

Ravi Motta Stoutz

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE FLUXOS DE TRABALHO
DE SIMULAÇÕES DE ILUMINAÇÃO NATURAL EM
PROCESSOS DE PROJETO INICIADOS EM TECNOLOGIA
BIM**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Professor Dr. Anderson Claro.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Stoutz, Ravi Motta
ESTUDO COMPARATIVO ENTRE FLUXOS DE TRABALHO DE
SIMULAÇÕES DE ILUMINAÇÃO NATURAL EM PROCESSOS DE
PROJETO INICIADOS EM TECNOLOGIA BIM / Ravi Motta
Stoutz; orientador, Anderson Claro, 2017.
220p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de
Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo,
Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

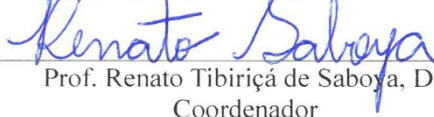
1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Simulação. 3.
Iluminação Natural. 4. Processo de Projeto. 5. BIM.
I. Claro, Anderson. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Ravi Motta Stoutz

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE FLUXOS DE TRABALHO
DE SIMULAÇÕES DE ILUMINAÇÃO NATURAL EM
PROCESSOS DE PROJETO INICIADOS EM TECNOLOGIA
BIM**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Arquitetura e Urbanismo”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina.

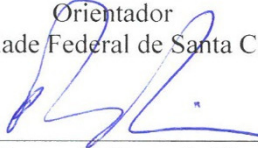
Florianópolis, 25 de Agosto de 2017.


Prof. Renato Tibiriçá de Saboya, Dr.
Coordenador

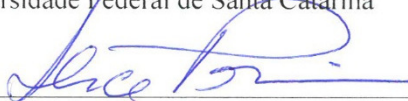
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Anderson Claro
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. PhD. Fernando Oscar Ruttkay Pereira
Universidade Federal de Santa Catarina



Profa. PhD. Alice Theresinha Cybis Pereira
Universidade Federal de Santa Catarina



Profa. Dra. Regina Coeli Ruschel
Universidade Estadual de Campinas

Dedico este trabalho
Ao meu filho, Tomás
À minha mãe, Vera
Ao meu pai, Mahlon (*In Memoriam*)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Anderson Claro, pela dedicação e parceria ao longo de todo o trabalho.

Aos professores:

Prof. Dr. Anderson Claro

Prof. PhD. Fernando Oscar Ruttkay Pereira

Prof. PhD. Roberto Lamberts

Prof. Dr. Martin Ordenes Mizgier

Profa. Dra. Veridiana Atanasio

Profa. Dra. Margarita Nilda Barretto Angeli

Prof. Dr. Rogério de Souza Versage

Pela importante base de conhecimentos transmitida ao longo das disciplinas do programa.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo apoio financeiro

Aos colegas do Laboratório de Conforto Ambiental | LabCon.

Aos profissionais do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo | Pós-Arq.

Aos membros da banca examinadora:

Prof. PhD. Fernando Oscar Ruttkay Pereira

Profa. PhD. Alice Theresinha Cybis Pereira

Prof. PhD. Regina Coeli Ruschell

À Laura Torres, pelo trabalho de revisão dessa dissertação.

À Luciana Guizan, pelo apoio e por todos os bons momentos compartilhados ao longo do percurso.

Aos amigos Angoleiros, pela parceria e disciplina que se mostraram indispensáveis durante essa jornada.

“Nós nascemos da luz. As estações são sentidas através da luz. Nós apenas conhecemos o mundo conforme ele é despertado pela luz... Para mim, a luz natural é a única luz, pois ela tem humor – ela dá uma base de comum acordo ao homem – ela nos põe em contato com o eterno. A luz natural é a única luz que faz a arquitetura ser arquitetura.”

(Louis I. Kahn)

RESUMO

O uso de ferramentas de simulação da iluminação natural pode contribuir para o aprimoramento do desempenho ambiental dos edifícios. Nesse sentido a atuação dos arquitetos e a adoção de estratégias apropriadas desde as etapas iniciais de projeto são determinantes, muito embora analisar o desempenho da iluminação natural por meio de simulações não seja uma prática comum entre arquitetos projetistas. A recente implementação de ferramentas e processos de Modelagem das Informações da Construção (BIM – da expressão em inglês *Building Information Modeling*) no Brasil é entendida como uma importante oportunidade para promover maior integração das simulações e análises da iluminação natural aos processos de projeto. O estudo tem por objetivo comparar três fluxos de trabalho para a realização de simulações e análises de iluminação natural partindo de um modelo BIM desenvolvido no Revit. Busca em última instância identificar suas potencialidades e limitações para a efetiva integração às etapas do processo de projeto. Foram consideradas duas condições para essa integração: que as simulações e análises sejam realizadas por um arquiteto projetista ou por um especialista em simulações colaborando com a equipe de projeto. Os fluxos de trabalho são definidos por programas que representam três abordagens distintas de simulação. Esses fluxos de trabalho são descritos a partir de um experimento indireto que toma como objeto de estudo o projeto arquitetônico para um edifício comercial em Belo Horizonte. Em seguida, são comparados com base nas características dos programas de simulação que utilizam e nos tipos de simulações e análises que permitem realizar. Por fim, são comparados resultados de simulações estáticas e dinâmicas obtidos com cada programa que define os fluxos de trabalho. Os resultados das simulações estáticas mostraram-se muito semelhantes graficamente, enquanto diferenças mais acentuadas foram observadas nos resultados de simulações dinâmicas, tanto gráfica quanto numericamente. A análise comparativa dos fluxos de trabalho permitiu identificar fatores que favorecem cada uma das condições de integração consideradas, assim como as potencialidades e limitações dos processos investigados para sua efetiva utilização durante as etapas do processo de projeto. A influência da interoperabilidade nas etapas do processo de simulação foi demonstrada, tendo sido considerada como uma importante contribuição da tecnologia BIM para que tal integração ocorra.

Palavras-chave: Simulação. Iluminação natural. Processo de projeto. BIM.

ABSTRACT

Using daylight simulation tools may contribute for improving the environmental performance of buildings. For that purpose, the role of architects and the adoption of appropriate design strategies since its initial stages are decisive, even though analyzing daylight performance through simulation is not a widespread practice among architectural designers. The recent implementation of Building Information Modeling (BIM) tools and processes in Brazil is thought to be an important opportunity to promote further integration of daylighting simulations and analyzes into design processes. The aim of this study is to compare three workflows for the realization of simulations and analyzes of daylighting starting from a BIM model developed in Revit. It ultimately seeks to identify their potentialities and limitations for effective integration into the stages of the design process. Two conditions were considered for this integration: that the simulations and analyzes are carried out by a designer or by a simulator collaborating with the project team. Workflows are defined by programs that represent three distinct approaches to simulation. The workflows are described from an indirect experiment that takes as object of study the architectural project for a commercial building in Belo Horizonte. They are then compared based on the characteristics of the simulation programs they use and on the types of simulations and analyzes that they allow to perform. Finally, the results of static and dynamic simulations obtained in each process are compared. The results of the static simulations were graphically very similar, whereas more pronounced differences were observed for the dynamic simulations, both graphically and numerically. The comparative analysis of workflows allowed to identify factors that favor each of the integration conditions considered, as well as the potentialities and limitations of the processes investigated for their effective use during the stages of the design process. The influence of interoperability in the simulation process steps has been demonstrated and has been considered an important contribution of BIM technology for such integration to take place.

