. A arquitetura de classes tem como objetivo conciliar as ferramentas disponibilizadas pelas bibliotecas para simular corretamente o modelo matemático escolhido e permitir que outros modelos matemáticos sejam facilmente acoplados posteriormente. A estrutura de dados proposta possibilita que as diversas características de uma árvore arterial possam ser armazenadas, utilizadas e visualizadas em tempo de execução. Os resultados obtidos neste trabalho estão condizentes com dados numéricos relatados na literatura. A ferramenta e estrutura abstrata disponibilizadas permitem a simulação do mesmo experimento em diferentes modelos geométricos e a visualização de todos os parâmetros armazenados.

Palavras-chave: Árvores arteriais. Escoamento pulsátil. Hemodinâmica Computacional. Fábricas Dinâmicas. Fábricas Abstratas. Orientação à Objetos.

ABSTRACT

The blood flow phenom in arterial tree models of the circulatory system is frequently studied to better understand this complex system, the simulation shows how the wave changes as it progresses through the geometric model and investigates specific scenarios. It is possible to extract analytical data without invasive procedures and correctly correlate flow characteristics observed in the pressure wave with the model's parameters. In this work, the following are presented: (i) an analytical scheme based on physisc and mathematic laws to calculate the local charactheristics of the pressure and flux wave in 1D arterial tree's models, (ii) a computational environment desenvolved to simulate and visualize the results of the model's construction and hemodynamic studies. The computational environment is composed of a data structure that integrates the concepts of an object-oriented language and other libraries with the proposed analytical scheme. The proposed data structure allows the computational environment to store, utilize and display different characteristics of an arterial tree. The data structure constructed two environments, the first a console, and the second a user interface. The class architecture objectives are the correct use of the libraries to simulate the mathematical model and allow other mathematical models to be easily integrated posteriorly. The results produced in this work are consistent to real morphometric data and numeric data related in the literature. The tool and abstract structure used are openly distributed and allow the same experiment in varioues geometric models and the visualization of every stored parameter.

Keywords: Arterial trees. Pulsatile flow. Computational hemodynamics. Dynamic Factories. Abstract Factories. Object oriented.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2.1	Segmento do modelo geométrico de uma árvore arterial, composto pelo nó proximal <i>A</i> e pelo nó distal <i>B</i>	24
2.2	Notação usada para identificar cada segmento de vaso (<i>k, j</i>) (figura adaptada de 1986 Duan e Zamir).	26
3.1	Interface gráfica da ferramenta desenvolvida.	33
3.2	Representação de classes de um elemento inteligente. <i>WiseElement</i> a classe abstrata base e seus componentes: <i>WiseStructure</i> representa a estrutura contida em um arquivo VTK e <i>DataStructure</i> representa a estrutura de ponteiros e variáveis utilizadas na iteração. Tingido de azul as estruturas que nem sempre estão presentes.	42
3.3	Tipos de elementos inteligentes. <i>WiseGraphic</i> , um gráfico bidimensional. <i>WiseMesh</i> , uma malha tridimensional. <i>WisePoly</i> , um cubo. <i>WiseArteryTree</i> , uma árvore arterial	43
3.4	Pontos utilizados na especificação do modelo geométrico. Linhas utilizadas na especificação do modelo geométrico, através dos pontos previamente definidos. Células utilizadas na especificação do modelo geométrico, através dos pontos previamente definidos.	45
3.5	Máquina de estados que controla o funcionamento de um elemento inteligente.	46
3.6	Elemento inteligente enquanto no estado <i>Warming</i> , <i>Raw</i> e <i>Cooling</i>	47
3.7	Elemento inteligente enquanto no estado <i>Cold</i>	48
3.8	Elemento inteligente enquanto no estado <i>Hot</i>	48
3.9	Arquitetura de classes fábrica e fluxo de trabalho do elemento inteligente <i>WiseElement</i> . A fábrica <i>WiseElementFactory</i> é responsável por criar os elementos inteligentes, a fábrica <i>WiseIterationFactory</i> é responsável pela iteração do elemento inteligente e a fábrica <i>GraphicFactory</i> é responsável por criar as estruturas de visualização.	50

3.10 Objeto inteligente <i>WiseObject</i> e todos seu componentes: <i>WiseObjectFactory</i> , fábrica responsável pela criação de objetos inteligentes; <i>WiseElementFactory</i> , fábrica responsável pela criação de elementos inteligentes; <i>WiseIterationFactory</i> , fábrica de iteração; <i>WiseGraphicFactory</i> , fábrica gráfica; <i>WiseCollection</i> , coleção de elementos inteligentes; <i>GraphicModel</i> , coleção de objetos gráficos.	52
3.11 Máquina de estados utilizada pelos objetos inteligentes <i>WiseObject</i> . O estado <i>Ready</i> indica que o objeto foi criado corretamente e o estado <i>Set</i> indica que o objeto teve suas fábricas corretamente adicionadas. Enquanto o objeto inteligente estiver iterando ele permanecerá no estado <i>Go</i> e quando finalizar irá para o estado <i>Finished</i> . Finalmente o estado <i>Crashed</i> é utilizado quando o objeto não funciona corretamente.	53
3.12 Modelo gráfico <i>GraphicModel</i> , contém uma coleção de objetos gráficos	56
3.13 Tipos de objetos gráficos <i>GraphicObjects</i> , representando cada tipo de elemento inteligente <i>WiseElement</i> . O objeto <i>Graphic</i> representa um gráfico, o objeto <i>Mesh</i> uma malha, o objeto <i>Poly</i> um cubo e o objeto <i>ArteryTree</i> uma árvore arterial.	56
3.14 Tipos de elementos gráficos <i>GraphicElements</i> . <i>Point</i> , um ponto. <i>Line</i> , uma linha. <i>Quad</i> , um quadrado. <i>Cube</i> , um cubo. <i>Cylinder</i> , um cilindro. <i>Sphere</i> , uma esfera.	57
3.15 Projeto inteligente <i>WiseProject</i> e seus componentes, uma lista de objetos inteligentes <i>WiseObject</i> e uma lista de elementos inteligentes <i>WiseElement</i> .	58
3.16 Fábrica de projetos inteligentes <i>WiseProjectFactory</i> e seus componentes, fábricas de elementos inteligentes <i>WiseElementFactories</i> , fábricas de objetos inteligentes <i>WiseObjectFactories</i> , fábrica de objetos gráficos <i>GraphicObjectFactories</i> , fábricas de elementos gráficos <i>GraphicElementFactories</i> e fábricas de iteração <i>WiseIterationFactories</i>	59
3.17 Todas as fábricas que compõem uma fábrica de projeto.	61

3.18	Modelo de Threads. <i>WiseThreadPool</i> , responsável por orquestrar o funcionamento das demais <i>threads</i> , bem como os objetos contidos em um projeto <i>WiseProject</i> . <i>WiseIO</i> , <i>thread</i> responsável por processos de leitura e escrita. <i>WiseConsole</i> , <i>thread</i> responsável por interpretar os comandos de texto e os traduzir-los na chamada de métodos. <i>WiseProcessor</i> , <i>thread</i> responsável por realizar o método iterativo de um objeto inteligente <i>WiseObject</i>	63
3.19	Modelo de Threads ao receber uma linha de comando da interface de usuário.	64
3.20	Modelo de Threads ao receber um comando de escrita/leitura.	65
3.21	Máquina de estados utilizadas por trabalhos inteligentes <i>WiseJobs</i>	67
4.1	Interface de usuário gráfica.	69
4.2	Estrutura do projeto que compõe o ambiente computacional InGU.	70
4.3	Captura de tela com a execução do ambiente computacional InGU em um console.	71
4.4	Captura de tela com a execução do ambiente computacional InGU em um console.	72
4.5	Fluxograma do ambiente computacional InGU, em azul as atividades de criação de elementos inteligentes, em verde as atividades de criação de projetos inteligentes e em laranja as atividades de criação de objetos inteligentes.	96
4.6	Fluxo de caso de uso do ambiente computacional IGU.	97
4.7	Janela principal ambiente computacional IGU. Da esquerda para a direita: A. Menu principal do programa; B. Árvore de projetos e seus elementos; C. Área de trabalho, no caso mostrando OpenGl <i>Canvas</i> ; D. Seleção de abas	98
4.8	Opções do menu principal da ferramenta computacional <i>IGU</i>	99
4.9	Opções do menu principal da ferramenta computacional <i>IGU</i>	100
4.10	Mudanças gráficas observadas na Área de Trabalho ao trocar a aba selecionada, exibindo o elemento gráfico <i>Canvas</i> com a aba <i>Canvas</i> selecionada.	101
4.11	Mudanças gráficas observadas na Área de Trabalho ao trocar a aba selecionada, exibindo o elemento gráfico <i>Console</i> com a aba <i>Console</i> selecionada.	101
4.12	Árvore de projetos, na imagem a ferramenta apresenta um projeto inteligente <i>p1</i> , um objeto inteligente <i>obj1</i> e seus elementos gráficos e inteligentes.	102

4.13 Janela <i>Canvas</i> exibida sobre a área de trabalho <i>Canvas</i> , a janela exibindo um gráfico obtido como resultado e a área de trabalho exibindo a árvore arterial estudada.	104
4.14 Janela <i>Jobs</i> exibida com a aba <i>Timetable</i> selecionada, a janela lista os trabalhos recebidos pela estrutura <i>WiseThreadPool</i> e seus tempos de execução.	105
4.15 Janela <i>Jobs</i> exibida com a aba <i>Timetable</i> selecionada, a janela lista os trabalhos recebidos pela estrutura <i>WiseThreadPool</i> e os separa logicamente pelas listas de espera.	106
5.1 Representação do modelo de árvore arterial canina (figura adaptada de (DUAN; ZAMIR, 1986)).	107
5.2 Amplitude da pressão $ P $ ao longo da árvore arterial considerando diferentes viscosidade do fluido μ e frequências: (a) $f = 3,65$ Hz, (b) $f = 7,30$ Hz.	109
5.3 Amplitude da pressão $ P $ ao longo da árvore arterial considerando diferentes viscosidade do fluido μ e frequências: (a) $f = 10,95$ Hz, (b) $f = 14,60$ Hz.	110
5.4 Amplitude da pressão $ P $ ao longo da árvore arterial considerando diferentes valores de viscoelasticidade ϕ_0 e frequências: $f = 3,65$ Hz e $f = 7,30$ Hz.	111
5.5 Amplitude da pressão $ P $ ao longo da árvore arterial considerando diferentes valores de viscoelasticidade ϕ_0 e frequências: $f = 10,95$ Hz e $f = 14,60$ Hz.	112
5.6 Amplitude da pressão $ P $ ao longo da árvore arterial considerando diferentes valores de viscoelasticidade ϕ_0 e frequências: (a) $f = 3,65$ Hz, (b) $f = 7,30$ Hz.	114
5.7 Amplitude da pressão $ P $ ao longo da árvore arterial considerando diferentes valores de viscoelasticidade ϕ_0 e frequências: (a) $f = 10,95$ Hz, (b) $f = 14,60$ Hz.	115

LISTA DE TABELAS

3.1	Propriedades de cada vaso arterial do modelo.	34
4.1	Descrição do comando ajuda.	71
4.2	Descrição do comando ler arquivo de comando.	73
4.3	Descrição do comando bateria de testes.	74
4.4	Descrição do comando listar testes.	74
4.5	Descrição do comando executar caso de teste.	75
4.6	Descrição do comando para testar a equidade de dois arquivos.	75
4.7	Descrição do comando para criar projetos.	75
4.8	Descrição do comando para selecionar projetos.	76
4.9	Descrição do comando listar projetos.	76
4.10	Descrição do comando imprimir projetos.	77
4.11	Descrição do comando excluir projetos.	77
4.12	Descrição do comando para salvar projetos.	77
4.13	Descrição do comando para carregar projetos.	78
4.14	Descrição do comando para criar.	78
4.15	Descrição do comando para clonar elementos inteligentes.	79
4.16	Descrição do comando listar elementos.	79
4.17	Descrição do comando imprimir elementos inteligentes.	80
4.18	Descrição do comando excluir projetos.	80
4.19	Descrição do comando salvar elementos.	81
4.20	Descrição do comando para carregar elementos inteligentes.	81
4.21	Descrição do comando listar exportações de um elemento inteligente.	82
4.22	Descrição do comando para exportar elementos.	82
4.23	Descrição do comando para escalar elementos.	83
4.24	Descrição do comando para definir parâmetros de elementos.	84
4.25	Descrição do comando para definir todos os parâmetros de um campo pertencente à um elemento inteligente.	84
4.26	Descrição do comando listar fábricas de elemento.	85
4.27	Descrição do comando listar exemplos contidos em determinada fábrica de elemento.	85

4.28	Descrição do comando para criar objetos inteligentes.	86
4.29	Descrição do comando para clonar objetos inteligentes.	86
4.30	Descrição do comando listar elementos.	87
4.31	Descrição do comando imprimir objetos inteligentes.	87
4.32	Descrição do comando excluir objetos inteligentes.	88
4.33	Descrição do comando salvar objetos inteligentes.	88
4.34	Descrição do comando carregar objetos inteligentes.	89
4.35	Descrição dos comandos de exportação elementos contidos no <i>Forno</i> de objetos inteligentes.	89
4.36	Descrição dos comandos de exportação elementos contidos no <i>Forno</i> de objetos inteligentes.	90
4.37	Descrição do comando setar objetos inteligentes.	90
4.38	Descrição do comando iterar objetos inteligentes.	91
4.39	Descrição do comando listar fábricas de iteração.	91
4.40	Descrição do comando definir fábricas gráficas.	92
4.41	Descrição do comando listar fábricas gráficas.	92
4.42	Descrição do comando definir fábricas gráficas.	93
4.43	Descrição do comando listar objetos gráficos.	93
4.44	Descrição do comando listar elementos gráficos <i>Canvas</i> .	94
4.45	Descrição dos comandos que enviam um objeto gráfico para ser exibido em um elemento gráfico da interface de usuário.	94
4.46	Descrição do comando terminar link gráfico.	95
5.1	Propriedades dos segmentos do modelo de árvore arterial (DUAN; ZAMIR, 1986; DUAN; ZAMIR, 1984)	107

LISTA DE ABREVIAÇÕES E SIGLAS

PPGMC	Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
XML	Xtreme Markup Language
IGU	Iterador Gráfico Universal
InGU	Iterador não-Gráfico Universal
VTK	Visual Toolkit

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	21
1.2	ORGANIZAÇÃO	22
2	MODELAGEM DO ESCOAMENTO SANGUÍNEO.....	23
2.1	MODELO MATEMÁTICO	23
2.1.1	CÁLCULO DA PRESSÃO E DO FLUXO SANGUÍNEO.....	27
2.1.2	CÁLCULO DO COEFICIENTES DE REFLEXÃO E ADMITÂNCIA	29
2.1.3	CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE ENTRADA.....	30
2.1.4	INCORPORAÇÃO DA VISCOSIDADE E VISCOELASTICIDADE NO MODELO	30
3	FERRAMENTA COMPUTACIONAL	32
3.1	MODELAGEM COMPUTACIONAL	34
3.2	ESTRUTURA DE DADOS	40
3.2.1	ELEMENTO INTELIGENTE.....	41
3.2.2	FÁBRICA	49
3.2.3	OBJETO INTELIGENTE	51
3.2.4	OBJETO GRÁFICO.....	55
3.2.5	PROJETO INTELIGENTE	58
3.2.6	FÁBRICA DE PROJETO.....	59
3.2.7	THREADS INTELIGENTES	60
3.2.8	TRABALHOS INTELIGENTES	66
4	USABILIDADE DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL	69
4.1	CONSOLE	70
4.1.1	AJUDA	71
4.1.2	LER ARQUIVO DE ENTRADA.....	72

4.1.3	BATERIA DE TESTES.....	73
4.1.4	LISTA DE TESTES.....	74
4.1.5	CASO DE TESTE	74
4.1.6	TESTAR EQUIDADE DE ARQUIVOS	74
4.1.7	CRIAR PROJETO	75
4.1.8	USAR PROJETO.....	76
4.1.9	LISTAR PROJETOS	76
4.1.10	IMPRIMIR PROJETO	76
4.1.11	EXCLUIR PROJETO	77
4.1.12	SALVAR PROJETO	77
4.1.13	CARREGAR PROJETO	78
4.1.14	CRIAR ELEMENTO	78
4.1.15	CLONAR ELEMENTO.....	79
4.1.16	LISTAR ELEMENTOS	79
4.1.17	IMPRIMIR ELEMENTO.....	79
4.1.18	EXCLUIR ELEMENTO	80
4.1.19	SALVAR ELEMENTO.....	80
4.1.20	CARREGAR ELEMENTO	81
4.1.21	LISTAR EXPORTAÇÕES DO ELEMENTO	81
4.1.22	EXPORTAR ELEMENTO	82
4.1.23	ESCALAR ELEMENTO.....	82
4.1.24	DEFINIR PARÂMETRO DE ELEMENTO	83
4.1.25	DEFINIR TODOS OS PARÂMETROS DE ELEMENTO	83
4.1.26	LISTAR FÁBRICAS DE ELEMENTO	84
4.1.27	LISTAR EXEMPLOS DISPONÍVEIS DE ELEMENTO	85
4.1.28	CRIAR OBJETO.....	85
4.1.29	CLONAR OBJETO.....	86
4.1.30	LISTAR OBJETOS	87
4.1.31	IMPRIMIR OBJETO.....	87

4.1.32	EXCLUIR OBJETO	87
4.1.33	SALVAR OBJETO.....	88
4.1.34	CARREGAR OBJETO	88
4.1.35	EXPORTAR OBJETO.....	89
4.1.36	DEFINIR PARÂMETROS DE OBJETO.....	89
4.1.37	DEFINIR OBJETO.....	90
4.1.38	ITERAR OBJETO	90
4.1.39	LISTAR FÁBRICAS DE ITERAÇÃO DE OBJETO.....	91
4.1.40	DEFINIR FÁBRICA DE ITERAÇÃO DE OBJETO	91
4.1.41	LISTAR FÁBRICAS GRÁFICAS DE OBJETO	92
4.1.42	DEFINIR FÁBRICA GRÁFICA DE OBJETO.....	92
4.1.43	LISTAR OBJETOS GRÁFICOS	93
4.1.44	LISTAR CANVAS.....	93
4.1.45	LINK GRÁFICO	94
4.1.46	TERMINAR LINK GRÁFICO	94
4.2	CASO DE USO	95
4.3	JANELA PRINCIPAL	98
4.3.1	MENU	99
4.3.2	ABAS E ÁREA DE TRABALHO.....	99
4.4	ÁRVORE DE PROJETOS	102
4.5	JANELAS	103
4.5.1	JANELA CANVAS	103
4.5.2	JANELA JOBS.....	105
5	RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÕES	107
5.1	ESCOAMENTO VISCOSO	108
5.2	SEGMENTO VISCOELÁSTICO	108
5.3	ESCOAMENTO VISCOSO EM SEGMENTO VISCOELÁSTICO	113
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	116

A	PROCESSO DE COMPILAÇÃO.....	117
A.1	INSTALAR QT	117
A.2	INSTALAR BIBLIOTECAS SECUNDÁRIAS	117
A.3	CLONAR E COMPILE REPOSITÓRIO	118
A.3.1	COMPILE COM QT CREATOR	118
A.3.2	OUTROS.....	118
B	FORMATO DE ARQUIVO DE COMANDOS.....	119
C	FORMATO DE ARQUIVO DE ELEMENTO INTELIGENTE ..	121
D	FORMATO DE ARQUIVO DE OBJETO INTELIGENTE	122
	REFERÊNCIAS	125

1 INTRODUÇÃO

Estudos de simulação hemodinâmica têm sido frequentemente baseados em modelos de árvores arteriais para obter uma melhor compreensão de todos os aspectos relacionados ao escoamento sanguíneo, dentre eles a propagação de ondas e análise do pulso de pressão, passando pelo diagnóstico e inclusive aplicações no planejamento cirúrgico. A representação do sistema cardiovascular através de um modelo puramente 3D que leva em conta a estrutura geométrica exata de todos os vasos não é, no momento, viável computacionalmente, para contornar estes limites computacionais modelos dimensionalmente heterogêneos conhecidos como 0D (zero-dimensional)–1D (unidimensional)–2D (bidimensional)–3D (tridimensional) vêm sendo empregados (FORMAGGIA et al., 2001).

Modelos 3D são utilizados para estudar em detalhe a hemodinâmica local de distritos arteriais de interesse, e a geometria destes modelos são provenientes de dados anatômicos obtidos normalmente via reconstrução de imagens médicas de pacientes específicos (PESKIN, 1972; TAYLOR; HUGHES; ZARINS, 1998). Modelos 1D são adotados para representar as artérias de maior calibre e a estrutura geométrica destes modelos pode ser construída a partir de dados anatômicos (AVOLIO, 1980; FORMAGGIA; LAMPONI; QUARTERONI, 2003; STERGIOPULOS; YOUNG; ROGGE, 1992). Tais modelos são capazes de capturar os efeitos de propagação de ondas (ANLIKER; ROCKWELL; ODGEN, 1971; DUAN; ZAMIR, 1986), a interação das reflexões destas ondas e dar como resultado um pulso de pressão e vazão com significado fisiológico, tanto em artérias centrais quanto periféricas.

No entanto, um modelo 1D de toda a árvore arterial sistêmica não é possível devido à falta de dados anatômicos precisos das regiões periféricas. Portanto, a árvore tem que ser truncada em algum nível. Normalmente, este truncamento é feito empregando modelos 0D (MATES; KLOCKE; CANTY, 1988; STERGIOPULOS; YOUNG; ROGGE, 1992) conhecidos por terminais Windkessel à jusante da posição distal do modelo 1D para representar o comportamento de distritos arteriais relacionados com o nível de arteríolas e capilares.

Os modelos matemáticos são reconhecidos como boas ferramentas de medição tendo seus resultados comparados com dados in-vivo (BERTAGLIA et al., 2020). Para simular

corretamente a hemodinâmica corporal, as propriedades viscoelásticas do vaso precisam ser consideradas no comportamento do escoamento cardiovascular. Apesar disso, além da dificuldade de obter dados anatômicos precisos, a quantidade de cálculos necessários e a complexidade matemática e numérica fazem do desenvolvimento de ferramentas confiáveis e práticas para a simulação do sistema cardiovascular humano um dos desafios das próximas décadas (QUARTERONI; FORMAGGIA, 2004).

A incidência maior de picos na onda de pressão ao percorrer a aorta já foi documentada como evidência para os efeitos da reflexão em árvores vasculares (KOUCHOUKOS; SHEPPARD; MCDONALD, 1970; LIGHTHILL, 1975; MCDONALD, 1974). Enquanto as áreas de reflexão não podem ser completamente conhecidas ou localizadas, é geralmente aceito que a forma da onda de pressão é modificada significativamente enquanto progride pela aorta, de uma forma que só pode ser explicada por reflexões de onda. Um entendimento mais claro da relação entre modificações e fatores de modificação motiva a busca e desenvolvimento de modelos matemáticos que determinam a forma da onda que o pulso de pressão toma em cada ponto ao percorrer uma árvore arterial.

Dentro deste contexto, adotou-se neste trabalho o modelo matemático de Duan e Zamir (DUAN; ZAMIR, 1986; DUAN; ZAMIR, 1995) que descreve escoamento sanguíneo pulsátil em árvores arteriais. Estes autores propuseram um modelo relativamente simples para representação da pressão sanguínea e do fluxo em um modelo de árvore arterial. Dentro de cada segmento de vaso, o escoamento sanguíneo foi calculado baseado em uma aproximação de Womersley (WOMERSLEY, 1955), incluindo a elasticidade da parede, bem como a densidade do sangue e a viscosidade.

O modelo matemático de Duan e Zamir foi escolhido para implementação e simulação computacional por sua capacidade de capturar o pico de pressão existente no escoamento sanguíneo. Este modelo possibilita o cálculo correto das características locais das ondas de pressão e fluxo a medida que elas progridem ao longo de um modelo de árvore 1D e se tornam modificadas por reflexões de onda.

O principal objetivo deste trabalho é possibilitar a análise dos modelos geométricos de árvores arteriais através da ferramenta computacional, permitindo sugerir e planejar

intervenções subsequentes, sem a necessidade de procedimentos invasivos. Portanto, a presença de picos de pressão, a velocidade da onda e a pressão da reflexão de onda podem indicar a existência problemas na circulação periférica (TAKAHASHI et al., 2021).

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho num primeiro momento descreverá modelo matemático e o esquema iterativo e os conceitos matemáticos que regem o escoamento sanguíneo. Em seguida, propõe uma ferramenta computacional cujo principal objetivo é resolver e visualizar os efeitos da reflexão de onda no escoamento sanguíneo sobre diferentes condições. As tecnologias inseridas na ferramenta computacional permitem que ela seja altamente configurável em tempo de execução. Ao descrever o funcionamento da ferramenta computacional, o modelo matemático e geométrico é constantemente validado, pois o principal objetivo da ferramenta computacional é reproduzir corretamente o escoamento sanguíneo nestes cenários.

Os objetivos deste trabalho são os seguintes: O desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de simular o modelo matemático de Duan e Zamir (DUAN; ZAMIR, 1995); A aplicação da ferramenta desenvolvida considerando diferentes cenários hemodinâmicos para investigar os efeitos da viscosidade sanguínea e da viscoelasticidade da parede do vaso no escoamento sanguíneo; A aplicação de conceitos da linguagem orientada à objetos C++ à ferramenta computacional, bem como disponibilizar uma interface gráfica através da adição de bibliotecas complementares OpenGL/Qt; A generalização da estrutura de dados da ferramenta computacional para que ela possa ser utilizada futuramente, no estudo de árvore arteriais e na visualização dos resultados de uma simulação computacional; A contribuição com a literatura ao reproduzir experimentos de escoamento pulsátil, propor um modelo de classes com a adição de funcionalidades modernas (WELICKI; YODER; WIRFS-BROCK, 2008; QT, 2019) e, finalmente, entregar uma ferramenta computacional capaz de analisar modelos geométricos similares.

1.2 ORGANIZAÇÃO

Os demais capítulos deste trabalho estão organizados como segue. Primeiramente, neste capítulo é apresentado o modelo matemático utilizado para calcular os efeitos do escoamento pulsátil ao atravessar uma árvore arterial sobre três cenários diferentes, o primeiro sobre o efeito da viscoelasticidade dos vasos sanguíneos, em seguida da viscosidade sanguínea e, finalmente, um cenário com ambos os efeitos.

No capítulo três, apresenta-se a ferramenta computacional desenvolvida em C++, a qual conta com a utilização das bibliotecas Qt/OpenGL acrescentada de funcionalidades da programação paralela, orientação à objetos e utilização de estruturas modernas (WELICKI; YODER; WIRFS-BROCK, 2008).

O quarto capítulo discorre sobre os resultados numéricos obtidos e uma breve discussão é apresentada. Os resultados numéricos obtidos pela ferramenta computacional proposta, em cima de sua estruturas de dados própria, foram comparados com os resultados obtidos pela literatura.

A seção de anexos contém informações complementares ao uso da ferramenta. O Anexo A contém os passos necessários para se compilar a ferramenta computacional. O Anexo B demonstra o formato esperado de um arquivo de comandos à ser utilizado. Os Anexos C e D representam os arquivos de saída da ferramenta computacional, um elemento e um objeto inteligente, respectivamente.

2 MODELAGEM DO ESCOAMENTO SANGUÍNEO

Neste capítulo, apresenta-se o modelo matemático de Duan e Zamir (DUAN; ZAMIR, 1995), para o escoamento sanguíneo pulsátil em árvores arteriais que será utilizado para desenvolver a ferramenta computacional. Por fim, apresenta um algoritmo que resume passos dos cálculos realizados para obtenção da pressão e fluxo ao longo da árvore arterial.

2.1 MODELO MATEMÁTICO

A propagação de ondas em um tubo é governada pela equações da onda para a pressão $p(x, t)$ e fluxo $q(x, t)$ como seguem:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -cY \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{c}{Y} \frac{\partial q}{\partial x}, \quad (2.2)$$

nos quais t é o tempo, x é a coordenada axial ao longo do tubo, c é a velocidade de onda, $Y = \frac{A}{\rho c}$ é a admitância e A é a área da seção transversal do tubo, e ρ é a densidade do fluido. Estas equações são baseadas na linearização das equações de movimento do fluido (DUAN; ZAMIR, 1984; LIGHTHILL, 1975).

Para uma onda harmônica simples, as Equações (2.1) e (2.2) resultam em:

$$p = \bar{p}_0 \exp \left[i\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] + R\bar{p}_0 \exp \left[i\omega \left(t - \frac{2L}{c} + \frac{x}{c} \right) \right], \quad (2.3)$$

$$q = Y \left\{ \bar{p}_0 \exp \left[i\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] - R\bar{p}_0 \exp \left[i\omega \left(t - \frac{2L}{c} + \frac{x}{c} \right) \right] \right\}, \quad (2.4)$$

onde $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular, f é frequência em Hertz, L é o comprimento do tubo, \bar{p}_0 é a amplitude da onda incidente, R é o coeficiente de reflexão definido pela razão entre as ondas refletidas pelas ondas que chegam no local de reflexão (DUAN; ZAMIR, 1984; KARREMAN, 1952) e i é a unidade imaginária ($i^2 = -1$).

O modelo matemático considera que o segmento é composto pelo nó proximal A e pelo nó distal B , considerando o nó proximal o ponto mais próximo da origem do fluxo e o

nó distal o ponto mais distante, como apresentado na Figura 2.1.

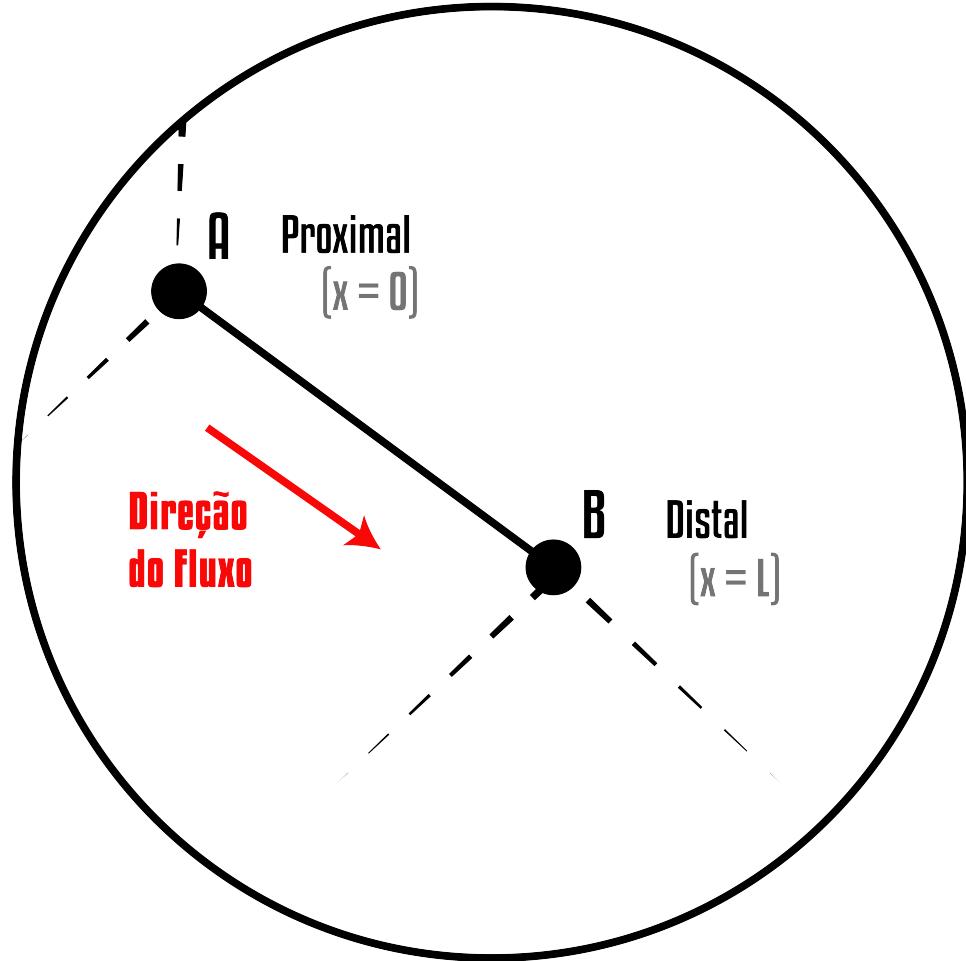


Figura 2.1: Segmento do modelo geométrico de uma árvore arterial, composto pelo nó proximal A e pelo nó distal B .

As Equações (2.3) e (2.4) para pressão e fluxo são aplicadas em cada segmento de vaso do modelo de árvore arterial, tomando $x = 0$ para o nó proximal e $x = L$ para o nó distal do segmento. Um segmento de vaso é definido pelo intervalo vascular entre dois locais de ramificação (ZAMIR; PHIPPS, 1988). No sistema arterial, as bifurcações são os locais de ramificação mais comuns (ZAMIR, 1976).

De 1986 Duan e Zamir, um segmento de vaso é identificado por (k, j) , onde o k representa o nível da geração e j representa a ordem do segmento naquela geração, como na Figura 2.2. Desta forma, a pressão e o fluxo ao longo de um segmento (k, j) do modelo de árvore

arterial são dados por:

$$\begin{aligned} p(k, j) &= \bar{p}(k, j) \exp \left[i\omega \left(t - \frac{x(k, j)}{c(k, j)} \right) \right] \\ &\quad + R(k, j) \bar{p}(k, j) \exp \left[i\omega \left(t - \frac{2L(k, j)}{c(k, j)} + \frac{x(k, j)}{c(k, j)} \right) \right], \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} q(k, j) &= Y(k, j) \left\{ \bar{p}(k, j) \exp \left[i\omega \left(t - \frac{x(k, j)}{c(k, j)} \right) \right] \right. \\ &\quad \left. - R(k, j) \bar{p}(k, j) \exp \left[i\omega \left(t - \frac{2L(k, j)}{c(k, j)} + \frac{x(k, j)}{c(k, j)} \right) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

nos quais $\bar{p}(k, j)$ é a amplitude combinada do grupo de ondas progressivas no segmento (k, j) e $R(k, j)$ é o coeficiente de reflexão no final daquele segmento. O coeficiente de reflexão R é a razão das ondas progressivas pelas ondas atrasadas avaliadas no nó distal $x(k, j) = L(k, j)$.

O grupo de ondas progressivas viaja no sentido positivo de $x(k, j)$, estas são compostas de ondas progressivas vindo de vasos acima deste, bem como, ondas refletidas na junção à montante $x(k, j) = 0$. O grupo de ondas atrasadas viaja no sentido oposto e é composto por ondas vindas de vasos conectados ao nó distal, estas ondas são refletidas na junção à jusante $x(k, j) = L(k, j)$, estas ondas viajam na direção oposta ao fluxo sanguíneo e são consideradas a reflexão das ondas progressivas nos segmentos adjacentes ao nó distal B .