Keywords: BIM. Daylighting simulation. Design process.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 2.1 – Gráfico de esforço/efeito para cada etapa de projeto | 50 |
| Figura 2.2 – Representação das cartas solares e informações que dela podem ser extraídas. | 59 |
| Figura 2.3 – Esquema genérico dos programas de simulação da iluminação natural | 61 |
| Figura 2.4 – Método do Raio Traçado. Representação das trocas luminosas em raios partindo do ponto de vista do observador..... | 66 |
| Figura 2.5 – Método da radiosidade. Representação das trocas luminosas entre parcelas de superfície de um ambiente. | 67 |
| Figura 2.6 – Estrutura de Análise da Luz Natural | 78 |
| Figura 4.1 – Localização do terreno e principais vias de acesso. | 106 |
| Figura 4.2 – Delimitação do lote e entorno imediato. | 106 |
| Figura 4.3 – Esquema conceitual da concepção do partido arquitetônico. | 108 |
| Figura 4.4 – Vista tridimensional do modelo BIM representativo da concepção do partido arquitetônico. | 110 |
| Figura 4.5 – Vista tridimensional do modelo BIM completo, com destaque para o pavimento e salas simulados. | 112 |
| Figura 4.6 – Planta do pavimento tipo que será submetido às simulações | 113 |
| Figura 4.7 – Planta do pavimento tipo que será submetido aos fluxos de trabalho para simulação. | 113 |
| Figura 4.8 – Delimitação do modelo BIM para a exportação do modelo geométrico. | 114 |
| Figura 4.9 – Modelo de teste para compatibilização das variáveis dos modelos de céu. | 120 |
| Figura 5.1 – Gerenciador de materiais do Revit. | 130 |
| Figura 5.2 – Caixa de diálogo da ferramenta Lighting Analysis. | 132 |
| Figura 5.3 – Estudo de sombreamento para o dia 21/12, às 11h. Visualização da Trajetória Solar correspondente aos meses de verão – período de 21/12 a 21/3. | 133 |
| Figura 5.4 – Incidência de radiação solar acumulada. Vista Noroeste do Modelo. | 134 |
| Figura 5.5 – Mapas de iluminâncias sobre as superfícies do modelo. Salas 403 (a) e 409 (b). Solstício de verão, às 9h, com céu claro. | 135 |
| Figura 5.6 – Imagens renderizadas da iluminação para as salas 403(a) e 409(b). Solstício de verão, às 9h, com céu claro..... | 135 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.7 – Mapas de Iluminâncias sobre o plano de análise. Visualização em vista tridimensional do modelo BIM.. | 136 |
| Figura 5.8 – Caixa de diálogo da ferramenta Metrics. Acesso às simulações do DIVA. | 140 |
| Figura 5.9 – Exemplo de Mapa de Luminância gerado com o DIVA. | 142 |
| Figura 5.10 – Exemplo de visualização do índice DGP gerado com o DIVA. | 142 |
| Figura 5.11 – Exemplo de Mapa de Radiação Solar gerado com o DIVA. | 143 |
| Figura 5.12 – Exemplo de máscara de obstrução do entorno do terreno. | 150 |
| Figura 5.13 – Exemplo de Máscaras de obstrução para o ambiente. .. | 151 |
| Figura 5.14 – Exemplo de Máscaras de obstrução para o ambiente. .. | 152 |
| Figura 5.15 – Mapas de luminâncias obtidos com o APOLUX..... | 153 |
| Figura 5.16 – Análise de classes de iluminâncias. Solstício de verão. 9h. Céu claro..... | 153 |
| Figura 5.17 – Visualização do ambiente pelo vetor foton..... | 154 |
| Figura 5.18 – Caixa de diálogo para definição do tipo de céu com o FT1. | 160 |
| Figura 5.19 – Caixa de diálogo com as configurações para simulações estáticas com o FT3. Destaques para parâmetros relativos ao tipo de céu..... | 162 |
| Figura 5.20 – Visualização de distribuição de luminâncias da abóbada com o APOLUX..... | 163 |
| Figura 5.21 – Delimitação do modelo BIM para a exportação do modelo geométrico. | 165 |
| Figura 6.1 – Relação dos Fluxos de Trabalho com as condições de integração das simulações e análises ao processo de projeto..... | 204 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 2.1 – Etapas da atividade técnica de projeto previstas na ABNT NBR 13.532. | 48 |
| Quadro 2.2 – Etapas de projeto associadas aos níveis de desenvolvimento do modelo BIM. | 49 |
| Quadro 3.1 – Objetivos, métodos e resultados esperados | 85 |
| Quadro 3.2 – Síntese metodológica. | 86 |
| Quadro 3.3 – Simulações e análises que podem ser realizadas com Revit, Insight 360 e Autodesk 360. | 94 |
| Quadro 3.4 – Simulações e análises que podem ser realizadas com a ferramenta Metrics, do DIVA. | 96 |
| Quadro 3.5 – Simulações e análises que podem ser realizadas com o APOLUX. | 99 |
| Quadro 3.6 – Categorias de critérios para avaliação da iluminação natural. | 103 |
| Quadro 4.1 – Datas, horários e tipos de céu simulados para comparação de resultados. | 118 |
| Quadro 5.1 – Fluxo de Trabalho 1. Simulações e análises utilizando ferramentas do Revit, Insight 360 e Autodesk 360. | 128 |
| Quadro 5.2 – Fluxo de Trabalho 2. Simulações e análises utilizando o DIVA-for-Rhino | 137 |
| Quadro 5.3 – Fluxo de Trabalho 3. Simulações e análises utilizando o APOLUX. | 145 |
| Quadro 5.4 – Quadro comparativo dos fluxos de trabalho. Características dos programas. | 156 |
| Quadro 5.5 – Categorias de critérios e dados de saída para avaliação da iluminação natural durante a Concepção do Partido Arquitetônico. | 167 |
| Quadro 5.6 – Categorias de critérios e dados de saída para avaliação da iluminação natural durante a Desenvolvimento Inicial. Simulações estáticas. | 168 |
| Quadro 5.7 – Categorias de critérios e dados de saída para avaliação da iluminação natural durante a Desenvolvimento Inicial. Simulações dinâmicas. | 170 |
| Quadro 5.8 – Mapas de Iluminância. 09h. Céu Claro. Solstício Verão (21/12) | 173 |
| Quadro 5.9 – Mapas de Iluminância. 09h. Céu Claro. Solstício Verão (21/12) | 175 |
| Quadro 5.10 – Mapas de Iluminância. 09h. Céu Claro. Solstício de Inverno (21/06) | 176 |

| | |
|--|-----|
| Quadro 5.11 – Mapas de Iluminância. 12h. Céu Claro. Solstício Verão. (21/12) | 177 |
| Quadro 5.12 – Mapas de Iluminância. 12h. Céu Claro. Solstício Inverno (21/06) | 178 |
| Quadro 5.13 – Mapas de Iluminância. 15h. Céu Claro. Solstício Verão. (21/12) | 179 |
| Quadro 5.14 – Mapas de Iluminância. 15h. Céu Claro. Solstício Inverno. (21/06) | 180 |
| Quadro 5.15 – Mapa de Iluminância. 09h. Céu Encoberto. Solstício Verão. (21/12)..... | 182 |
| Quadro 5.16 – Mapas de Iluminância. 09h. Céu Encoberto. Solstício Inverno. (21/12)..... | 183 |
| Quadro 5.17 – Mapas de Iluminância. 12h. Céu Encoberto. Solstício Verão (21/12)..... | 184 |
| Quadro 5.18 – Mapas de Iluminância. 12h. Céu Encoberto. Solstício Inverno. (21/06)..... | 185 |
| Quadro 5.19 – Mapas de Iluminância. 15h. Céu Encoberto. Solstício Verão (21/12)..... | 186 |
| Quadro 5.20 – Mapas de Iluminância. 15h. Céu Encoberto. Solstício Inverno (21/06)..... | 187 |
| Quadro 5.21 – Mapas de Iluminância. Simulações com entorno e sem entorno. Fluxo de Trabalho 1 | 189 |
| Quadro 5.22 – Mapas de Iluminância. Simulações com entorno e sem entorno. Fluxo de Trabalho 2 | 190 |
| Quadro 5.23 – Mapas de Iluminância. Simulações com entorno e sem entorno. Fluxo de Trabalho 3 | 191 |
| Quadro 5.24 – Comparativo para as métricas Autonomia de Luz Diurna (DA) E Autonomia Espacial de Luz Diurna (sDA)..... | 192 |
| Quadro 5.25 – Comparativo para a métrica Exposição Anual à Luz Solar (ASE)..... | 194 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1 – Comparativo entre os métodos Raio Traçado e da Radiosidade..... | 67 |
| Tabela 4.1 – Resultados das simulações com o modelo de teste para dias de céu claro..... | 121 |
| Tabela 4.2 – Resultados de iluminâncias do modelo de teste para céu encoberto..... | 121 |
| Tabela 4.3 – Compatibilização de parâmetros céu do APOLUX para céu claro..... | 122 |
| Tabela 4.4– Compatibilização de parâmetros céu do APOLUX para céu encoberto..... | 124 |
| Tabela 4.5 – Compatibilização de parâmetros climáticos do Insight 360 para céu claro..... | 125 |
| Tabela 4.6 – Compatibilização de parâmetros climáticos do Insight 360 para céu encoberto..... | 126 |

LISTA DE APÊNDICES

| | |
|---|-----|
| APÊNDICE A - Configuração de propriedades óticas dos materiais no Revit..... | 220 |
|---|-----|

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEC – Arquitetura, Engenharia, Construção
AIA – American Institute of Architecture
BIM – Building Information Modeling (Modelagem de Informação da Construção) ou Building Information Model (Modelo de Informação da Construção)
CAD – Computer Aided Design
CR – Coeficiente de Radiosidade
DLC – Daylight Coefficient ou Coeficiente de Luz Diurna
DHI – Diffuse Normal Irradiance
DirHI: Irradiação Direta Horizontal
DNI – Direct Normal Irradiance
DXF – Drawing Exchange Format
EPW – Energy Plus Weather File
EALN – Estimativa Annual de Luz Natural
GHI – Global Horizontal Irradiance
HDR – High-Dynamic Range
IAI – International Alliance for Interoperability
IBPSA - International Building Performance Simulation Association
IEA-SHC – International Energy Agency – Solar Heating & Cooling Programme
IES – Illuminating Engineering Society of North America
IFC – Industry Foundation Classes
IllumDifHor: Iluminância Difusa Horizontal
IllumDirHor – Iluminância Direta Horizontal
IllumGloHor – Iluminância Global Horizontal
LEED – Leadership in Energy and Environmental Design
IPD – Integrated Project Delivery
ISO – International Organization for Standardization
LOD – Level of Development
NIBS – National Institute of Building Science
NBIMS – National BIM Standards Committee
PBH – Prefeitura Municipal de Belo Horizonte
TMY – Typical Meteorological Year