As Equações (2.5) e (2.6) descrevem, respectivamente, as ondas de pressão e de fluxo localmente em um segmento (k, j) do modelo de árvore, e localmente na posição $x(k, j)$ dentro deste segmento de vaso. O principal objetivo deste modelo matemático é determinar as duas variáveis desconhecidas: a amplitude da pressão $\bar{p}(k, j)$ e o coeficiente de reflexão $R(k, j)$, que são detalhados na Seção 2.1.1.

A Figura 2.2 mostra a notação usada para identificar cada segmento de vaso (k, j) , onde k é a geração/nível do vaso e j é um número sequencial dentro daquela geração. Os nós proximal e distal do segmento (k, j) 2.1 são denotados por A e B , respectivamente. O coeficiente de reflexão $R(k, j)$ do segmento (k, j) está associado ao nó distal B .

Na Equação (2.6), tem-se a admitância característica para cada segmento dada por:

$$Y(k, j) = \frac{A(k, j)}{\rho(k, j)c(k, j)}, \quad (2.7)$$

nos quais $A(k, j)$ é a área da seção transversal do segmento (k, j) , $\rho(k, j)$ é a densidade do fluido dentro do vaso e $c(k, j)$ é a velocidade da onda correspondente. A admitância de um segmento é uma medida do quanto o segmento permite o fluxo.

Assumindo um segmento elástico de parede fina, a velocidade da onda $c(k, j)$ é calculada por (DUAN; ZAMIR, 1984):

$$c(k, j) = \sqrt{\frac{E(k, j)h(k, j)}{\rho(k, j)d(k, j)}}, \quad (2.8)$$

onde $E(k, j)$ é o módulo de Young, $d(k, j)$ é o diâmetro do segmento (k, j) e $h(k, j)$ é a espessura da parede do segmento, a qual neste estudo é dada por (DUAN; ZAMIR, 1986):

$$h(k, j) = 0,05d(k, j). \quad (2.9)$$

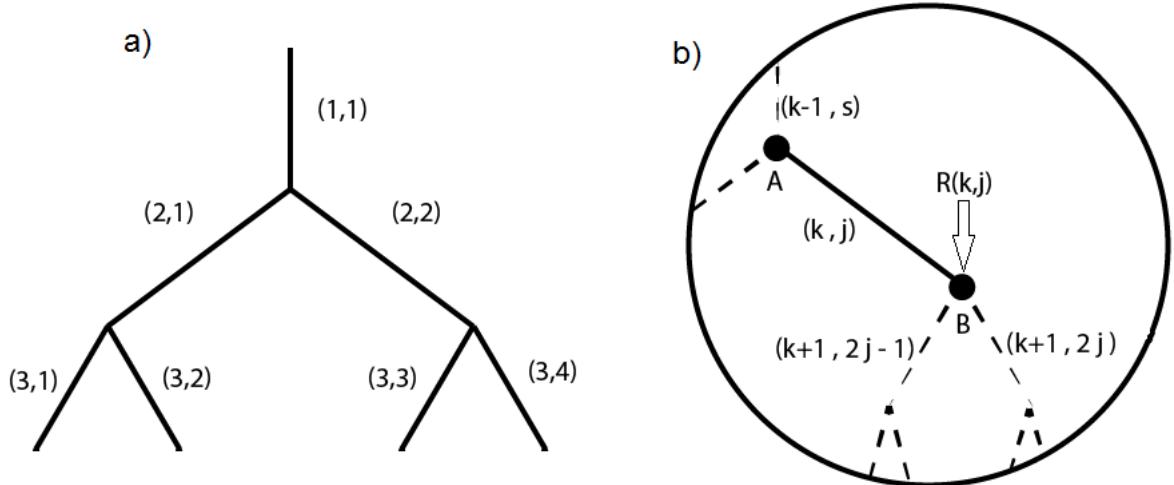


Figura 2.2: Notação usada para identificar cada segmento de vaso (k, j) (figura adaptada de 1986 Duan e Zamir).

2.1.1 CÁLCULO DA PRESSÃO E DO FLUXO SANGUÍNEO

Para determinar a pressão $\bar{p}(k, j)$ em um certo segmento (k, j) , aplica-se a condição de continuidade de pressão no nó proximal A (ver Figura 2.2). Escrevendo as componentes progressiva e atrasada da onda como $p_f(k, j)$ e $p_b(k, j)$ respectivamente, a pressão na posição proximal do segmento $x(k, j) = 0$ é dada por:

$$[p(k, j)]_A = [p_f(k, j)]_A + [p_b(k, j)]_A, \quad (2.10)$$

nos quais as pressões $[p_f(k, j)]_A$ e $[p_b(k, j)]_A$ são expressas por:

$$[p_f(k, j)]_A = \bar{p}(k, j) \exp[i\omega t], \quad (2.11)$$

$$[p_b(k, j)]_A = R(k, j) \bar{p}(k, j) \exp\left[i\omega\left(t - \frac{2L(k, j)}{c(k, j)}\right)\right]. \quad (2.12)$$

Similarmente, a pressão no segmento pai $(k - 1, s)$ pode ser escrita como:

$$p(k - 1, s) = p_f(k - 1, s) + p_b(k - 1, s), \quad (2.13)$$

nos quais s é um número sequencial do segmento pai e as pressões $p_f(k - 1, s)$ e $p_b(k - 1, s)$ são dadas por:

$$p_f(k - 1, s) = \bar{p}(k - 1, s) \exp\left[i\omega\left(t - \frac{x(k - 1, s)}{c(k - 1, s)}\right)\right], \quad (2.14)$$

$$p_b(k - 1, s) = R(k - 1, s) \bar{p}(k - 1, s) \exp\left[i\omega\left(t - \frac{2L(k - 1, s)}{c(k - 1, s)} + \frac{x(k - 1, s)}{c(k - 1, s)}\right)\right].$$

No nó distal do vaso superior, $x(k - 1, s) = L(k - 1, s)$, a pressão é dada por:

$$[p(k - 1, s)]_A = [p_f(k - 1, s)]_A + [p_b(k - 1, s)]_A, \quad (2.15)$$

nos quais

$$[p_f(k-1, s)]_A = \bar{p}(k-1, s) \exp \left[i\omega \left(t - \frac{L(k-1, s)}{c(k-1, s)} \right) \right], \quad (2.16)$$

$$[p_b(k-1, s)]_A = R(k-1, s) \bar{p}(k-1, s) \exp \left[i\omega \left(t - \frac{L(k-1, s)}{c(k-1, s)} \right) \right]. \quad (2.17)$$

A condição de continuidade da pressão exige que na junção ela assuma um único valor, portanto

$$[p_f(k-1, s)]_A + [p_b(k-1, s)]_A = [p_f(k, j)]_A + [p_b(k, j)]_A. \quad (2.18)$$

Substituindo as Equações (2.11), (2.12), (2.16) e (2.17) na Equação (2.18) e resolvendo para $\bar{p}(k, j)$, resulta em:

$$\bar{p}(k, s) = \frac{\bar{p}(k-1, s) [1 + R(k-1, s)] \exp \left[-\frac{i\omega L(k-1, s)}{c(k-1, s)} \right]}{1 + R(k, j) \exp \left[-2i\omega \frac{L(k, j)}{c(k, j)} \right]}. \quad (2.19)$$

Conforme 1986 Duan e Zamir, para efeitos de cálculo da pressão e fluxo, adimensionalizam-se as pressões em (2.19) em termos da pressão de entrada $p_0 = \bar{p}_0 \exp[i\omega t]$.

Considerando $P(k, j) = \frac{p(k, j)}{p_0}$ e $\bar{P}(k, j) = \frac{\bar{p}(k, j)}{\bar{p}_0}$, a Equação (2.5) para o cálculo da pressão pode ser expressa de forma adimensionalizada por:

$$\begin{aligned} P(k, j) &= \bar{P}(k, j) \{ \exp[-i\beta(k, j)X(k, j)] \\ &\quad + R(k, j) \exp[-i2\beta(k, j)] \exp[i\beta(k, j)X(k, j)] \}, \end{aligned} \quad (2.20)$$

nos quais $\beta(k, j) = \frac{\omega L(k, j)}{c(k, j)}$ e $X = \frac{x(k, j)}{L(k, j)}$. Similarmente, a Equação (2.6) para o fluxo $q(k, j)$ pode ser obtida de forma adimensionalizada por:

$$\begin{aligned} Q(k, j) &= M(k, j) \bar{P}(k, j) \{ \exp[-i\beta(k, j)X(k, j)] \\ &\quad - R(k, j) \exp[-2i\beta(k, j)] \exp[i\beta(k, j)X(k, j)] \}, \end{aligned} \quad (2.21)$$

nos quais $Q(k, j) = \frac{q(k, j)}{q_0}$, $M = \frac{Y(k, j)}{Y(1, 1)}$ e $q_0 = Y(1, 1)p_0$. O cálculo da admitância $Y(1, 1)$ na posição proximal do segmento raiz, ou seja, da artéria de alimentação é apresentado

na próxima seção.

2.1.2 CÁLCULO DO COEFICIENTES DE REFLEXÃO E ADMITÂNCIA

Para determinar os coeficientes de reflexão nas junções, consideram-se as duas junções A e B das extremidades de um segmento genérico (k, j) de um modelo de árvore arterial (ver Figura 2.2). Na posição distal B , o coeficiente de reflexão é definido por (DUAN; ZAMIR, 1984; LIGHTHILL, 1975):

$$R(k, j) = \frac{Y(k, j) - [Y_e(k + 1, 2j) + Y_e(k + 1, 2j - 1)]}{Y(k, j) + [Y_e(k + 1, 2j) + Y_e(k + 1, 2j - 1)]}, \quad (2.22)$$

nos quais $Y_e(k + 1, 2j - 1)$ e $Y_e(k + 1, 2j)$ são admitâncias efetivas nos segmentos à jusante de B . Estas admitâncias são determinadas pela razão entre o fluxo e pressão naquela posição, que é dada por:

$$Y_e(k + 1, s) = \frac{Y(k + 1, s) \{1 - R(k + 1, s) \exp[-i2\beta(k + 1, s)]\}}{1 + R(k + 1, s) \exp[-i2\beta(k + 1, s)]}, \quad (2.23)$$

nos quais $s = 2j - 1$ e $2j$ são os números sequenciais dos dois segmentos filhos e $R(k + 1, s)$ é o coeficiente de reflexão na posição distal de cada segmento. Similarmente, $Y_e(k, j)$, a admitância na posição proximal A do segmento (k, j) pode ser dada por:

$$Y_e(k, j) = \frac{Y(k, j) \{1 - R(k, j) \exp[-i2\beta(k, j)]\}}{1 + R(k, j) \exp[-i2\beta(k, j)]}. \quad (2.24)$$

Substituindo $R(k, j)$ da Equação (2.22) em (2.24), obtém-se uma equação para cálculo das admitâncias efetivas ao longo do modelo de árvore arterial:

$$Y_e(k, j) = \frac{Y(k, j)[Y_e(k + 1, 2j) + Y_e(k + 1, 2j - 1) + iY(k, j) \tan \beta(k, j)]}{Y(k, j) + i[Y_e(k + 1, 2j) + Y_e(k + 1, 2j - 1)] \tan \beta(k, j)}. \quad (2.25)$$

Em segmentos terminais, pode ser assumido que não ocorrem mais reflexões à jusante das posições distais destes segmentos, portanto a admitância efetiva destes segmentos é igual às suas admitâncias características. Adotando a Equação (2.24), todas as admitâncias efetivas podem ser determinadas percorrendo a árvore a partir dos segmentos terminais

até o segmento raiz.

2.1.3 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

A impedância vascular de um modelo de árvore arterial é expresso por

$$z = \frac{p}{q}, \quad (2.26)$$

onde p e q podem ser definidos pelas Equações (2.3) e (2.4), respectivamente. Dados que $p(k, j) = P(k, j)p_0$, $q(k, j) = Q(k, j)q_0$ e $q_0 = Y(1, 1)p_0$, em termos de variáveis adimensionalizadas, a impedância pode ser reescrita por

$$Z = \frac{P(k, j)}{Y(1, 1)Q(k, j)}. \quad (2.27)$$

A impedância de entrada de um modelo de árvore arterial determina Z na posição proximal do vaso raiz, ou seja, em $x(k, j) = 0$.

Adotando as Equações (2.20) e (2.21) com $x(k, j) = 0$, obtém-se a impedância de entrada:

$$Z = \frac{-1}{Y(1, 1)}. \quad (2.28)$$

Em suma, a impedância de entrada em módulo é o inverso da admitância característica da artéria de alimentação.

2.1.4 INCORPORAÇÃO DA VISCOSIDADE E VISCOELASTICIDADE NO MODELO

A partir do modelo matemático aqui apresentado, os seguintes cenários podem ser investigados nas simulações hemodinâmicas:

- **2.1.4.1 - Cenário 1:** análise do impacto da viscosidade sanguínea ($\mu(k, j)$).

Os efeitos da viscosidade sanguínea podem ser investigados por substituir a velocidade da onda $c(k, j)$ por uma velocidade da onda complexa:

$$c_v(k, j) = c(k, j)\sqrt{\epsilon}, \quad (2.29)$$

onde ϵ é um fator viscoso que corresponde a um tubo elástico com restrições (DUAN; ZAMIR, 1995). Seja α o número de Womersley adimensional

$$\alpha = r(k, j) \sqrt{\frac{\omega \rho(k, j)}{\mu(k, j)}}, \quad (2.30)$$

o fator viscoso ϵ é calculado por:

$$\epsilon = 1 - F_{10}(\alpha), \quad (2.31)$$

onde a função F_{10} é avaliada deste modo:

$$F_{10}(\alpha) = \frac{2.0}{\alpha \sqrt{i}} \left(1.0 + \frac{1.0}{2.0\alpha} \right), \quad (2.32)$$

onde J_p denota a função de Bessel de índice p .

- **2.1.4.2 - Cenário 2:** análise do impacto da viscoelasticidade da parede do vaso (ϕ_0).

A viscoelasticidade da parede do segmento é incorporado substituindo o módulo de Young estático $E(k, j)$ por um módulo elástico complexo $E_c(k, j)$ no cálculo da velocidade $c(k, j)$ na equação (2.8) da seguinte forma (DUAN; ZAMIR, 1986):

$$E_c(k, j) = |E_c(k, j)| \exp\{i\phi\}, \quad (2.33)$$

onde ϕ é o ângulo de fase entre a pressão e o deslocamento da parede do segmento (TAYLOR, 1966) expresso por $\phi = \phi_0[1 - \exp(-\omega)]$ e $|E_c(k, j)|$ corresponde ao módulo de Young fornecido para a simulação.

- **2.1.4.3 - Cenário 3:** efeitos da viscosidade sanguínea $\mu(k, j)$ e da viscoelasticidade da parede do segmento ϕ_0 de forma combinada.

Neste último cenário, utiliza-se a Equação (2.33) para determinar a velocidade da onda $c(k, j)$ (2.8) no modelo. Com este resultado, calcula-se a Equação (2.29) para determinar a velocidade complexa $c_v(k, j)$ a ser considerada no modelo.

3 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Nesta seção apresentam-se detalhes da ferramenta computacional desenvolvida para simulação do escoamento sanguíneo em modelos de árvores arteriais. A principal finalidade desta ferramenta é possibilitar a visualização de estruturas das árvores arteriais e após a simulação hemodinâmica, a visualização das curvas de distribuição do fluxo sanguíneo e pressão.

Esta ferramenta foi desenvolvida em C++ utilizando as bibliotecas do Qt 5.15.0 (QT, 2019) e OpenGL (KHRONOS, 2019), que ajudam na construção da interface gráfica e na exibição de modelos gráficos, como árvores arteriais e gráficos dos resultados. A ferramenta foi disponibilizada em dois ambientes, o primeiro nomeado de *Iterador Gráfico Universal* (IGU), pois em seu modelo de classes qualquer objeto que implemente a classe *WiseObject* (descrito na Seção 3.2.3) está apto para realizar iterações e desenhar-se através de diretivas OpenGL em um elemento de interface gráfica. O segundo ambiente disponibilizado foi nomeado de *Iterador não-Gráfico Universal* (InGU), pois segue a mesma generalização, entretanto é disponibilizada pelo console, não possuindo interface gráfica. Buscou-se no desenvolvimento desta ferramenta alto grau de generalização para que seja possível analisar todos os parâmetros de um objeto facilmente e que ela possua grande versatilidade. Além de árvores arteriais a ferramenta possibilita que outros objetos sejam gerados para visualização, qualquer objeto que implemente a classe *GraphicObject* (descrito na Seção 3.2.4) pode ser visualizado. A Figura 3.1 ilustra a ferramenta desenvolvida.

Através da modelagem de classes no paradigma do C++ (PARKER, 1959), foi possível realizar diversas generalizações que ampliam a adaptabilidade dos objetos que podem ser inseridos neste modelo de classes. Na Seção 3.2 é proposto um esquema de classes virtuais, ou abstratas, que foram criadas para facilitar o manuseio dos objetos dentro do ambiente computacional e prover funções básicas.

Uma classe virtual não possui construtor próprio, porque classes virtuais são incompletas. Estas classes possuem métodos virtuais, que por sua vez precisam ser definidos pela classe herdeira. Portanto uma classe virtual funciona como um conjunto de regras que classes herdeiras devem seguir, todas as classes que implementem esta classe virtual

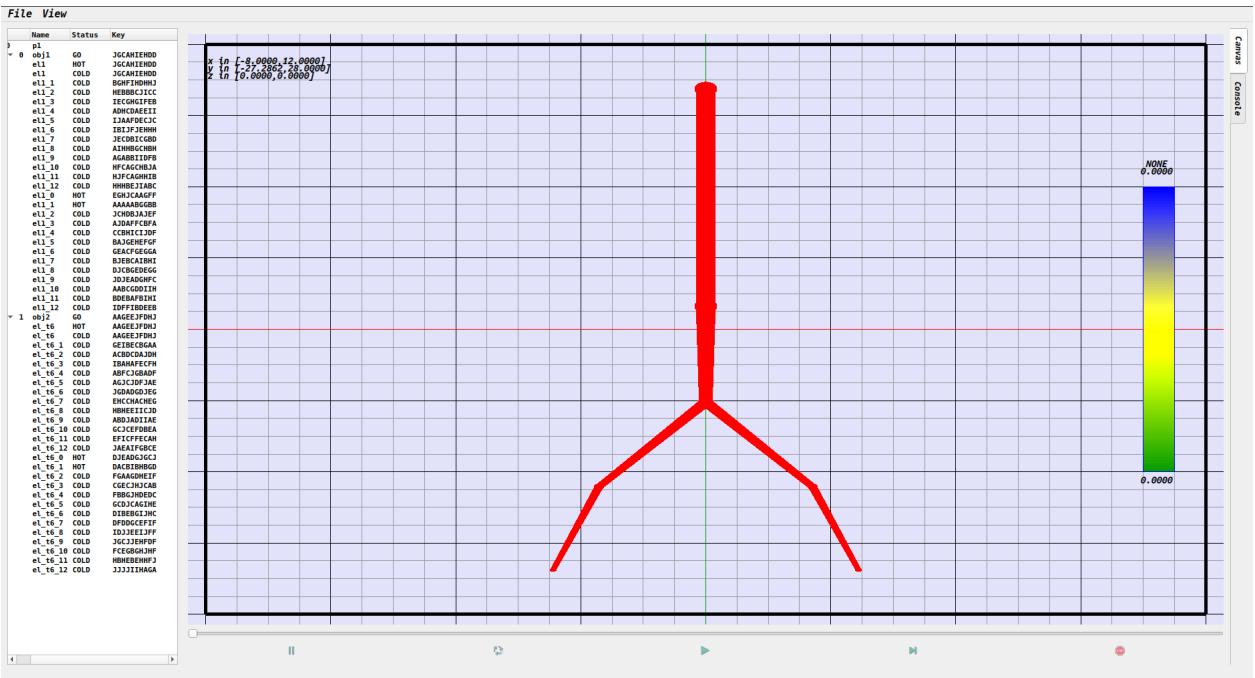


Figura 3.1: Interface gráfica da ferramenta desenvolvida.

devem ter sua própria definição dos métodos virtuais, podendo ter funcionamentos distintos, entretanto recebendo os mesmos parâmetros. Adicionado este conceito à estrutura de dados, classes virtuais generalizam os objetos e garantem o seu funcionamento, separando as estruturas de acordo com seu propósito em classes.

Nesta ferramenta computacional ponteiros foram utilizados na organização destas classes virtuais, quando um ponteiro para uma classe abstrata é definido, é possível que diversas estruturas de dados sejam referencias. Ao referenciar um objeto inteligente *WiseObject* através de um ponteiro é possível acessar os métodos padrões da classe abstrata que irão acessar a implementação de cada objeto. Todos os objetos inteligentes irão ter por definição um método que irá construir a estrutura, mas cada objeto irá construir suas próprias estruturas. Portanto é possível que a ferramenta computacional envie estes dados sem necessariamente reescrever os na memória, eles são enviados por referência. Este fator foi determinante na escolha da linguagem *C++*, pois um ponteiro é o endereço de memória física, o que permite uma agilidade maior na organização da ferramenta e na utilização destas estruturas pela ferramenta em suas diferentes *threads*.

3.1 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Nesta seção, detalham-se alguns aspectos da estrutura de dados e algoritmos que descrevem os passos para o cálculo das equações da pressão P e fluxo Q definidas em (2.20) (2.21), respectivamente.

Inicialmente, salientam-se que as Equações (2.22) e (2.23) expõem a necessidade de valores $Y_e(k + 1, 2j)$ e $Y_e(k + 1, 2j - 1)$ atrelados aos vasos adjacentes na posição distal do vaso (k, j) . Por outro lado, o valor da pressão média do vaso (k, j) calculado usando a Equação (2.19) depende de valores à montante desse vaso, ou seja, do valor $\bar{p}(k - 1, s)$. Tendo isto em vista, a estrutura de dados desenvolvida utiliza ponteiros para acessar as propriedades de artérias à montante e a jusante de um vaso do modelo.

Neste trabalho, adotou-se a linguagem de programação C++. Essa linguagem de programação escolhida permite que objetos sejam passados por referência. Ao passar um objeto por referência, o endereço de memória é enviado, dando total acesso aos parâmetros do objeto, este endereço é chamado de ponteiro. Ao enviar o ponteiro do vaso raiz, é possível acessar todo o modelo de árvore arterial. Cada vaso arterial do modelo contém as propriedades apresentadas na Tabela 3.1, além de ponteiros para os vasos adjacentes.

valores conhecidos	unidade	valores calculados	unidade
comprimento (L)	cm	velocidade da onda (c)	cm/s
densidade (ρ)	g/cm ³	beta (β)	—
módulo de Young (E)	g/cms ²	velocidade angular (ω)	rad/s
viscosidade (μ_0)	cm ² /s	espessura da parede (h)	cm
raio (r)	cm	número de Womersley (α)	—
		admitância característica (Y)	cm ⁴ s/g
		admitância efetiva (Y_e)	cm ⁴ s/g
		coeficiente de reflexão (R)	g/cm ⁴ s
		fator viscoso (ϵ)	—
		pressão (P)	—
		pressão média (\bar{p})	—
		fluxo (Q)	—

Tabela 3.1: Propriedades de cada vaso arterial do modelo.

Além das propriedades especificadas na Tabela 3.1, o vaso possui ainda três ponteiros para os seus vasos adjacentes. Um destes ponteiros, para o vaso adjacente ao seu nó

proximal, ou seja, para o seu vaso pai ($k - 1, s$). Os demais ponteiros para os vasos adjacentes ao seu nó distal, ou seja, para seus vasos filhos à esquerda (*esq*) e à direita (*dir*) expressos por $(k + 1, 2j - 1)$ e $(k + 1, 2j)$, respectivamente. Este arranjo de ponteiros é equivalente a uma árvore duplamente encadeada, onde através de um único ponteiro para um vaso é possível trafegar a árvore nos dois sentidos. Isto é útil quando é necessário acessar propriedades de outro vaso para se determinarem por exemplo, a pressão média, coeficientes de reflexão e admitâncias de um dado vaso.

Os ponteiros permitem também definir se o vaso é a raiz ou uma folha. Caso o ponteiro para o segmento superior ($k - 1, s$) seja igual ao valor da *flag* nula se trata de um vaso raiz. Caso ambos vasos $(k + 1, 2j - 1)$ e $(k + 1, 2j)$ sejam iguais ao valor da *flag* nula se trata de vaso folha, isto é, um vaso terminal.

Basicamente, os passos para determinar as ondas de pressão e fluxo que percorrem um modelo de árvore arterial usando o modelo de Duan e Zamir são dados por:

Algoritmo 1: Cálculos hemodinâmicos simplificados com passos determinando as ondas de fluxo e pressão.

1 **início**

- 2** Cálculo da admitância característica (Y) de cada vaso;
- 3** Cálculo da admitância efetiva (Y_e) de cada vaso;
- 4** Cálculo do coeficiente de reflexão (R) de cada vaso;
- 5** Armazenar valor da admitância característica (Y_r) do vaso raiz, isto é, o valor de $Y(1, 1)$;
- 6** Cálculo da pressão média (\bar{p}) em cada vaso;
- 7** Cálculo das ondas de pressão e fluxo P e Q .

8 **fim**

Os passos acima mencionados podem ser organizados no Algoritmo 1. Esse algoritmo tem como entrada: o modelo de árvore arterial (\mathcal{MAA}) com seus vasos caracterizados por suas propriedades, a frequência f , um fator de escala da viscosidade γ_μ , o parâmetro da viscoelasticidade da parede ϕ e a quantidade de espaçamento para discretização de um vaso N .

O Algoritmo 1 proposto tem dois módulos, a saber: \mathcal{M}_1 e \mathcal{M}_2 .

Algoritmo 2: Cálculos hemodinâmicos do modelo de árvore arterial (\mathcal{MAA}).

Entrada: $\mathcal{MAA}, f, \gamma_\mu, \phi, \bar{p}_0, N$

```

1 início
2   inicializa vaso  $v$  a partir do vaso raiz;
3   se  $existe(v)$  então
4     | Chama  $\mathcal{M}_1(v, f, \gamma_\mu, \phi_0)$  e armazena  $Y_r$ ;
5   fim se
6   se  $existe(Y(1, 1))$  então
7     | Chama  $\mathcal{M}_2(v, \bar{p}_0, Y_r, N)$ ;
8   fim se
9 fim

```

O módulo \mathcal{M}_1 realiza o cálculo percorrendo o caminho a partir dos vasos finais até o vaso raiz (estratégia do tipo *bottom-up*), visando calcular os valores de admitância efetiva (Y_e), admitância característica (Y) e coeficiente de reflexão (R) de cada vaso. Este módulo é definido pelo Algoritmo 3. Necessitam-se das admitâncias efetivas dos vasos à justante do vaso k ($Y_e(k + 1, 2j - 1)$ e $Y_e(k + 1, 2j)$) estejam definidas. Em vista disso, verifica-se a existência dos vasos à justante do vaso atual tanto a esquerda (*esq*) quanto a direita (*dir*) e caso existam realiza-se uma chamada recursiva. Após o retorno das chamadas recursivas, calculam-se as propriedades do vaso atual. Assim, as propriedades do vasos à jusante do vaso atual serão conhecidas, ou seja, já terão sido determinadas $Y_e(k + 1, 2j - 1)$ e $Y_e(k + 1, 2j)$.

Algoritmo 3: \mathcal{M}_1 – Cálculo das admitâncias e coeficiente de reflexão.

```

1  $\mathcal{M}_1(v, f, \gamma_\mu, \phi)$ 
2 início
3   se existe( $v \rightarrow esq$ ) então
4      $\mathcal{M}_1(v \rightarrow esq, f, \gamma_\mu, \phi);$ 
5   fim se
6   se existe( $v \rightarrow dir$ ) então
7      $\mathcal{M}_1(v \rightarrow dir, f, \gamma_\mu, \phi);$ 
8   fim se
9   Calcula as propriedades  $c, \omega, \beta;$ 
10  se ( $\gamma_\mu == 0$ ) e ( $\phi == 0$ ) então
11    Calcula  $Y;$ 
12  fim se
13  senão
14    se ( $\gamma_\mu != 0$ ) então
15      Calcula  $\alpha, \epsilon, E_v, c_v$  e  $Y_v;$ 
16      Atualiza  $E = E_v, c = c_v$  e  $Y = Y_v;$ 
17    fim se
18    se ( $\phi != 0$ ) então
19      Calcula  $E_c;$ 
20      Atualize  $E = E_c;$ 
21    fim se
22  fim se
23  se ( $v$  é um vaso terminal) então
24     $Y_e = Y$  e  $R = 0;$ 
25  fim se
26  senão
27    Calcula  $Y_e$  e  $R;$ 
28  fim se
29 fim

```

O módulo \mathcal{M}_2 realiza os cálculos percorrendo o modelo a partir do vaso raiz até os vasos terminais (abordagem do tipo *top-bottom*), visando calcular o valor da pressão média, pressão e fluxo em cada vaso. Este módulo é expresso no Algoritmo 4. Como expresso na Equação (2.19), o valor da pressão média requer o valor da pressão média do vaso à montante ($k - 1, s$). Com isso, inicialmente, se o vaso atual é a artéria de alimentação (raiz), neste caso $\bar{p} = \bar{p}_0$. Caso contrário, calcula-se \bar{p} com a Equação (2.19). Em seguida, o valor das ondas de pressão e fluxo são obtidas ao longo de cada vaso 1D, que são discretizados. Por fim, a recursão é enviada aos segmentos inferiores, desta forma se garante a existência de um valor $\bar{p}(k - 1, s)$.

Algoritmo 4: \mathcal{M}_2 – Cálculo da pressão e fluxo ao longo de cada vaso.

```

1  $\mathcal{M}_2(v, \bar{p}_0, Y_r, N)$ 
2 início
3   se ( $v$  é o vaso raiz) então
4      $\bar{p} = \bar{p}_0;$ 
5   fim se
6   senão
7     Calcula  $\bar{p};$ 
8   fim se
9   Calcula  $P(X_i)$  e  $Q(X_i)$ , onde  $X_i \in [0, 1];$ 
10  se existe( $v \rightarrow esq$ ) então
11     $\mathcal{M}_2(v \rightarrow esq, \bar{p}_0, Y_r, N);$ 
12  fim se
13  se existe( $v \rightarrow dir$ ) então
14     $\mathcal{M}_2(v \rightarrow dir, \bar{p}_0, Y_r, N);$ 
15  fim se
16 fim
```

No Algoritmo 4 tem-se que N denota a quantidade de espaçamento dX no intervalo $[0, 1]$ para discretização de um vaso. Assim, $dX = 1/N$ e $X_i = idX (i = 0, 1, \dots, N)$.

3.2 ESTRUTURA DE DADOS

Nesta seção apresentam-se detalhes da estrutura de dados adotada no funcionamento da ferramenta computacional. Como mencionado na Seção 3.1 , foi empregado uma estrutura para armazenar todas as referências às informações do modelo geométrico da árvore arterial.

Iterar o modelo matemático na ferramenta computacional equivale à aplicar um objeto inteligente a sua fábrica de iteração *WiseIterationFactory* (descrito na Seção 3.2.2). A fábrica de iteração *DuanAndZamirIterationFactory* acoplada à uma árvore arterial *WiseArterialTree* é equivalente a execução do Algoritmo 1 em todo o modelo geométrico, definindo a onde de pressão P e fluxo Q em todos os segmentos.

A ferramenta computacional foi desenvolvida para ser capaz de armazenar, carregar e iterar o modelo matemático e gerar novas estruturas para visualização, a estrutura de dados proposta para a ferramenta precisa realizar estas operações e armazenar corretamente os dados gerados.

As seções contidas nesta Seção de estrutura de dados descrevem a estrutura de dados genérica, tendo como principal objeto de estudo, o fluxo pulsátil enquanto atravessa uma estrutura de árvore arterial e a visualização de seus resultados. Em versões anteriores, a ferramenta computacional definia seus modelos matemáticos, geométricos e de visualização em apenas uma estrutura abstrata, o que acarretou em classes grandes com difícil manutenção e pouca versatilidade. Isto porque o mesmo objeto ficava responsável por diversas funções, era capaz de se instanciar, iterar e desenhar na tela através de diretivas OpenGL. Portanto, nesta versão da ferramenta computacional as classes foram desenvolvidas para ter propósito único, cujo objetivo é garantir que as classes tenham uma função apenas, garantindo uma classe enxuta e de fácil interpretação.

Com a experiência adquirida previamente três principais fluxos foram identificadas: A iteração dos objetos, uma vez carregados estes objetos são atualizados por algoritmos, gerando novas versões; O armazenamento dos objetos, os elementos criados no método de iteração podem ser armazenados em uma cache e então recuperados; E a exibição dos objetos, os elementos carregados podem ter seus parâmetros visualizados em um

elemento de interface gráfica *OpenGL*. O ciclo iterativo irá gerar ao final uma animação, cada iteração irá gerar um quadro desta animação. O objeto inteligente *WiseObject* irá armazenar todos estes quadros, cada quadro representa um elemento inteligente *WiseElement*. Cada quadro antes de ser exibido precisa ser processado em diretivas OpenGL, o responsável sobre esse processo é o elemento gráfico *GraphicObject*. Igualmente quando se tratam de animações e reproduções de vídeo, somente quadros necessários estarão em memória.

Finalmente, estas estruturas são utilizadas pela ferramenta computacional possibilitando que modelos geométricos sejam carregados, iterados e então exibidos, sem que haja perda dos quadros ou de algum dado. Os elementos principais da estrutura de dados serão descritos nas seções que se seguem.

3.2.1 ELEMENTO INTELIGENTE

Elementos inteligentes são objetos que implementam a classe *WiseElement*, o principal objetivo de um elemento inteligente é manter os dados mais recentes de um modelo geométrico e os dados necessários para o método de iteração. No caso do estudo do fluxo pulsátil consideramos que uma iteração seja a execução completa do algoritmo apresentado na Seção 3.1 em toda a árvore. Portanto cada elemento inteligente possuirá todas as informações do modelo geométrico de uma árvore arterial, seus segmentos e suas propriedades.

Através das malhas estruturadas e desestruturadas presentes na biblioteca *VTK* (*Visualization ToolKit*) (THE... ,) é possível descrever diversas estruturas de dados através de elementos padronizados, como pontos, linhas e células. Utilizando os elementos básicas contidas nestas malhas, variáveis e ferramentas da linguagem a estrutura básica da arquitetura foi criada, presente na Figura 3.2.