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 31 |
| 1.1 | PERGUNTA DE PESQUISA..... | 32 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA..... | 32 |
| 1.3 | OBJETIVOS..... | 34 |
| 1.3.1 | Objetivo Geral..... | 34 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos..... | 35 |
| 1.4 | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO..... | 35 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO..... | 37 |
| 2.1 | A TECNOLOGIA BIM..... | 37 |
| 2.1.1 | Breve histórico e definições..... | 37 |
| 2.1.2 | O paradigma BIM: novas ferramentas e processos..... | 40 |
| 2.1.2.1 | Modelagem baseada em objetos paramétricos..... | 42 |
| 2.1.2.2 | Suporte para colaboração entre as equipes de projeto..... | 42 |
| 2.1.3 | Implementação da tecnologia BIM..... | 44 |
| 2.1.4 | Processo de projeto de arquitetura no contexto BIM..... | 46 |
| 2.1.5 | Ferramentas BIM para projeto de arquitetura..... | 50 |
| 2.1.6 | Integração do BIM às simulações..... | 51 |
| 2.2 | SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA ILUMINAÇÃO NATURAL..... | 53 |
| 2.2.1 | Leis, códigos e normas para iluminação natural..... | 55 |
| 2.2.1.1 | Legislação por zoneamento Solar..... | 55 |
| 2.2.1.2 | Legislação sobre o dimensionamento de aberturas..... | 56 |
| 2.2.1.3 | Legislação baseada em níveis de iluminação..... | 56 |
| 2.2.2 | Breve histórico dos métodos de avaliação da iluminação natural..... | 58 |
| 2.2.3 | Simulação da geometria solar: incidência solar, sombreamento e obstruções..... | 58 |
| 2.2.4 | Simulação da irradiação solar..... | 59 |
| 2.2.5 | Simulação computacional de iluminação natural..... | 60 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 2.2.5.1 | Dados do projeto | 61 |
| 2.2.5.2 | Modelos de céu | 63 |
| 2.2.5.3 | Algoritmos de simulação e métodos de cálculo de iluminação. | 65 |
| 2.2.5.4 | Coefficiente de Luz Diurna (DLC - Daylight Coefficient) | 69 |
| 2.2.5.5 | Simulações estáticas e simulações dinâmicas..... | 69 |
| 2.2.5.6 | Visualização de resultados e métricas para análise de simulações estáticas | 71 |
| 2.2.5.7 | Métricas de análise por simulações dinâmicas | 72 |
| 2.2.6 | Pesquisas sobre simulação e análise no processo de projeto | 75 |
| 2.2.7 | Principais programas de simulação no contexto atual | 81 |
| 2.2.7.1 | Radiance | 82 |
| 2.2.7.2 | DAYSIM..... | 82 |
| 2.2.7.3 | DIVA-for-RHINO | 82 |
| 2.2.7.4 | Apolux | 83 |
| 2.2.7.5 | Autodesk Insight 360..... | 83 |
| 2.2.7.6 | Outras ferramentas de simulação | 83 |
| 3 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 85 |
| 3.1 | PREMISSAS E CONDIÇÕES DE INTEGRAÇÃO | 88 |
| 3.2 | CARACTERIZAÇÃO DOS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS ADOTADOS..... | 89 |
| 3.2.1 | Plataforma BIM | 89 |
| 3.2.2 | Programas de simulação da iluminação natural..... | 90 |
| 3.2.2.1 | Revit, Insight 360 e Autodesk 360 (versão 2017)..... | 91 |
| 3.2.2.2 | DIVA-for-Rhino (versão 4) | 94 |
| 3.2.2.3 | APOLUX (versão IV)..... | 97 |
| 3.3 | COMPATIBILIZAÇÃO DE PARÂMETROS PARA CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CÉU. | 99 |
| 3.4 | DEFINIÇÃO DOS FLUXOS DE TRABALHO ESTUDADOS..... | 100 |

| | | |
|-------|--|------------|
| 3.5 | ANÁLISE COMPARATIVA DOS FLUXOS DE TRABALHO | 102 |
| 3.5.1 | Quanto às características dos programas | 102 |
| 3.5.2 | Quanto aos tipos de simulação, tipos de análise e categorias de critérios | 102 |
| 3.6 | AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS RESULTADOS | 103 |
| 3.6.1 | Comparação de resultados de simulações estáticas..... | 103 |
| 3.6.2 | Comparação de resultados de simulações dinâmicas..... | 104 |
| 4 | APRESENTAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO..... | 105 |
| 4.1 | LOCALIZAÇÃO, PROGRAMA E CONDICIONANTES NATURAIS E URBANOS | 105 |
| 4.2 | MODELOS BIM REPRESENTATIVOS DAS ETAPAS DE ETAPAS DE PROJETO | 108 |
| 4.2.1 | A concepção do partido arquitetônico..... | 109 |
| 4.2.2 | Desenvolvimento Inicial..... | 110 |
| 4.3 | DADOS DE PROJETO..... | 114 |
| 4.4 | PARÂMETROS PARA SIMULAÇÕES ESTÁTICAS E DINÂMICAS | 116 |
| 4.4.1 | Parâmetros aplicáveis tanto às simulações estáticas quanto às dinâmicas..... | 116 |
| 4.4.2 | Parâmetros aplicáveis somente às simulações estáticas. | 117 |
| 4.4.3 | Parâmetros aplicáveis somente às simulações dinâmicas | 119 |
| 4.5 | COMPATIBILIZAÇÃO de parâmetros que caracterizam as condições de céu | 119 |
| 4.5.1 | Modelo e simulação de teste | 120 |
| 4.5.2 | Compatibilização para o APOLUX | 122 |
| 4.5.3 | Compatibilização para o Insight 360..... | 124 |
| 5 | ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 127 |
| 5.1 | DESCRIÇÃO DOS FLUXOS DE TRABALHO..... | 127 |
| 5.1.1 | Fluxo de Trabalho 1 – Revit, Insight 360, Autodesk 360 | 127 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 5.1.1.1 | Etapa de preparação do modelo BIM..... | 128 |
| 5.1.1.2 | Etapa de simulação | 130 |
| 5.1.1.3 | Visualização dos resultados | 132 |
| 5.1.2 | Fluxo de Trabalho 2 – Revit para DIVA-for-Rhino | 136 |
| 5.1.2.1 | Etapa de preparação do modelo BIM..... | 137 |
| 5.1.2.2 | Etapa de preparação do modelo geométrico. | 138 |
| 5.1.2.3 | Etapa de simulação | 139 |
| 5.1.2.4 | Visualização de resultados para análise | 140 |
| 5.1.3 | Fluxo de Trabalho 3 – Revit para Apolux | 144 |
| 5.1.3.1 | Etapa de preparação do modelo BIM..... | 146 |
| 5.1.3.2 | Etapa de preparação do modelo geométrico | 146 |
| 5.1.3.3 | Etapa de simulação | 147 |
| 5.1.3.4 | Visualização de resultados para análise | 148 |
| 5.2 | ANÁLISE COMPARATIVA DOS FLUXOS DE TRABALHO..... | 155 |
| 5.2.1 | Quanto às características dos programas | 157 |
| 5.2.1.1 | Interface com o usuário..... | 157 |
| 5.2.1.2 | Interoperabilidade dos dados de projeto | 157 |
| 5.2.1.3 | Modelos de Céu | 159 |
| 5.2.1.4 | Motores e Métodos de Cálculo | 163 |
| 5.2.2 | Quanto aos tipos de simulação e ferramentas de análise | 166 |
| 5.2.2.1 | Concepção do Partido Arquitetônico | 166 |
| 5.2.2.2 | Desenvolvimento Inicial do Projeto..... | 167 |
| 5.3 | COMPARAÇÃO GRÁFICA E QUALITATIVA DOS RESULTADOS | 170 |
| 5.3.1 | Simulações estáticas | 171 |
| 5.3.1.1 | Da forma de apresentação dos resultados | 171 |
| 5.3.1.2 | Comparação gráfica dos mapas de iluminâncias. | 174 |
| 5.3.1.3 | Comparativo de resultados com entorno e sem entorno | 188 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 5.3.2 | Simulações dinâmicas | 191 |
| 6 | CONCLUSÕES | 195 |
| 6.1 | SOBRE A DESCRIÇÃO DOS FLUXOS DE TRABALHO | 195 |
| 6.2 | SOBRE A ANÁLISE COMPARATIVA DOS FLUXOS DE TRABALHO | 196 |
| 6.2.1 | Complexidade do processo e as condições de integração | 196 |
| 6.2.1.1 | Condição 1: simulações e análises realizadas por arquitetos projetistas | 197 |
| 6.2.1.2 | Condição 2: simulações e análises realizadas com a colaboração de especialista em simulações..... | 198 |
| 6.2.2 | Tipos de simulação, ferramentas de análise e etapas de projeto. | 200 |
| 6.3 | SOBRE A COMPARAÇÃO GRÁFICA E QUALITATIVA DOS RESULTADOS..... | 202 |
| 6.4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 203 |
| 6.5 | LIMITAÇÕES DA PESQUISA e SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 207 |
| 6.5.1 | Quanto aos programas computacionais investigados | 207 |
| 6.5.2 | Quanto a metodologia utilizada | 208 |
| 6.5.3 | Quanto aos tipos de simulações e análises aplicáveis ao processo de projeto..... | 208 |
| | REFERÊNCIAS | 210 |
| | APÊNDICE A - CONFIGURAÇÃO DE PROPRIEDADES ÓTICAS DOS MATERIAIS NO REVIT..... | 220 |

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho se insere na linha de pesquisa “Métodos e Técnicas Aplicados ao Projeto em Arquitetura e Urbanismo”, da área de concentração em “Projeto e Tecnologia do Ambiente Construído”, que compõem o programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina (PósARQ). Em essência, é abordada a aplicação integrada de duas temáticas ao contexto do processo de projeto de arquitetura: a implementação recente da tecnologia BIM (*Building Information Modeling*) e as simulações computacionais para análise da iluminação natural.

As primeiras leituras a respeito do uso de ferramentas de simulação integradas à prática do projeto de arquitetura (KOWALTOWSKI *et al.*, 2006; MENDES *et al.*, 2005) indicaram a importância de que o arquiteto (ou a equipe de arquitetos) tenham uma relação mais próxima com as análises de simulações de desempenho, seja operando as ferramentas, seja contando com a colaboração de um especialista. Com a participação mais próxima dos arquitetos, as análises de resultados de simulação podem oferecer subsídios para decisões arquitetônicas desde as etapas iniciais do processo.

Dois fatores principais motivaram o tema desta pesquisa: o interesse pessoal do autor em aplicar de forma mais efetiva conceitos relacionados ao conforto ambiental e à sustentabilidade no ambiente construído; e a experiência profissional recente do autor com a utilização da plataforma BIM Autodesk Revit como principal ferramenta para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos. Dessa experiência recente, pode ser observada a disponibilidade de ferramentas para análise energética, análise de iluminação e análise solar entre as funcionalidades do Revit. Diante dessas ferramentas e da complexidade dos processos de simulação apontados por Mendes *et al.* (2005), a essência dos questionamentos que motivaram a pesquisa sempre esteve relacionada com a busca pela compreensão de como a adoção recente de plataformas BIM pelos escritórios de arquitetura poderia favorecer a incorporação de análises de desempenho aos processos de projeto. Em razão da importância do bom aproveitamento da luz natural para a qualidade arquitetônica, para o conforto dos usuários e de seu potencial de economia de energia, a pesquisa concentrou-se no uso de simulações para a análise de iluminação natural.

1.1 PERGUNTA DE PESQUISA

Quais as potencialidades e limitações que a recente implementação da tecnologia BIM por empresas e escritórios de arquitetura representa para a aproximação de práticas de simulação da iluminação natural às etapas do processo de projeto?

1.2 JUSTIFICATIVA

O universo teórico desta pesquisa está compreendido no contexto amplo da sustentabilidade no ambiente construído, em que é dada particular atenção ao papel primordial exercido pela Arquitetura. Há, desde a década de 90, quando se reconhece que a indústria da construção é uma das atividades humanas com maior impacto sobre o meio ambiente, a atividade econômica e o bem-estar da sociedade (SILVA; SILVA; AGOPYAN, 2003), uma ampla discussão em âmbito mundial em torno da sustentabilidade no ambiente construído. A demanda pela redução dos impactos negativos desta indústria e pela produção e requalificação de edifícios com melhor desempenho ambiental e energético é crescente no mundo todo. A eficiência energética das edificações assumiu, nos países desenvolvidos, um papel de vanguarda na prática e nas pesquisas em arquitetura graças às preocupações recentes com o aquecimento global, com a camada de ozônio e com o esgotamento e consequente aumento no preço dos combustíveis fósseis (BOUBEKRI, 2008). No Brasil, cuja matriz energética é majoritariamente dependente da geração hidrelétrica, as mudanças nos regimes pluviais e o aumento crescente da demanda são fatores que reforçam a importância da busca por edifícios mais eficientes no cenário nacional.

A atuação do arquiteto é determinante para o desempenho energético de uma edificação. Idealmente, esse profissional deve ter conhecimentos básicos sobre todos os conceitos que impactam no consumo energético do edifício para que possa atuar colaborativamente com outros profissionais e possibilitar respostas arquitetônicas integradas. A adoção de princípios bioclimáticos para o planejamento da edificação quanto à sua tipologia, orientação, materiais e sistemas construtivos, entre outros, é de grande importância para a obtenção de conforto ambiental de forma passiva, ou com uso reduzido de recursos mecânicos para iluminação e climatização, e está intimamente relacionada à sua eficiência energética (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). A abordagem da pesquisa voltada ao desempenho da

iluminação natural se justifica por ser este um importante aspecto da arquitetura bioclimática, que pode representar um grande potencial de economia de energia e pela importância que a luz natural, tem em si, para a qualidade arquitetônica. Historicamente, a luz natural é reconhecida pelos arquitetos como uma das matérias primas mais nobres, seja por seu efeito poético e simbólico ou por sua importância para a saúde e o bem-estar humanos (BOUBEKRI, 2008). No contexto atual, projetar um edifício que privilegie o uso da iluminação natural para promover conforto e eficiência requer uma atuação cuidadosa e preponderante dos arquitetos, que envolve a adoção de estratégias apropriadas desde as etapas iniciais. Reinhart (2014), acredita na necessidade de expor os arquitetos a processos de trabalho que permitam avaliar suas propostas com base em fundamentos científicos. Aponta que ferramentas de simulação computacional vêm possibilitando o desenvolvimento de novas técnicas de análise, o que justifica uma abordagem informativa sobre o potencial que seu uso integrado ao processo de projeto de arquitetura tem para influenciar as decisões relativas ao projeto e o desempenho final do edifício. De acordo com Mendes *et al.* (2005), pesquisas envolvendo instrumentos computacionais para análise de desempenho de edifícios são realizadas no Brasil desde a década de 1980 e são fundamentais como suporte na aplicação de normas de eficiência energética e no projeto de edificações de alta eficiência. No entanto, os autores já indicavam a predominância de uso de tais instrumentos nos meios acadêmicos e que, para obtenção de bons resultados neste sentido, a prática de simulação deveria estar incorporada na rotina de trabalho dos escritórios de arquitetura e engenharia (MENDES *et al.* 2005). Pesquisas recentes têm abordado a importância da incorporação da prática das simulações de desempenho desde etapas iniciais do processo de projeto (MARSH, 1999; DONN; SELKOWITZ; BORDASS, 2009; BRÍGITTE; RUSCHEL, 2013). Destacam-se a necessidade de interfaces amigáveis com resultados que sejam úteis para a concepção arquitetônica (SOUZA, 2012, 2013) e a necessidade de modelos dinâmicos e integrados para um melhor suporte ao projetista (NEGENDAHL, 2014). Embora distintas em termos de algoritmos e métodos de cálculo, simulações térmicas, energéticas e de iluminação natural são análogas em importância e complementares entre si, pois soluções arquitetônicas visando o aproveitamento da luz natural têm impactos diretos também sobre o desempenho térmico e sobre o potencial consumo de energia. Inúmeros trabalhos têm investigado métodos que buscam auxiliar os arquitetos em uma análise compreensiva da iluminação natural, que contam com suporte de simulações para avaliar o potencial anual e critérios relevantes

para a boa iluminação (ANDERSEN; GUILLEMIN, 2013; ANDERSEN *et al.*, 2013; CLARO, 2015; REINHART; WIENOLD, 2011).

O sucesso na utilização desses métodos para a melhoria do desempenho em termos de iluminação natural pressupõe a colaboração entre profissionais de diferentes áreas e a consideração simultânea de muitos aspectos do projeto – tais como forma e orientação do edifício, materiais utilizados, distribuição e dimensionamento de aberturas, integração dos sistemas de iluminação artificial – que, por sua vez, afetam a atuação de profissionais de outras disciplinas. Por essas razões a *Illuminating Engineering Society* (IES) defende a abordagem do Projeto Integrado do Edifício (*Integrated Building Design*) como sendo benéfico para o melhor desempenho da iluminação natural e faz uma associação direta com a tecnologia BIM como favorecedora dessa abordagem de projeto (IES, 2009). Embora não seja uma tecnologia propriamente nova, o uso do BIM tem tido grande impulso nos últimos anos e processos de trabalho baseados nessa tecnologia vêm sendo cada vez mais adotados por empresas de arquitetura e construção no Brasil e no mundo em substituição aos processos de trabalho definidos por programas e formas de representação de base CAD (*Computer Aided Design*).

Andrade e Ruschel (2009) analisaram o panorama das pesquisas sobre o tema BIM no Brasil e relataram a predominância de estudos sobre sua associação aos processos de projeto, sobre o estágio inicial de implantação da tecnologia nos escritórios de arquitetura e sobre a necessidade de pesquisas relacionando interoperabilidade e modelagem paramétrica às metodologias de projeto digital. Os autores apontaram ainda a importância de pesquisas que busquem a evolução das práticas de projeto digital e auxílio à síntese das soluções arquitetônicas. Há, no Brasil, uma carência de estudos que relacionam o BIM à prática de simulações e que dêem ênfase aos aspectos lumínicos. Considerando-se este cenário, esta pesquisa pretende contribuir para difusão das simulações para iluminação natural como ferramentas de auxílio ao projeto, a partir da oportunidade representada pela implementação da tecnologia BIM.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Comparar fluxos de trabalho para a realização de simulações e análises de iluminação natural em processos de projeto iniciados em tecnologia BIM, identificando potencialidades e limitações de cada um

para a sua efetiva utilização durante as etapas formais do desenvolvimento do projeto arquitetônico.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Descrever os fluxos de trabalho e ações necessárias para que um projeto arquitetônico desenvolvido com ferramentas de projeto BIM seja simulado e analisado quanto à iluminação natural com programas representativos de três abordagens distintas de simulação.
- b) Analisar comparativamente os fluxos de trabalho descritos quanto às características dos programas, abordagens de simulação e tipos de análises possíveis.
- c) Comparar gráfica e qualitativamente os resultados obtidos por simulações estáticas e dinâmicas com os programas que caracterizam cada fluxo de trabalho analisado.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é apresentada em seis capítulos, divididos em Introdução, Referencial Teórico, Procedimentos Metodológicos, Desenvolvimento do Experimento Indireto, Análise e Discussão dos Resultados, e Conclusões.

O Capítulo 1 corresponde a esta Introdução, onde são apresentadas as perguntas de pesquisa, as justificativas para o tema proposto e os objetivos geral e específicos.

O Capítulo 2 apresenta o Referencial Teórico para a pesquisa e é dividido entre as duas temáticas principais: a Tecnologia BIM e as Simulações e Análises da Iluminação Natural.

O Capítulo 3 trata dos Procedimentos Metodológicos e apresenta premissas e condições de integração consideradas, os programas computacionais utilizados, procedimentos de compatibilização de parâmetros relacionados à caracterização das condições de céu e a abordagem para o cumprimento dos objetivos específicos.

O Capítulo 4 trata do Desenvolvimento do Experimento Indireto, onde são apresentados o projeto arquitetônico e todos os dados de projeto adotados para o estudo.

O Capítulo 5 apresenta a Análise e Discussão dos Resultados da pesquisa segundo os objetivos específicos traçados.

O Capítulo 6 apresenta as Conclusões e considerações finais da dissertação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A TECNOLOGIA BIM

Nos últimos anos, a tecnologia BIM vem sendo fortemente disseminada na indústria de Arquitetura, Engenharia, Construção (AEC) em todo o mundo e representa uma importante mudança de paradigmas nas formas de representação, documentação e comunicação de projetos. Uma das principais fontes de referência sobre o tema é o *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*¹. O livro, que teve sua primeira edição em 2008 e a segunda atualizada em 2011, aborda de forma abrangente os diversos aspectos da tecnologia BIM e suas implicações para a cadeia produtiva da indústria de AEC e é citado em praticamente todas as pesquisas sobre a temática BIM posteriores à sua publicação. Sendo assim, é também a principal referência para esta seção do referencial teórico.

2.1.1 Breve histórico e definições

Os conceitos, abordagens e metodologias que fundamentam o que hoje se entende como BIM são oriundos de meados da década de 1970, enquanto o uso da terminologia “*Building Information Model*” ou “*Building Information Modeling*”², assim como a própria sigla, começou a ser difundido no início do século XXI. O primeiro documento que contém a base conceitual da tecnologia, citada a seguir, foi uma publicação de autoria de Charles M. (Chuck) Eastman, a quem é atribuída a alcunha de “pai do BIM”, para o AIA Journal, em 1975 (LAISERIN, 2008):

[Projetar] (...) interativamente definindo elementos (...) derivando seções, plantas, vistas isométricas ou perspectivas a partir da mesma descrição de elementos (...) Qualquer mudança no arranjo teria

¹ Guia BIM: Um Guia para a Modelagem das Informações da Construção para Proprietários, Gerentes, Projetistas e Empreiteiros. Tradução do autor.