A Figura 3.2 mostra que um elemento inteligente é composto por duas outras estruturas: A primeira *WiseStructure*, utiliza pontos, linhas, células e campos para determinar estruturas geométricas; A segunda *DataStructure*, representa os dados abstratos específicos de cada elemento. Estas estruturas são equivalentes entre si, isto é feito para que a

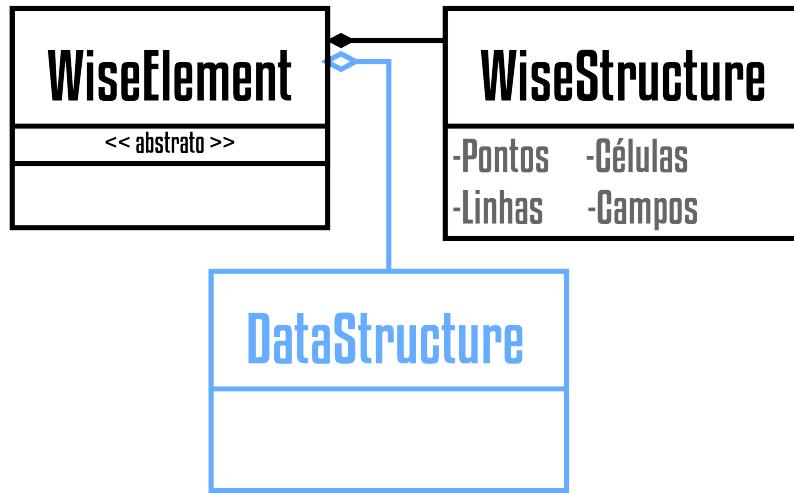


Figura 3.2: Representação de classes de um elemento inteligente. *WiseElement* a classe abstrata base e seus componentes: *WiseStructure* representa a estrutura contida em um arquivo VTK e *DataStructure* representa a estrutura de ponteiros e variáveis utilizadas na iteração. Tingido de azul as estruturas que nem sempre estão presentes.

primeira estrutura siga um formato padrão de pontos, linhas, células e campos seja mantida. Enquanto dados abstratos equivalentes podem ser utilizados. Os dados mantidos na estrutura padrão *WiseStructure* são utilizados principalmente na leitura e escrita de objetos, portanto são mantidos como vetores que possuem cadeias de caracteres, os dados presentes nesta estrutura podem ser editados pelo usuário. Enquanto os dados abstratos contém a mesma informação contida em variáveis da linguagem, como números inteiros, vetores, ponteiros e outros.

Cada parâmetro de um elemento inteligente representa uma grandeza associada à um componente do modelo geométrico (pontos, linhas e células) ou ainda sobre todo o modelo (campos). Os parâmetros armazenam valores definidos por um nome e uma referência ao modelo geométrico, os raios r de um árvore arterial são dados relacionados à um segmento que é representado por uma linha, como só existe um raio por segmento, somente um valor será armazenado. Os valores da onda de uma onda de pressão P através de um segmento com $X \in [0, 1]$ estão relacionados as mesmas linhas, mas são representados por uma sequência de valores. A estrutura de parâmetros permite que sejam armazenados um ou múltiplos valores no mesmo local e os acesse da mesma forma. Ao acessar o valor do raio r de um segmento é recebido um vetor com apenas uma posição e ao acessar a

pressão P são esperados N elementos.

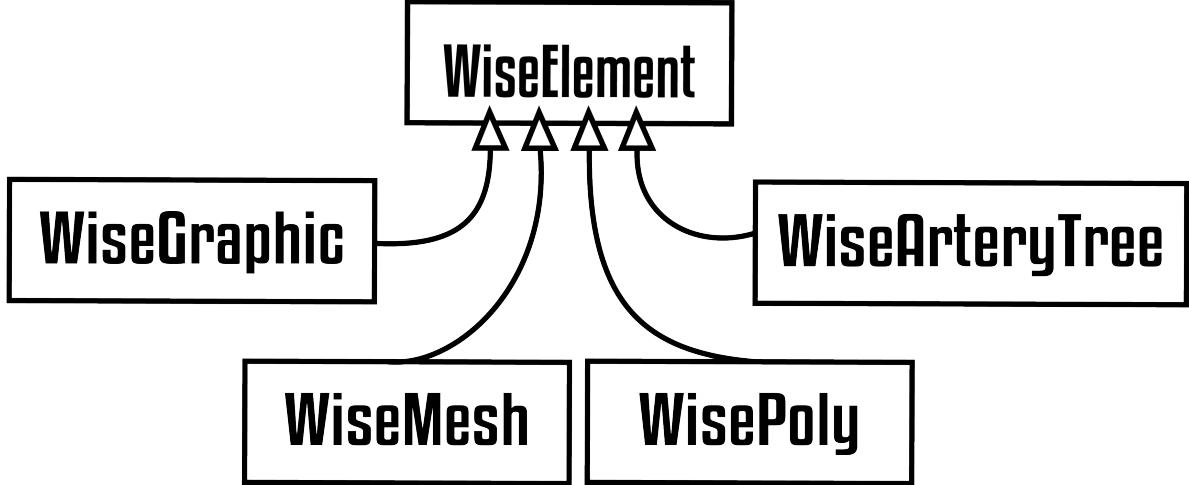


Figura 3.3: Tipos de elementos inteligentes. *WiseGraphic*, um gráfico bidimensional. *WiseMesh*, uma malha tridimensional. *WisePoly*, um cubo. *WiseArteryTree*, uma árvore arterial

Como demonstrado na Figura 3.3 um elemento inteligente é aquele que implementa a classe abstrata *WiseElement*, os dados abstratos *DataStructure* de cada classe podem ser salvos na estrutura padrão *WiseStructure* e utilizados quando necessário.

O modelo geométrico de uma árvore arterial foi traduzido para o elemento inteligente *WiseArteryTree*, a estrutura inteligente deste elemento conta com pontos e linhas que definem os parâmetros do modelo geométrico na estrutura *WiseStructure*, a estrutura abstrata *DataStructure* conta com ponteiros para cada segmento e grandezas físicas armazenadas em pontos flutuantes de precisão dupla.

Foram criadas ainda outros elementos inteligentes, como o gráfico inteligente *WiseGraphic* que representa um gráfico, a malha plana inteligente *WiseMesh* representa um plano e malha em cubo inteligente *WisePoly* representa um cubo.

O elemento inteligente *WiseGraphic* foi criado para armazenar dados ao longo de uma dimensão, como a pressão ao longo da árvore arterial. Os elementos *WiseMesh* e *WisePoly* foram criados para armazenar dados ao longo de duas dimensões e ao longo de três dimensões, estes dois elementos foram utilizados como exemplo de objetos que podem ser generalizados na ferramenta e visualizados, mudando pouco as estruturas já existentes. O elemento *WiseGraphic* é equivalente à um vetor de valores (x, v) , o elemento *WiseMesh*

é equivalente à uma matriz de valores (x, y, v) e o elemento *WisePoly* é equivalente uma matriz tridimensional de valores (x, y, z, v) , onde v é o valor associado e $(x), (x, y)$ ou (x, y, z) a posição, respectivamente. Através deste modelo, é possível armazenar em um *WiseMesh* o valor v da pressão ao longo de uma árvore arterial na direção x variando a frequência no eixo y .

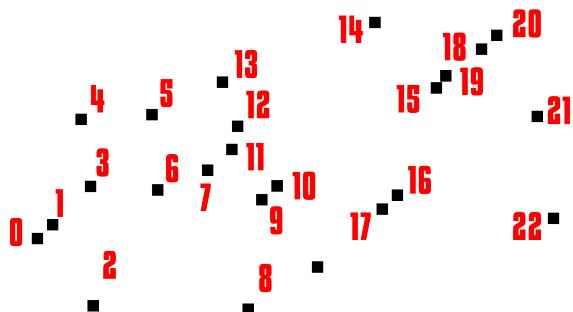
Os elementos inteligentes servem como estruturas de armazenamento padrão que compõem um outro objeto. O ciclo de manipulação desses elementos se divide em três partes: A criação, aonde os objetos podem ser criados à partir de exemplos pré-definidos ou através de um arquivo de entrada *VTK* ou *XML (eXtensible Markup Language)*; A iteração, processo em que o elemento inteligente com todas as estruturas definidas e consistentes é utilizado por um algoritmo; [A exibição, este último ciclo utiliza os dados armazenados nesta estrutura e gera um objeto para visualização.](#)

Todo elemento inteligente completo possui uma redundância de dados, podendo ser representado por qualquer uma das duas estruturas que o compõe. A estrutura inteligente, *WiseStructure*, utiliza componentes simples para descrever as estruturas e seus parâmetros. Essa estrutura é a que mais se assemelha à encontrada na arquitetura *VTK*. Por utilizar uma quantidade limitada de diretivas o arquivo proveniente dessa estrutura pode ser rapidamente lido, interpretado e até mesmo exportado.

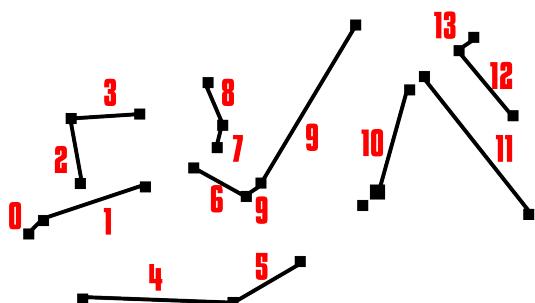
Os componentes de uma estrutura inteligente são pontos, células, linhas e campos. Pontos demarcam uma posição no espaço, células e linhas representam conjuntos de pontos e os campos são dados gerais da estrutura. Um modelo de pontos e linhas é capaz de representar o mesmo modelo geométrico de uma árvore arterial, basta considerar cada ponto uma bifurcação de vasos e cada segmento de vaso uma linha. Através destes componentes é possível armazenar e acessar dados sobre cada segmento. Para dados gerais do modelo, como a frequência f , são utilizados os campos da estrutura inteligente.

A classe *WiseElement* foi desenvolvida para construir a estrutura abstrata (*DataStructure*) à partir das informações contidas na estrutura inteligente (*WiseStructure*), desta forma é importante que a estrutura inteligente possa ser armazenada e recuperada rapidamente. O elemento inteligente é o elemento básico do método de iteração, sendo duplicado

Pontos



Linhos



Células

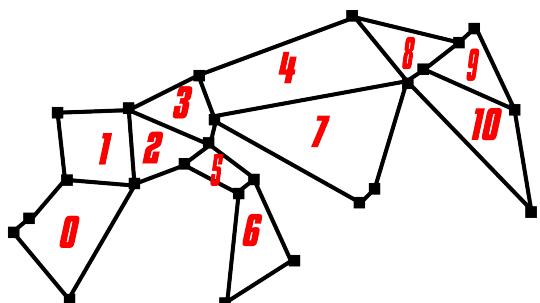


Figura 3.4: Pontos utilizados na especificação do modelo geométrico. Linhas utilizadas na especificação do modelo geométrico, através dos pontos previamente definidos. Células utilizadas na especificação do modelo geométrico, através dos pontos previamente definidos.

antes de ser iterado, gerando novas estruturas inteligente e abstrata idênticas. Imediatamente, a nova estrutura abstrata *DataStructure* é descartada e os dados contidos na nova estrutura inteligente *WiseStructure* são armazenados. Portanto, a estrutura abstrata não estará sempre presente. Seguindo este ciclo de vida, todos os elementos inteligentes obedecem à máquina de estados contida na Figura 3.5.

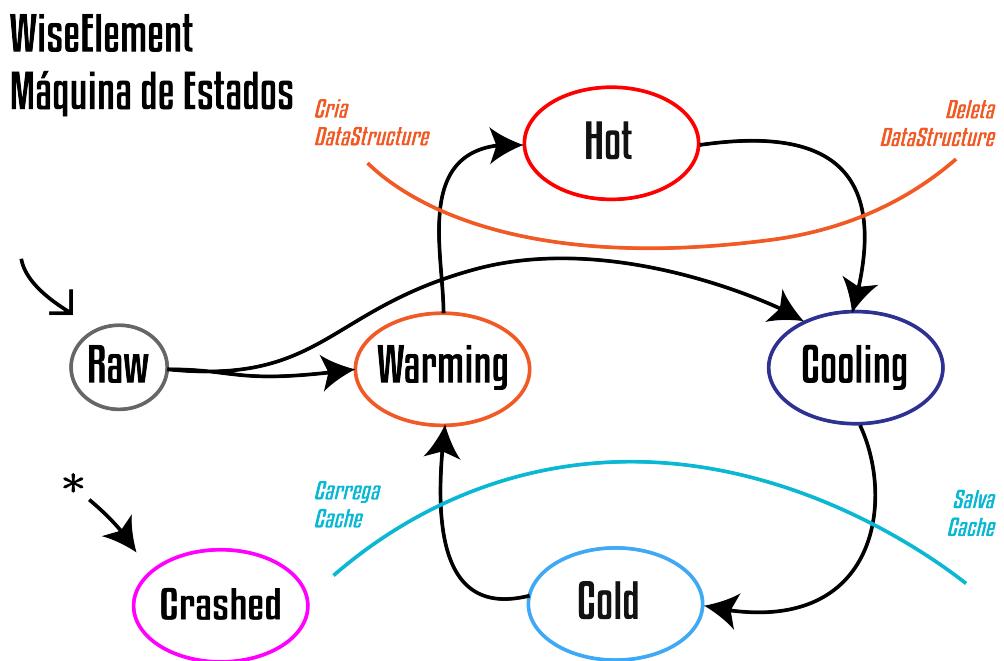


Figura 3.5: Máquina de estados que controla o funcionamento de um elemento inteligente.

A máquina de estados dos elementos inteligentes gerencia o ciclo de vida de todos os elementos inteligentes, elementos inicialmente recebem o estado *Raw*, ou cru, que representa um elemento ainda sem estruturas carregadas ou sem consistência garantida. Uma vez que a estrutura inteligente é inserida e verificada o elemento muda para o status *Warming* ou *Cooling*, respectivamente esquentando ou esfriando, suas estruturas estão representadas na Figura 3.6.

A figura 3.6 mostra as estruturas presentes em elementos no estado *Warming* que é a mesma dos estados *Raw* e *Cooling*. Cada estado possui uma finalidade diferente e representa em que estado estão as informações do elemento inteligente. Elementos no estado *Warming* estão aguardando a construção de sua estrutura abstrata, enquanto elementos no estado *Cooling* aguardam que seus dados sejam salvos em cache. Finalmente,

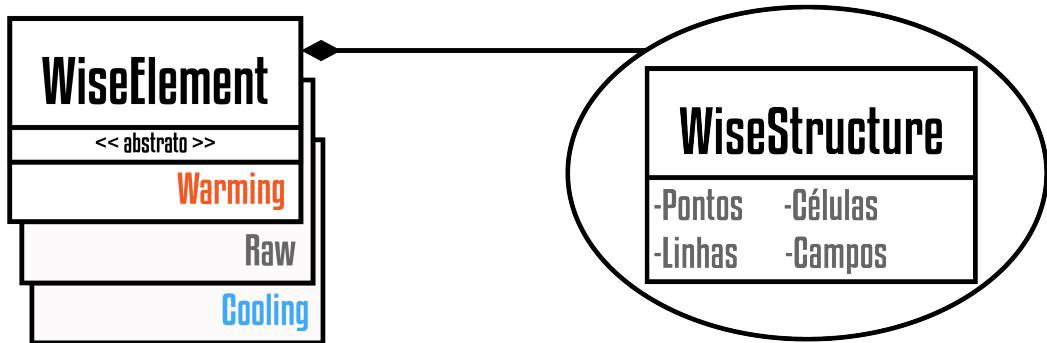


Figura 3.6: Elemento inteligente enquanto no estado *Warming*, *Raw* e *Cooling*.

elementos no estado *Raw* indicam que não é esperada a consistência dos dados.

Inicialmente os elementos inteligentes são criados no estado *Raw*, enquanto os dados do elemento são carregados ele permanecerá neste estado. Ao final do carregamento o objeto trocará de estado para *Warming* ou *Cooling*, que indicam o próximo passo do elemento. Estar no estado *Warming* indica que o objetivo é esquentar o objeto, atingindo o estado *Hot*. Enquanto o estado *Cooling* indica que a estrutura inteligente aguarda resfriamento, atingindo o estado *Cold*. Quando os dados abstratos são criados corretamente para o elemento inteligente seu estado é definido como *Hot*, neste estado todas as informações do objeto estão em memória, sendo este o estado mais pesado do elemento inteligente. Em contraponto, o estado *Cold* indica que a estrutura inteligente foi corretamente armazenada em disco, elementos inteligentes neste estado estão em seu estado mais leve, pois possuem em memória apenas o caminho para a estrutura inteligente armazenada.

Como demonstrado na Figura 3.5, o estado frio (*Cold*) está associado com o uso de uma cache para estruturas inteligentes. A estrutura do arquivo é equivalente à uma malha estruturada VTK, mas são efetivamente salvos em um arquivo *XML*. Caso sejam novamente carregados por uma mudança de estado ou deletados o arquivo armazenado é deletado.

O estado *Crashed* serve para identificar objetos que não tem mais o funcionamento esperado. Durante a troca de estados do elemento é verificado se as estruturas esperadas estão presentes, caso não estejam o objeto é direcionado à este estado.

Finalmente, o estado *Hot* representa os elementos que possuem todas as estruturas

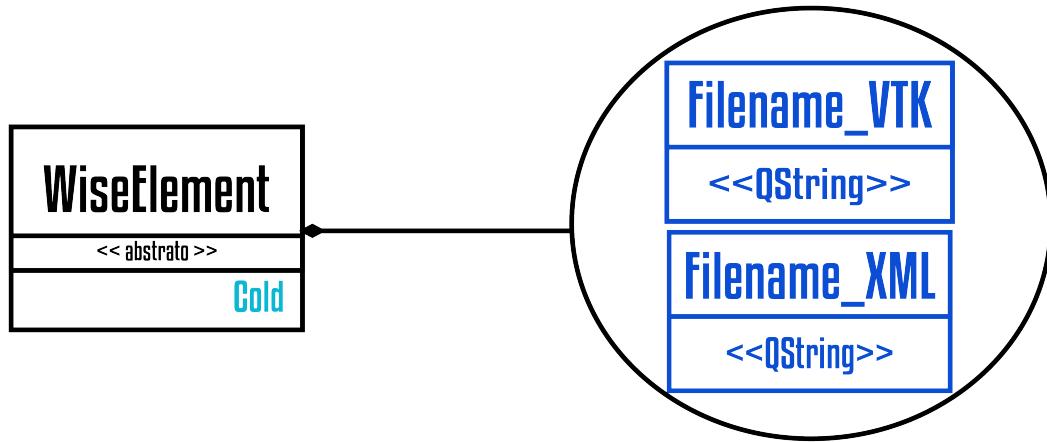


Figura 3.7: Elemento inteligente enquanto no estado *Cold*.

presentes. Isto significa que a estrutura inteligente *WiseStructure* e a estrutura abstrata equivalente *DataStructure* estão presentes e são consistentes.

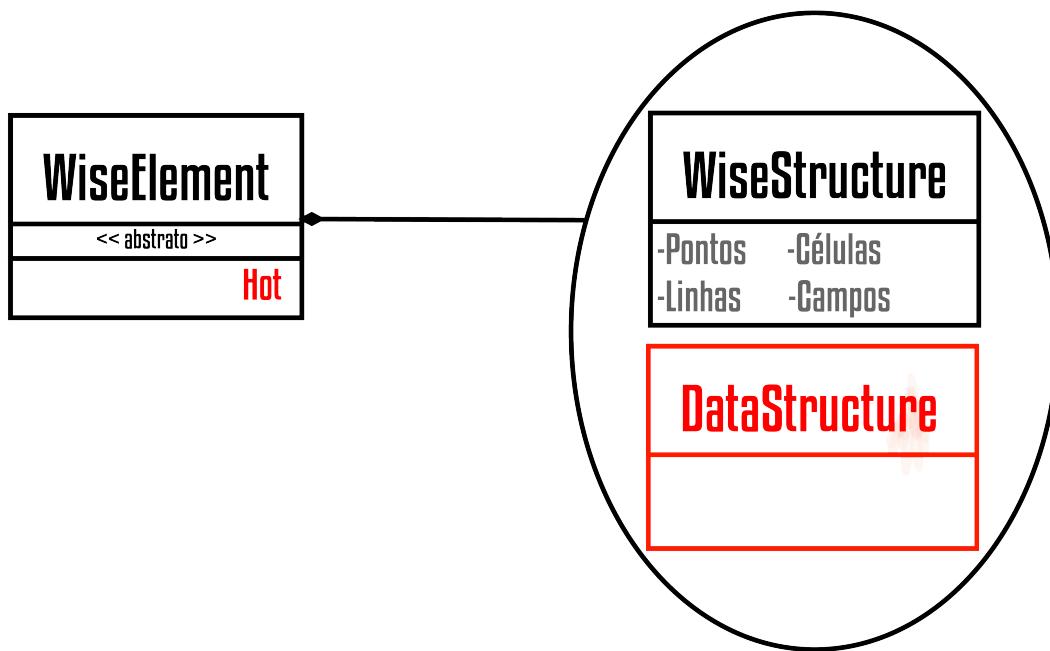


Figura 3.8: Elemento inteligente enquanto no estado *Hot*.

Para que um elemento possa ser iterado ele precisa estar no estado *Hot*, porque durante a iteração de um elemento inteligente seus dados abstratos são utilizados. A cada passo da iteração a estrutura *DataStructure* é atualizada, exigindo uma atualização da estrutura *WiseStructure*.

Seguindo o conceito de classes com propósito único, os elementos inteligentes são responsáveis apenas por gerir os dados contidos na estrutura inteligente e abstrata. Portanto as funções

de criar, iterar e visualizar estas estruturas foram divididas em outras classes.

3.2.2 FÁBRICA

Como mencionado anteriormente três principais barreiras foram identificadas armazenamento, iteração e visualização. Nesta seção uma arquitetura de classes que permite a execução de cada passo através do paradigma de Fábricas Dinâmicas (WELICKI; YODER; WIRFS-BROCK, 2008). Nesta seção foi proposta uma arquitetura com Fábricas que permitem a criação de instâncias com definições concretas armazenadas como metadados. Isso facilita a adição de novos objetos que podem ser interpretados sem modificar o código da fábrica em si. A fábrica é uma classe que possui construtores de outra classes, este tipo de classe permite que os métodos de construção do objeto sejam separados da lógica interna do objeto, sendo útil em classes com uma construção complexa. Sendo estas fábricas também classes virtuais, três principais tipos de fábricas foram idealizadas. A primeira fábrica cria os elementos inteligentes, a segunda fábrica itera estes elementos inteligentes e a terceira que cria um elemento gráfico a partir de um elemento inteligente. Primeiramente, a fábrica de elementos inteligentes *WiseElementFactory* é utilizada para a criação de elementos inteligentes, essa fábrica é utilizada para criar um elemento inteligente à partir de parâmetros pré-definidos. Esse tipo de fábrica é também uma classe virtual, seus métodos definem que fábricas de elementos inteligentes possuem três maneiras de executar: Criar elementos à partir de uma lista de exemplos; Criar elemento a partir de um arquivo *VTK*; E, um último que cria o elemento a partir de um arquivo *XML*.

Os métodos de criação de elementos são selecionados através do nome da fábrica e de um dos três métodos de criação. A ferramenta computacional possui uma lista com todas as fábricas disponíveis e as utiliza quando necessário. Devido à forma como os dados são carregados para cada elemento, é necessário que haja uma fábrica para cada tipo de elemento inteligente.

Similarmente, a fábrica *WiseIterationFactory* só pode operar com um tipo específico de elemento inteligente, entretanto é possível que haja mais de uma fábrica de iteração

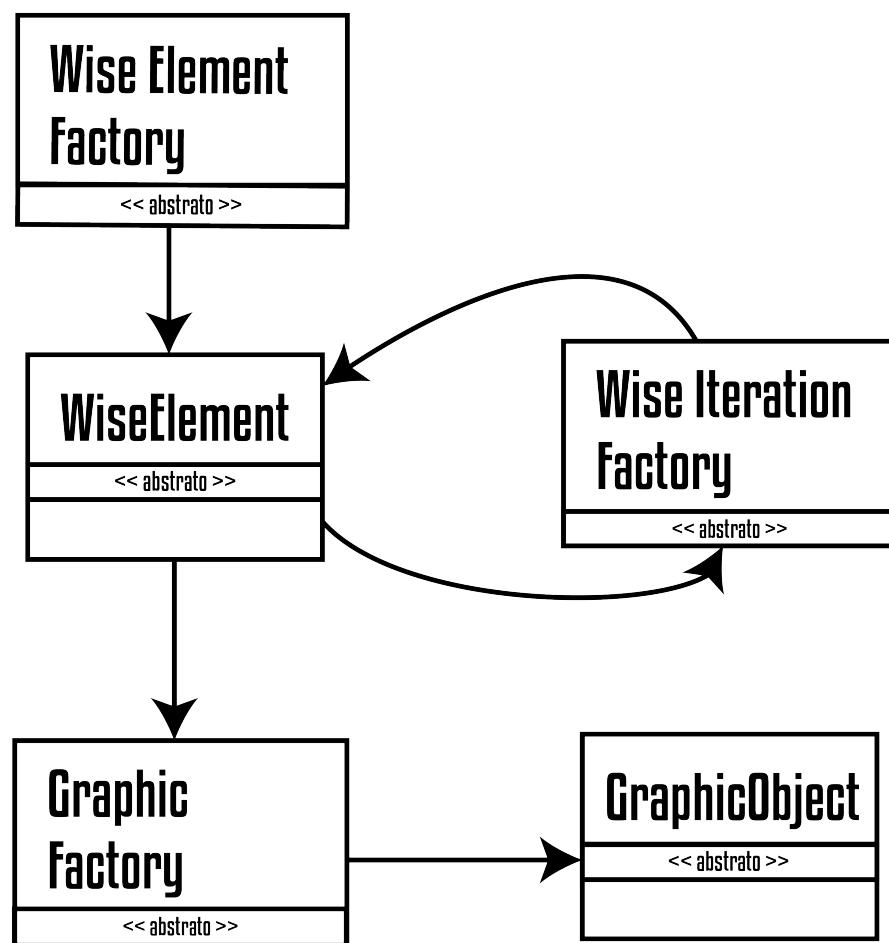


Figura 3.9: Arquitetura de classes fábrica e fluxo de trabalho do elemento inteligente *WiseElement*. A fábrica *WiseElementFactory* é responsável por criar os elementos inteligentes, a fábrica *WiseIterationFactory* é responsável pela iteração do elemento inteligente e a fábrica *GraphicFactory* é responsável por criar as estruturas de visualização.

disponível por tipo de elemento inteligente. Desta forma, uma árvore arterial pode ser iterada por diferente algoritmos de iteração e o mesmo ocorre com os outros tipos de elementos. Estas fábricas são responsáveis por executar algum algoritmo que utilize o tipo de dados do elemento inteligente. No caso de uma árvore arterial é possível utilizar uma fábrica que irá executar o modelo matemático descrito na Seção 3.1 utilizando os ponteiros para segmentos disponíveis em uma *WiseArteryTree*.

Por último, a fábrica *GraphicFactory* irá criar o objeto gráfico correspondente ao elemento inteligente. Assim como um elemento inteligente um objeto gráfico pode ser salvo em cache. Um elemento inteligente é composto por todas as linhas, pontos, células e seus valores associados, enquanto um objeto gráfico contém as representações gráficas destas estruturas e permite a visualização destes valores associados. Os elementos estruturais de uma árvore arterial (seus pontos e linhas) são traduzidos em esferas e cilindros como visto na Figura 3.1. A cor destas esferas e cilindros representam algum valor associado à estrutura, apenas um valor pode ser exibido por vez ao longo da escala de cores, como o fluxo Q ou a pressão P . Desta forma os elementos gráficos só exigem que um parâmetro por vez seja armazenado.

3.2.3 OBJETO INTELIGENTE

A classe que combina todas as estruturas utilizadas no método de iteração da ferramenta computacional foi nomeada de objeto inteligente *WiseObject*, este objeto preserva todos os passos de de iteração e poupa a quantidade de recursos mantida em memória. A classe é composta por um coleção de elementos inteligentes e objetos gráficos equivalentes entre si. A presença de uma fábrica gráfica é opcional, possibilitando que objetos sejam iterados sem que alguma estrutura seja disponibilizada para visualização. Utilizando a mesma separação de classes com propósito único, fábricas dinâmicas garantem que um objeto inteligente seja criado corretamente. As fábricas presentes na Seção 3.2.2 foram incluídas como propriedades de um objeto inteligente, desta forma estes objetos serão compostos por três fábricas: *WiseElementFactory*, *WiseIterationFactory* e *GraphicFactory*. O objeto inteligente possuirá duas estruturas de armazenarão elementos inteligentes. O

elemento inteligente guardado no *Forno* será o objeto utilizado pelo algoritmo a cada iteração, portanto é sempre o mais recente. A cada ciclo iterativo o elemento contido no *Forno* é duplicado e uma nova instância é adicionada ao *Freezer*, estes elementos serão armazenados e recuperados quando necessário.

O ciclo de vida de um objeto inteligente consiste na sua criação, a iteração de um modelo matemático e, opcionalmente, a exibição de um modelo gráfico. Objetos inteligentes são criados com seu primeiro elemento inteligente. Ao criar um objeto inteligente, sua fábrica adiciona em sua estrutura a fábrica de elementos inteligentes, desta forma objetos inteligentes são capazes de replicar seus elementos inteligentes. No momento da criação, o primeiro elemento é duplicado e uma instância segue para o *Forno*, enquanto a outro segue para o *Freezer*.

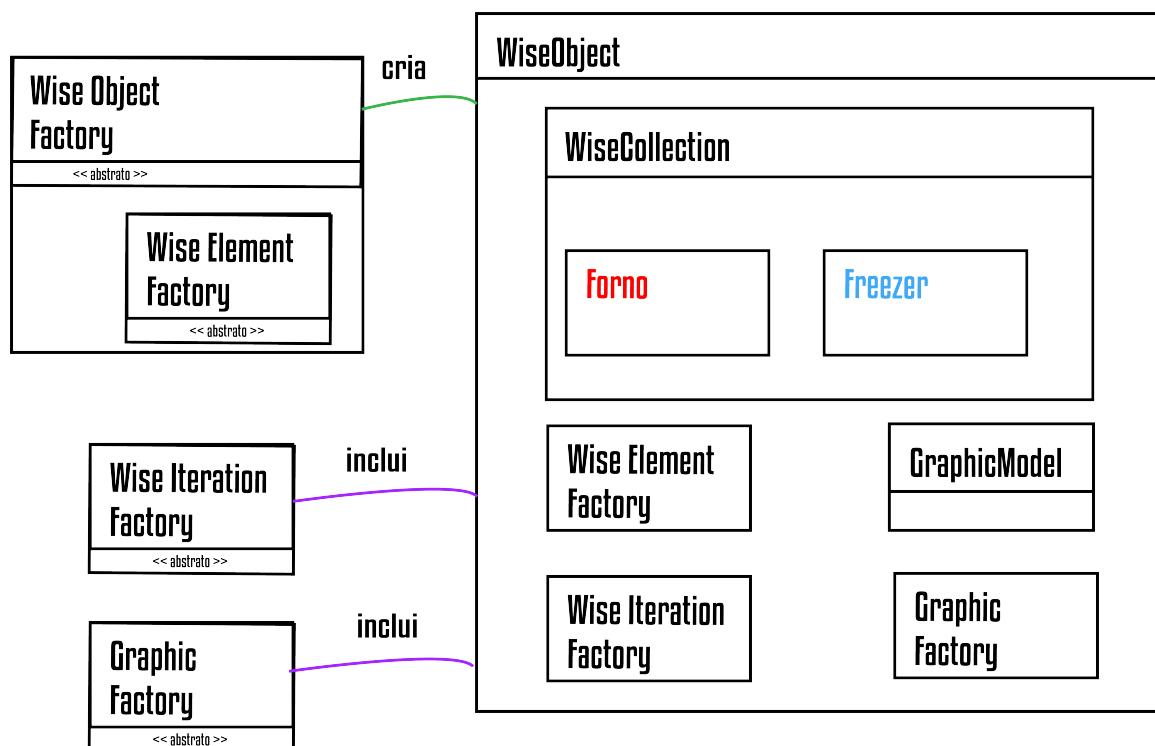


Figura 3.10: Objeto inteligente *WiseObject* e todos seu componentes: *WiseObjectFactory*, fábrica responsável pela criação de objetos inteligentes; *WiseElementFactory*, fábrica responsável pela criação de elementos inteligentes; *WiseIterationFactory*, fábrica de iteração; *WiseGraphicFactory*, fábrica gráfica; *WiseCollection*, coleção de elementos inteligentes; *GraphicModel*, coleção de objetos gráficos.

Através do modelo de classes de um objeto inteligente presente na Figura 3.10 é possível

identificar todos os componentes presentes em um objeto inteligente. O objeto inteligente troca seus elementos de estado automaticamente, a coleção de elementos inteligentes *WiseCollection* irá manter apenas um elemento em memória, o elemento contido no *Forno* que deve permanecer no estado *Hot*. Ao mesmo tempo a coleção irá manter um histórico de elementos armazenados no *Freezer* que devem permanecer no estado *Cold*. É possível que o objeto inteligente volte à um estado anterior, substituindo o elemento presente no *Forno* com algum estado anterior armazenado no *Freezer*, dessa forma o elemento inteligente utilizado no método iterativo será o objeto recuperado. Ao realizar essa operação, a coleção de elementos inteligentes irá recuperar a estrutura inteligente do elemento, alterando seu estado para *Warming*, em seguida irá recriando seus dados abstratos utilizando a fábrica de elementos inteligentes disponível, além de alterar seu estado para *Hot*. Estas mudanças de estados são descritas pela máquina de estados do objeto inteligente ??.

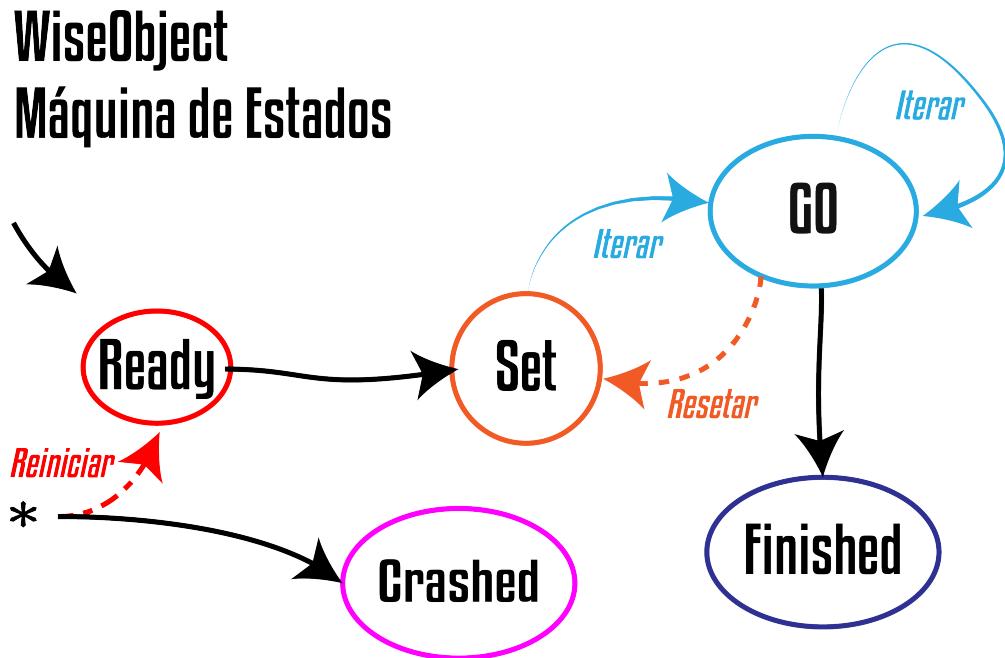


Figura 3.11: Máquina de estados utilizada pelos objetos inteligentes *WiseObject*. O estado *Ready* indica que o objeto foi criado corretamente e o estado *Set* indica que o objeto teve suas fábricas corretamente adicionadas. Enquanto o objeto inteligente estiver iterando ele permanecerá no estado *Go* e quando finalizar irá para o estado *Finished*. Finalmente o estado *Crashed* é utilizado quando o objeto não funciona corretamente.