² “Modelagem das Informações da Construção” ou “Modelo das Informações da Construção” em tradução do autor. O termo BIM refere-se simultaneamente às duas expressões, significando ora o produto final, ora o processo para sua obtenção.

que ser feita apenas uma vez para que todos os futuros desenhos sejam atualizados. Todos os desenhos derivados do mesmo arranjo de elementos seriam automaticamente consistentes (...) qualquer tipo de análise quantitativa pode ser diretamente vinculado à sua descrição (...) estimativa de custos ou quantitativos de materiais podem ser facilmente gerados (...) fornecendo uma única base de dados integrada para análises visuais e quantitativas, (...) verificação automática dos códigos de construção seja pelas prefeituras ou pelo escritório de arquitetura. Empreiteiros de grandes projetos podem achar tal representação vantajosa para planejamento e compras de materiais. (EASTMAN, 1975, *apud* LAISERIN, 2008, p. XI, *tradução nossa*)

Laiserin (2008) menciona ainda esforços em pesquisa e desenvolvimento tecnológico ao longo dos anos 1970 e início dos anos 1980 em que terminologias semelhantes eram utilizadas para métodos e abordagens originários do BIM. Entre estas, nos Estados Unidos cunhou-se o termo “*Building Product Model*”¹ enquanto na Europa era comum o termo “*Product Information Models*”². O termo “*Building Modeling*”³, que por fim assumiu o sentido do que hoje se entende como “*Building Information Modeling*” foi publicado por Robert Aish em 1986. Mas foi somente a partir de 2002, com os primeiros esforços de Jerry Laiserin em buscar consenso quanto à nomenclatura entre os diversos fornecedores, que o termo BIM se popularizou (LAISERIN, 2008). Por sua complexidade e abrangência, o termo BIM pode apresentar diversas definições conforme o contexto específico de sua aplicação. Em 2007, Jerry Laiserin definiu BIM e comentou essa definição da seguinte forma:

Modelagem das Informações da Construção é um processo de representação que cria e mantém vistas multidimensionais e ricas em dados de um modelo ao longo de todo o ciclo de vida do projeto para dar suporte à: **comunicação** (compartilhamento de dados); colaboração (atuação sobre os dados)

1 Modelo de Produto da Construção, em tradução do autor.

2 Modelos de Informação do Produto, em tradução do autor.

3 Modelagem do Edifício, em tradução do autor.

compartilhados); **simulação** (utilização dos dados para previsão); e **otimização** (uso de respostas para aprimorar projeto, documentação e entrega). (...) BIM é um processo de negócio e não um software computacional. (...) entretanto, automatizar e externar esse processo por meio de softwares mudará tudo. (LAISERIN, 2007, p.46, tradução do autor)

Destaca-se da definição acima a presença do termo simulação, de grande relevância no âmbito desta pesquisa, como um dos aspectos fundamentais que a tecnologia BIM se propõe a dar suporte, e também a noção de que BIM é um processo abrangente que tem a concepção e a representação do objeto arquitetônico como elementos centrais. A relação intrínseca entre projeto e simulação fica evidente na definição da empresa de construção M.A. Mortensen Company, pioneira no uso da tecnologia nos Estados Unidos: “uma simulação inteligente da arquitetura” (EASTMAN *et al*, 2008, p.13, tradução do autor).

A análise permanente do projeto arquitetônico é outro aspecto que aparece na definição concisa do BIM adotada pelos autores para os propósitos do BIM Handbook: “uma tecnologia de modelagem e um conjunto de processos associados para produzir, comunicar e analisar modelos de edifícios” (EASTMAN *et al*, 2011, p.16, tradução do autor). Essa definição é atrelada ao conceito de modelo BIM¹, que é caracterizado por:

- a) Componentes do edifício representados digitalmente por objetos com atributos gráficos e atributos de dados que podem ser manipulados inteligentemente para diversas aplicações.
- b) Componentes que contêm dados que descrevem como se comportam em relação às necessidades de análises e processos de trabalho.
- c) Dados consistentes e não redundantes, de tal forma que qualquer modificação em um componente se reflete automaticamente em todas as vistas que o representam e nos sistemas dos quais fazem parte.

¹ O termo *Building Model* é adotado pelos autores para significar um modelo com características atreladas aos conceitos BIM. O termo “Modelo BIM” é adotado nessa dissertação com esse mesmo sentido.

- d) Dados coordenados de modo que todas as vistas do modelo são representadas de forma coordenada.

Uma definição que também pode ser entendida como uma visão de futuro desse novo paradigma para a indústria de AEC foi dada pelo Comitê para Padronização da Modelagem das Informações da Construção (NBIMS)¹ do *National Institute of Building Science* (NIBS):

“Um processo aprimorado para planejamento, projeto, construção, operação e manutenção que utiliza um modelo computacional padronizado de informações para cada instalação, nova ou antiga, que contém toda informação apropriada sobre a instalação em um formato que seja útil ao longo de todo o seu ciclo de vida.” (NIBS, 2007, p. 25, tradução do autor)

2.1.2 O paradigma BIM: novas ferramentas e processos

A crença de Eastman *et al.* (2011) de que a tecnologia BIM representa uma importante mudança de paradigma para toda a indústria da construção é justificada pela visão do NIBS, citada acima. Com sua implementação, a indústria de AEC se vê forçada a evoluir no sentido de estabelecer novos fluxos de trabalho mais integrados e interoperáveis, nos quais as tarefas são organizadas em uma plataforma única que permite que o processo seja coordenado e colaborativo, utilizando o máximo das capacidades computacionais disponíveis. Benefícios potenciais são apontados por Eastman *et al.* (2011) para os principais agentes da indústria de AEC: proprietários, projetistas, construtores e gestores de edifícios. Esse potencial, entretanto, não se encontra plenamente incorporado às práticas da indústria, e limitações e dificuldades são encontradas no processo de implementação. Howell e Batcheler (2003) reconhecem que muitas das promessas advindas desse processo têm de fato se realizado com vantagens significativas em relação às práticas tradicionais com base CAD, mas atribuem como utópica a concepção de que o BIM seria um modelo único para toda indústria da construção, além de apontarem uma série de verificações entre promessas do BIM e a realidade de sua implementação. Para esses autores, o que é criticamente importante é a habilidade de se compartilhar as informações da

¹ Sigla para National Building Information Modeling Standard, dos Estados Unidos.

construção geradas inteligentemente por meio de plataformas BIM de, para ou entre modelos de edifícios construídos com outros propósitos, como para simulações de desempenho da iluminação natural. Tal habilidade é a base para o conceito de interoperabilidade, essencial para o estabelecimento de práticas colaborativas integradas ao longo do processo de projeto, e que será abordado adiante. De qualquer forma, de acordo com Succar (2009), a modelagem das informações da construção – BIM – representa mudanças tecnológicas e processuais emergentes para a indústria de AEC.

O paradigma que antecede e ainda deve conviver por algum tempo com as novas práticas e processos trazidos com o BIM tem como uma de suas bases os sistemas CAD para representação de projetos e transmissão de informações. A transição do CAD para o BIM sugere comparações sujeitas a equívocos conceituais importantes. Laiserin (2002) usa como metáfora a relação entre as palavras “*pommes*” e “*naranjas*”¹, em analogia à comparação de duas tecnologias muito claramente distintas, mas que também guardam entre si similaridades importantes. O termo CAD é universalmente reconhecido pela indústria da construção por que é específico o suficiente para se referir a uma interface para representação geométrica ou gráfica e, ao mesmo tempo, genérico o bastante para abarcar variações aplicáveis também a outras indústrias como a mecânica. Entretanto, para esse autor, o termo CAD se tornou insuficiente para descrever a amplitude e profundidade a que chegou o processo de projeto, e “*Building Information Modeling*”, ou simplesmente BIM, seria a melhor terminologia para representar a geração atual e futura de softwares para projeto. Tal como o termo CAD, BIM é um termo específico o suficiente para evocar com clareza conceitos comuns das novas tecnologias e abrangente o suficiente para abarcar toda a diversidade de abordagens tecnológicas e aplicações comerciais (LAISERIN, 2002).

Quanto ao processo de trabalho dos arquitetos, pode-se dizer que a revolução representada pelos sistemas CAD foi a possibilidade de digitalização e automatização de processos que anteriormente eram feitos manualmente. Os sistemas CAD mais antigos representavam, basicamente, uma forma automatizada de se produzir desenhos, que eram impressos a partir de arquivos digitais. Gradualmente, evoluíram para a modelagem tridimensional e avançaram para representação de superfícies

¹ “Comparing ‘*pommes*’ e ‘*naranjas*’”. “*Pommes*”, que significa maçã, em francês, e “*naranja*”, que significa laranja em espanhol. Remete à ideia de comparar coisas diferentes e em idiomas diferentes.

complexas, incluindo parâmetros associados aos objetos tridimensionais. À medida que os sistemas CAD orientados aos objetos foram ficando mais inteligentes, permitiram que informações pudessem ser associadas aos modelos 3D (HOWELL; BATCHELER, 2003). O foco dos usuários começou a migrar dos desenhos bidimensionais para imagens tridimensionais e para os dados em si, evoluindo, assim, para o que agora chamamos modelos da informação das construções, ou simplesmente modelos BIM (EASTMAN *et al.*, 2011).

De acordo com esses autores, duas características importantes distinguem a tecnologia BIM dos sistemas CAD: o conceito de objetos paramétricos e o suporte para colaboração entre a equipe de projeto. Tais características são fundamentais para que se estabeleçam novos fluxos de trabalho e de informações para a indústria de AEC.

2.1.2.1 Modelagem baseada em objetos paramétricos

A modelagem de objetos paramétricos, que caracterizam os sistemas BIM, vai além da modelagem paramétrica meramente geométrica encontrada em sistemas CAD. Objetos paramétricos BIM são definidos por conjuntos de regras que dizem respeito não só à geometria, mas também às relações topológicas e funcionais entre elementos construtivos e aos conjuntos de propriedade que podem ser atribuídos a eles (EASTMAN *et al.*, 2011). A atribuição de propriedades físicas associadas à definição geométrica é o que, teoricamente, possibilita que modelos BIM tenham a capacidade de intercambiar dados entre o modelo arquitetônico e o modelo para simulação de iluminação natural.

2.1.2.2 Suporte para colaboração entre as equipes de projeto

Em processos de projeto BIM, o suporte à colaboração deve se basear em interfaces abertas que possibilitem a importação, exportação e edição de dados dos modelos de diferentes especialidades e em diversos formatos. A esta capacidade, atribui-se o conceito de interoperabilidade como sendo fundamental para o suporte para colaboração entre as equipes de projeto em processo BIM, já que:

Nenhum programa computacional pode realizar de forma isolada todas as tarefas associadas com o projeto e construção da edificação. A interoperabilidade representa a necessidade de transferir dados entre softwares, permitindo que

múltiplos tipos de especialistas e de aplicativos contribuam para o projeto em desenvolvimento (EASTMAN et al, 2008, p. 65).

De acordo com Eastman *et al.* (2011), historicamente, a indústria de AEC supriu a necessidade de troca de dados através de diversos formatos de arquivos digitais, entre os quais se incluem, em ordem aproximada de complexidade, imagens 2D formadas por pixels (JPG, GIF, TIF, BMP, PNG entre outros), ou por vetores (DXF, DWG, AI, DGN, PDF entre outros), superfícies e formas 3D (3DS, DXF, DWG, OBJ, DGN, DWF entre outros), além de dados de outras naturezas. A crescente riqueza de dados atribuídos aos objetos paramétricos aumentou consideravelmente e fez da interoperabilidade uma das questões mais importantes para a evolução dos processos BIM. Uma grande carga de trabalho manual pode ser eliminada caso se obtenha sucesso na troca de dados entre programas de diferentes especialidades, como esta pesquisa busca evidenciar através da comparação dos fluxos de trabalho. A cópia manual de dados gerados em outros programas pode desencorajar a iteração inerente aos processos de projeto colaborativos, especialmente quando envolvem questões complexas como a iluminação natural, e conduzir a erros e inconsistências (EASTMAN et al., 2011).

Howell e Batcheler (2003) apontam que os formatos tradicionais para intercâmbio de dados (tais como DXF, DWF, DWG e PDF) não são capazes de transferir apropriadamente o nível de inteligência dos objetos BIM e menciona a abordagem do IFC (*Industry Foundation Classes*) como um formato capaz de transferir objetos, suas interações e propriedades associadas. *BuildingSMART* é uma organização internacional que teve origem a partir da *International Alliance for interoperability* (IAI) e reúne uma rede de empresas e organizações em prol da padronização de processos, fluxos de trabalho e procedimentos relacionados ao BIM (*BuildingSMART*, 2017). O foco dessa organização é o desenvolvimento do IFC como formato padrão para a interoperabilidade entre as diversas plataformas e ferramentas BIM. No contexto de análises energéticas, Howell e Batcheler (2003) acreditam que o protocolo XML¹ representa uma importante oportunidade para a

¹ (eXtensible Markup Language)

interoperabilidade e citam o exemplo do esquema gbXML¹ como mecanismo padrão para a trocas de dados entre plataformas BIM e programas de análise e simulação energéticas.

2.1.3 Implementação da tecnologia BIM

A fim de lidar com a complexidade e multiplicidade de domínios do BIM, inerentes a uma indústria fragmentada como a de AEC, Succar (2009) apresenta em artigo uma estrutura para investigações sobre o tema. O autor defende que uma subdivisão estruturada sobre essa temática promove compreensão, disseminação e implementação gradual, e busca reduzir o abismo que separa a visão acadêmica daquela da aplicação prática do BIM pela indústria. A estrutura de investigação proposta é representada por um modelo composto por três eixos de conhecimento:

- a) **Campos de atividades BIM (*BIM Fields*)**: em que são identificados três campos interligados – os campos da tecnologia, dos processos e das políticas.
- b) **Estágios BIM (*BIM Stages*)**: delineiam os níveis de maturidade na implementação de processos de trabalho em BIM.
- c) **Lentes BIM (*BIM Lenses*)**: dizem respeito à profundidade e amplitude necessárias para identificar, avaliar e qualificar os campos de atividades e estágios BIM.

A compreensão do eixo de conhecimento dos estágios BIM é de particular interesse para os propósitos desta pesquisa, para que se possa situar o momento de implementação da tecnologia e seus processos no Brasil. Para Succar (2009), os níveis de maturidade BIM dizem respeito aos três campos – tecnologia, processos e políticas – e subdividem-se em três estágios, que são precedidos pelo status que denomina como pré-BIM e têm como meta final a Entrega Integrada de Projetos (*Integrated Project Delivery* - IPD). Com base nas definições do autor, poderiam ser sintetizadas como se segue:

- a) **Status pré-BIM**: é caracterizado pela forte dependência em documentação 2D para descrever objetos 3D. Mesmo que sejam utilizadas representações tridimensionais, elas não seriam automaticamente consistentes, como na definição de Eastman

¹ gbXML ou *Green Building XML*, é um esquema desenvolvido para facilitar a transferência de informações armazenadas em modelos BIM, permitindo a interoperabilidade com ferramentas de análise diversas. (http://www.gbxml.org/About_GreenBuildingXML_gbXML)

apresentada na seção 2.1.1 (EASTMAN, 1975, *apud* LAISERIN, 2008), por serem desconectadas e dependentes da documentação e detalhamento bidimensionais.

- b) **Primeiro Estágio BIM** (*BIM Stage 1*): É caracterizado pela modelagem paramétrica baseada em objetos. As plataformas BIM, como Revit, ArchiCAD, entre outras, são usadas primariamente para automatizar a geração e coordenação de documentação 2D e 3D no âmbito interno da organização – um escritório de arquitetura, por exemplo. Os processos de trabalho colaborativo, entretanto, são similares aos do status pré-BIM, sendo as trocas de dados unidirecionais e sem intercâmbio do modelo BIM.
- c) **Segundo Estágio BIM** (*BIM Stage 2*): é caracterizado pela colaboração suportada pelo modelo BIM. As trocas de dados se dão graças à interoperabilidade, pelo intercâmbio do modelo BIM, e podem ocorrer em apenas uma ou mais de uma fase do ciclo de vida da edificação (projeto, construção ou operação).
- d) **Terceiro Estágio BIM** (*BIM Stage 3*): é caracterizado pelo trabalho integrado em rede, em que modelos semanticamente ricos são criados, mantidos e compartilhados colaborativamente durante todo o ciclo de vida da edificação. Os modelos BIM desse estágio seriam interdisciplinares e multidimensionais, permitindo análises complexas desde o início da construção virtual.
- e) **Entrega Integrada de Projetos (IPD)**: seria uma visão de longo prazo da implementação do BIM pela indústria de AEC.

De acordo com a AsBEA (2015), o Brasil vive um momento de transição da utilização do CAD para o BIM. Mesmo que se possa encontrar organizações – construtoras e escritórios de projeto, por exemplo – que já adotaram ferramentas e processos apoiados em BIM, o Primeiro Estágio BIM seria o que melhor representaria o momento atual. Como ainda é difícil montar equipes de projeto que já trabalhem integralmente com a tecnologia, os processos de trabalho ainda são híbridos, e algumas de suas disciplinas ainda atuam com base em ferramentas CAD.

Oliveira (2011) explorou os reflexos da implantação do BIM em escritórios de arquitetura no Brasil com ênfase em quatro aspectos (visualização da informação, documentação, produtividade e interoperabilidade) e identificou problemas iniciais, como o pouco conhecimento dos conceitos BIM, pouca adaptação das plataformas aos padrões nacionais e necessidade de aprimoramento técnico dos profissionais de projeto. Dessa última constatação de Oliveira, evidencia-se que, além da investigação das aplicações do BIM no mercado da

indústria de AEC, é importante para a evolução da implementação no cenário nacional que políticas, processos e tecnologias associados ao BIM sejam abordados também no ensino. Ruschel, Andrade e Morais (2013) fazem uma revisão de iniciativas de ensino do BIM no Brasil, em contraponto a iniciativas internacionais e identificam três níveis de abordagem (introdutório, intermediário e avançado) que guardam certa analogia com as etapas de implementação definidas por Succar (2009). Nesse sentido, o trabalho de Delatorre (2014) exemplifica uma proposta para implementação do BIM no ensino, em que propõe a inserção dos conceitos integrando-os à grade curricular do curso de Arquitetura e Urbanismo da UNOCHAPECÓ.

2.1.4 Processo de projeto de arquitetura no contexto BIM

O artigo de Kowaltowski *et al.* (2006), “Reflexões sobre metodologias de projeto arquitetônico”, discute as metodologias de projeto arquitetônico à luz das complexidades do processo criativo, avanços tecnológicos e mudanças sociais e econômicas, e permite compreender a importância do processo para a produção arquitetônica e vislumbrar afinidades com o novo paradigma que se apresenta com a adoção das tecnologias BIM. Os autores atribuem a crescente complexidade do processo de projeto ao avanço rápido da tecnologia, mudanças de percepção e de demanda dos proprietários, aumento da importância do edifício como facilitador da produtividade, aumento da troca de informações e do controle humano; e a necessidade de criação de ambientes sustentáveis, com eficiência energética. Dülgeroglu¹ (1999) *apud* Kowaltowski *et al.* (2006) e Jutla² (1996) *apud* Kowaltowski *et al.* (2006) são citados para tratar a complexidade do processo criativo, que é pouco externado pelos profissionais e transita numa região intermediária entre arte e ciência para resolver questões pouco definidas, que permitem múltiplas abordagens. Projetos de edifícios representam problemas únicos, cujas soluções se baseiam em diferentes conjuntos de critérios e

¹ DÜLGEROGLU, Y. Design methods theory and its implications for architectural studies. **Design methods: theories, research, education and practice**, California: Design Methods Institute, v. 33, n. 3, p. 2870-2879, 1999.