As trocas de estado dos objetos inteligentes são causadas por operações do usuário para

preparar o objeto para iteração e para executar o método de iteração. Desta forma o usuário pode definir quais fábricas serão inseridas no objeto, parâmetros do modelo geométrico do experimento e quais trocas de estados devem ser executadas.

Como objetos inteligentes são criados à partir de um elemento inteligente, eles possuem os mesmos métodos de criação. Desta forma, as fábricas de objetos inteligentes *WiseObjectFactory* são compostas por fábricas de elementos inteligentes *WiseElementFactory*. Finalmente, com este modelo de classes, foram disponibilizadas duas formas de criar objetos inteligentes foram disponibilizadas, utilizando um elemento inteligente já existente ou os métodos de criação de elementos disponíveis na fábrica de elementos inteligentes.

Em seguida é necessário definir qual será a lógica de iteração do objeto, adicionando uma fábrica de iteração *WiseIterationFactory* compatível. Para o caso de escoamento pulsátil através de uma árvore arterial é necessário se adicionar a fábrica de iteração correspondente ao algoritmo da Seção 3.1 e em seguida definir os parâmetros desejados, como a frequência f , a viscosidade μ e o ângulo de fase ϕ . Com as alterações concluídas o objeto passa a poder ser iterado, opcionalmente uma fábrica gráfica *GraphicFactory* pode ser inserida. Neste caso, o objeto inteligente passará a gerar objetos gráficos *GraphicObject* a cada iteração.

Inicialmente, um objeto é criado no estado *Ready* somente com seu elemento inicial e uma fábrica do tipo *WiseElementFactory*. Neste estado é esperada a inclusão das fábricas de iteração e gráfica. Uma vez que elas estejam corretamente acopladas ao objeto inteligente, é possível fazer a troca do estado *Ready* para o estado *Set*. Com a mudança de estado, é adicionado à estrutura inteligente *WiseStructure* todos os parâmetros disponibilizados pelas fábricas de iteração e gráfica. Um objeto no estado *Set* indica que o objeto foi corretamente criado, uma fábrica de iteração foi adicionada, possivelmente uma fábrica gráfica, e agora o objeto aguarda alterações nestes parâmetros ou execução do método iterativo.

Com os parâmetros definidos e as fábricas devidamente acopladas o objeto está pronto para a iteração. O método iterativo de um objeto inteligente é representado na transição para o estado *Go*. Uma iteração de uma *WiseArteryTree* representa o cálculo dos valores

de pressão e fluxo em toda a árvore arterial. Caso algum erro ocorra durante o processamento de dados o objeto se desloca para o estado *Crashed*, assim como elementos inteligentes. É possível também finalizar a execução de um objeto inteligente o enviando para o estado *Finished*, neste estado o objeto não poderá ser iterado novamente. Para que parâmetros da iteração possam ser alterados sem que se perda elementos inteligentes, é possível que um objeto no estado *Go* e retorne para o estado *Set*. Todas estas trocas de estados são gerenciadas pela máquina de estado apresentada na Figura 3.11.

3.2.4 OBJETO GRÁFICO

Quando o objeto inteligente *WiseObject* estiver corretamente carregado e uma fábrica gráfica *GraphicFactory* for adicionada à sua estrutura o primeiro objeto gráfico *GraphicObject* de sua coleção será criado. Assim como um elemento inteligente representa uma iteração, um objeto gráfico representa um ciclo iterativo. Enquanto a estrutura responsável por elementos inteligentes, *WiseCollection*, é responsável por manter os últimos dados de iteração aquecidos, a coleção de objetos gráficos *GraphicModel* mantém o objeto que está sendo exibido por alguma tela. As coleções tem como objetivo manter seus elementos e realizar trocas de estados quando necessário. No caso dos elementos inteligentes, somente o último objeto é necessário e o mesmo ocorre, no contexto dos objetos gráficos apenas o objeto exibido em um elemento da interface de usuário e seus vizinhos serão mantidos em memória.

Na Figura 3.12 estão os componentes que permitem armazenar todos os quadros da animação final. Quando um objeto *WiseObject* está corretamente configurado com uma instância de fábrica gráfica *GraphicFactory*, seu método iterativo é atrelado à criação de objetos gráficos. Isso permite que o objeto iterado crie um elemento inteligente *WiseElement* e um objeto gráfico *GraphicObject* à cada iteração.

Cada objeto gráfico se desenha através de diretivas OpenGL, o formato do modelo geométrico é apresentado ao usuário através das formas geométrica, enquanto algum parâmetro do elemento inteligente *WiseElement* é visualizado através de uma escala de cores.

Os objetos gráficos contidos na Figura 3.13 possuem métodos específicos para se desenhar

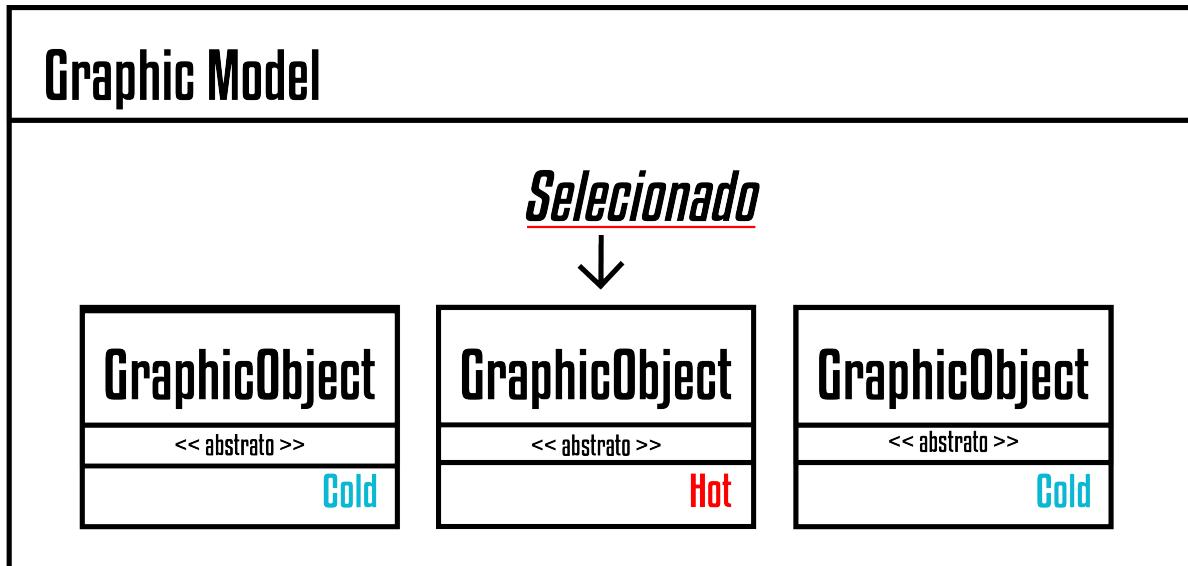


Figura 3.12: Modelo gráfico *GraphicModel*, contém uma coleção de objetos gráficos

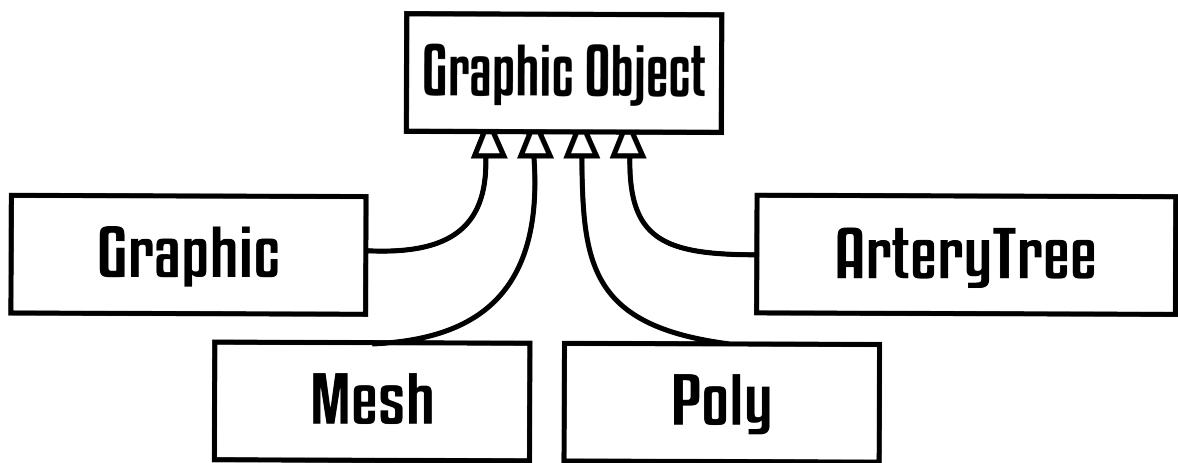


Figura 3.13: Tipos de objetos gráficos *GraphicObjects*, representando cada tipo de elemento inteligente *WiseElement*. O objeto *Graphic* representa um gráfico, o objeto *Mesh* uma malha, o objeto *Poly* um cubo e o objeto *ArteryTree* uma árvore arterial..

utilizando um gradiente de cores e formas geométricas padrão, bidimensionais ou tridimensionais. Cada forma geométrica utilizada é representada por elementos gráficos *GraphicElement*. A cada iteração a fabrica utilizará o elemento inteligente contido na estrutura *Forno*, retirando a informação do elemento inteligente mais atual. Cada objeto gráfico possui um valor máximo e mínimo que é vinculado ao gradiente cores, com isso as cores representam os valores armazenados em cada objeto gráfico.

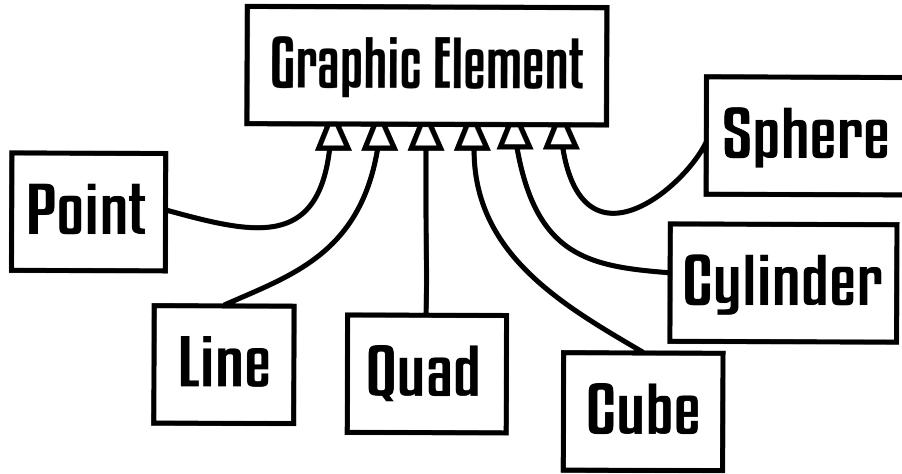


Figura 3.14: Tipos de elementos gráficos *GraphicElements*. *Point*, um ponto. *Line*, uma linha. *Quad*, um quadrado. *Cube*, um cubo. *Cylinder*, um cilindro. *Sphere*, uma esfera.

Os elementos gráficos podem ser utilizados por qualquer tipo de objeto gráfico. A representação geométrica de uma árvore arterial é construída utilizando cilindros e esferas, que representam segmentos de vaso e terminais, respectivamente. Por padrão, os cilindros receberão uma lista de valores da pressão $P(X)$ para $\forall X \in [0, 1]$, enquanto as esferas receberão os valores da pressão $P(X)$ quando $X = 0$ ou $X = 1$, condicionado a escolha do nó distal ($X = 1$) ou o nó proximal ($X = 0$). Assim como os objetos inteligentes *WiseObject* têm seus tipos definidos pelo tipo de elemento inteligente, o objeto gráfico *GraphicObject* tem seu tipo definido pelo elemento inteligente que representa, com sua fábrica própria.

Nesta estrutura ficam presentes o modelo geométrico, a escala de cores utilizada e o parâmetro a ser visualizado. Apesar do objeto gráfico *GraphicObject* ser uma redundância dos dados armazenados em um elemento inteligente *WiseElement*, ele é menor por conter somente um dos parâmetros armazenado, podendo ser carregado e armazenado mais

rapidamente. O objetivo das estruturas nesta seção é permitir que diversos objetos gráficos *GraphicObjects* possam ser armazenados e rapidamente carregados em memória. Os objetos gráficos em sequência representam uma animação que pode ser visualizada através da interface gráfica.

3.2.5 PROJETO INTELIGENTE

Os projetos inteligentes *WiseProject* são os escopos de trabalho da ferramenta computacional, sendo utilizada na organização dos objetos. O primeiro passo para utilizar a ferramenta é criar um projeto inteligente que irá conter todos os objetos e elementos inteligentes criados.

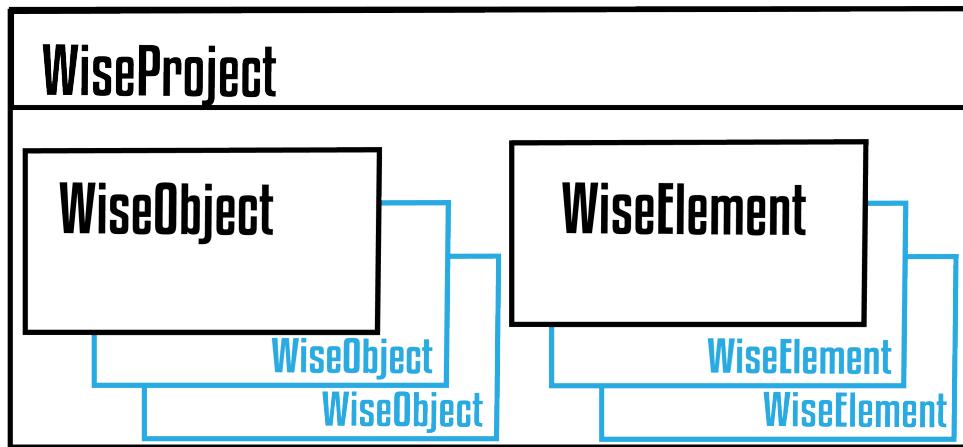


Figura 3.15: Projeto inteligente *WiseProject* e seus componentes, uma lista de objetos inteligentes *WiseObject* e uma lista de elementos inteligentes *WiseElement*.

Como demonstrado na Figura 3.15, os projetos inteligentes são representados por duas coleções, uma de elementos inteligentes *WiseElement* e outra de objetos inteligentes *WiseObject*. Os comandos recebidos pela ferramenta computacional terão efeito apenas sobre um projeto inteligente e suas coleções. Por exemplo, quando um elemento inteligente for utilizado na criação de um objeto inteligente eles devem estar no mesmo projeto inteligente.

Os projetos inteligentes são estrutura organizacionais, uma vez que um comando é executado sobre objetos de um projeto, estes objetos são bloqueados pelo projeto até o final da execução do comando. Enquanto permanecer bloqueado um objeto não pode ser excluído

ou alterado por outro comando. Ao excluir um projeto, todas as demandas devem ser finalizadas. Finalmente, as estruturas dos projetos podem ser salvas e carregadas, portanto estas estruturas também servem para armazenar experimentos inteiros e seus resultados.

3.2.6 FÁBRICA DE PROJETO

O conceito de fábrica foi adicionado ao projeto para padronizar a construção de objetos, inclusa neste conceito, a fábrica de projetos *WiseProjectFactory* é responsável pela construção de projetos. Diferentemente das outras, a *WiseProjectFactory* contém todas as fábricas suportadas pela ferramenta computacional.

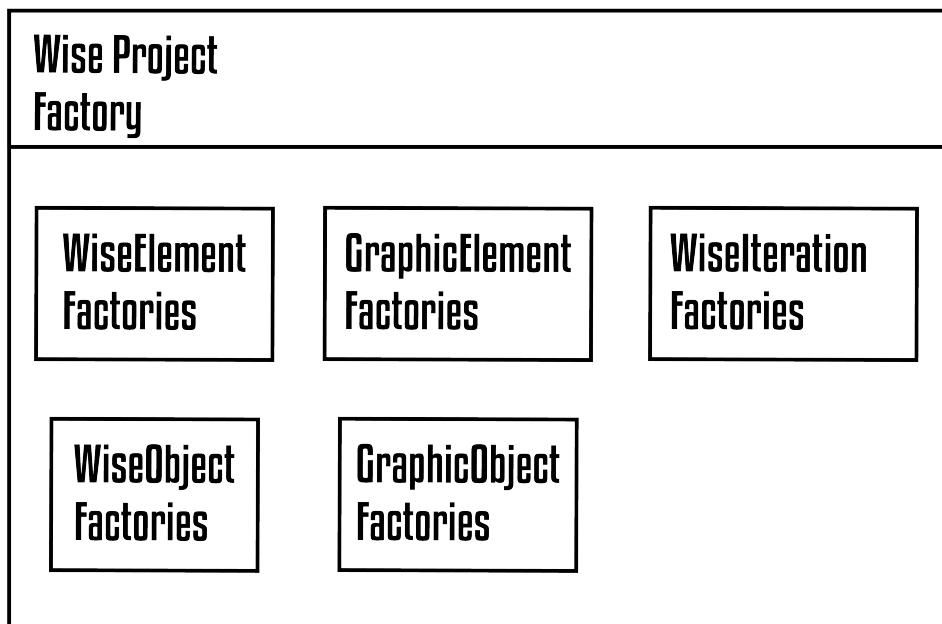


Figura 3.16: Fábrica de projetos inteligentes *WiseProjectFactory* e seus componentes, fábricas de elementos inteligentes *WiseElementFactories*, fábricas de objetos inteligentes *WiseObjectFactories*, fábrica de objetos gráficos *GraphicObjectFactories*, fábricas de elementos gráficos *GraphicElementFactories* e fábricas de iteração *WiseIterationFactories*.

Como é possível observa na Figura 3.16, a fábrica de projetos inteligentes é composta de outras coleções de fábricas, agrupadas pelo tipo de estrutura que criam. Nesta classe estão as fábricas de elementos inteligentes *WiseElement*, objetos inteligentes *WiseObject*, objetos gráficos *GraphicObject*, elementos gráficos *GraphicElement* e iteração *WiseIterationFactory*. Por exemplo, quando um projeto contendo diversas árvores arteriais e gráficos é carregado ele é construído pela fábrica de projetos. A fábrica de projetos irá reconhecer o formato

de cada estrutura e encaminhar para a fábrica correspondente.

As fábricas de iteração descritas na Figura 3.17 foram criadas para resolver o modelo matemático descrito na Seção 2.1 e extraír o seu resultado. A fábrica de iteração estática *StaticIterationFactory* é uma fábrica que não altera o objeto inteligente no processo de iteração, esta é a única classe de iteração que pode ser utilizada em mais de um tipo de objeto, podendo ser executada em qualquer tipo de objeto inteligente.

O modelo do escoamento pulsátil proposto está presente na fábrica de iteração *DuanAndZamirIterationFactory*, esta fábrica é responsável por utilizar a estrutura de uma árvore arterial *WiseArteryTree* e aplicar o modelo matemático. Finalmente, a fábrica de iteração *WiseObjectDataReadIterationFactory* é uma fábrica responsável por armazenar os resultados obtidos a cada iteração e armazenar em uma estrutura do tipo *WiseMesh*.

3.2.7 THREADS INTELIGENTES

Até o momento as estruturas foram construídas utilizando conceitos padrões da linguagem C++, herança de propriedades através do polimorfismo, ponteiros, classes virtuais e fábricas dinâmicas. Nesta seção o conceito de programação paralela e divisão de tarefas acoplado à ferramenta computacional é proposto.

A arquitetura de computadores atual permite aos usuários da aplicação executar processos que irão utilizar os recursos físicos do computador. O processador é a unidade central de processamento, apesar de executar milhões de tarefas por segundo os processadores executam apenas uma instrução por vez. Quando diversos processos estão em execução no computador o sistema operacional é responsável por balancear o tempo de processamento que cada processo ganha, com isso somos capazes de executar diversos programas ao mesmo tempo, este ciclo é conhecido como escalonamento de processos.

Processadores mais recentes estão equipados com múltiplos núcleos de processamento, o que permite a execução de diversas tarefas ao mesmo tempo. Para que um único processo tire vantagem desta arquitetura ele precisa se reestruturar em *threads*, estes elementos são partes do processo e cada uma possui seu próprio ciclo de execução e é avaliado separadamente no escalonamento de processo. Desta forma um processo é

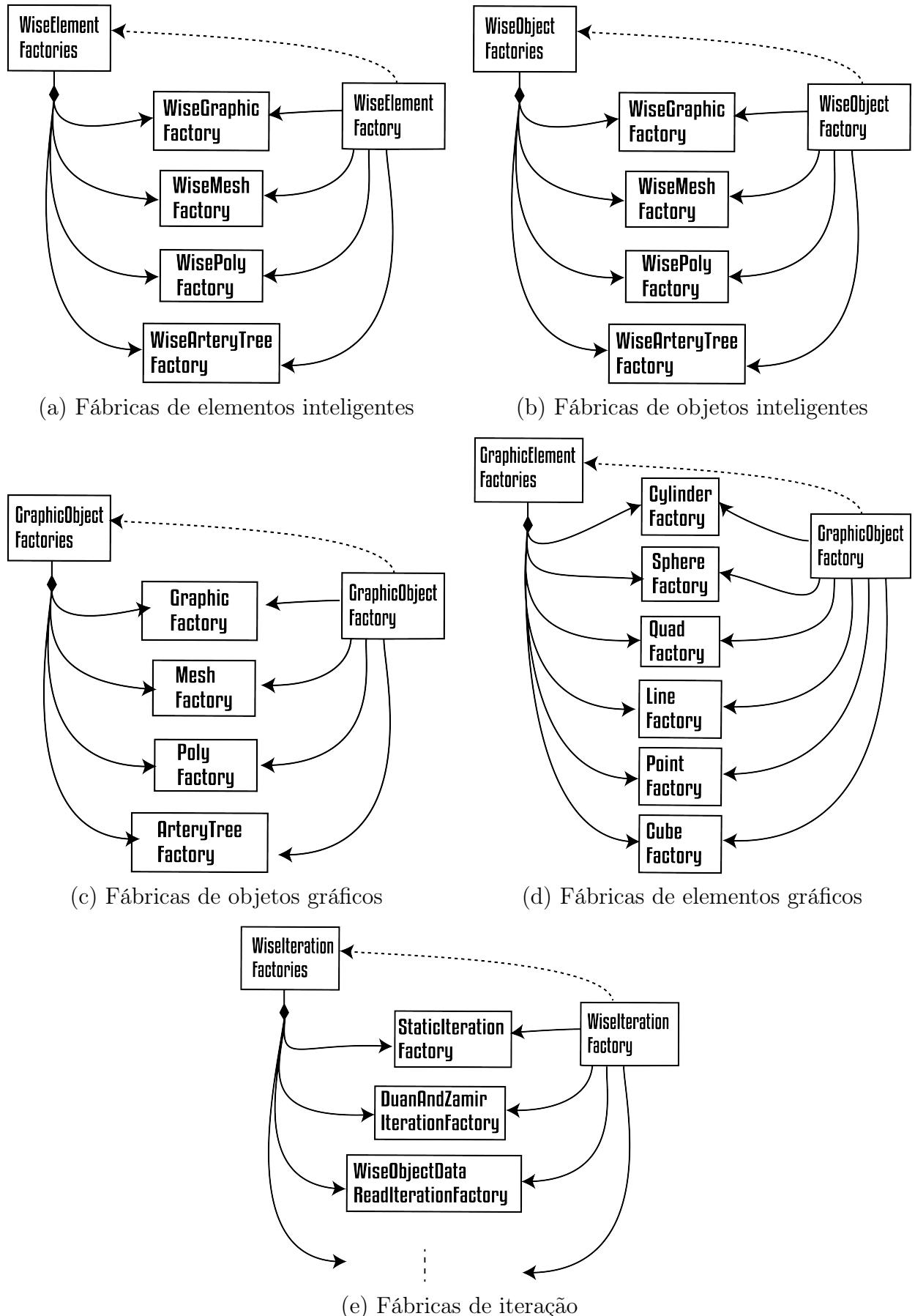


Figura 3.17: Todas as fábricas que compõem uma fábrica de projeto.

capaz de se beneficiar de uma arquitetura com múltiplos núcleos, entretanto é necessária uma reorganização do processo uma vez que todas as *threads* irão dividir o mesmo espaço de memória. Como cada *thread* possui o seu próprio ciclo de execução elasão estarão executando em sincronia, para que possam trocar informações é necessário que haja uma comunicação assíncrona.

Observou-se que as estruturas possuem comportamentos padronizados e que um objeto inteligente é autônomo, ele sozinho é capaz de se armazenar, reconstruir, iterar e ocasionalmente se desenhar. Imaginando um cenário em que diversos objetos inteligente estão iterando, as tarefas foram divididas em três tipos de *Threads*, primeiramente trabalhos de leitura e escrita, em seguida a iteração dos objetos.

Estes objetos inteligentes estão disponíveis para todas as *threads* através do projeto inteligente *WiseProject* e são enviados por referência no trabalho inteligente *WiseJob* caso não estejam bloqueados. Desta forma computadores com múltiplos núcleos podem fazer uso de suas *threads* e permitir que mais de um objeto realize suas tarefas por vez. Ao longo da pesquisa esta estrutura foi agregada as bibliotecas comuns do Qt 5.15.0 (QT, 2019), em um primeiro momento para facilitar a visualização dos resultados através dos elementos gráficos de interface de usuários disponibilizados. Em seguida, permitiu o processamento de elementos de forma paralela. Com isso um modelo que suportasse o processamento distribuído utilizando classes *QThreads* que possuem tarefas concorrentes foi construído.

As tarefas se dividem em três principais grupos: tarefas auxiliares, tarefas de leitura/escrita e trabalhos de iteração. O principal trabalho auxiliar é interpretar os comandos recebidos pelo programa e então criar a instância de trabalho inteligente *WiseJob*. Sendo os grupos de tarefas mais custosos os de tarefas de escrita/leitura e iteração, se dividiram em *threads* específicas, *WiseIO* e *WiseProcessor* respectivamente.

Os objetos distribuídos *threads* contidos na Figura 3.18 possuem um ciclo próprio, portanto executam tarefas assíncronas e precisam de tratamento adequado. O sistema de sinais e fendas disponibilizado pelas bibliotecas comuns do Qt permitem que as *threads* se comuniquem assincronamente através do envio de mensagens. Estas mensagens são

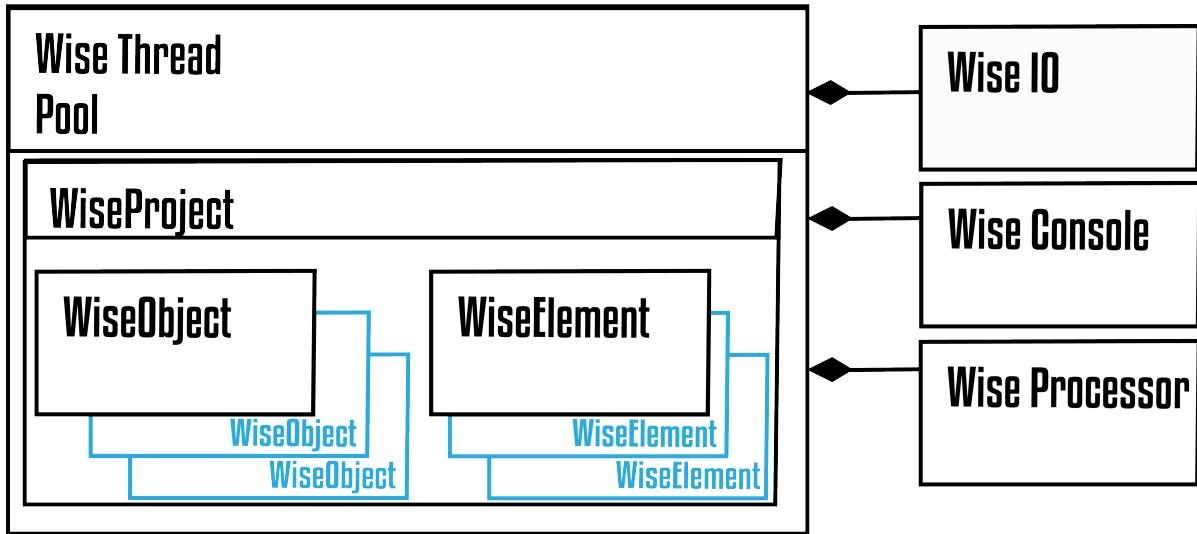


Figura 3.18: Modelo de Threads. *WiseThreadPool*, responsável por orquestrar o funcionamento das demais *threads*, bem como os objetos contidos em um projeto *WiseProject*. *WiseIO*, *thread* responsável por processos de leitura e escrita. *WiseConsole*, *thread* responsável por interpretar os comandos de texto e os traduzir-los na chamada de métodos. *WiseProcessor*, *thread* responsável por realizar o método iterativo de um objeto inteligente *WiseObject*

chamadas de trabalhos inteligentes *WiseJobs*, cada uma possuindo sua atividade relacionada e objeto relacionado. Uma vez criados, os trabalhos inteligentes são alocados à sua respectiva categoria de *thread* passando por um balanceamento executado pelo gerenciador de threads *WiseThreadPool*. Enquanto o processamento é feito, todos os dados relativos ao processamento são bloqueados, isso previne a sobreescrita de dados quando há mais de uma thread trabalhando.

O gerenciador de *threads* inteligente *WiseThreadPool* é composto por *threads* que executam os trabalhos e por projetos inteligentes *WiseProject* que criam trabalhos *WiseJobs*. Ao executar um comando de texto, a linha de entrada será recebida pelo gerenciador e o primeiro trabalho inteligente *WiseJob* será criado. Em seguida, será interpretado pelas *threads* do grupo de tarefas auxiliares *WiseConsole*, caso seja um trabalho de leitura, escrita ou iteração um trabalho inteligente associado será criado e enviado ao gerenciador de *threads*. Caso não seja um trabalho desses tipos ele será executado na *thread* atual e o trabalho inteligente finalizado. O console inteligente *WiseConsole* funciona como interpretador principal dos comando e das mensagens, ao receber uma linha de

textos este objeto irá analisar seu conteúdo e executar a ação correspondente.

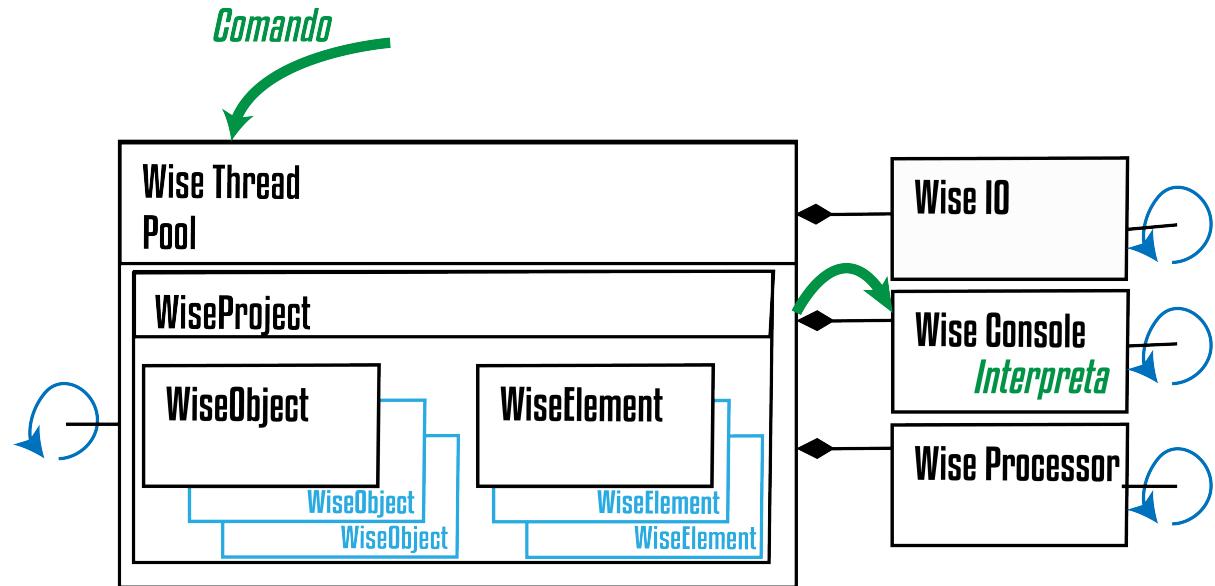


Figura 3.19: Modelo de Threads ao receber uma linha de comando da interface de usuário.

Quando se trata de um comando de escrita ou leitura, a *thread* *WiseIO* é utilizada. Ao receber esse tipo de comando o console inteligente irá listar o trabalho no gerenciador de threads *WiseThreadPool*. O gerenciador irá平衡ear as requisições entre as *threads* e em seguida o gerenciador de *threads* irá aguardar uma mensagem, indicando o final da execução do trabalho. Quando um objeto inteligente *WiseObject* é iterado um elemento inteligente é criado na estrutura *Freezer*, gerando uma requisição através de um trabalho inteligente. Portanto a *thread* *WiseIO* é muito utilizada no ciclo de vida de um elemento inteligente, gerenciando o processo de armazenamento e reconstrução do elemento. É esta estrutura que efetivamente aquece e resfria elementos inteligentes.

Os trabalhos de iteração funcionam da mesma forma que as de leitura ou escrita, entretanto são enviadas a *threads* *WiseProcessor*. Estas *threads* não possuem lógicas muito complexas, elas são responsáveis apenas por gerenciar os objetos e executar os métodos requisitados, por este motivo os objetos inteligentes e elementos inteligentes possuem métodos abstratos e seguem esses conjuntos de regras, para que uma estrutura que desconheça o seu funcionamento ou suas estruturas internas sejam capazes de executar métodos padrões.

Mesmo com a arquitetura de *threads* inclusa na ferramenta computacional ainda é possível

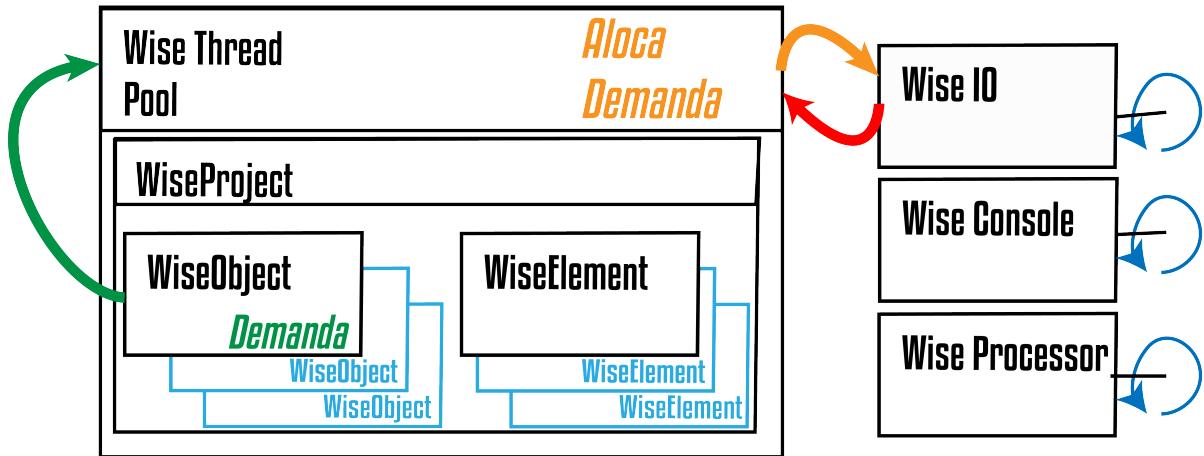


Figura 3.20: Modelo de Threads ao receber um comando de escrita/leitura.

que ela seja executada em processadores com apenas um núcleo, neste caso mais *threads* inteligentes [não irão tornar a ferramenta mais rápida](#), pois apesar dos trabalhos ainda serem divididos em *threads* diferentes, elas serão executadas no mesmo núcleo de processamento. *Além disto, existe um custo computacional pela comunicação entre threads, portanto com apenas um núcleo a arquitetura de classes divididas em threads se torna uma desvantagem.* As *threads* inteligentes têm um impacto maior nas atividades de escrita e leitura, isto porque o objeto inteligente está dividido em várias estruturas menores que são armazenadas e acessadas constantemente, principalmente no caso de uma animação gráfica.

Ainda dentro do gerenciador de *threads* inteligentes existem quatro listas de espera:

- **Pre-Queue (Pre-Q):** Lista de pré-seleção. Nesta estrutura os trabalhos são agrupados por grupo de trabalho e ordenadas por data de criação.
- **Queue (Q):** Lista de espera, para trabalhos que aguardam sua alocação em *threads* adequadas.
- **Running:** Lista de trabalhos que já foram enviados às suas respectivas *threads* e aguardam resposta.
- **Finished:** Lista de trabalhos que já terminaram o seu ciclo de execução.

No momento de criação os objetos são adicionados à lista *Pre-Q*. A cada ciclo da *thread* *WiseThreadPool* trabalhos da lista *Pre-Queue* são enviados a lista de espera *Queue*,

os trabalhos de cada carga de trabalho são selecionados e enviados caso não haja pré-requisitos. A única exceção é a carga de trabalho utilizada pela ferramenta para armazenar e recuperar objetos rapidamente, para isto foi reservada um identificador da carga de trabalho.

Os trabalhos na lista de espera *Queue* são balanceados entre as *threads* disponíveis utilizando uma distribuição uniforme. Uma vez alocados, os trabalhos passam para a lista de trabalhos *Running*, que contém os trabalhos em execução.

Finalmente, ao final da execução em uma *thread* separada, a estrutura armazena os trabalhos finalizados em uma lista *Finished*, estes finalizaram seu processamento em uma *thread* concorrente e uma resposta foi recebida pelo gerenciador de *threads*.

3.2.8 TRABALHOS INTELIGENTES

Para que a comunicação entre as *threads* inteligentes *WiseThreads* seja feita de forma padronizada e possa ser estendida futuramente. Ao receber alguma demanda, o gerenciador de *thread* inteligentes *WiseThreadPool* irá criar um objeto do tipo *WiseJob*, este objeto contém os seguinte parâmetros:

- **ID:** Número de identificação único.
- **Workload:** Número de carga de trabalho.
- **Arg:** Cadeia de caracteres opcional, pode conter parâmetros para a execução do trabalho.
- **Type:** Tipo de trabalho.
- **Status:** Estado do trabalho.
- **Antecessors:** Lista de trabalhos que antecedem este na ordem de chamada.
- **Pre-requisites:** Lista de trabalhos que antecedem este na ordem de execução, ou seja, precisam ser finalizados antes.
- **Ponteiros:** O trabalho do tipo *WiseJob* pode ter um ponteiro para estruturas da ferramenta computacional.

O número de identificação do trabalho é único e incremental, a carga de trabalho representa o grupo em que o trabalho irá executar. Ao executar a leitura de um arquivo de entrada, cada linha do arquivo irá ser interpretada como um comando e adicionada ao mesmo grupo de trabalho e vinculada ao último comando pela lista de antecessores *Antecessors*, desta forma é garantido que eles serão executados em ordem.

O tipo *Type* do trabalho inteligente é um identificador dado ao trabalho após sua interpretação inicial. Este identificador permite às *threads* determinar qual a composição do objeto e quais parâmetros para execução foram preenchidos, como ponteiros e linhas de entrada.

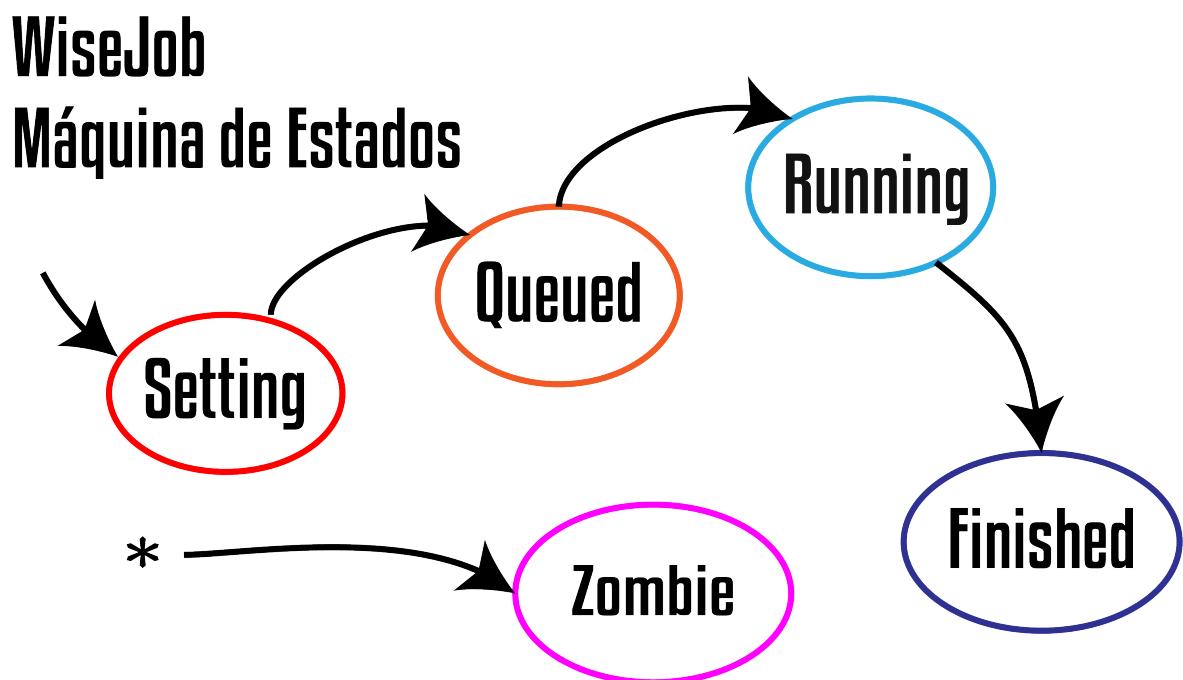


Figura 3.21: Máquina de estados utilizadas por trabalhos inteligentes *WiseJobs*.

Os estados de um trabalho inteligente são ditados pela sua máquina de estados representada na Figura 3.21. Os estados desta máquina indicam em qual estrutura da *WiseThreadPool* o trabalho está e se seu funcionamento é adequado. O estado *Setting* indica que o trabalho foi criado e está na lista de seleção *Pre-Q*; O estado *Queued* significa que o trabalho foi adicionado à fila de espera e aguarda execução; O estado *Running* indica que o trabalho está sendo executado; O estado *Finished* indica que o trabalho foi finalizado corretamente; E, o estado *Zombie* indica que o trabalho não foi finalizado corretamente.

No cerne da biblioteca *Qt* está a classe *QObject*, esta classe que possui o mecanismo de

comunicação entre objetos de sinais e fendas. Para que um objeto possa utilizar desta interface de comunicação é necessário que ele herde as características da classe *QObject* por polimorfismo (QT, 2019).

Os objetos de trabalho inteligente servem como mensagens de comunicação entre as *threads*. Através desta estrutura objetos do tipo *QObject* podem se comunicar e executar a requisição de trabalhos complexo. Isto foi feito para permitir que estruturas *QWidget*, que são elementos gráficos da interface de usuário e herdam da classe *QObject*, pudessem enviar mensagens diretamente ao gerenciador de *threads*. Os objetos *QWidget* são elementos gráficos como o quadro OpenGL, uma caixa de texto ou um botão. Todos os objetos desta classe enviam sinais à outro *QObject* ao interagir com o usuário, como o uso de comandos de teclado e/ou mouse. Através da comunicação dos objetos da classe *QObject* é possível que comandos na interface usuário açãoem as funcionalidades das *threads* e objetos inteligentes.

4 USABILIDADE DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Nesta seção apresentam-se detalhes da interface escolhida para facilitar o uso da ferramenta computacional. A interface de usuário foi concebida para permitir o controle de todas as estruturas descritas na Seção 3.2 com todos os seus recursos gráficos extraídos. A interface se divide em dois ambientes: Um console, que permite uma interação textual e acesso as mesmas funcionalidades de iteração; E uma janela com elementos gráficos capazes de exibir os resultados obtidos.

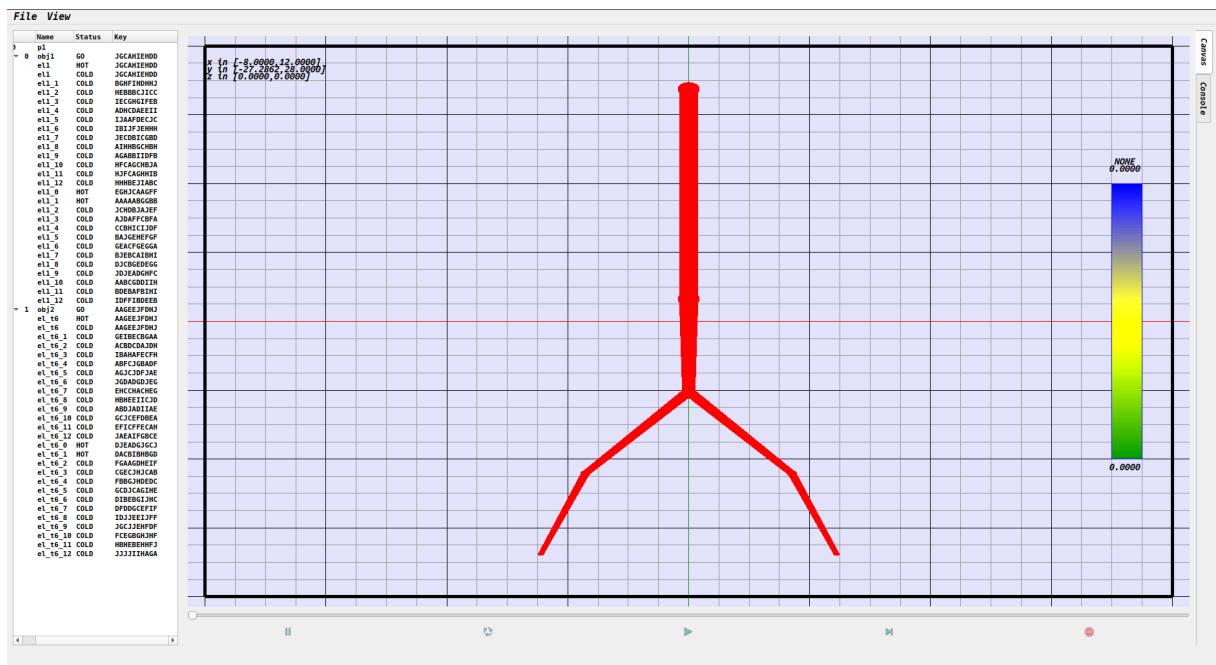


Figura 4.1: Interface de usuário gráfica.

Ambas as interfaces foram construídas para manipular objetos inteligentes e suas estruturas, por isto ambas possuem instâncias do gerenciador de *threads* inteligentes descritos na Seção 3.2. O console se trata de um envio direto de mensagens para a *thread WiseConsole*, que é efetivamente o console. Nas próximas seções os diferentes ambientes da ferramenta computacional serão descritos. Cada ambiente representa um projeto *Qt/C++* distinto, entretanto dividem as mesmas classes.

4.1 CONSOLE

O ambiente de console da ferramenta computacional consiste em um projeto *Qt/C++* sem interface gráfica. O projeto foi intitulado *InGU* ou **I**terador **n**ão-**G**ráfico **U**niversal, porque o ambiente apesar de não conter os elementos para a visualização dos elementos gráficos, é capaz de criar as estruturas gráficas para visualização futura. No console as bibliotecas gráficas do OpenGL não foram incluídas no processo de compilação, portanto ambientes sem recursos gráficos são capazes de compilar e executar a ferramenta computacional através deste ambiente.

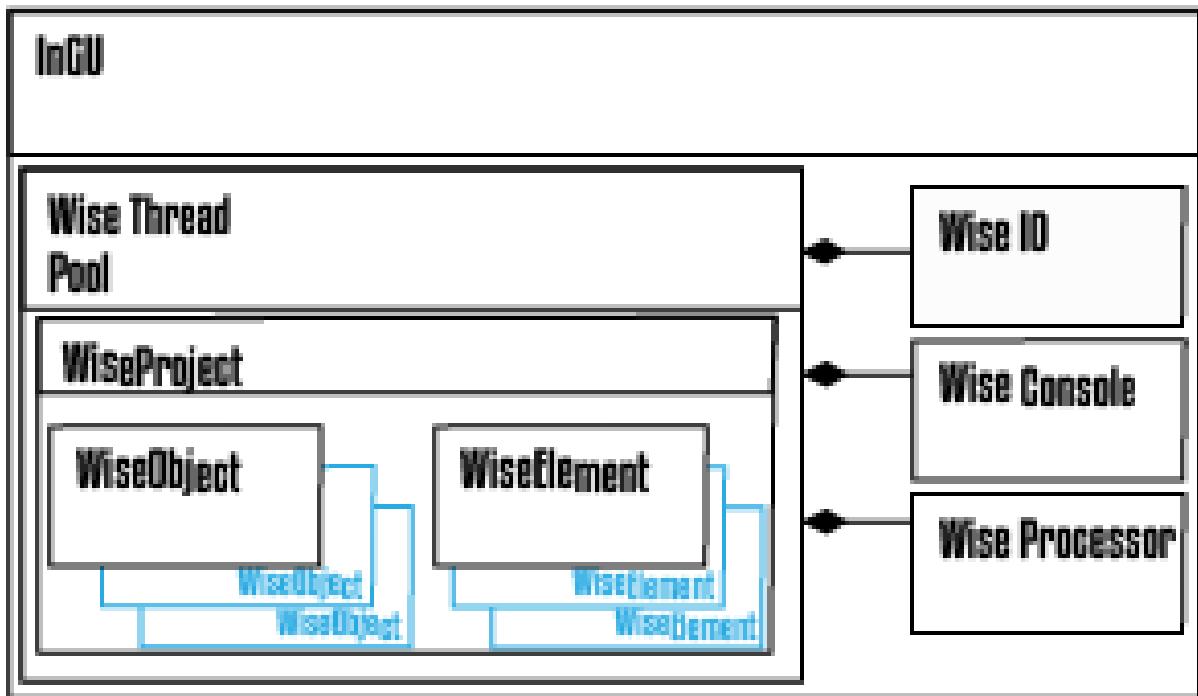


Figura 4.2: Estrutura do projeto que compõe o ambiente computacional InGU.

No Anexo A estão as sequências de instruções necessárias para compilar todos os projetos da ferramenta computacional. Ao ser compilado, um executável InGU contendo o projeto console é gerado. Ao ser executado, o console corresponde do sistema operacional irá ser aberto com o cabeçalho da ferramenta e aguardará entrada de texto.

Para executar um comando, basta inserir uma linha de texto e apertar a tecla *Enter*.

Ao capturar a linha de texto, o programa de console irá na verdade redirecionar o comando para a estrutura *WiseThreadPool*, que por sua vez irá alocar uma *thread* do tipo *WiseConsole*

```

. =====/
. /===/      IGU (Iterador Gráfico Universal)      /=====
. /===/      (or, Universal Graphic Iterator)      /=====
. =====/
. /=1.1=====/
. =====/
. segunda-feira 09/08/2021 19:19:08 313
. =====/
. [WISE CONSOLE] LOAD invoked
. <p1:WISE_PROJECT> 'WISE_ID [0] (NAME: p1) WISE PROJECT CREATED'
. <el1:WISE_ELEMENT> 'WISE_ID [0] (NAME: el1) WISE ELEMENT CREATED'
. <el1:WISE_OBJECT> 'WISE_ID [0] (NAME: obj1) WISE OBJECT CREATED'
. <el1:WISE_ELEMENT> 'WISE_ID [1] (NAME: el1) WISE ELEMENT CREATED'
. <el1:WISE_ELEMENT> 'WISE_ID [2] (NAME: el1) WISE ELEMENT CREATED'
. <el1:WISE_ELEMENT> 'WISE_ID [3] (NAME: el1) WISE ELEMENT CREATED'
. <el1:WISE_ELEMENT> 'WISE_ID [4] (NAME: el1) WISE ELEMENT CREATED'
. <el1:WISE_ELEMENT> 'WISE_ID [5] (NAME: el1) WISE ELEMENT CREATED'
. <el1:WISE_ELEMENT> 'WISE_ID [6] (NAME: el1) WISE ELEMENT CREATED'
. <el1:WISE_ELEMENT> 'WISE_ID [7] (NAME: el1) WISE ELEMENT CREATED'
. <el1:WISE_ELEMENT> 'WISE_ID [8] (NAME: el1) WISE ELEMENT CREATED'
. <el1:WISE_ELEMENT> 'WISE_ID [9] (NAME: el1) WISE ELEMENT CREATED'
. <el1:WISE_ELEMENT> 'WISE_ID [10] (NAME: el1) WISE ELEMENT CREATED'
. <el1:WISE_ELEMENT> 'WISE_ID [11] (NAME: el1) WISE ELEMENT CREATED'
. <el1:WISE_ELEMENT> 'WISE_ID [12] (NAME: el1) WISE ELEMENT CREATED'
. <el1:WISE_ELEMENT> 'WISE_ID [13] (NAME: el1) WISE ELEMENT CREATED'

```

Figura 4.3: Captura de tela com a execução do ambiente computacional InGU em um console.

para interpretar a mensagem. Este comportamento é o mesmo apresentado na Seção 3.2.7.

Uma lista de comandos foi disponibilizada e está acessível através do comando *help*.

Ao enviar este comando para o console uma lista com todos as possíveis entradas será exibida. Nas próximas seções estes comandos, suas entradas, seu escopo e *thread* responsável serão descritos, esta *thread* irá executar a tarefa.

4.1.1 AJUDA

O comando de ajuda é o primeiro comando da interface e foi feito para listar todas as entradas possíveis do programa. Ao receber este comando a thread *WiseConsole* envia o texto pré-definido com todos os comandos.

Linha de Comando	help
Escopo	nenhum
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	Nenhuma

Tabela 4.1: Descrição do comando ajuda.

Ao executar o comando, o usuário receberá uma lista de comandos divididos em escopos específicos, [como visto na Figura 4.4](#). Os escopos foram criados para agrupar comandos

por área de atuação, comandos auxiliares, como o comando de ajuda, são os comandos que não alteram as estruturas e exibem informações auxiliares ao usuário.

```

=====
/===== AJUDA =====/
=====
|help..... |Lista todos os comandos da plataforma.
|SCOPE READ..... |read cmds <file>..... |<file> Caminho para arquivo de entrada (XML ou VTK).
| |Lê todas as linhas do arquivo e executa a sequência de comandos.
|SCOPE TEST..... |test..... |Realiza todas as baterias de teste.
|test.list..... |Realiza todas as baterias de teste.
|test.<test_id>..... |Realiza um teste específico.
|test file <test_id> <file1> <file2>..... |Testa a equidadade de dois arquivos.
|..... |SCOPE PROJECT..... |..... |project..... |project create <project_name> |<project_name> Nome do projeto à ser criado.
| |Cria projeto.
|project use <project_name> |<project_name> Nome do projeto à ser selecionado.
| |Seleciona projeto para execução dos próximos comandos.
|project list |Lista os projetos disponíveis.
|project print |Imprime o projeto selecionado.
|project delete |Delete o projeto selecionado.
|project save <filename> |<filename> Arquivo de saída aonde o projeto será salvo.
| |Salva projeto em um arquivo XML.
|project load <filename> |<filename> Arquivo de entrada de onde o projeto será reconstruído.
| |Carrega um arquivo XML.
|..... |SCOPE ELEMENT..... |..... |element..... |element create <type> <example> <name> [ARGS] |<type> Tipo de elemento à ser criado.
| |<example> Nome do exemplo à ser utilizado.
| |<name> Nome do elemento à ser criado.
| |[ARGS] Argumentos extras do método de criação específico.
| |Cria elemento inteligente à partir de um exemplo da fábrica.
|element clone <element_name> <name> |<element_name> Nome do elemento à ser clonado.
| |<name> Nome do elemento clone.
| |Clona um elemento inteligente.
|element list |Lista os elementos do projeto selecionado.
|
```

Figura 4.4: Captura de tela com a execução do ambiente computacional InGU em um console.

4.1.2 LER ARQUIVO DE ENTRADA

O comando ler arquivo de comandos irá receber o endereço de um arquivo local, este arquivo deve conter um comando por linha, um exemplo pode ser encontrado no Anexo B. Para este tipo de comando, deve-se enviar um *WiseJob* contendo a linha de comando e qual a sequência de trabalhos que será executada. Por se tratar de uma leitura de

arquivo de comando, a *thread* *WiseIO* será responsável por ler o arquivo e criar os trabalhos com os comandos subsequentes. Estes novos comandos irão passar novamente pela interpretação de uma *thread* do tipo *WiseConsole* e em seguida executados.

Linha de Comando	read cmds <file>	
Escopo	READ	
Thread Responsável	WiseIO	
Entrada	<file>	Caminho para arquivo contendo sequência de comandos.

Tabela 4.2: Descrição do comando ler arquivo de comando.

4.1.3 BATERIA DE TESTES

O ciclo principal de testes da ferramenta se baseia em verificar a consistência de todas as fábricas e do fluxo principal da ferramenta computacional, exceto detalhes gráficos e do processo de iteração. Ao executar a bateria de testes todos os elementos inteligentes *WiseElement* e objetos inteligentes *WiseObject* disponíveis serão testados individualmente.

Para isto, uma fábrica de projeto *WiseProjectFactory* irá ser encarregada de criar todos os elementos e objetos inteligentes disponíveis.

Estes testes foram utilizados principalmente no momento do desenvolvimento da ferramenta e garantem que as fábricas de elementos e objetos inteligentes estão funcionando corretamente. Futuramente, caso novas estruturas sejam incluídas, estes testes garantem que todas as classes do projeto foram elaboradas corretamente, com isso todas as estruturas que são carregadas pela ferramenta não perdem informação ao serem armazenadas e recuperadas, processo recorrente na ferramenta computacional. Os comandos deste tipo são de responsabilidade da *thread* *WiseConsole*, que irá criar e executar subcomando, trabalhos *WiseJob* relacionados à uma atividade superior.

Linha de Comando	test
Escopo	TEST
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	Nenhuma

Tabela 4.3: Descrição do comando bateria de testes.

4.1.4 LISTA DE TESTES

O comando de listar testes irá enumerar todos os teste possíveis de serem executados pela ferramenta computacional. Assim como o comando de ajuda, este comando irá imprimir no console todas os resultados encontrados.

Linha de Comando	test list
Escopo	TEST
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	Nenhuma

Tabela 4.4: Descrição do comando listar testes.

4.1.5 CASO DE TESTE

Como visto na Seção 4.1.4, os testes são enumerados. Baseando-se nessa lista, é possível selecionar um teste pelo seu número correspondente. Os casos de testes irão gerar uma sequência de comandos à serem interpretados pelo *WiseConsole*, os testes são compostos de comandos que irão criar e deletar estruturas que são finalizados na própria *thread* *WiseConsole*, entretanto estas estruturas são enviadas para um arquivo externo e então lidas. Estes subcomandos irão ser executados pela *thread* *WiseIO*. O caso de teste só é dado como concluído quando todos os subcomandos terminam sua execução.

4.1.6 TESTAR EQUIDADE DE ARQUIVOS

Outro comando de teste disponibilizado pela ferramenta computacional é o teste de equidade de arquivos. Este comando utiliza uma chave numérica *test_id* para salvar o

Linha de Comando	test <test_id>
Escopo	TEST
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	<test_id> Número do teste a ser executado

Tabela 4.5: Descrição do comando executar caso de teste.

resultado do teste, tanto o resultado quanto a quantidade de testes executados com a mesma chave são salvos. Por se tratar da leitura de dois arquivos diferentes esse comando é executado por uma *thread* do tipo *WiseIO*.

Linha de Comando	test file <test_id> <file1> <file2>						
Escopo	TEST						
Thread Responsável	WiseIO						
Entrada	<table border="1"> <tr> <td><test_id></td> <td>Chave numérica para armazenar resultado</td> </tr> <tr> <td><file1></td> <td>Caminho para o primeiro arquivo</td> </tr> <tr> <td><file2></td> <td>Caminho para o segundo arquivo</td> </tr> </table>	<test_id>	Chave numérica para armazenar resultado	<file1>	Caminho para o primeiro arquivo	<file2>	Caminho para o segundo arquivo
<test_id>	Chave numérica para armazenar resultado						
<file1>	Caminho para o primeiro arquivo						
<file2>	Caminho para o segundo arquivo						

Tabela 4.6: Descrição do comando para testar a equidade de dois arquivos.

4.1.7 CRIAR PROJETO

Comando utilizado para criar um novo projeto, como entrada ele recebe o nome do projeto. Este comando irá utilizar a fábrica de projetos inteligentes para criar a estrutura vazia do projeto. Ao receber um comando deste a *thread* *WiseConsole* irá retornar um projeto em branco para ser acoplado à *WiseThreadPool*. Isto é feito para que outras *threads* possam receber o mesmo projeto de forma separada.

Linha de Comando	project create <name>
Escopo	PROJECT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	<name> Nome do projeto a ser criado

Tabela 4.7: Descrição do comando para criar projetos.

4.1.8 USAR PROJETO

Para que a maioria dos comandos funcione é necessário que um projeto esteja selecionado, pois é a estrutura do projeto que disponibiliza elementos e objetos inteligentes. Uma vez que projetos tenham sido criados, eles podem ser selecionados utilizando o comando de usar projetos

Linha de Comando	project use <project_name>
Escopo	PROJECT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	<project_name> Nome do projeto a ser selecionado

Tabela 4.8: Descrição do comando para selecionar projetos.

4.1.9 LISTAR PROJETOS

É possível verificar todos os projetos do ambiente utilizando o comando de listar projetos. Todos os projetos carregados no momento da execução serão exibidos na listagem.

Linha de Comando	project list
Escopo	PROJECT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	Nenhuma

Tabela 4.9: Descrição do comando listar projetos.

4.1.10 IMPRIMIR PROJETO

O comando de imprimir projetos irá exibir no console a representação do arquivo *XML* do projeto selecionado. Caso o projeto possua elementos e objetos inteligentes eles também serão impressos na estrutura de saída.

Linha de Comando	project print
Escopo	PROJECT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	Nenhuma

Tabela 4.10: Descrição do comando imprimir projetos.

4.1.11 EXCLUIR PROJETO

Com um projeto selecionado, o comando de exclusão de elementos irá excluir o elemento inteligente do projeto recebendo o nome do elemento como parâmetro de entrada. Este comando será interpretado pela *thread WiseConsole*, que notifica o gerenciador de *threads WiseThreadPool*. O gerenciador só irá aguardar até que o projeto não possua trabalhos em execução para que posso excluí-lo.

Linha de Comando	project delete
Escopo	PROJECT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	Nenhuma

Tabela 4.11: Descrição do comando excluir projetos.

4.1.12 SALVAR PROJETO

O comando de salvar projetos irá extrair do projeto selecionado sua representação em um arquivo *XML*, assim como no processo de impressão do projeto. Este arquivo será impresso em um arquivo externo e por isto é executado pela thread *WiseIO*.

Linha de Comando	project save <file_name>
Escopo	PROJECT
Thread Responsável	WiseIO
Entrada	<file_name> Caminho do arquivo de saída.

Tabela 4.12: Descrição do comando para salvar projetos.

4.1.13 CARREGAR PROJETO

O comando de carregar projetos irá extrair de um arquivo de entrada no formato *XML* a estrutura de um projeto inteligente. A ferramenta computacional irá utilizar os arquivos de entrada diretamente nas estruturas de fábrica relacionadas. Caso o projeto possua elementos e objetos inteligentes eles também serão reconstruídos no projeto reconstruído.

Linha de Comando	project load <filename>	
Escopo	PROJECT	
Thread Responsável	WiseIO	
Entrada	<filename>	Caminho do arquivo de entrada.

Tabela 4.13: Descrição do comando para carregar projetos.

4.1.14 CRIAR ELEMENTO

As fábricas de elementos inteligentes descritas na Seção 3.2.2 são acessadas pelo comando de criar elementos. Este comando recebe como entrada o tipo de elemento inteligente, o nome e o exemplo à ser utilizado. Cada fábrica de elementos possui uma lista de exemplos disponíveis, essa lista é visualizada através do comando de listar exemplos de uma fábrica de elementos.

Linha de Comando	element create <type> <example> <name> [ARGS]	
Escopo	ELEMENT	
Thread Responsável	WiseConsole	
Entrada	<type> <example> <name> [ARGS]	Tipo de elemento à ser criado, seleciona a fábrica de elemento à ser utilizada. Caminho para o primeiro arquivo. Caminho para o segundo arquivo. Individualmente, as fábricas podem receber parâmetros para a criação de elementos.

Tabela 4.14: Descrição do comando para criar.

4.1.15 CLONAR ELEMENTO

Assim como o comando de criação de elementos descrito na Seção 4.1.14, a clonagem de elementos também irá acessar as fábricas de elementos. Ao clonar um elemento o seu tipo é selecionado juntamente com a fábrica correspondente, uma vez selecionados a fábrica receberá como parâmetro o elemento inteligente e o nome do novo elemento à ser criado. Portanto o comando de clonagem de elementos poderá ser utilizando com a entrada do nome do elemento inteligente à ser clonado e o nome do novo elemento.

Linha de Comando	element clone <element_name> <name>	
Escopo	ELEMENT	
Thread Responsável	WiseConsole	
Entrada	<element_name> <name>	Nome do elemento à ser clonado. Nome do novo elemento.

Tabela 4.15: Descrição do comando para clonar elementos inteligentes.

4.1.16 LISTAR ELEMENTOS

Com um projeto já selecionada, o comando de listar elementos pode ser utilizado para que o console imprima uma lista com o nome de todos os elementos inteligentes presentes no projeto.

Linha de Comando	element list
Escopo	ELEMENT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	Nenhuma

Tabela 4.16: Descrição do comando listar elementos.

4.1.17 IMPRIMIR ELEMENTO

O comando de imprimir elementos irá extrair do projeto selecionado a representação em um arquivo *XML*, a informação textual deste arquivo será impressa como resultado no

console. Para que o comando funcione é necessário que um projeto esteja selecionado e que o nome do elemento à ser impresso seja informado.

Linha de Comando	element print <element_name>
Escopo	ELEMENT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	<element_name> Nome do elemento à ser impresso.

Tabela 4.17: Descrição do comando imprimir elementos inteligentes.

4.1.18 EXCLUIR ELEMENTO

O comando de excluir elementos irá remover os dados do elemento da memória.

Linha de Comando	element delete <element_name>
Escopo	ELEMENT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	<element_name> Nome do elemento à ser excluído.

Tabela 4.18: Descrição do comando excluir projetos.

4.1.19 SALVAR ELEMENTO

Os elementos inteligentes podem ser exportados em dois formatos, um arquivo *XML* e um arquivo *VTK*. Ambos futuramente podem ser utilizados na reconstrução do elemento inteligente. Como entrada o comando receberá o nome do elemento, o tipo de arquivo à ser escrito e o caminho onde ele deve ser salvo. A saída do comando será o arquivo determinado, à partir deste arquivo é possível reconstruir o elemento completo.

Linha de Comando	element save <element_name> <save_type> <filename>	
Escopo	ELEMENT	
Thread Responsável	WiseIO	
Entrada	<element_name> <save_type> <filename>	Nome do elemento inteligente à ser salvo. Tipo de arquivo à ser exportando, podendo ser <i>XML</i> ou <i>VTK</i> . Caminho para o arquivo à ser exportado.

Tabela 4.19: Descrição do comando salvar elementos.

4.1.20 CARREGAR ELEMENTO

O comando de carregar elementos irá extrair de um arquivo de entrada no formato *XML* ou *VTK* a estrutura de um elementos inteligente. A ferramenta computacional irá utilizar os arquivos de entrada diretamente na fábrica de elemento inteligente relacionada. Caso seja um arquivo *XML* não será necessário informar o tipo de elemento inteligente à ser construído. Caso contrário o tipo e o nome serão recebidos como parâmetros de entrada.

Linha de Comando	element load <load_type> element load < VTK > <filename> <type> <name> element load < XML > <filename>	
Escopo	ELEMENT	
Thread Responsável	WiseIO	
Entrada	<filename> <load_type> <type> <name>	Caminho para o arquivo de entrada. Tipo de arquivo à ser carregado, podendo ser <i>XML</i> ou <i>VTK</i> . Tipo de elemento inteligente à ser criado. Nome do elemento inteligente à ser criado.

Tabela 4.20: Descrição do comando para carregar elementos inteligentes.

4.1.21 LISTAR EXPORTAÇÕES DO ELEMENTO

Os elementos inteligentes podem ser exportados outros formatos de arquivo, [como uma imagem *PNG*, imagem *JPG* ou texto *TXT*](#). Cada tipo de elemento inteligente possui

uma lista de exportações disponíveis, um comando foi inserido para acessar a lista de exportações de um certo objeto.

Linha de Comando	element export_list <element_name>	
Escopo	ELEMENT	
Thread Responsável	WiseConsole	
Entrada	<element_name>	Nome do elemento inteligente à analisado.

Tabela 4.21: Descrição do comando listar exportações de um elemento inteligente.

4.1.22 EXPORTAR ELEMENTO

A estrutura abstrata dos elementos inteligentes requer que cada um deles possua o método de exportação, os métodos de exportação podem receber parâmetros diferentes. A principal exportação utilizada foi disponibilizada na classe *WiseGraphic*, este tipo de elemento possui implementada a exportação dos gráficos em arquivos de imagem. Desta forma, possibilitou-se a criação de imagens em um ambiente que não possui interface gráfica.

Linha de Comando	element export <element_name> <export_name> [ARGS]	
Escopo	ELEMENT	
Thread Responsável	WiseIO	
Entrada	<element_name> <export_name> [ARGS]	Nome do elemento à ser exportado. Tipo de exportação à ser realizada. Os elementos podem receber parâmetros para sua exportação.