² JUTLA, R. An inquiry into design methods. **Design methods: theories, research, education and practice**, California: Design Methods Institute, v. 30, n. 1, p. 2304-2308, 1996.

envolvem habilidades intelectuais específicas., sintetizadas por Fabrício e Melhado (2002), tais como: a capacidade de análise e síntese de informações e problemas, a criatividade e o raciocínio, o conhecimento e a capacidade de comunicação e interação entre diferentes indivíduos. No processo mental de criação, as ideias podem surgir em estágios diferentes que obrigam o autor a trabalhar em ciclos simultâneos de decisão (KOWALTOWSKI *et al.* 2006).

Nesta pesquisa, não se pretende investigar o processo criativo da concepção arquitetônica, mas sim, dar a ênfase às etapas formais do processo de produção do projeto que compõem os diversos ciclos de decisões. Busca-se assim compreender quais as implicações da integração dos processos de simulação no decorrer dessas etapas de desenvolvimento dos projetos, que independem da forma peculiar com que cada arquiteto concebe sua obra.

Nesse sentido, enquanto atividade técnica, o processo de projeto de arquitetura é organizado em etapas padronizadas pela norma brasileira NBR 13.532:1995 - Elaboração de projetos de edificações – Arquitetura (ABNT, 1995b). O Quadro 2.1 sintetiza o escopo de cada uma das etapas, que são importantes tanto para a organização interna do escritório de arquitetura, quando influenciam desde a elaboração de propostas comerciais aos cronogramas de desenvolvimento das atividades, quanto para a orientação do processo de colaboração com projetistas, quando organiza marcos do estágio de desenvolvimento dos projetos de arquitetura e outras disciplinas. Com a implementação recente dos processos de projeto BIM no Brasil entidades e organizações têm buscado orientar empresas e profissionais nos processos de implementação das novas metodologias de trabalho advindas com a adoção do BIM. Exemplos dessas iniciativas são o “Guia AsBEA de Boas Práticas em BIM” (AsBEA, 2015), destinado à comunidade de arquitetos, mas que também é de interesse de projetistas, empreendedores e construtores, e o Caderno de Apresentação de Projetos em BIM do Governo de Santa Catarina, que busca estabelecer procedimentos a serem adotados por prestadores de serviços de projeto elaborados com o BIM para obras do Estado.

Um dos pontos em comum dessas iniciativas é a associação das etapas de projeto com o conceito de Nível de Desenvolvimento do Modelo BIM (LOD¹). O Quadro 2.2 apresenta as definições dos LOD adotadas no guia da AsBEA (2015), com as respectivas ilustrações

¹ A sigla LOD é derivada da expressão original em inglês, *Level Of Detail*.

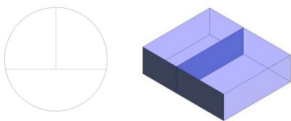
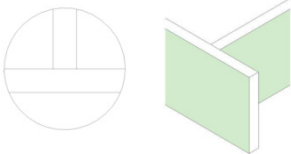
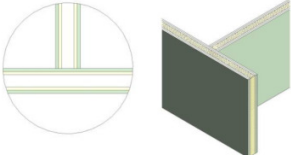
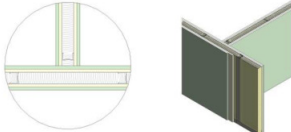
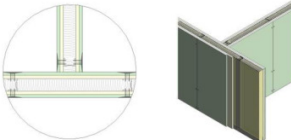
esquemáticas em planta e detalhe 3D, e a associação às etapas de projeto proposta pelo Governo de Santa Catarina (2015). Tal associação reflete metodologicamente o processo cíclico de decisões que envolve a concepção e o desenvolvimento de projetos de edificações.

Quadro 2.1 – Etapas da atividade técnica de projeto previstas na ABNT NBR 13.532.

| | |
|---|---|
| Levantamento (LV) | Destinada à coleta das informações de referência que representem as condições preexistentes, de interesse para instruir a elaboração do projeto. |
| Programa de necessidades (PN) | Destinada à determinação das exigências de caráter prescritivo ou de desempenhos (necessidades e expectativas dos usuários) a serem satisfeitas pela edificação a ser concebida. |
| Estudo de viabilidade (EV) | Destinada à elaboração de análise e avaliações para seleção e recomendação de alternativas para a concepção da edificação e de seus elementos, instalações e componentes. |
| Estudo preliminar (EP) | Destinada à concepção e à representação do conjunto de informações técnicas iniciais e aproximadas, necessários à compreensão da configuração da edificação, podendo incluir soluções alternativas. |
| Anteprojeto (AP) e/ou pré-execução (PR) | Destinada à concepção e à representação das informações técnicas provisórias de detalhamento da edificação e de seus elementos, instalações e componentes, necessárias ao inter-relacionamento das atividades técnicas de projeto e suficientes à elaboração de estimativas aproximadas de custos e de prazos dos serviços de obra implicados. |
| Projeto legal (PL) | Destinada à representação das informações técnicas necessárias à análise e aprovação, pelas autoridades competentes, da concepção da edificação e de seus elementos e instalações, com base nas exigências legais (municipal, estadual, federal), e à obtenção do alvará ou das licenças e demais documentos indispensáveis para as atividades de construção. |
| Projeto básico (PB) (Opcional) | Etapla opcional destinada à concepção e à representação das informações técnicas da edificação e de seus elementos, instalações, e componentes, ainda não completas ou definitivas, mas consideradas compatíveis com os projetos básicos das atividades técnicas necessárias e suficientes à licitação (contratação) dos serviços de obra correspondentes. |
| Projeto para execução (PE) | Destinada à concepção e à representação final das informações técnicas da edificação e de seus elementos, instalações e componentes, completas, definitivas, necessárias e suficientes à licitação (contratação) e à execução dos serviços de obra correspondentes. |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ABNT (1995b).

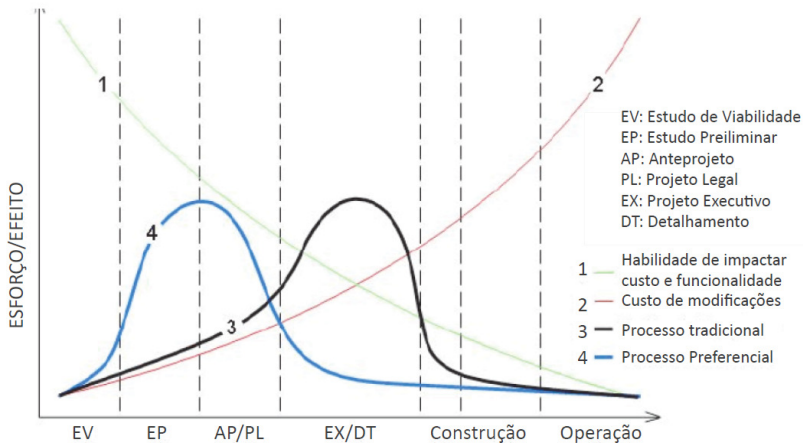
Quadro 2.2 – Etapas de projeto associadas aos níveis de desenvolvimento do modelo BIM.

| | |
|---|---|
| <p><u>LOD 100</u> O elemento pode ser representado graficamente no modelo com um símbolo ou outra representação genérica. Informação relativa ao elemento pode ser derivada de outros elementos modelados.</p> <p>Etapas de projeto associadas: (EP) (EV)</p> |  |
| <p><u>LOD 200</u> O elemento deve ser graficamente representado no modelo como um sistema, objeto ou montagem genérico, com quantidade, tamanho, forma, locação e orientação aproximados. Informações não gráficas adicionadas ao elemento devem constar nessa fase.</p> <p>Etapas de projeto associadas: (AP)</p> |  |
| <p><u>LOD 300</u> O elemento deve ser representado graficamente no modelo como um sistema, objeto ou montagem específico com quantidade, tamanho, forma, locação e orientação definidos. Informações não gráficas adicionadas ao elemento devem constar nessa fase.</p> <p>Etapas de projeto associadas: (PL)</p> |  |
| <p><u>LOD 400</u> O elemento deve ser representado graficamente no modelo como um sistema, objeto ou montagem específico, com quantidade, tamanho, forma, locação e orientação definidos, e suas interfaces com outros elementos do edifício. Informações não gráficas adicionadas ao elemento devem constar nessa fase.</p> <p>Etapas de projeto associadas: (PB) (PE)</p> |  |
| <p><u>LOD 500</u> O elemento deve ser representado graficamente no modelo como um sistema, objeto ou montagem específico, com quantidade, tamanho, forma, locação e orientação definidos, e suas interfaces com outros elementos do edifício. Informações não gráficas adicionadas ao elemento devem constar nessa fase.</p> <p>Etapas de projeto associadas: Detalhamento</p> |  |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ABNT NBR 15531 (1995), Governo de Santa Catarina (2015) e AsBEA (2015)

Entre os inúmeros avanços que processos de trabalho com base no BIM podem representar para toda a cadeia produtiva da construção civil, está o redirecionamento dos esforços de projeto para etapas iniciais, como mostra o gráfico da Figura 2.1, e o favorecimento ao trabalho colaborativo através do compartilhamento de informações facilitado.

Figura 2.1 – Gráfico de esforço/efeito para cada etapa de projeto
GRÁFICO ESFORÇO/EFEITO x TEMPO



Fonte: HOLZER (2012). p. 470

Tal redirecionamento dos esforços condiz com a importância da incorporação da prática das simulações de desempenho desde etapas iniciais do processo de projeto, assim reconhecida por autores como Brigitte e Ruschel (2013). Diante disso, vislumbra-se com esta dissertação que a integração das simulações de iluminação natural aos processos de projeto BIM deva ocorrer respeitando as etapas de projeto e conforme o nível de desenvolvimento do modelo arquitetônico BIM.

2.1.5 Ferramentas BIM para projeto de arquitetura

De acordo com Eastman *et al.* (2011), a maioria dos produtos BIM para projetos disponíveis no mercado atualmente pretendem fornecer muito mais do que simplesmente uma ferramenta para modelagem paramétrica em 3D e representação arquitetônica. Dada sua complexidade, esses produtos podem ser hierarquizados conforme os diversos níveis de aplicações. O termo “ferramentas BIM” refere-se às funcionalidades dos softwares para a realização de tarefas e resultados

específicos. “Plataforma BIM” refere-se ao software em si, que reúne ferramentas diversas, usualmente para aplicações em projetos, gerando dados que podem ser utilizados por múltiplos profissionais. “Ambiente BIM” seria o ambiente virtual de gerenciamento do fluxo de informações em uma organização, e integra ferramentas e plataformas.