Tabela 4.22: Descrição do comando para exportar elementos.

4.1.23 ESCALAR ELEMENTO

Os dados inseridos em um elemento inteligente podem ser escalados. As informações contidas em pontos, linhas, células e campos podem ser multiplicados por um escalar s . Isso permite modelos geométricos que possuam parâmetros em unidades fora do padrão

possam ser escaladas. Utilizando o nome do elemento, o tipo e o nome do parâmetro à ser escalado e o valor do escalar s o comando de escalar elementos permite ao usuário dimensionar cada parâmetro individualmente.

Linha de Comando	element scale <element_name> <cell_type> <field> <scale>		
Escopo	ELEMENT		
Thread Responsável	WiseConsole		
Entrada	<type>		Tipo de elemento à ser criado, seleciona a fábrica de elemento à ser utilizada.
	<element_name>		Nome do elemento à ser exportado.
	<cell_type>		Tipo de parâmetro à ser escalado (Ponto,Célula,Linha e Campos).
	<field>		Nome do campo à ser escalado.
	<scale>		Escalar f utilizado ao escalar elemento.

Tabela 4.23: Descrição do comando para escalar elementos.

4.1.24 DEFINIR PARÂMETRO DE ELEMENTO

Os dados inseridos em um elemento inteligente podem ser alterados e receber um valor. As informações contidas em pontos, linhas, células e campos podem ser substituídas por um valor de entrada. Isso permite modelos geométricos tenham seus parâmetros editados. Para alterar o parâmetro de um elemento inteligente é necessário adicionar à linha de comando o nome do elemento, o tipo e nome do parâmetro à ser alterado, a posição do valor no vetor do parâmetro e o valor à ser inserido.

4.1.25 DEFINIR TODOS OS PARÂMETROS DE ELEMENTO

O comando de definição de todos os valores pertencentes à um parâmetro auxilia no manuseio de parâmetros que possuem múltiplos valores. O comando define todos as posições encontradas no vetor do parâmetro e os altera para o valor de entrada. Para alterar todos os valores de um determinado parâmetro de um elemento inteligente é

Linha de Comando	element set_field <element_name> <cell_type> <field_name> <id> <data>		
Escopo	ELEMENT		
Thread Responsável	WiseConsole		
Entrada	<type> <element_name> <cell_type> <field_name> <id> <data>	Tipo de elemento à ser criado, seleciona a fábrica de elemento à ser utilizada. Nome do elemento à ser definido. Tipo de parâmetro à ser escalado (Ponto,Célula,Linha ou Campo). Nome do campo à ser escalado. Posição do valor no vetor do parâmetro, 0 caso valor único. Valor à ser inserido como parâmetro do elemento inteligente.	

Tabela 4.24: Descrição do comando para definir parâmetros de elementos.

necessário adicionar à linha de comando o nome do elemento, o tipo e nome do parâmetro à ser alterado e o valor à ser inserido.

Linha de Comando	element set_all_field <element_name> <cell_type> <field_name> <data>		
Escopo	ELEMENT		
Thread Responsável	WiseConsole		
Entrada	<type> <element_name> <cell_type> <field_name> <data>	Tipo de elemento à ser criado, seleciona a fábrica de elemento à ser utilizada. Nome do elemento à ser exportado. Tipo de parâmetro à ser escalado (POINT,LINE,CELL ou FIELD). Nome do campo à ser escalado. Valor à ser inserido como parâmetro do elemento inteligente.	

Tabela 4.25: Descrição do comando para definir todos os parâmetros de um campo pertencente à um elemento inteligente.

4.1.26 LISTAR FÁBRICAS DE ELEMENTO

O comando para listar todas as fábricas de elemento inteligente *WiseElementFactory* foi criado. O resultado impresso ao executar este comando é a lista de fábricas disponíveis na classe *WiseElementFactories* acoplada na ferramenta computacional.

Consequentemente, os resultados impressos representam os tipos de elementos inteligentes suportados pela ferramenta computacional.

Linha de Comando	element factories list
Escopo	ELEMENT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	Nenhuma

Tabela 4.26: Descrição do comando listar fábricas de elemento.

4.1.27 LISTAR EXEMPLOS DISPONÍVEIS DE ELEMENTO

Para cada tipo de elemento inteligente, ou fábrica inteligente listada pelo comando descrito na Seção 4.1.27, existirá uma lista de exemplos disponíveis. Exemplos são elementos inteligentes pré-definidos que podem ser criados a partir do comando de criar elementos descrito na Seção 4.1.14. Para listar os exemplos disponíveis o comando recebe como parâmetro de entrada a fábrica à ser analisada.

Linha de Comando	element factories examples <factory>
Escopo	ELEMENT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	<factory> Nome da fábrica de elementos inteligente à analisada.

Tabela 4.27: Descrição do comando listar exemplos contidos em determinada fábrica de elemento.

4.1.28 CRIAR OBJETO

Assim como o comando de criação de elementos inteligentes, o comando de criação de objetos irá acessar a fábrica de elementos inteligentes *WiseElementFactory*. É possível criar objetos inteligentes de duas formas: A primeira, utilizando um elemento inteligente; A segunda utilizando os exemplos disponibilizados pela fábrica de elementos inteligentes.

Assim como descrito na Seção 3.2, ao criar um objeto inteligente, um elemento inteligente é adicionado à estrutura do *Forno*, enquanto um Clone é acoplado ao *Freezer*;

Linha de Comando	object create <object_name> <element_name> object create <type> <example> <name> <element_name> [ARGS]	
Escopo	OBJECT	
Thread Responsável	WiseConsole	
Entrada	<object_name> <element_name> <type> <name> [ARGS]	Nome do objeto à ser criado. Nome do elemento à ser utilizado na criação ou do elemento à ser criado a partir do exemplo. Tipo de elemento inteligente à ser criado. Nome do exemplo de elemento inteligente à ser criado. Individualmente, as fábricas podem receber parâmetros para a criação de elementos.

Tabela 4.28: Descrição do comando para criar objetos inteligentes.

4.1.29 CLONAR OBJETO

Assim como o elemento inteligente, o objeto inteligente pode ser clonado em uma fábrica própria. Através do comando de clonar objetos estes métodos podem ser acessados, basta inserir o nome do objeto à ser clonado. A fábrica correta é acessada verificando o tipo do objeto à ser clonado.

Linha de Comando	object clonet <object_name> <name>	
Escopo	OBJECT	
Thread Responsável	WiseConsole	
Entrada	<object_name> <name>	Nome do objeto à ser clonado. Nome do novo elemento.

Tabela 4.29: Descrição do comando para clonar objetos inteligentes.

4.1.30 LISTAR OBJETOS

Com um projeto já selecionada, o comando de listar objetos pode ser utilizado para que o console imprima uma lista com o nome de todos os objetos inteligentes presentes no projeto.

Linha de Comando	object list
Escopo	OBJECT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	Nenhuma

Tabela 4.30: Descrição do comando listar elementos.

4.1.31 IMPRIMIR OBJETO

O comando de imprimir elementos irá extrair do projeto selecionado a representação em um arquivo *XML*, a informação textual deste arquivo será impressa como resultado no console. Para que o comando funcione é necessário que um projeto esteja selecionado e que o nome do objeto à ser impresso seja informado.

Dentro deste arquivo *XML* estarão todas as estruturas descritas na Seção 3.2.3, todos os elementos inteligentes que compõe as estruturas do *Forno* e *Freezer* de detalhes do objeto inteligente, bem como seu tipo e fábricas utilizadas.

Linha de Comando	object print <object_name>
Escopo	OBJECT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	<object_name> Nome do objeto à ser impresso.

Tabela 4.31: Descrição do comando imprimir objetos inteligentes.

4.1.32 EXCLUIR OBJETO

Com um projeto selecionado, o comando de exclusão de objetos irá excluir o objeto inteligente do projeto recebendo o nome do objeto como parâmetro de entrada.

Linha de Comando	object delete <object_name>
Escopo	OBJECT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	<object_name> Nome do objeto à ser excluído.

Tabela 4.32: Descrição do comando excluir objetos inteligentes.

4.1.33 SALVAR OBJETO

O comando de salvar objetos possibilita que a estrutura complexa de um objeto inteligente, bem como seus componentes, sejam arquivados em um arquivo *XML*. Os objetos salvos podem em seguida ser recuperados. Como entrada o comando de salvar objetos irá receber o nome do objeto à ser salvo e o caminho para o arquivo de saída.

Linha de Comando	object save <object_name> <filename>
Escopo	OBJECT
Thread Responsável	WiseIO
Entrada	<object_name> Nome do objeto à ser salvo. <filename> Caminho para o arquivo de saída.

Tabela 4.33: Descrição do comando salvar objetos inteligentes.

4.1.34 CARREGAR OBJETO

O comando de carregar objetos irá enviar um arquivo de entrada a fábrica de objetos inteligentes *WiseObjectFactory*, que por sua vez irá reconstruir cada componente do objeto com sua fábrica adequada. Isto significa que a coleção de elementos inteligentes e objetos gráficos irá reconstruir cada objeto. O comando recebe como entrada o nome do arquivo apenas, no Anexo C há um exemplo de arquivo *XML* contendo um objeto inteligente válido.

Linha de Comando	object load <filename>	
Escopo	OBJECT	
Thread Responsável	WiseIO	
Entrada	<filename>	Caminho para o arquivo de entrada.

Tabela 4.34: Descrição do comando carregar objetos inteligentes.

4.1.35 EXPORTAR OBJETO

O comando de exportar objetos funciona da mesma forma que o comando de exportar elementos, isto porque o comando irá exportar o elemento contido na estrutura do *Forno*. Portanto os comandos de listar exportações e o de exportar elemento foram adicionados ao objeto.

Linha de Comando	object export_list <object_name> object export <object_name> <export_type> [ARGS]	
Escopo	OBJECT	
Thread Responsável	WiseConsole	
Entrada	<object_name> <export_type> [ARGS]	Nome do objeto à ser analisado ou exportado. Tipo de exportação à ser realizada. Argumentos de entrada, específicos de cada exportação.

Tabela 4.35: Descrição dos comandos de exportação elementos contidos no *Forno* de objetos inteligentes.

4.1.36 DEFINIR PARÂMETROS DE OBJETO

Assim como o comando de exportar objeto atua sobre o elemento contido na estrutura do *Forno*, ao realizar comandos de definição de parâmetros em um objeto inteligente o elemento inteligente contido na estrutura do *Forno* que será afetado. Portanto, caso algum ajuste seja feito no modelo geométrico as iterações passadas não sofrerão mudanças, enquanto qualquer iteração nova irá receber a nova informação definida.

Linha de Comando	object set_field <object_name> <cell_type> <field_name> <id> <data> object set_all_field <object_name> <cell_type> <field_name> <data>		
Escopo	OBJECT		
Thread Responsável	WiseConsole		
Entrada	<object_name> <cell_type> <field_name> <id> <data>	Nome do elemento à ser definido. Tipo de parâmetro à ser escalado (Ponto,Célula,Linha ou Campo). Nome do campo à ser escalado. Posição do valor no vetor do parâmetro, 0 caso valor único. Valor à ser inserido como parâmetro do elemento inteligente.	

Tabela 4.36: Descrição dos comandos de exportação elementos contidos no *Forno* de objetos inteligentes.

4.1.37 DEFINIR OBJETO

O comando de definir um objeto inteligente tem ligação direta com o seu processo de iteração. Como mencionado na Seção 3.2, os objetos são criados por padrão no estado *Ready*, tendo sido corretamente criados e acoplados de fábricas de iteração e, opcionalmente, gráficas, ele pode ser definido mudando para o estado *Set*. O comando para definir um objeto inteligente recebe apenas o nome do objeto inteligente e retorna uma mensagem de conclusão.

Linha de Comando	object set <object_name>	
Escopo	OBJECT	
Thread Responsável	WiseConsole	
Entrada	<object_name>	Nome do objeto à ser setado.

Tabela 4.37: Descrição do comando setar objetos inteligentes.

4.1.38 ITERAR OBJETO

O comando de iterar objetos irá executar o ciclo de iteração de um objeto que tenha sido corretamente setado. Os objetos inteligentes no estado *Set* podem ter seus parâmetros

alterados e corretamente configurados, em seguida passam pelo ciclo de iteração. Ao terminarem o ciclo os objetos inteligentes mudam para o estado *Go*.

Linha de Comando	object go <object_name>
Escopo	OBJECT
Thread Responsável	WiseProcessor
Entrada	<object_name> Nome do objeto à ser iterado.

Tabela 4.38: Descrição do comando iterar objetos inteligentes.

4.1.39 LISTAR FÁBRICAS DE ITERAÇÃO DE OBJETO

Cada tipo de objeto inteligente possuirá uma lista de fábricas de iteração *WiseIterationFactory* que podem ser acopladas à ele. O comando de listar fábricas de iteração irá receber o nome do objeto inteligente à ser analisado, as fábricas de iteração que forem compatíveis com o objeto serão escritas no console.

Linha de Comando	object iteration_factories list <object_name>
Escopo	OBJECT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	<object_name> Nome do objeto à ser analisado.

Tabela 4.39: Descrição do comando listar fábricas de iteração.

4.1.40 DEFINIR FÁBRICA DE ITERAÇÃO DE OBJETO

Antes que um objeto possa passar para o estado *Set* ele precisa ter em sua composição uma fábrica de iteração, caso deseje um objeto estático (que não mude durante o ciclo iterativo) a fábrica *StaticIterationFactory* deve ser acoplada. O comando para definir a fábrica de iteração irá receber o nome do objeto que terá a fábrica acoplada e o nome da fábrica à ser adicionada.

Linha de Comando	object iteration_factories set <object_name> <factory_name>	
Escopo	OBJECT	
Thread Responsável	WiseConsole	
Entrada	<object_name>	Nome do objeto inteligente que irá receber a fábrica.
	<factory_name>	Fábrica de iteração à ser inserido no objeto.

Tabela 4.40: Descrição do comando definir fábricas gráficas.

4.1.41 LISTAR FÁBRICAS GRÁFICAS DE OBJETO

Além de fábricas de iteração, objetos inteligentes podem ser compostos por fábricas gráficas. O comando de listar fábricas gráficas irá imprimir no console as fábricas gráficas disponíveis para um determinado objeto inteligente, como dado de entrada o comando irá receber o nome deste objeto.

Linha de Comando	object graphic_factories list <object_name>	
Escopo	OBJECT	
Thread Responsável	WiseConsole	
Entrada	<object_name>	Nome do objeto à ser analisado.

Tabela 4.41: Descrição do comando listar fábricas gráficas.

4.1.42 DEFINIR FÁBRICA GRÁFICA DE OBJETO

Uma vez que o objeto inteligente tenha sido criado corretamente ele pode ser acoplado a fábricas de iteração ou gráficas. O comando de definir fábrica gráfica irá acoplar uma fábrica gráfica disponível à um objeto inteligente compatível. Como dados de entrada o comando receberá o nome do objeto inteligente à ser alterado e o nome da fábrica gráfica à ser adicionada.

Linha de Comando	object graphic_factories set <object_name> <factory_name>	
Escopo	OBJECT	
Thread Responsável	WiseConsole	
Entrada	<object_name>	Nome do objeto inteligente que irá receber a fábrica.
	<factory_name>	Fábrica gráfica à ser inserido no objeto.

Tabela 4.42: Descrição do comando definir fábricas gráficas.

4.1.43 LISTAR OBJETOS GRÁFICOS

Uma vez que o objeto gráfico tenha sido corretamente criado e acoplado à uma fábrica gráfica, o seu modelo é disponibilizado numa lista de objetos gráficos. Essa lista irá exibir o nome de todos os objetos que podem ser visualizados e está disponível para visualização através de um comando.

Linha de Comando	graphic list
Escopo	OBJECT
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	Nenhuma.

Tabela 4.43: Descrição do comando listar objetos gráficos.

4.1.44 LISTAR CANVAS

O comando de listar *Canvas* irá nomear todas os elementos gráficos disponíveis. Quando o ambiente *InGU* está sendo executado não existirão elementos gráficos disponíveis, entretanto como veremos à frente o ambiente computacional *IGU* apresentar exatamente as mesmas funcionalidades com elementos gráficos. Ao executar este comando no ambiente computacional com elementos gráficos, cada objeto e seu nome será enviado como resultado.

Linha de Comando	canvas list
Escopo	GRAPHIC
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	Nenhuma.

Tabela 4.44: Descrição do comando listar elementos gráficos *Canvas*.

4.1.45 LINK GRÁFICO

Tendo o conhecimento dos elementos gráficos disponíveis para desenho e das estruturas aptas à serem desenhadas, é possível que estas estruturas sejam conectadas para que funcionem em conjunto. Ao realizar esta conexão, nomeada de link gráfico, o elemento gráfico passará a exibir o elemento gráfico.

Linha de Comando	graphic link <graphic_name> <canvas_name> canvas link <canvas_name> <graphic_name>	
Escopo	GRAPHIC	
Thread Responsável	WiseConsole	
Entrada	<graphic_name> <canvas_name>	Nome do objeto gráfico à ser linkado com elemento gráfico <i>Canvas</i> . Nome do <i>Canvas</i> à receber objeto gráfico para desenho.

Tabela 4.45: Descrição dos comandos que enviam um objeto gráfico para ser exibido em um elemento gráfico da interface de usuário.

4.1.46 TERMINAR LINK GRÁFICO

Uma vez que os elementos gráficos começam a ser exibidos em elementos de interface gráfica eles são desenhados continuamente. Para liberar o elemento de interface gráfica e deixá-lo vazio o comando de terminar link gráfico deve ser utilizado. Como dado de entrada este comando recebe o nome do elemento de interface gráfica.

Linha de Comando	canvas purge <canvas_name>
Escopo	GRAPHIC
Thread Responsável	WiseConsole
Entrada	<canvas_name> Canvas à ser limpo.

Tabela 4.46: Descrição do comando terminar link gráfico.

4.2 CASO DE USO

O principal objetivo da ferramenta computacional é iterar modelos utilizando alguma lógica pré-definida por algum algoritmo disponível. Através dos comandos descritos na Seção 4.1 é possível que estes modelos sejam criados, alterados, iterados e, opcionalmente, visualizados. A Figura 4.5 demonstra a principal sequência de atividades executadas para se iterar um objeto inteligente. Com este modelo é possível observar a sequência de passos necessárias para se iterar um obejto inteligente.

Primeiramente, é necessário criar um projeto inteligente e selecioná-lo. Cada atividade representada no fluxograma é executada por um comando correspondente, o mesmo fluxo pode ser observado no Anexo B. As primeiras linhas de comando representadas neste arquivo de comandos são de criação de projetos.

Ao criar um objeto inteligente, seus elemento inteligentes também são criados. Esta funcionalidade está disponível ao usuário uma vez que ele tenha selecionado um projeto. É possível ainda criar um objeto inteligente à partir de um elemento inteligente. Desta forma há garantia da igualdade inicial entre os modelos.

Com um objeto criado corretamente é possível adicionar à ele uma fábrica de iteração e uma gráfica. Ao acoplar a fábrica de iteração o método iterativo é liberado, bem como a possibilidade de alterar os parâmetros do objeto inteligente.

Também existe a possibilidade de se exportar elementos inteligentes, para elementos inteligentes como *WiseGraphic* isso signifca a exportação de imagem no formato **Portable Network Graphics**, ou *png*, com seu comando representado na linha 7 do Anexo B.

Como mencionado anteriormente, a mesma estrutura foi utilizada na construção do ambiente computacional composto por elementos gráficos *IGU*, conforme a Figura 4.6.

Desta forma o principal fluxo de uso da interface gráfica foi desenvolvido. O funcionamento

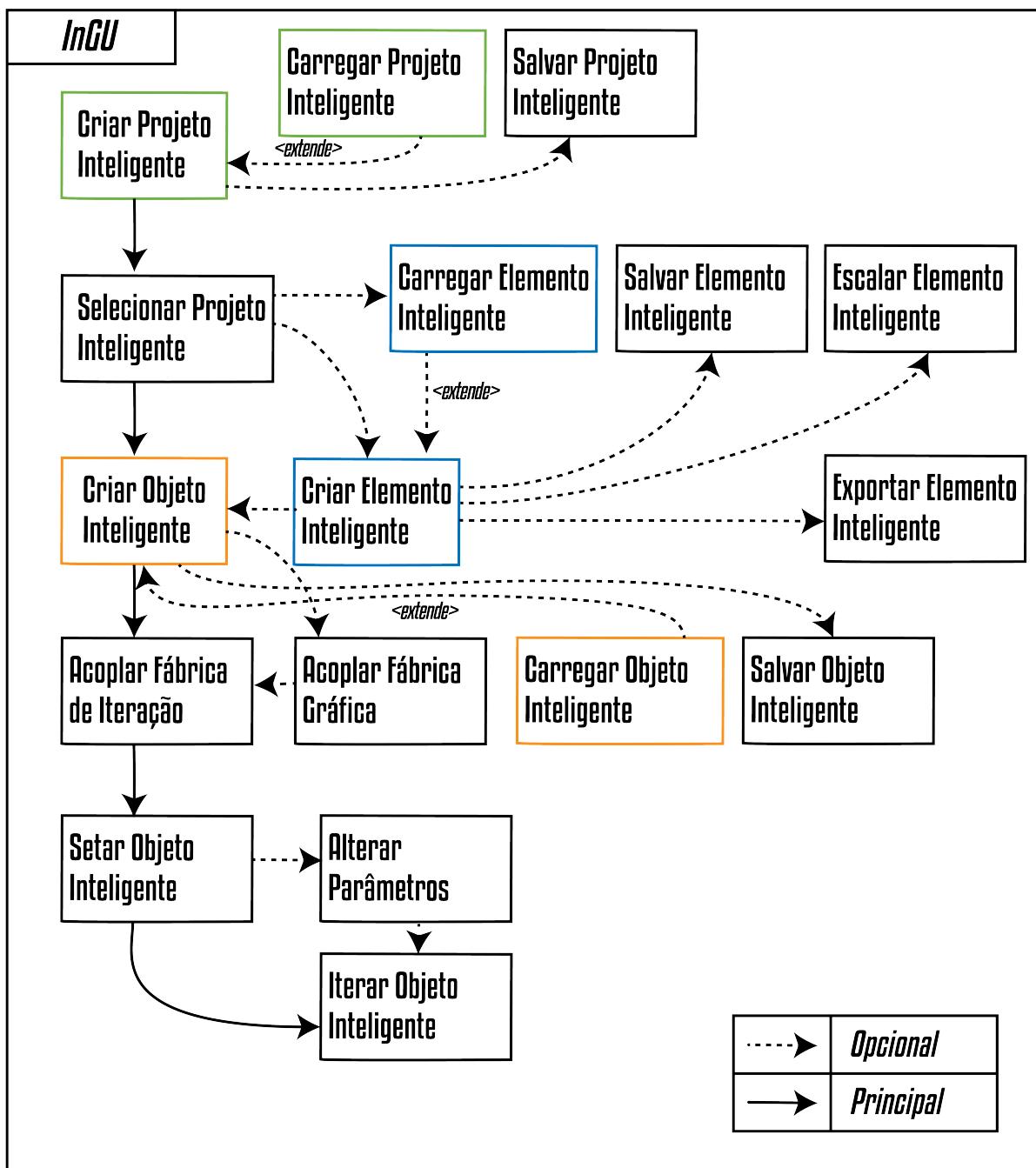


Figura 4.5: Fluxograma do ambiente computacional InGU, em azul as atividades de criação de elementos inteligentes, em verde as atividades de criação de projetos inteligentes e em laranja as atividades de criação de objetos inteligentes.

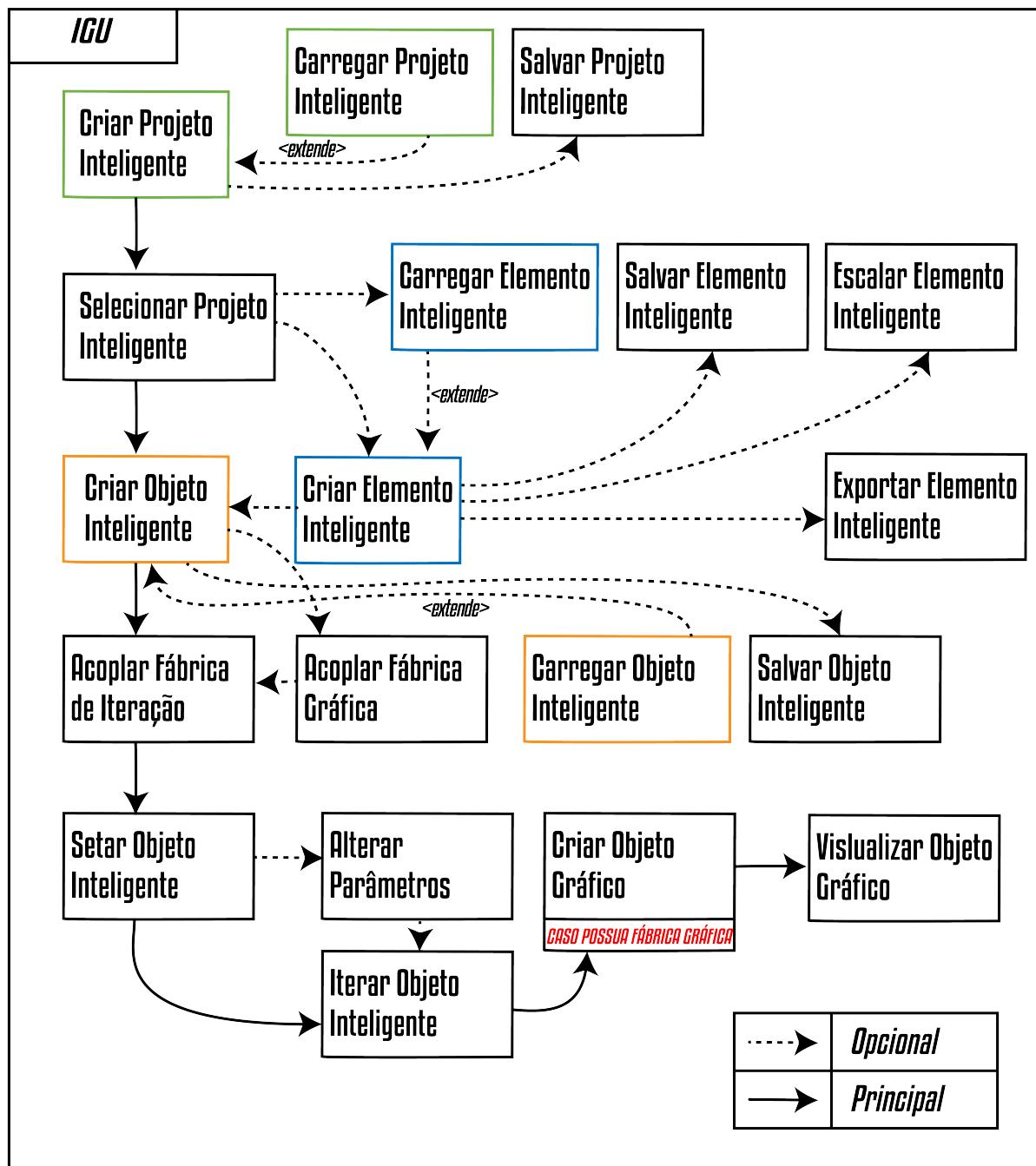


Figura 4.6: Fluxo de caso de uso do ambiente computacional IGU.

apresentado pela Figura 4.6 difere do apresentado na Figura 4.5 apenas na visualização dos objetos gráficos disponibilizada pelos elementos gráficos. Isto garante que ambos os ambientes computacionais sejam alterados em uma eventual atualização de código e que tenham funcionamento idêntico.

4.3 JANELA PRINCIPAL

O ambiente com interface gráfica foi nomeado de **I**terador **G**ráfico **U**niversal (IGU), que também está presente como parte de um projeto *Qt/C++*. Diferentemente dos outros ambientes, este possui elementos gráficos. O principal elemento gráfico disponibilizado pela interface gráfica é a janela principal, que é um objeto do tipo *QMainWindow*. Estes objetos são disponibilizados pela biblioteca *Qt* e permitem que um projeto *C++* possua uma interface gráfica utilizando diretivas OpenGL e GLUT (The OpenGL Utility Kit) (KHRONOS 2019).

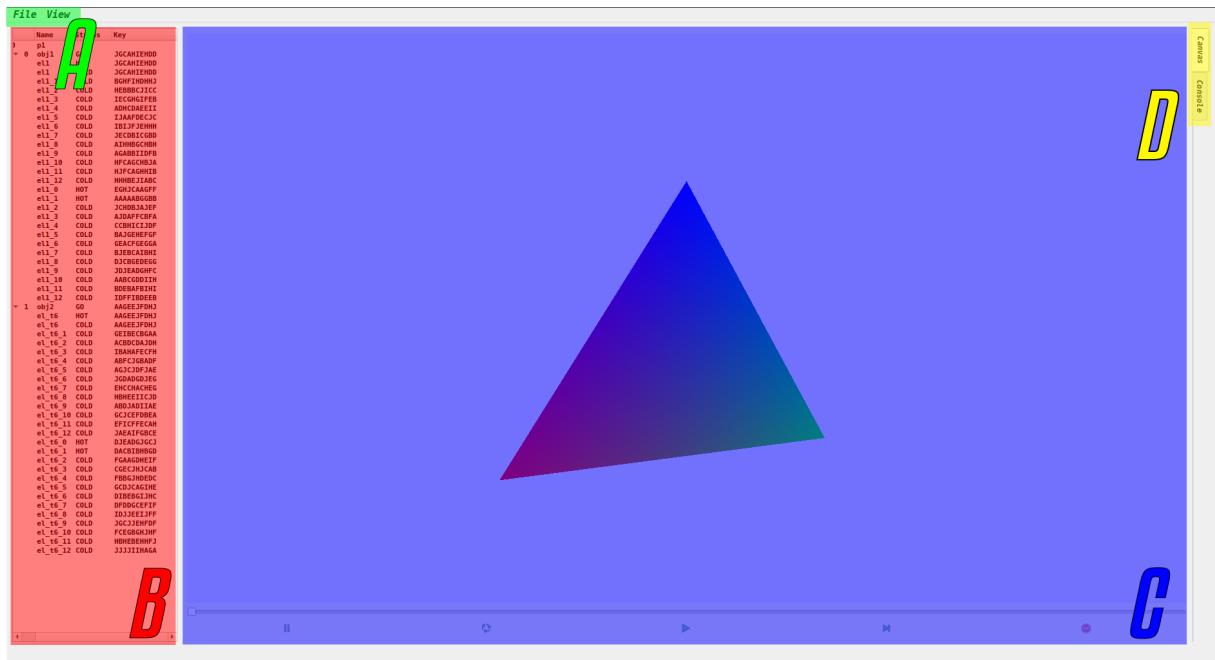


Figura 4.7: Janela principal ambiente computacional IGU. Da esquerda para a direita: A. Menu principal do programa; B. Árvore de projetos e seus elementos; C. Área de trabalho, no caso mostrando OpenGL *Canvas*; D. Seleção de abas

A Figura 4.7 demonstra o comportamento inicial da ferramenta computacional. Ao ser aberta o ambiente de trabalho, projetos, objetos e elementos são recuperados de um

arquivo contido na mesma parte da ferramenta computacional. Este arquivo é salvo toda vez que a ferramenta computacional é encerrada com projetos inteligentes ainda no ambiente. Ainda nesta figura estão representados os principais grupos de elementos gráficos.

As próximas seções discorrem sobre cada grupo de elemento gráfico presente na janela principal da ferramenta computacional e seu funcionamento.

4.3.1 MENU

O primeiro grupo são os elementos que compõem o menu principal da aplicação. Cada opção do menu é representada por um uma linha de texto, ao selecionar a linha uma ação é executada:

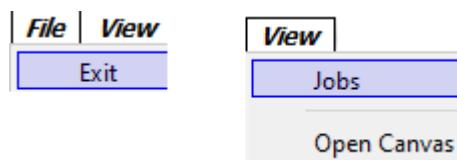


Figura 4.8: Opções do menu principal da ferramenta computacional *IGU*

- **Exit:** Fecha o ambiente computacional.
- **Jobs:** Abre a Janela que exibe os trabalhos inteligentes criados.
- **Open Canvas:** Abre uma nova janela contendo um novo elemento gráfico OpenGL *Canvas*.

Ao abrir um novo elemento gráfico *Canvas*, um novo nome será listado ao executar o comando de listar canvas. Isso possibilita que mais de um objeto seja exibido ao mesmo tempo em janelas distintas.

4.3.2 ABAS E ÁREA DE TRABALHO

As abas da janela principal selecionam o elemento de interface gráfica que será exibido na área de trabalho da aplicação.

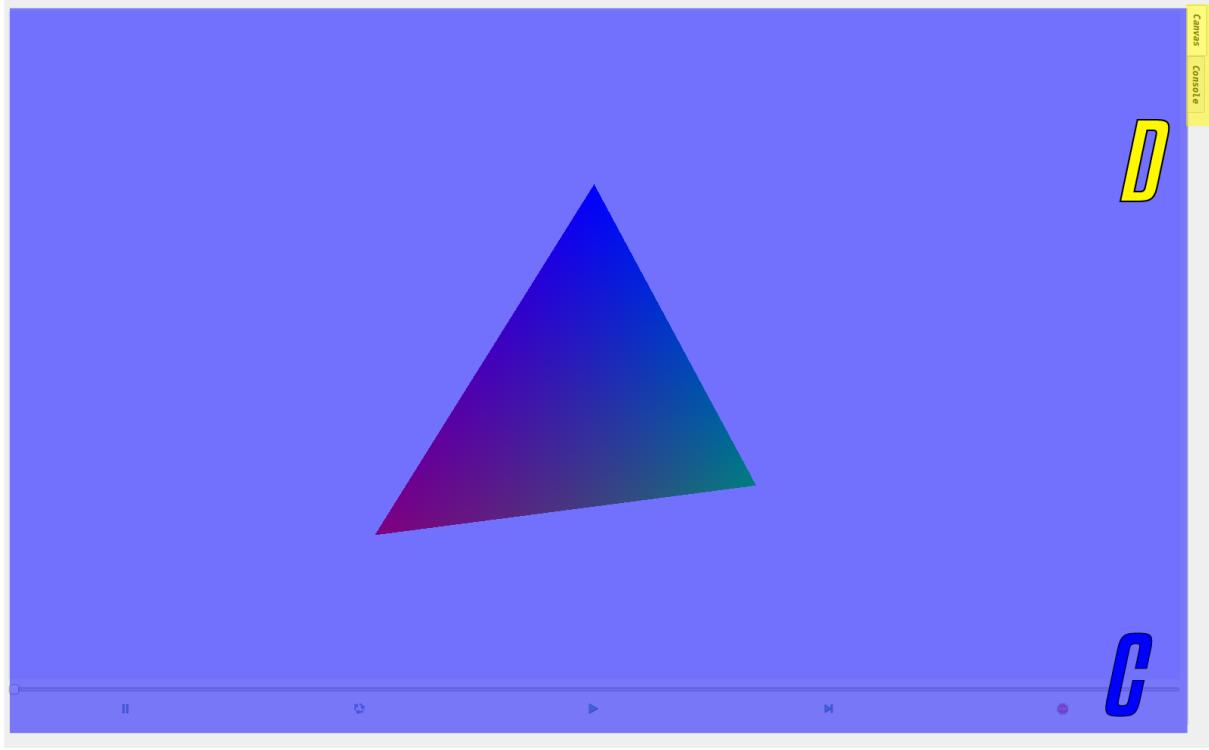


Figura 4.9: Opções do menu principal da ferramenta computacional *IGU*

Ao selecionar uma das abas, os elementos de interface de usuário da área de trabalho são trocados. Estes elementos são objetos do tipo *QWidget*, que por sua vez são divididos em dois ambientes: o *Canvas* e o *Console*.

A aba *Console* exibe um ambiente similar ao disponibilizado pelo ambiente *InGU*. Utilizando um elemento de exibição textual longa, uma linha de texto como entrada e um botão, os mesmos comandos disponibilizados na Seção 4.1 são acessados por estes elementos gráficos. Para executar uma linha de comando basta inserir-la no elemento gráfico e pressionar o botão ou a tecla *Enter*, a resposta será acoplada ao elemento de exibição textual longa.

A Figura ?? mostra as áreas de trabalho disponibilizadas ao selecionar uma das abas. Através da opção *Canvas*, o elemento gráfico que contém um *QWidget* cuja principal função é uma tela *OpenGL*. Os objetos gráficos, resultados de iterações podem ser visualizados aqui. O funcionamento desta área de trabalho é descrito pela janela *Canvas* e funciona como um reproduutor de vídeo.

As abas foram construídas para realizar todas as funções da ferramenta computacional

Figura 4.10: Mudanças gráficas observadas na Área de Trabalho ao trocar a aba selecionada, exibindo o elemento gráfico *Canvas* com a aba *Canvas* selecionada.

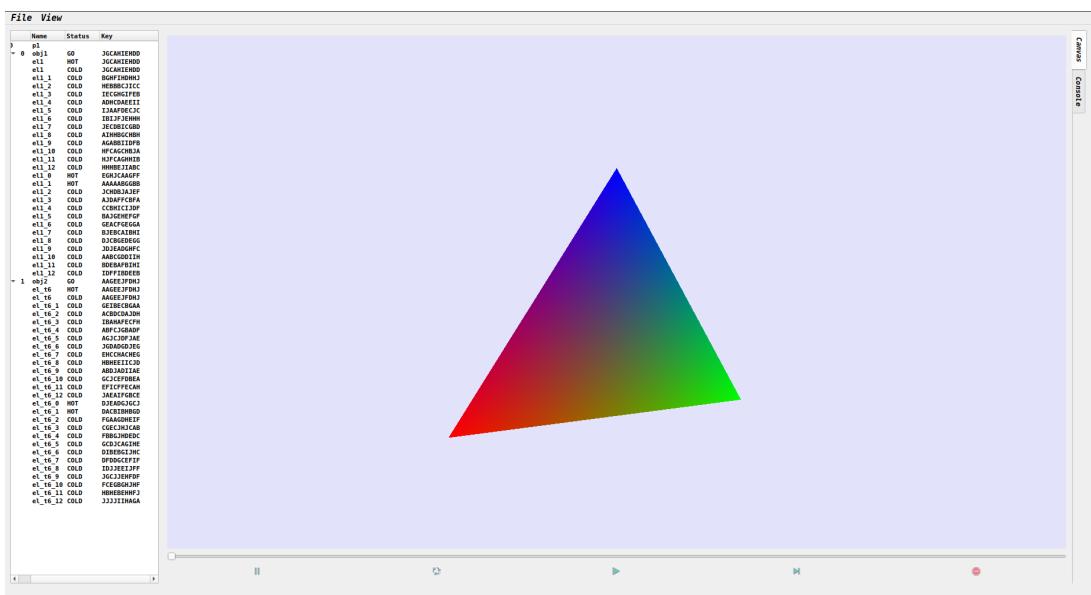


Figura 4.11: Mudanças gráficas observadas na Área de Trabalho ao trocar a aba selecionada, exibindo o elemento gráfico *Console* com a aba *Console* selecionada.

com seus elementos gráficos. O ciclo de vida da *thread WiseThreadPool* esta diretamente ligado à interface gráfica. Ao utilizar a interface gráfica para percorrer os elementos gráficos, ou executar a animação, irá desencadear chamadas diretas as *threads*.

4.4 ÁRVORE DE PROJETOS

Além da área de trabalho, o elemento gráfico que exibe a árvore de projetos permanece fixa. Este elemento gráfico é um explorador de árvore *QTreeWidget* que exibe todos os projetos carregados e suas estruturas. Esta árvore permite rapidamente verificar os elementos criados, seus nomes, suas chaves únicas e seu estado atual.

	Name	Status	Key
0	p1	GO	JGCAHIEHDD
0	obj1	HOT	JGCAHIEHDD
0	ell	COLD	JGCAHIEHDD
0	ell	COLD	BGHFIHDHHJ
0	ell_1	COLD	HEBBCJICC
0	ell_2	COLD	IECGHGIFEB
0	ell_3	COLD	ADHCDAAEII
0	ell_4	COLD	IJAAFDECJC
0	ell_5	COLD	IBIJFJEHHH
0	ell_6	COLD	JECDBICGBD
0	ell_7	COLD	AIHHBGCHBH
0	ell_8	COLD	AGABBIIDFB
0	ell_9	COLD	HFCAGCHBJA
0	ell_10	COLD	HJFCAGHHIB
0	ell_11	COLD	HHHBEJIABC
0	ell_12	COLD	EGHJCAAGFF
0	ell_0	HOT	AAAAAABGGBB
0	ell_1	HOT	JCHDBJAJEF
0	ell_2	COLD	AJDAFFCBFA
0	ell_3	COLD	CCBHICIJDF
0	ell_4	COLD	BAJGEHEFGF
0	ell_5	COLD	GEACFGEGGA
0	ell_6	COLD	BJEBCAIBHI
0	ell_7	COLD	DJCBGEDEGG
0	ell_8	COLD	JDJEADGHFC
0	ell_9	COLD	AABCDDTTI
0	ell_10	COLD	BDEBAFB
0	ell_11	COLD	IDFFIBI
0	ell_12	COLD	AAGEEJ
1	obj2	GO	AAGEEJ
1	el_t6	HOT	AAGEEJ
1	el_t6	COLD	AAGEEJ
1	el_t6_1	COLD	GEIBERGA
1	el_t6_2	COLD	ACBDT
1	el_t6_3	COLD	IBAHAFECFH

Figura 4.12: Árvore de projetos, na imagem a ferramenta apresenta um projeto inteligente *p1*, um objeto inteligente *obj1* e seus elementos gráficos e inteligentes.

A Figura 4.12 apresenta o elemento gráfico de uma árvore de projetos com objetos carregados. Na imagem está um projeto nomeado *p1*, um objeto inteligente *obj1* e diversos elementos inteligentes e gráficos. Como visto anteriormente quando o objeto está no estado *GO*

significa que ele já foi corretamente configurado e iterado. Dentro deste objeto inteligente estão os elementos inteligentes e gráficos. O primeiro elemento *el1* é o elemento contido na estrutura *Forno* e é o único elemento inteligente no estado *Hot*. Em seguida estão os elementos inteligentes da estrutura *Freezer*, seguidos pelos objetos gráficos.

Através da árvore de projetos é possível observar a troca de estado dos elementos, por exemplo, ao executar a animação os elementos gráficos serão sucessivamente aquecidos. Se observa que a mesma quantidade de elementos gráficos e inteligentes, mantendo a consistência do objeto inteligente, cada passo iterativo com sua respectiva representação gráfica.

4.5 JANELAS

Nesta seção seão descritas as janelas disponíveis no menu, descrito na Seção 4.3.1. Existem dois tipos de janelas disponibilizadas pela ferramenta computacional: *Canvas*, que funciona como um reproduutor de vídeo, exibindo elementos gráficos sucessivamente; *Jobs*, exibe todas as demandas criadas pelo programa enviadas à *thread* inteligente *WiseThreadTool*. Esta última janela pode ser intstanciada apenas uma vez, enquanto diversos *Canvas* podem ser disponibilizados e exibir diferentes objetos.

4.5.1 JANELA CANVAS

A janela e área de trabalho *Canvas* possibilita que o usuário selecione o quadro à ser exibido. Cada quadro representa um objeto do tipo *GraphicObject* que é um componente do modelo gráfico *GraphicModel*. O quadro é selecionado através de uma barra de progresso, além de botões que alteram a animação feita com o objeto gráfico. Estes botões são:

- **Pause:** Pausa a animação do objeto gráfico.
- **Repeat:** Este botão tem um funcionamento liga e desliga, ao ser ligado, quando a animação chegar ao último elemento gráfico retornará ao primeiro.
- **Play:** Este botão também tem um funcionamento liga e desliga, ao ser ligado, o elemento gráfico irá percorrer por todos os quadros da animação.

- **Avançar quadro:** Avança um quadro da animação.
- **Stop:** Caso o *Play* esteja ativo ele é desativado e a tela volta ao primeiro elemento gráfico da animação.

Todas as funções do *Canvas* só são disponibilizadas ao usuário depois que um objeto gráfico é ligado à tela *OpenGL*. Neste cenário, quando cada quadro é selecionado é alterado quais objetos gráficos *GraphicObject* estarão no estado aquecido *Hot*. Isto foi feito utilizando a conexão entre objetos *QObjects* e os elementos gráficos *QWidget*, desta forma a tela é capaz de acionar diretamente a estrutura do *WiseThreadPool* e selecionar quais elementos devem ser aquecidos e exibidos. A mesma conexão é responsável por enviar a linha de comando da aba *Console* à *WiseThreadPool* para que seja executada e em seguida enviar a mensagem de resposta ao elemento textual.

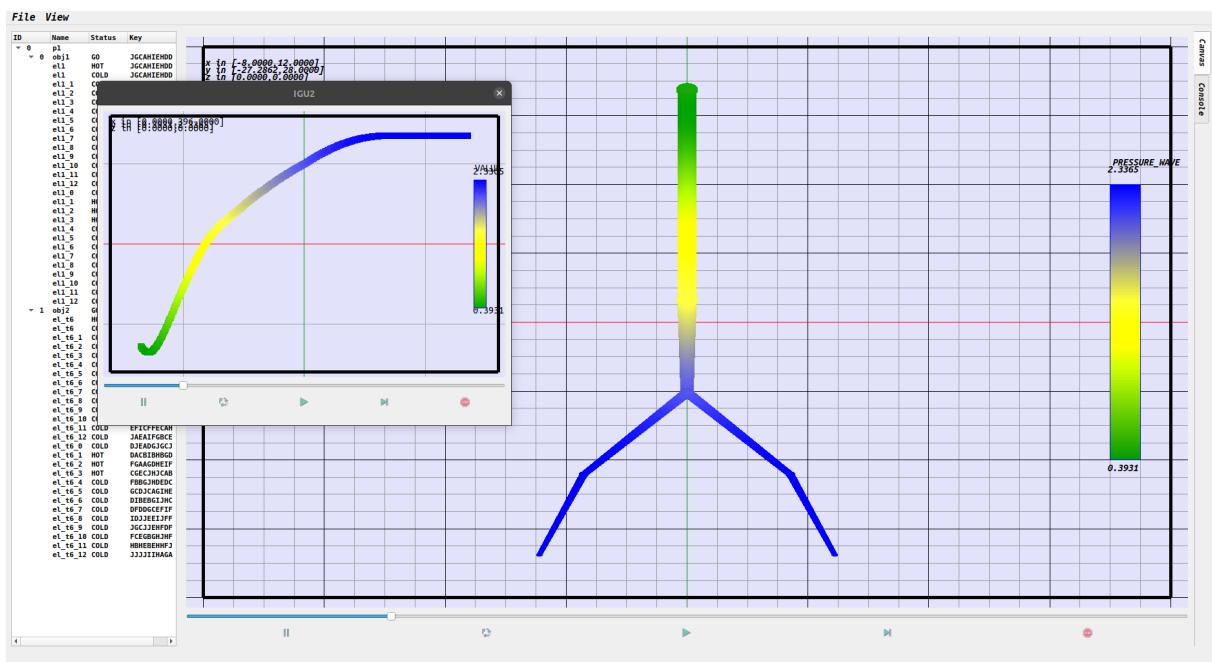


Figura 4.13: Janela *Canvas* exibida sobre a área de trabalho *Canvas*, a janela exibindo um gráfico obtido como resultado e a área de trabalho exibindo a árvore arterial estudada.

Durante sua execução esta janela irá selecionar o elemento gráfico *GraphicElement* que deve ser exibido, selecionando o elemento através do objeto gráfico *GraphicObject*. Para que o elemento seja exibido corretamente ele precisa estar no estado *Hot*, que representa o momento em que o elemento está corretamente carregado em memória com o modelo

geométrico e o parâmetro à ser exibido. Portanto, ao selecionar o elemento o *Canvas* irá criar trabalhos de aquecimento dos elementos. A coleção de objetos gráficos *GraphicModel* é encarregada de enviar estes trabalhos a *thread* inteligente *WiseThreadPool*.

4.5.2 JANELA JOBS

A janela *Jobs* exibe uma listagem comprehensiva dos processos iniciados e enviados à *thread* inteligente *WiseThreadPool*, cada comando executado via *Console* ou elemento de interface gráfica irá gerar processos listados nesta janela.

ID	Workload	Type	Status	Created at	Msec to Q	Msec to Run	Msec to Finish	Msec Running	Finished at
52 51	0	RUN_CMD	FINISHED	15/08 23:23:08.564	0	0	0	0	15/08 23:23:08.565
53 52	0	CANVAS_LINK	FINISHED	15/08 23:23:08.565	0	0	0	0	15/08 23:23:08.565
54 53	6	HEAT_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:20.696	23	23	38	15	15/08 23:23:20.735
55 54	6	HEAT_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:26.361	16	16	33	17	15/08 23:23:26.395
56 55	6	FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:26.361	16	16	34	18	15/08 23:23:26.396
57 56	6	HEAT_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:31.146	17	17	32	15	15/08 23:23:31.179
58 57	6	FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:31.146	17	17	33	16	15/08 23:23:31.180
59 58	6	HEAT_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:41.461	16	16	34	18	15/08 23:23:41.495
60 59	6	HEAT_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:41.461	16	16	34	18	15/08 23:23:41.496
61 60	6	FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:41.461	16	16	35	19	15/08 23:23:41.497
62 61	6	FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:41.461	16	16	36	20	15/08 23:23:41.498
63 62	6	HEAT_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:45.511	16	16	34	18	15/08 23:23:45.545
64 63	6	FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:45.511	16	16	34	18	15/08 23:23:45.546
65 64	6	HEAT_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:49.145	16	16	34	18	15/08 23:23:49.179
66 65	6	FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:49.145	16	16	34	18	15/08 23:23:49.179
67 66	6	HEAT_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:52.345	16	16	33	17	15/08 23:23:52.378
68 67	6	FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:52.345	16	16	34	18	15/08 23:23:52.379
69 68	6	HEAT_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:56.230	16	16	34	18	15/08 23:23:56.265
70 69	6	FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:23:56.230	16	16	35	19	15/08 23:23:56.265
71 70	6	HEAT_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:24:04.244	16	16	34	18	15/08 23:24:04.279
72 71	6	HEAT_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:24:04.244	16	16	34	18	15/08 23:24:04.279
73 72	6	FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:24:04.244	16	16	35	19	15/08 23:24:04.280
74 73	6	FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:24:04.244	16	16	36	20	15/08 23:24:04.281
75 74	6	HEAT_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:24:08.178	16	16	34	18	15/08 23:24:08.212
76 75	6	FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:24:08.178	16	16	34	18	15/08 23:24:08.213
77 76	6	HEAT_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:24:15.495	16	16	34	18	15/08 23:24:15.529
78 77	6	FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:24:15.495	16	16	34	18	15/08 23:24:15.529
79 78	6	HEAT_GRAPHIC_ELEMENT	FINISHED	15/08 23:24:15.778	16	16	33	17	15/08 23:24:15.812

Figura 4.14: Janela *Jobs* exibida com a aba *Timetable* selecionada, a janela lista os trabalhos recebidos pela estrutura *WiseThreadPool* e seus tempos de execução.

A Figura 4.14 demonstra a tabela obtida lista todos os trabalhos recebidos pela *thread* inteligente *WiseThread* e suas propriedades. Cada linha nesta janela representa um *WiseJob*, as colunas descrevem propriedades de cada trabalho:

- **ID:** Número de identificação.
- **Workload:** Número da carga de trabalho.
- **Status:** Estado do trabalho.

- **Created at:** Data de criação.
- **Msec to Q:** Milisegundos do momento da criação até a chegada a fila.
- **Msec to Run:** Milisegundos do momento da criação até a alocação do trabalho em uma thread.
- **Msec to Finish:** Milisegundos do momento da criação até o final de sua execução.
- **Msec Running:** Milisegundos no estado *RUNNING*.
- **Finished at:** Data de finalização.

All Jobs	Pre-Q	Q	Running	Finished
[6][0] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][0] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][1] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][1] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][2] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][2] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][3] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][3] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][4] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][4] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][5] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][5] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][6] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][6] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][7] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][7] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][8] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][8] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][9] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][9] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][10] FREEZE_WISE_ELEMENT	1			[6][10] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][11] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][11] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][12] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][12] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][13] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][13] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][14] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][14] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][15] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][15] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][16] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][16] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][17] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][17] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][18] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][18] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][19] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][19] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][20] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][20] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][21] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][21] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][22] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][22] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][23] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][23] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][24] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][24] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][25] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][25] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][26] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][26] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][27] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][27] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][28] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][28] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][29] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][29] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][30] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][30] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][31] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][31] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][32] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][32] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][33] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][33] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][34] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][34] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][35] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][35] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][36] FREEZE_WISE_ELEMENT				[6][36] FREEZE_WISE_ELEMENT
[6][37] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][37] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][38] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][38] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][39] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][39] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][40] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][40] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][41] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][41] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][42] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][42] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][43] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][43] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][44] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][44] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][45] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][45] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT
[6][46] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT				[6][46] FREEZE_GRAPHIC_ELEMENT

Figura 4.15: Janela *Jobs* exibida com a aba *Timetable* selecionada, a janela lista os trabalhos recebidos pela estrutura *WiseThreadPool* e os separa logicamente pelas listas de espera.

A Figura 4.15 demonstra as cinco listas exibidas ao selecionar a aba *Timetable* da janela *Jobs*. A primeira lista *All Jobs* lista todos os trabalhos criados e as listas subsequentes listam as listas presentes no gerenciador de threads *WiseThreadPool* descritas na Seção 3.2.8. Desta forma é possível verificar os trabalhos que aguardam execução, estão sendo executados ou foram finalizados.

5 RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, apresentam-se resultados obtidos com a implementação computacional e simulação do modelo matemático de Duan e Zamir (DUAN; ZAMIR, 1995). As simulações realizadas aqui tratam da propagação de uma onda harmônica simples ao longo de uma árvore, onde reflexões de onda modificam a amplitude da onda de pressão enquanto ela avança. A escolha de uma onda harmônica simples neste estudo possibilita investigar os efeitos da frequência, fluido viscoso e viscoelasticidade da parede do segmento de vaso.

Considerou-se neste estudo um modelo de árvore arterial canina como ilustrado na Figura 5.1. As propriedades dos segmentos foram escolhidas oriundas dos dados de Fung (FUNG, 2013) e são descritas na Tabela 5.1.

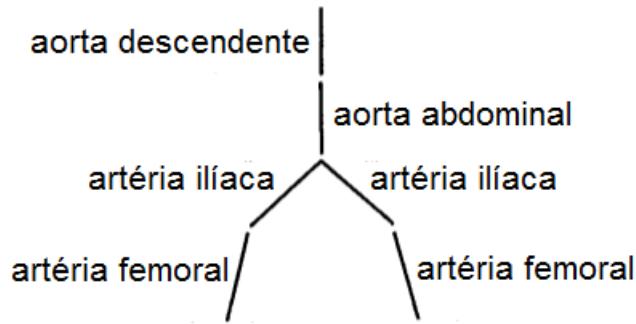


Figura 5.1: Representação do modelo de árvore arterial canina (figura adaptada de (DUAN; ZAMIR, 1986)).

Tabela 5.1: Propriedades dos segmentos do modelo de árvore arterial (DUAN; ZAMIR, 1986; DUAN; ZAMIR, 1984)

Artéria	Comprimento (cm)	Densidade ρ (g/cm^3)	Viscosidade μ_0 (g/cms)	Diâmetro (cm)	Módulo de Young (dyn/cm^2)
Aorta Descendente	25	0,960	0,0385	1,3	$4,8 \times 10^6$
Aorta Abdominal	11	1,134	0,0449	0,9	$1,0 \times 10^7$
Ilíaca	12	1,172	0,0472	0,6	$1,0 \times 10^7$
Femoral	10	1,235	0,0494	0,4	$1,0 \times 10^7$

Nas simulações realizadas, calculou-se a distribuição de amplitude de pressão ao longo da árvore arterial (Figura 5.1). Os resultados foram obtidos para quatro diferentes frequências e três diferentes cenários de escoamento/segmento: (i) escoamento viscoso em segmento

puramente elástico (cenário 1 da Seção 2.1.4), (ii) escoamento invíscido em segmento viscoelástico (cenário 2) e (iii) escoamento viscoso em segmento viscoelástico (cenário 3).

Os resultados obtidos nas simulações são mostrados nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 envolvendo a amplitude da pressão ao longo do modelo de árvore arterial. Nestas figuras, o comprimento de cada segmento arterial foi dimensionado para 1,0, de modo que o comprimento adimensional total da árvore é 4,0. O comprimento real é 58 cm. A amplitude da pressão também foi escalada pela pressão de entrada P_o , e os resultados finais são portanto mostrados em termos de amplitude de pressão adimensional $|P|$ versus a distância adimensional X do início da árvore.

5.1 ESCOAMENTO VISCOSO

Nas Figuras 5.2 e 5.3, o efeito da viscosidade do fluido é examinado separadamente considerando-se o escoamento em segmentos puramente elásticos com quatro valores diferentes de viscosidade do fluido, ou seja, $\mu = 0; 0,5\mu_0; 1,0\mu_0$ e $1,5\mu_0$, onde μ_0 é o valor base da viscosidade da Tabela 5.1. Observa-se que o efeito da viscosidade do fluido é reduzir o aumento global na amplitude da onda de pressão causada pelas reflexões das ondas à medida que a onda se desloca na direção à jusante. Além disso, modera os picos locais na distribuição de pressão.

5.2 SEGMENTO VISCOELÁSTICO

Nas Figuras 5.4, 5.5, o efeito da viscoelasticidade da parede do segmento de vaso é considerado separadamente considerando-se o escoamento invíscido e tomando-se quatro valores diferentes da viscoelasticidade da parede do segmento. O modelo viscoelástico proposto utilizado para fins destes cálculos é apresentado no cenário 2 da Seção 2.1.4, no qual a viscoelasticidade da parede do vaso é representada por um módulo de Young complexo. Estas figuras mostram os resultados para $\phi_0 = 0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ e 12° . Quando $\phi_0 = 0^\circ$ tem-se um valor representando uma parede puramente elástica e para $\phi_0 > 0$ tem-se a representação da viscoelasticidade. Nota-se a partir destas figuras que o efeito da viscoelasticidade,

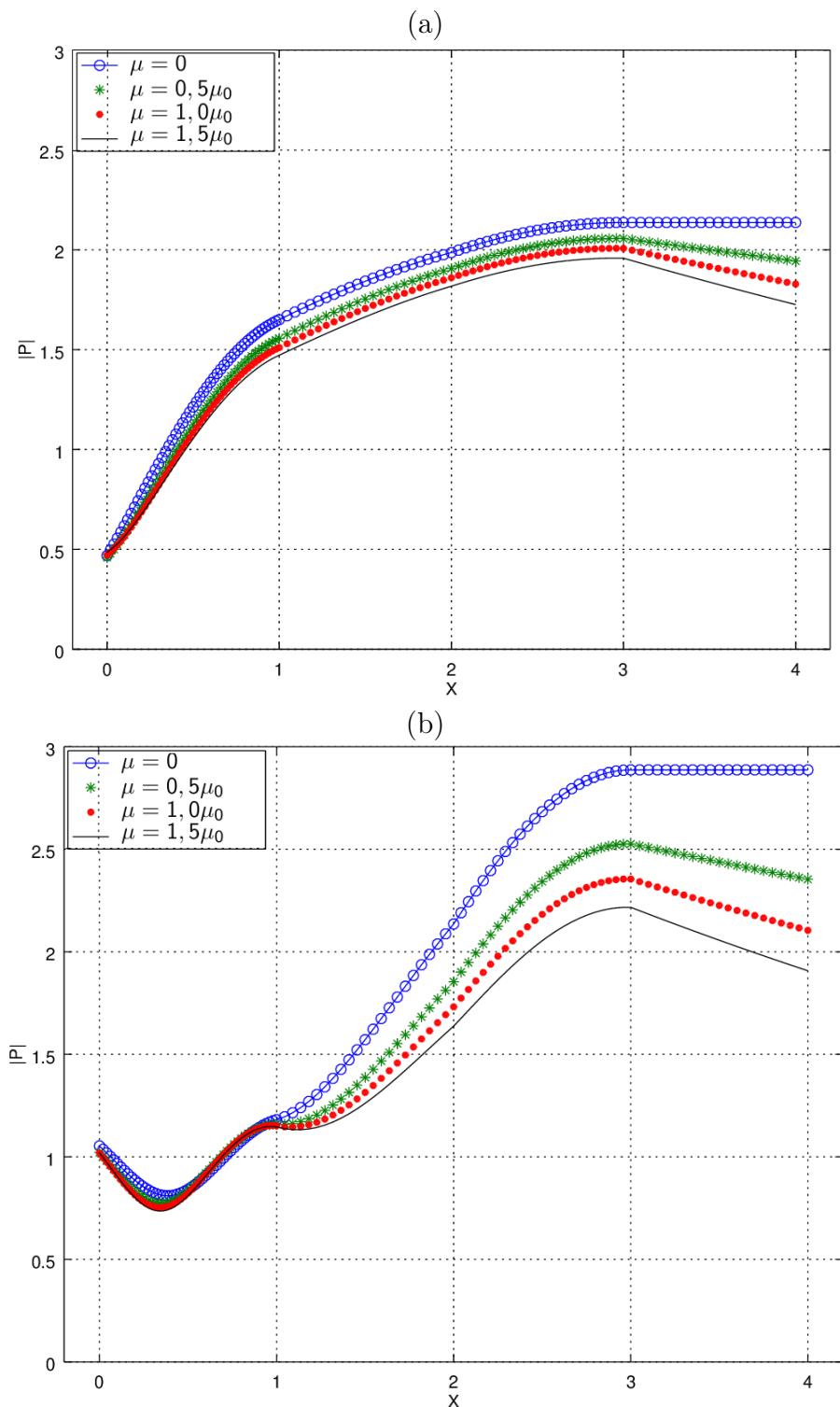


Figura 5.2: Amplitude da pressão $|P|$ ao longo da árvore arterial considerando diferentes viscosidades do fluido μ e frequências: (a) $f = 3,65 \text{ Hz}$, (b) $f = 7,30 \text{ Hz}$.

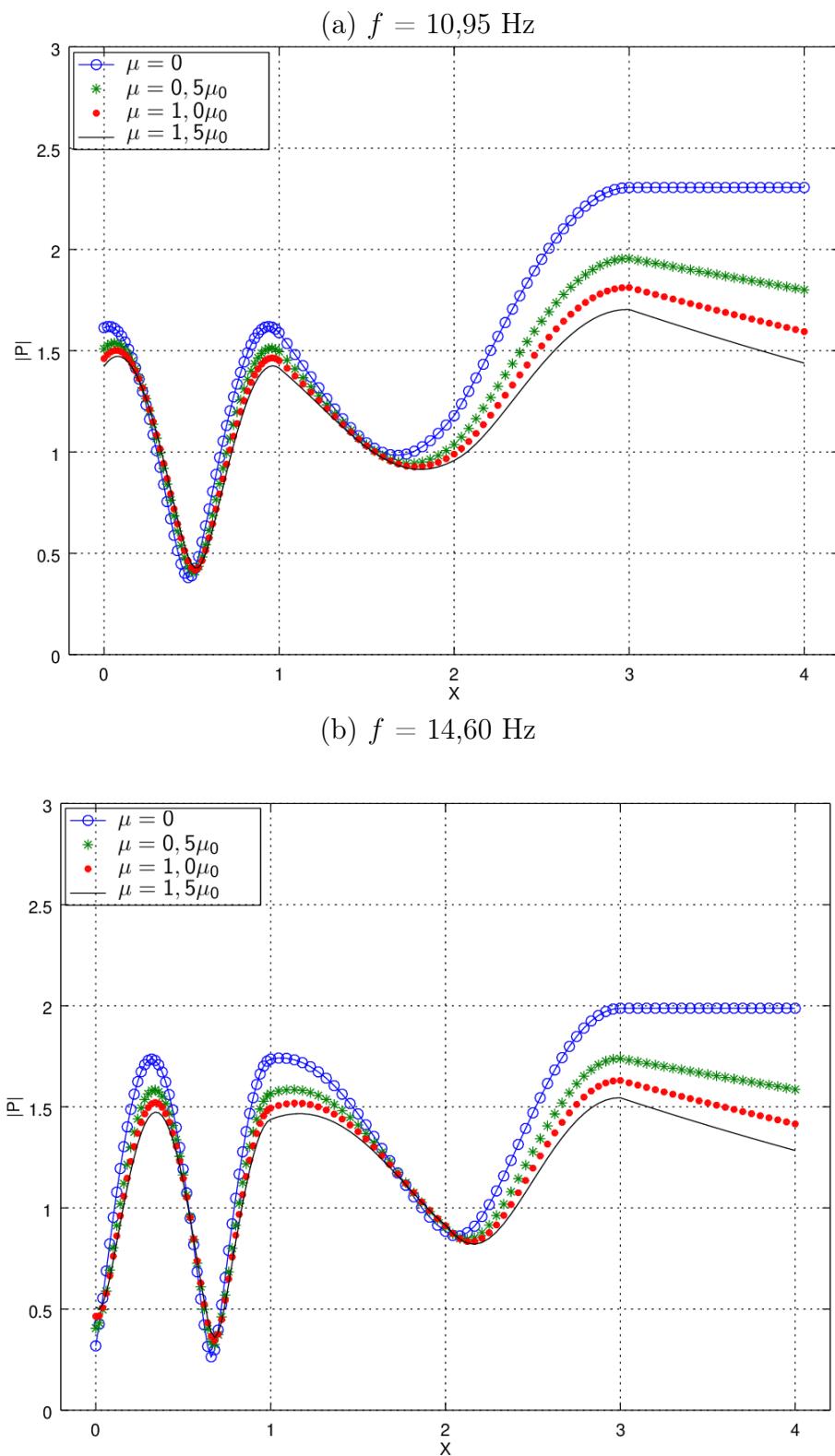


Figura 5.3: Amplitude da pressão $|P|$ ao longo da árvore arterial considerando diferentes viscosidades do fluido μ e frequências: (a) $f = 10,95 \text{ Hz}$, (b) $f = 14,60 \text{ Hz}$.

como o da viscosidade do fluido, é amortecer o aumento global da amplitude da onda de pressão causada pelas reflexões das ondas à medida que a onda se desloca na direção à jusante, bem como moderar os picos locais na distribuição de pressão.

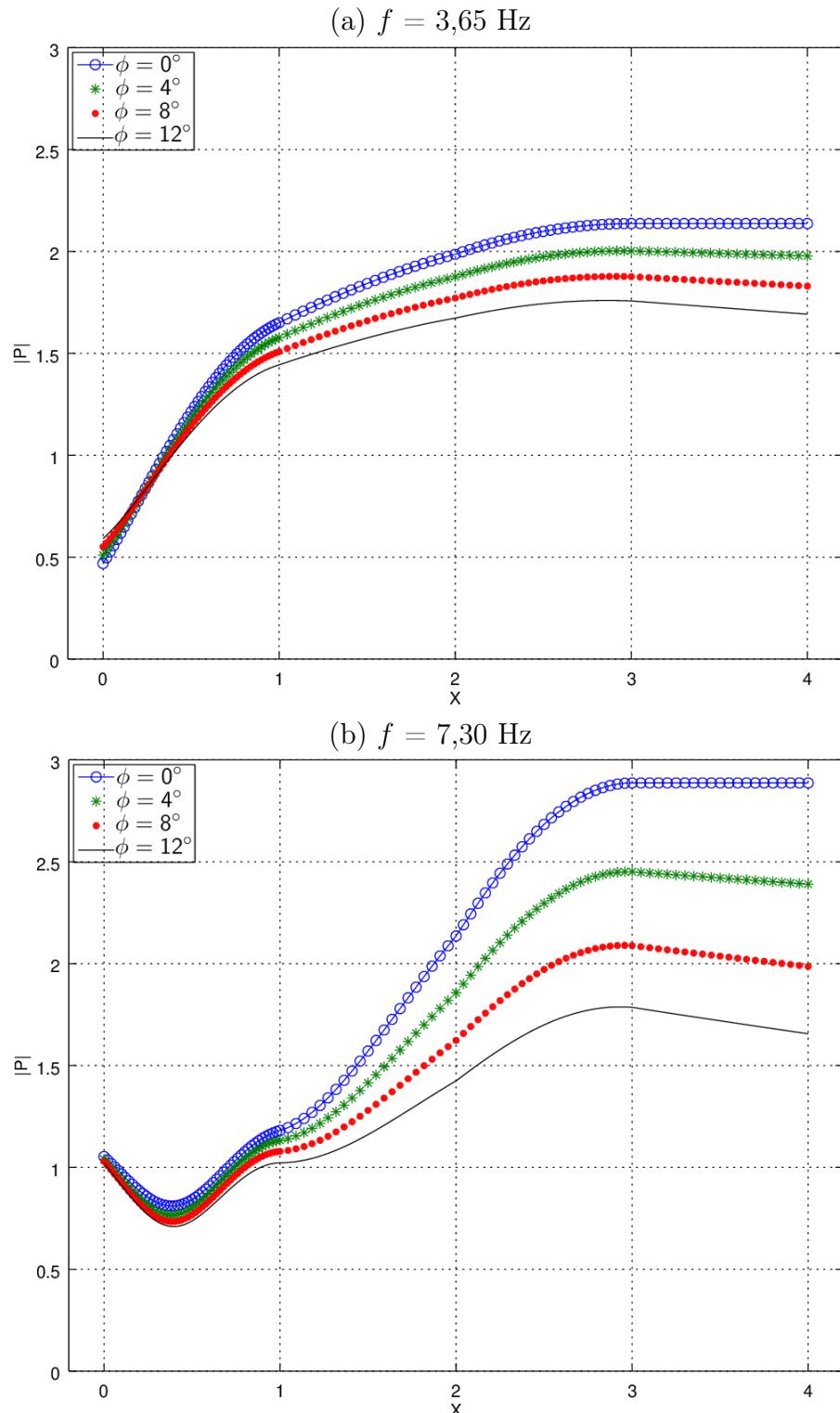


Figura 5.4: Amplitude da pressão $|P|$ ao longo da árvore arterial considerando diferentes valores de viscoelasticidade ϕ_0 e frequências: $f = 3,65 \text{ Hz}$ e $f = 7,30 \text{ Hz}$.

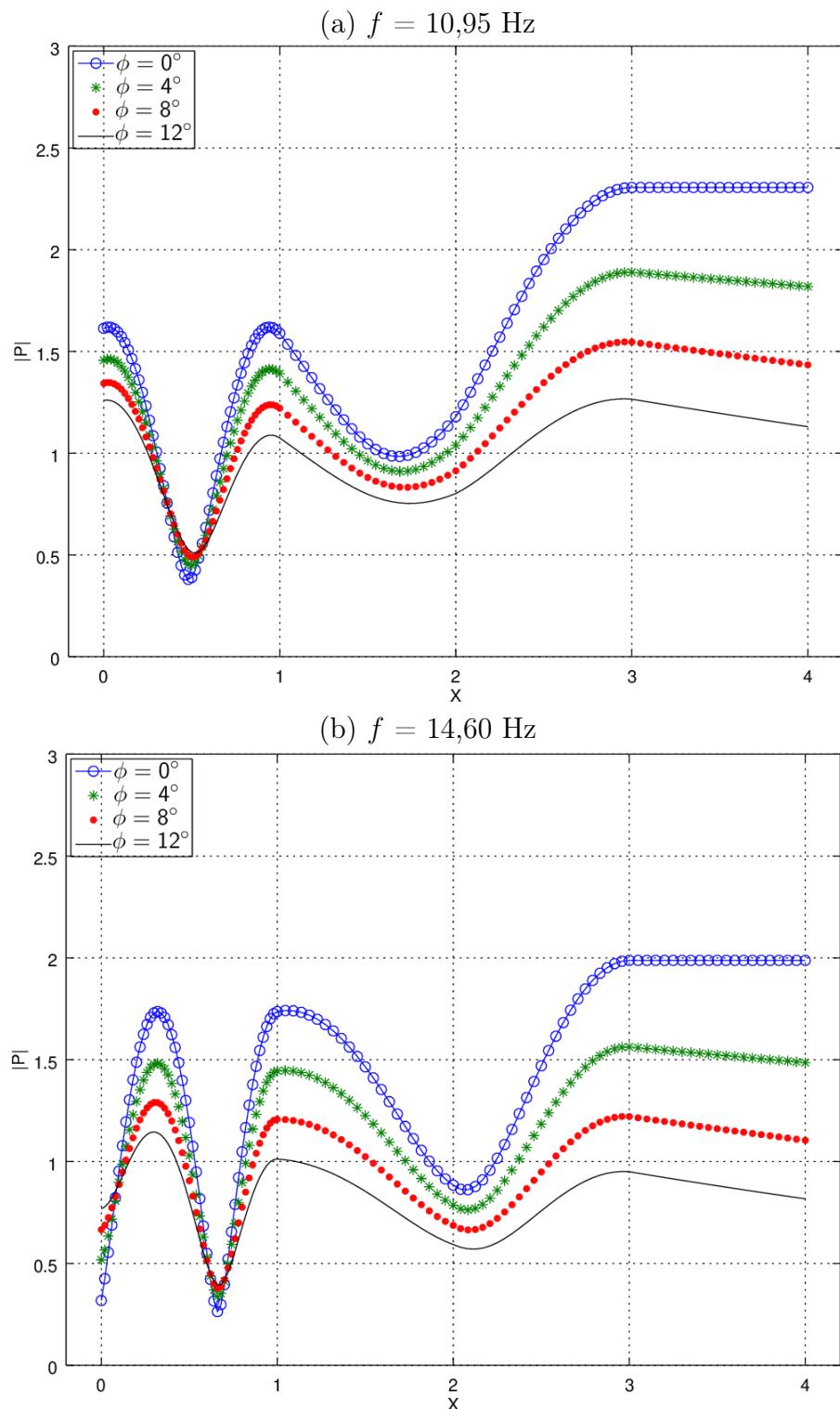


Figura 5.5: Amplitude da pressão $|P|$ ao longo da árvore arterial considerando diferentes valores de viscoelasticidade ϕ_0 e frequências: $f = 10,95 \text{ Hz}$ e $f = 14,60 \text{ Hz}$.

5.3 ESCOAMENTO VISCOSO EM SEGMENTO VISCOELÁSTICO

Nas Figuras 5.6, 5.7, o efeito da viscoelasticidade da parede do segmento é adicionada ao efeito do escoamento viscoso, adotando dois valores diferentes da viscoelasticidade e dois valores de viscosidade. O modelo utilizado no cenário 3 é a soma dos efeitos apresentados na Seção 2.1.4, adicionando o fator viscoso e o módulo de Young complexo. Estas figuras mostram o resultado para $\phi_0 = 0^\circ, 8^\circ$ e com as viscosidades $\mu = 0$ e $0,5\mu_0$. Ao visualizar os efeitos da viscoelasticidade e viscosidade na amplitude da onde de Pressão P , é observado o amortecimento global da amplitude de onda de pressão, somado à moderação dos picos locais na distribuição de pressão. Entretanto, o efeito somado dos fenômenos causa um amortecimento mais eficaz que o visto nos outros cenários.

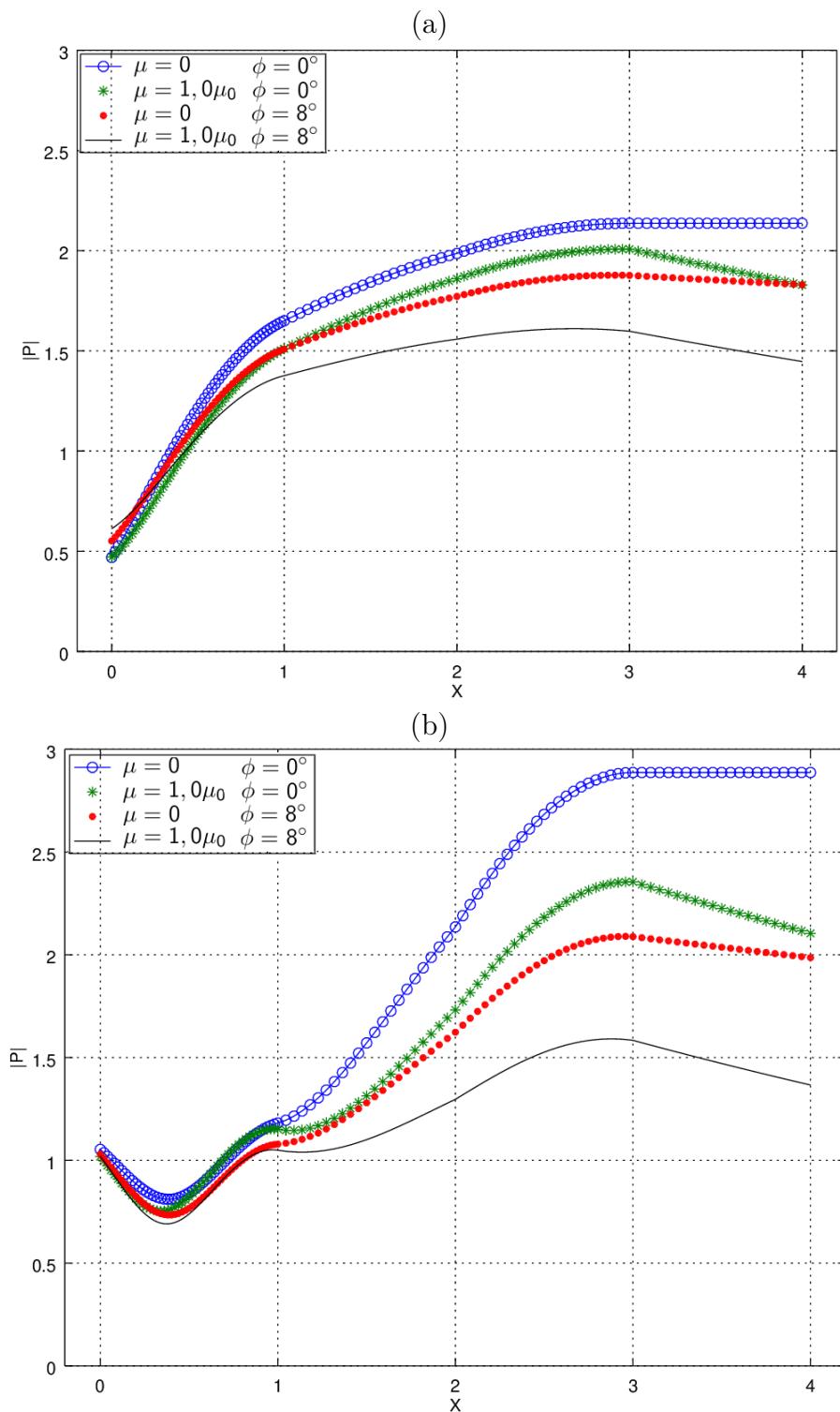


Figura 5.6: Amplitude da pressão $|P|$ ao longo da árvore arterial considerando diferentes valores de viscoelasticidade ϕ_0 e frequências: (a) $f = 3,65$ Hz, (b) $f = 7,30$ Hz.

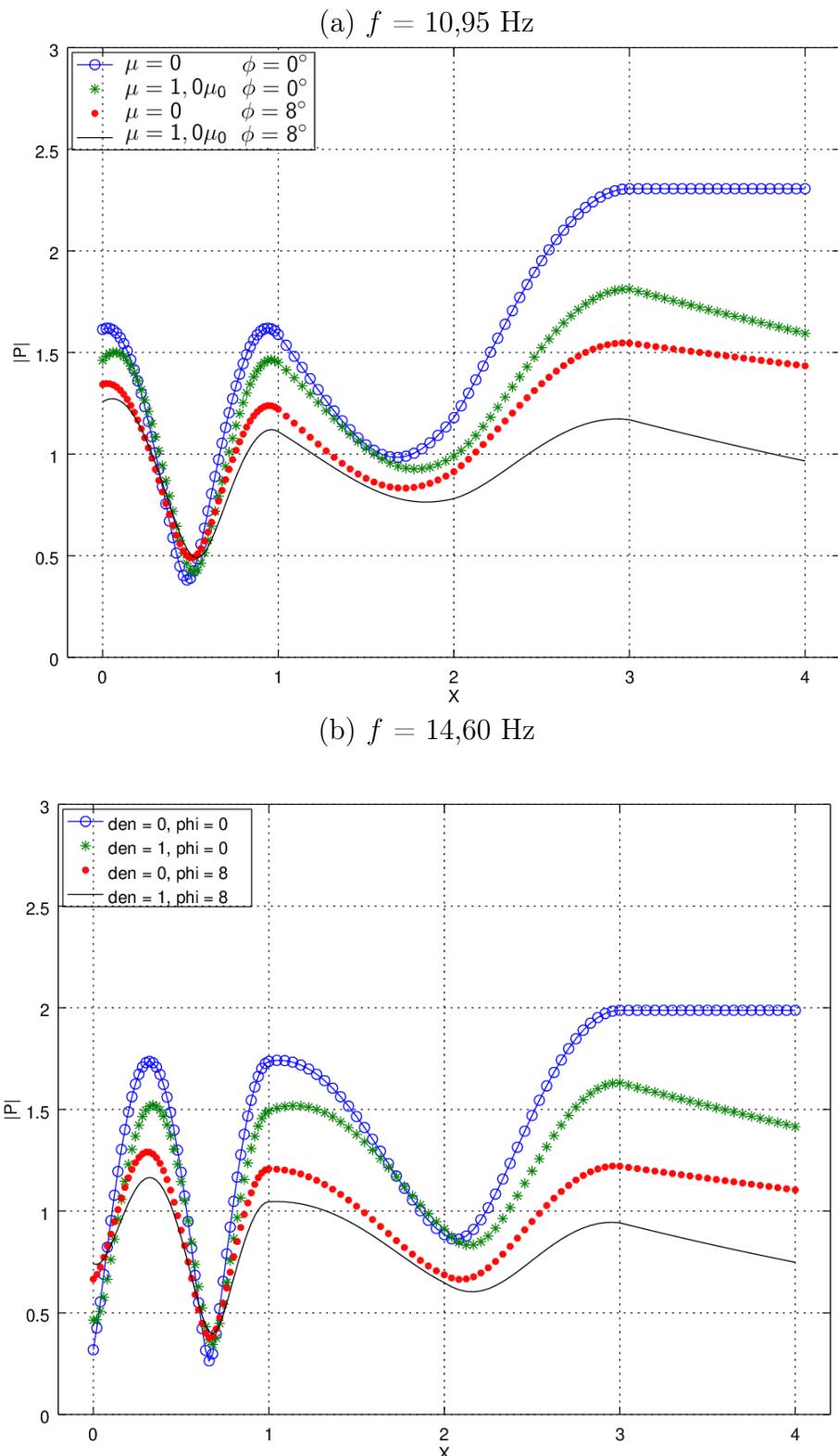


Figura 5.7: Amplitude da pressão $|P|$ ao longo da árvore arterial considerando diferentes valores de viscoelasticidade ϕ_0 e frequências: (a) $f = 10,95 \text{ Hz}$, (b) $f = 14,60 \text{ Hz}$.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Em relação a hemodinâmica, os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com aqueles obtidos por Duan e Zamir(DUAN; ZAMIR, 1995) considerando a propagação de uma onda harmônica simples nos três cenários abordados nas simulações.

Em destaque, visando contribuir na investigação do método desenvolvido por Duan e Zamir, curvas de impedância de entrada do modelo de árvore canina aqui considerada foram apresentadas. Estas curvas apresentam comportamento que pode ser observado em dados experimentais.

Este trabalho resultou no desenvolvimento de uma nova ferramenta computacional descrita no Capítulo 3, que permite a simulação de escoamento sanguíneo pulsátil em modelos de árvores arteriais no contexto de Duan e Zamir. A ferramenta computacional está disponibilizada no repositório de código aberto Bitbucket:

- **Link para Re却itório:** <http://bit.ly/2KwZ4np>

As informações necessárias para compilar a ferramenta computacional e seus ambientes esta inclusa no Anexo e na página inicial do repositório.

Como trabalhos futuros, destacam-se:

- Analisar hemodinamicamente modelos de árvores gerados no contexto do método CCO (*Constrained Constructive Optimization*) (KARCH et al., 1999; QUEIROZ, 2013; QUEIROZ et al., 2015; BRITO et al., 2017);
- Investigar a influência da escolha parâmetros na resposta do método, tais como: módulo de Young e espessura do vaso;
- Analisar o resultado hemodinâmico utilizando um outro esquema iterativo;
- Quantificação do aumento/perda de velocidade ao utilizar múltiplas threads;

A PROCESSO DE COMPILAÇÃO

A.1 INSTALAR QT

Rodar os comandos para baixar o arquivo da versão da biblioteca Qt e a instala.

- wget http://download.qt.io/official_releases/qt/5.15/5.15.0/qt-opensource-linux-x64-5.15.0.run
- chmod +x qt-opensource-linux-x64-5.15.0.run
- ./qt-opensource-linux-x64-5.15.0.run

Ou os comandos para buscar as mesma bibliotecas via *apt-get*:

- sudo apt-get install qtbase5-dev
- sudo apt-get install qtdeclarative5-dev

Instalar a biblioteca *Qt* de acordo com as instruções dadas pelo guia de instalação, instalar *Qt Creator* caso se deseje alterar o código-fonte.

A.2 INSTALAR BIBLIOTECAS SECUNDÁRIAS

Outras bibliotecas menores também são necessárias para compilar corretamente a ferramenta computacional, o comando abaixo instala todas elas:

- sudo apt-get install build-essential
- sudo apt-get install libfontconfig1
- sudo apt-get install mesa-common-dev
- sudo apt-get install libglu1-mesa-dev -y
- sudo apt-get install freeglut3-dev
- sudo apt-get install libflann-dev

A.3 CLONAR E COMPILAR REPOSITÓRIO

```
git clone https://MrBlackPower@bitbucket.org/MrBlackPower/igu.git
```

A.3.1 COMPILAR COM QT CREATOR

1. Abrir pasta do projeto *Project*

- Selecionar arquivo CMakeLists.txt
- Configura projeto para ser compilado.
- Escolher o ambiente computacional desejado e rodar o projeto.

A.3.2 OUTROS

Caso o erro "*cannot find -lGL*" permaneça, rode os seguintes comandos:

- sudo rm /usr/lib/x86_64-linux-gnu/libGL.so
- sudo ln -s /usr/lib/libGL.so.1 /usr/lib/x86_64-linux-gnu/libGL.so

B FORMATO DE ARQUIVO DE COMANDOS

Algoritmo 5: Cálculos hemodinâmicos do modelo de árvore arterial (*M.A.A*) em comandos que a ferramenta computacional é capaz de processar.

- 1 object create artery_tree DUAN_AND_ZAMIR obj_t5 el_t5
 - 2 object iteration_factories set obj_t5 DUAN_AND_ZAMIR
 - 3 object set obj_t5
 - 4 object set_field obj_t5 FIELD FREQUENCY 0 3.65
 - 5 object set_field obj_t5 FIELD ARTERY_CHOOSE_MODE 0 HIGHEST
 - 6 object go obj_t5
 - 7 object create graphic BLANK obj_t6 el_t6
 - 8 object iteration_factories set obj_t6 OBJECT_READ
 - 9 object set obj_t6
 - 10 object set_field obj_t6 FIELD READ_ELEMENT_NAME 0 obj_t5
 - 11 object set_field obj_t6 FIELD READ_FIELD 0 PRESSURE_WAVE
 - 12 object set_field obj_t6 FIELD READ_CELL_TYPE 0 FIELD
 - 13 object go obj_t6
 - 14 object export obj_t6 IMAGE_PNG pressure_3_65.png
 - 15 object set_field obj_t6 FIELD READ_FIELD 0 FLOW_WAVE
 - 16 object go obj_t6
 - 17 object export obj_t6 IMAGE_PNG flow_3_65.png
 - 18 object set_field obj_t5 FIELD FREQUENCY 0 7.30
 - 19 object go obj_t5
 - 20 object set_field obj_t6 FIELD READ_FIELD 0 PRESSURE_WAVE
 - 21 object set_field obj_t6 FIELD READ_CELL_TYPE 0 FIELD
 - 22 object go obj_t6
 - 23 object export obj_t6 IMAGE_PNG pressure_7_30.png
 - 24 object set_field obj_t6 FIELD READ_FIELD 0 FLOW_WAVE
 - 25 object go obj_t6
-

Algoritmo 6: Cálculos hemodinâmicos do modelo de árvore arterial (*MAA*) em comandos que a ferramenta computacional é capaz de processar.

```

1 object export obj_t6 IMAGE_PNG flow_7_30.png
2 object set_field obj_t5 FIELD FREQUENCY 0 10.95
3 object go obj_t5
4 object set_field obj_t6 FIELD READ_FIELD 0 PRESSURE_WAVE
5 object set_field obj_t6 FIELD READ_CELL_TYPE 0 FIELD
6 object go obj_t6
7 object export obj_t6 IMAGE_PNG pressure_10_95.png
8 object set_field obj_t6 FIELD READ_FIELD 0 FLOW_WAVE
9 object go obj_t6
10 object export obj_t6 IMAGE_PNG flow_10_95.png
11 object set_field obj_t5 FIELD FREQUENCY 0 14.60
12 object go obj_t5
13 object set_field obj_t6 FIELD READ_FIELD 0 PRESSURE_WAVE
14 object set_field obj_t6 FIELD READ_CELL_TYPE 0 FIELD
15 object go obj_t6
16 object export obj_t6 IMAGE_PNG pressure_14_60.png
17 object set_field obj_t6 FIELD READ_FIELD 0 FLOW_WAVE
18 object go obj_t6
19 object export obj_t6 IMAGE_PNG flow_14_60.png
20 object delete obj_t6
21 object delete obj_t5

```

C FORMATO DE ARQUIVO DE ELEMENTO INTELIGENTE

```

<WISE_ELEMENT>
    <!-- XML for Wise Element el1 -->
    <ELEMENT_PARAMS NAME="el1" FILENAME_VTK="wise_el1_ACJHBFGCGG_0_0.vtk" FILENAME_XML="wise_el1_ACJHBFGCGG_0_0.xml" TYPE="GRAPHIC" ELEMENT_KEY="ACJHBFGCGG" ID="0" DT="1.000000" MODEL_TIME="0.000000" INSTANCE="0" STATUS="HOT" />
    <WISE_STRUCTURE>
        <!-- XML for Wise Object el1 -->
        <STRUCTURE_PARAMETERS NAME="el1" STRUCTURE_ID="0" STRUCTURE_KEY="DGJJGJBIAH" N_POINTS="101" N_CELLS="0" N_LINES="0" N_FIELDS="0" MAX_X="360" MAX_Y="100" MAX_Z="0" MIN_X="0" MIN_Y="-1" MIN_Z="0" IMPORTED="0" IMPORT_TYPE="3" IMPORT_FILENAME="UNTITLED" />
        <STRUCTURE>
            <POINTS>
                <POINT ID="0" X="0.0000000000" Y="0.0000000000" Z="0.0000000000" />
                ...
                <POINT ID="100" X="360.0000000000" Y="0.0000000000" Z="0.0000000000" />
            </POINTS>
            <LINES />
            <CELLS />
        </STRUCTURE>
        <DATA>
            <POINT_DATA>
                <INFO NAME="VALUE" TYPE="DOUBLE">
                    <DATA VALUE="0.0000000000" />
                    ...
                    <DATA VALUE="0.0000000000" />
                </INFO>
            </POINT_DATA>
            <CELL_DATA />
            <LINE_DATA />
            <FIELD />
        </DATA>
    </WISE_STRUCTURE>
</WISE_ELEMENT>

```

D FORMATO DE ARQUIVO DE OBJETO INTELIGENTE

```

<WISE_OBJECT>
<!— XML for Wise Object obj1 —>
<OBJECT_PARAMS NAME="obj1" STATUS="GO" TYPE="ARTERY_TREE" DT="1.000000" MODEL_TIME="0.000000"
    FRAMES="0" ITERATIONS="0" ITERATION_FACTORY_SET="1" ITERATION_FACTORY="DUAN_AND_ZAMIR"
    GRAPHIC_FACTORY_SET="1" GRAPHIC_FACTORY="GRAPHIC_ARTERY_TREE_FACTORY" GRAPHIC_MODEL_SET="1"
    />
<WISE_COLLECTION>
<COLLECTION_PARAMS ID="0" N="13" />
<WISE_OVEN>
<WISE_ELEMENT>
<!— XML for Wise Element el1 —>
<ELEMENT_PARAMS NAME="el1" FILENAME_VTK="wise_el1_JGCAHIEHDD_0_0.vtk" FILENAME_XML=
    wise_el1_JGCAHIEHDD_0_0.xml" TYPE="ARTERY_TREE" ELEMENT_KEY="JGCAHIEHDD" ID="0" DT=
    1.000000" MODEL_TIME="12.000000" ITERATION="0" STATUS="HOT" />
<WISE_STRUCTURE>
<!— XML for Wise Object el1 —>
<STRUCTURE_PARAMETERS NAME="el1" STRUCTURE_ID="0" STRUCTURE_KEY="HDAGBBBCJC" N_POINTS="7"
    N_CELLS="0" N_LINES="0" N_FIELDS="0" MAX_X="12" MAX_Y="28" MAX_Z="0" MIN_X="-8" MIN_Y="-27"
    MIN_Z="0" IMPORTED="0" IMPORT_TYPE="3" IMPORT_FILENAME="UNTITLED" />
<STRUCTURE>
<POINTS>
<POINT ID="0" X="2.0000000000" Y="28.0000000000" Z="0.0000000000" />
<POINT ID="1" X="2.0000000000" Y="3.0000000000" Z="0.0000000000" />
<POINT ID="2" X="2.0000000000" Y="-8.0000000000" Z="0.0000000000" />
<POINT ID="3" X="-5.0000000000" Y="-17.7467940000" Z="0.0000000000" />
<POINT ID="4" X="-8.0000000000" Y="-27.2861860000" Z="0.0000000000" />
<POINT ID="5" X="9.0000000000" Y="-17.7467940000" Z="0.0000000000" />
<POINT ID="6" X="12.0000000000" Y="-27.2861860000" Z="0.0000000000" />
</POINTS>
<LINES>
<LINE ID="0" A="0" B="1" />
<LINE ID="1" A="1" B="2" />
<LINE ID="2" A="2" B="3" />
<LINE ID="3" A="3" B="4" />
<LINE ID="4" A="2" B="5" />
<LINE ID="5" A="5" B="6" />
</LINES>
<CELLS />
</STRUCTURE>
<DATA>
<POINT_DATA />
<CELL_DATA>
<INFO NAME="RADIUS" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="0.6500000000" />
...
<DATA VALUE="0.2000000000" />
</INFO>
<INFO NAME="DENSITY" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="0.9600000000" />
...
<DATA VALUE="1.2350000000" />
</INFO>
<INFO NAME="YOUNG_MODULUS" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="480000.000000000" />
...
<DATA VALUE="1000000.000000000" />
</INFO>
<INFO NAME="VISCOSITY" TYPE="DOUBLE">

```

```

<DATA VALUE="0.0385000000" />
...
<DATA VALUE="0.0494000000" />
</INFO>
<INFO NAME="ALPHA" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="-1.0000000000" />
...
<DATA VALUE="-1.0000000000" />
</INFO>
<INFO NAME="WAVE_SPEED" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="500.0000000000" />
...
<DATA VALUE="636.2847629758" />
</INFO>
<INFO NAME="WALL_THICKNESS" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="0.0650000000" />
...
<DATA VALUE="0.0200000000" />
</INFO>
<INFO NAME="LENGTH" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="25.0000000000" />
...
<DATA VALUE="9.999999865" />
</INFO>
<INFO NAME="PHI" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="0.0000000000" />
...
<DATA VALUE="0.0000000000" />
</INFO>
<INFO NAME="ANGULAR_FREQUENCY" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="86.0010988920" />
...
<DATA VALUE="86.0010988920" />
</INFO>
<INFO NAME="BETA_ABS" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="4.3000549446" />
...
<DATA VALUE="1.3516133621" />
</INFO>
<INFO NAME="BETA_REAL" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="4.3000549446" />
...
<DATA VALUE="1.3516133621" />
</INFO>
<INFO NAME="BETA_IMAGE" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="0.0000000000" />
...
<DATA VALUE="0.0000000000" />
</INFO>
<INFO NAME="VISCOS_WAVE_SPEED_ABS" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="1.0000000000" />
...
<DATA VALUE="1.0000000000" />
</INFO>
<INFO NAME="VISCOS_WAVE_SPEED_REAL" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="-1.0000000000" />
...
<DATA VALUE="-1.0000000000" />
</INFO>
<INFO NAME="VISCOS_WAVE_SPEED_IMAGE" TYPE="DOUBLE">

```

```

<DATA VALUE="0.0000000000" />
...
<DATA VALUE="0.0000000000" />
</INFO>
<INFO NAME="VISCOSY_YOUNG_MODULUS_ABS" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="1.0000000000" />
...
<DATA VALUE="1.0000000000" />
</INFO>
<INFO NAME="VISCOSY_YOUNG_MODULUS_REAL" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="-1.0000000000" />
...
<DATA VALUE="-1.0000000000" />
</INFO>
<INFO NAME="VISCOSY_YOUNG_MODULUS_IMAGE" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="0.0000000000" />
...
<DATA VALUE="0.0000000000" />
</INFO>
<INFO NAME="FLOW_ABS" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="0.2712788317" />
...
<DATA VALUE="0.1154357112" />
</INFO>
<INFO NAME="FLOW_REAL" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="-0.0642456722" />
...
<DATA VALUE="-0.0862382822" />
</INFO>
<INFO NAME="FLOW_IMAGE" TYPE="DOUBLE">
<DATA VALUE="0.2635615642" />
...
<DATA VALUE="-0.0767356639" />
</INFO>
<INFO NAME="FLOW_WAVE" TYPE="VECTOR">
<DATA VALUE="0.0043418095_0.0042507071_0.0041518920_0.0040455728_0.0039319766_0.0038113495_
0.0036839567_0.0035500842_0.0034100397_0.0032641549_0.0031127882_0.0029563287_0.0027952022_
_0.0026298798_0.0024608902_0.0022888384_0.0021144345_0.0019385376_0.0017622264_
0.0015869140_0.0014145382_0.0012478823_0.0010911088_0.0009505832_0.0008358491_0.0007597172_
_0.0007349176_0.0007666319_0.0008483353_0.0009669300_0.0011099295_0.0012682282_
0.0014357897_0.0016086623_0.0017841919_0.0019605202_0.0021362844_0.0023104383_0.0024821444_
_0.0026507080_0.0028155347_0.0029761038_0.0031319507_0.0032826544_0.0034278298_
0.0035671222_0.0037002030_0.0038267672_0.0039465316_0.0040592334_0.0041646288_0.0042624931_
_0.0043526199_0.0044348206_0.0045089248_0.0045747794_0.0046322496_0.0046812177_
0.0047215841_0.0047532669_0.0047762019_0.0047903426_0.0047956605_0.0047921449_0.0047798028_
_0.0047586593_0.0047287569_0.0046901564_0.0046429360_0.0045871919_0.0045230378_
0.0044506052_0.0043700434_0.0042815193_0.0041852177_0.0040813415_0.0039701115_0.0038517676_
_0.0037265686_0.0035947936_0.0034567429_0.0033127400_0.0031631342_0.0030083040_
0.0028486623_0.0026846642_0.0025168177_0.0023457001_0.0021719832_0.0019964706_0.0018201591_
_0.0016443352_0.0014707365_0.0013018221_0.0011412251_0.0009944780_0.0008699883_
0.0007796313_0.0007368490_0.0007501554" />
...
</WISE_OBJECT>
```

REFERÊNCIAS

- ANLIKER, M.; ROCKWELL, R.; ODGEN, E. Nonlinear analysis of flow pulses and shock waves in arteries. *ZAMP*, n. 22, p. 217–246, 1971.
- AVOLIO, A. Multi-branched model of the human arterial system. *Med. Biol. Eng. Comput*, n. 18, p. 709–718, 1980.
- BERTAGLIA, G. et al. Computational hemodynamics in arteries with the one-dimensional augmented fluid-structure interaction system: viscoelastic parameters estimation and comparison with in-vivo data. *Journal of Biomechanics*, v. 100, p. 109595, 2020. ISSN 0021-9290. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021929019308589>>.
- BRITO, P. et al. Automatic construction of 3d models of arterial tree incorporating the fahraeus-lindqvist effect. *Revista Eletrônica Paulista de Matemática*, n. 10, p. 38–49, 2017.
- DUAN, B.; ZAMIR, M. Biodynamics: Circulation. *New York: Springer-Verlag*, 1984.
- DUAN, B.; ZAMIR, M. Effect of dispersion of vessel diameters and lengths in stochastic networks. i. modeling of microcirculatory flow. *Microvascular Research*, n. 31, p. 203–222, 1986.
- DUAN, B.; ZAMIR, M. Viscous damping in one dimensional wave transmission. *J. Acoust. Soc. Am.*, n. 92, p. 3358–3363, 1995.
- FORMAGGIA, L. et al. Computer methods in applied mechanics and engineering. *Revista Eletrônica Paulista de Matemática*, n. 191, p. 561–582, 2001.
- FORMAGGIA, L.; LAMPONI, D.; QUARTERONI, A. One-dimensional models for blood flow in arteries. *Journal of Engineering Mathematics*, n. 47, p. 251–276, 2003.
- FUNG, Y.-c. *Biomechanics: mechanical properties of living tissues*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013.
- KARCH, R. et al. A three-dimensional model for arterial tree representation, generated by constrained constructive optimization. *Computers in biology and medicine*, n. 29, p. 19–38, 1999.
- KARREMAN, G. Some contributions to the mathematical biology of blood circulation. reflection of pressure waves in the arterial system. *Bull. Math. Biophys.*, n. 14, p. 327–350, 1952.
- KHRONOS, G. *OpenGL*. 2019. Disponível em: <<https://www.opengl.org/>>.
- KOUCHOUKOS, N.; SHEPPARD, L.; MCDONALD, D. A. Estimation of stroke volume in the dog by a pulse contour method. *Circ. Res.*, n. 26, p. 611–23, 1970.
- LIGHTHILL, M. Mathematical biofluidmechanics. *Philadelphia: Society for Industrial & Applied Mathematics*, 1975.

- MATES, R.; KLOCKE, F.; CANTY, J. Coronary capacitance. *Progress in Cardiovascular Diseases*, n. 31, p. 1–15, 1988.
- MCDONALD, D. A. Blood flow in arteries. *Baltimore: Williams & Wilkins*, 1974.
- PARKER, A. *Algorithms and Data Structures in C++*. [S.l.: s.n.], 1959.
- PESKIN, C. Flow patterns around heart valves: a numerical method. *J. Comput. Phys.*, n. 10, p. 252–271, 1972.
- QT. 2019. Disponível em: <<https://doc-snapshots.qt.io/qt5-5.9/classes.html>>.
- QUARTERONI, A.; FORMAGGIA, L. Mathematical modelling and numerical simulation of the cardiovascular system. In: *Computational Models for the Human Body*. Elsevier, 2004, (Handbook of Numerical Analysis, v. 12). p. 3–127. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570865903120017>>.
- QUEIROZ, R. *Construção automática de modelos de árvores circulatórias e suas aplicações em hemodinâmica computacional*. Tese (Doutorado) — Laboratório Nacional de Computação Científica, 2013.
- QUEIROZ, R. et al. Ifmbe proceedings. 49ed.: Springer international publishing. *Baltimore: Williams & Wilkins*, p. 884–887, 2015.
- STERGIOPULOS, N.; YOUNG, D.; ROGGE, T. R. Computer simulation of arterial flow with applications to arterial and aortic stenoses. *Journal of Biomechanics*, n. 25, p. 1477–1488, 1992.
- TAKAHASHI, T. et al. Association of pulse wave velocity and pressure wave reflection with the ankle-brachial pressure index in japanese men not suffering from peripheral artery disease. *Atherosclerosis*, v. 317, p. 29–35, 2021. ISSN 0021-9150. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021915020315513>>.
- TAYLOR, C.; HUGHES, T.; ZARINS, C. Finite element modeling of three-dimensional pulsatile flow in abdominal aorta: relevance to atherosclerosis. *Annals of Biomedical Engineering*, n. 26, p. 975–987, 1998.
- TAYLOR, M. The input impedance of an assembly of randomly branching elastic tubes. *Biophys. J*, n. 6, p. 29–51, 1966.
- THE VTK user's guide. [S.l.: s.n.].
- WELICKI, L.; YODER, J. W.; WIRFS-BROCK, R. *The Dynamic Factory Pattern*. [S.l.]: Association for Computing Machinery, 2008.
- WOMERSLEY, J. Xxiv. oscillatory motion of a viscous liquid in a thin-walled elastic tube—i: The linear approximation for long waves. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Taylor & Francis, v. 46, n. 373, p. 199–221, 1955.
- ZAMIR, M. ptimality principles in arterial branching. *J. Theor. Biol.*, n. 62, p. 227–251, 1976.
- ZAMIR, M.; PHIPPS, S. Network analysis of an arterial tree. *American Journal of Physiology*, n. 21, p. 25–34, 1988.