No âmbito desta pesquisa, serão mais abordados os conceitos de plataforma e ferramentas BIM. As principais plataformas disponíveis atualmente são brevemente descritas a seguir:

- a) Autodesk Revit: Desenvolvido pela Autodesk desde 2002, quando foi comprado de uma empresa “*start-up*”, é a plataforma BIM mais conhecida e líder do mercado para projetos de arquitetura. Como ferramenta, apresenta uma interface amigável e bom suporte para a geração de desenhos. Como plataforma, é a que dispõe do maior número de aplicações associadas, incluindo-se as versões dedicadas a estruturas e instalações prediais, suporte para diversos formatos de arquivo e interoperabilidade prevista via IFC e gbXML. No Brasil, também é a plataforma mais difundida.
- b) Graphisoft Archicad: Com origens no início dos anos 1980, na Hungria, é o mais antigo software BIM para arquitetura e com maior difusão nos países europeus. Como ferramenta, foi concebida com foco explícito para a arquitetura e possui interface intuitiva e fácil de usar, com geração de desenhos gerenciada automaticamente. Como plataforma, dispõe de conexões para ferramentas de múltiplos domínios, tais como: estrutural, mecânico, energia e ambiente, visualização e gerenciamento.
- c) Bentley Architecture: Introduzido em 2004 e desenvolvido a partir do Triforma, faz parte do Bentley Systems, plataforma de grande importância nas áreas de infraestrutura e engenharia civil. Como ferramenta, dispõe de um conjunto pré-definido de objetos paramétricos para modelagem de edifícios e produção de desenhos. Como plataforma, é parte da *Bentley Microstation* e dispõe de diversos sistemas para suporte à engenharia civil.

Além dessas, merecem menção ainda o *VectorWorks*, desenvolvido a partir do MiniCad desde 1985, e o *Digital Project*, desenvolvido pela Gehry Technologies.

2.1.6 Integração do BIM às simulações

Embora a inclusão de propriedades físicas seja premissa do conceito de objetos paramétricos dos sistemas BIM, Eastman *et al.* (2011) ressalva que no atual estágio de desenvolvimento, as propriedades físicas

ainda não se encontram apropriadamente organizadas para atender simultaneamente a funções distintas do modelo BIM, como para simulações térmicas ou lumínicas. A IES também reconhece que a modelagem BIM não atingiu maturidade suficiente para análises completas de iluminação, mas, ainda assim apoia o conceito BIM e o desenvolvimento dessas capacidades (IES, 2009). A integração entre o BIM e ferramentas para análise de performance dos edifícios tem sido o principal foco de pesquisas realizadas tanto por parte dos fornecedores de ferramentas BIM quanto pela da comunidade de simuladores (KOTA *et al.*, 2014). A falta de interoperabilidade entre o modelo arquitetônico e o modelo energético também é um importante fator que impossibilita o uso eficiente de simulações ao longo do processo de projeto (YAN *et al.*, 2013).

A pesquisa de Kota *et al.* (2014) contribui para o aprimoramento dessa interoperabilidade. O objetivo era tornar o processo de troca de dados do Revit para o Radiance¹ rápido e amigável para arquitetos e engenheiros, possibilitando a redução do tempo de preparação dos modelos, ao mesmo tempo em que se preservam as vantagens da modelagem paramétrica possibilitada pelo Revit. O método utilizado foi o desenvolvimento de um protótipo através da linguagem de programação em C++ do Revit (*Application Programming Interface* – API) capaz de extrair do modelo BIM as propriedades dos objetos necessárias como dados de entrada para simulações utilizando o Radiance. Verificou-se, por fim, que o modelo BIM não continha todas as informações necessárias para simulação utilizando o Radiance e o Daysim¹, embora ofereça opções para incorporá-las manualmente (KOTA *et al.*, 2014).

Uma abordagem significativamente mais sofisticada, buscando a integração de simulações dinâmicas da iluminação em projetos complexos a partir de modelos BIM, é apresentada por Welle, Rogers e Fischer (2012). Os autores propõem uma metodologia para decomposição e recomposição de um modelo BIM de um projeto complexo para a simulação anual de iluminação natural utilizando o Radiance. Toda a informação geométrica e atributos para simulação são obtidos do modelo BIM através do formato IFC. A pesquisa se insere no contexto de uma

¹ Radiance é uma das principais ferramentas de simulação de iluminação natural e é apresentada na seção 2.2.7.1.

¹ O Daysim é uma ferramenta de simulação de iluminação natural baseada no Radiance para análises de desempenho anuais. Será apresentada na seção 2.2.7.2

classe metodológica denominada *Multidisciplinary Design Optimization (MDO) environment*¹, desenvolvida pelo *Center for Integrated Facility Engineering (CIFE)* da Universidade de Stanford. Naturalmente, a realidade brasileira é bem mais modesta e os desafios para o uso das simulações de iluminação natural estão ainda em outro patamar de complexidade.

Mais condizente com a realidade brasileira, a pesquisa de Martins (2011) investigou a interoperabilidade entre plataformas de projeto BIM com ferramentas de simulação ambiental. No estudo foram utilizadas as plataformas BIM Autodesk Revit e Graphisoft ArchiCAD e as ferramentas de simulação Autodesk Ecotect Analysis e IES VE. Concluiu-se, por fim, haver muito pouca interoperabilidade entre os programas utilizados.

2.2 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA ILUMINAÇÃO NATURAL

“A principal característica da luz natural é sua variabilidade. Luz natural varia em magnitude, composição espectral e distribuição sob diferentes condições meteorológicas, em diferentes horários do dia e do ano, em diferentes latitudes” (BOYCE, 2003, p. 27, tradução do autor). A luz natural também é historicamente reconhecida como uma das principais matérias primas da arquitetura, elemento fundamental na composição dos espaços por seu efeito poético e simbólico. Seu uso para a expressividade arquitetônica é de natureza essencialmente subjetiva, sendo que “projetar com a luz natural é um processo criativo que envolve arte e ciência” (IEA-SHC, 2009, pp. XX, tradução do autor). Informações qualitativas e satisfação visual com o ambiente luminoso normalmente são tão importantes para quem projeta o edifício quanto parâmetros quantitativos (IEA-SHC, 2009). Em seu livro “*Daylighting, Architecture and Health*”¹, Boubekri (2008) discute amplamente a relação entre a qualidade ambiental interior e a saúde humana proporcionadas pela luz natural e traz uma perspectiva histórica do seu uso que conduz à discussão atual de sua relação com a eficiência energética.

Nesse contexto da eficiência energética, o uso da iluminação natural na arquitetura é comumente referido na bibliografia pelo termo em inglês “*Daylighting*”. Christoff Reinhart define o termo e evidencia sua importância da seguinte forma:

¹ Ambiente de Otimização Multidisciplinar de Projeto, em tradução do autor.

¹ Luz Natural, Arquitetura e Saúde. Tradução do autor.

“(...) [*Daylighting* é o] uso controlado da luz natural interna e externamente aos edifícios. O termo é derivado do substantivo *daylight* e implica em um processo pelo qual a luz direta do Sol e a luz difusa do dia é refletida, espalhada, admitida e/ou bloqueada para se alcançar um efeito de iluminação desejado. (...) os benefícios do uso da iluminação natural abrangem a redução no consumo de energia elétrica para iluminação e subsequente carga de resfriamento para a promoção de conforto e saúde dos ocupantes, visualização do exterior e melhoria estética de projeto. Ao mesmo tempo, há riscos associados à admissão excessiva da luz do dia no interior do edifício tais como sobreaquecimento, ofuscamento e falta de privacidade. Equilibrar esses efeitos requer projeto cuidadoso.” (REINHART, 2014, p. 9, tradução do autor)

O projeto cuidadoso referido pelo autor supracitado pressupõe que os arquitetos tenham conhecimentos essenciais sobre o clima local e os princípios físicos da iluminação para a adoção de estratégias bioclimáticas adequadas. Também é recomendável que se possa contar com suporte de especialistas e/ou de ferramentas para simulação dos efeitos da luz natural desde a concepção do projeto. Com o livro “*Daylighting Handbook I*”, Reinhart (2014) busca apresentar aos profissionais de arquitetura uma visão holística sobre como aplicar efetivamente em projetos arquitetônicos a crescente variedade de técnicas de análise, a maioria baseada em ferramentas computacionais, disponíveis para prever níveis de iluminação e consumo energético em edifícios.

De acordo com Boubekri (2008), os esforços para popularizar o uso da iluminação natural têm se concentrado em seu potencial para a economia de energia, que pode ocorrer em função da redução do consumo de energia elétrica para iluminação artificial e redução das cargas de resfriamento devidas ao calor gerado pelas luminárias, além de aliviarem picos de demanda. Mas, a despeito do reconhecimento desses benefícios, o autor observa que o uso da iluminação natural não é uma característica marcante na maioria dos edifícios e defende que, como o aspecto energético não se mostrou efetivo, o argumento para sua aplicação deve ter como foco os benefícios para a saúde e o bem-estar.

2.2.1 Leis, códigos e normas para iluminação natural

A razão apontada por Boubekri (2008) para que o uso da iluminação natural não seja devidamente aplicado em projetos é a carência de legislação que a exija. As dificuldades para criar esse tipo de legislação estão relacionadas à própria natureza da luz do dia como fonte de luz para os ambientes, cujas qualidades espectrais a tornam muito distinta das fontes artificiais. Seu caráter dinâmico em termos de intensidade, direção e cores acabam tornando-a imprevisível, pouco confiável e dificultam o estabelecimento de níveis adequados. Boyce (2003) aponta que há uma grande diversidade de formas de regulamentar o uso da luz, havendo documentos que determinam os níveis de iluminação que devem ser providos para diferentes aplicações, e outros que fornecem recomendações mais genéricas sobre como a luz deve ser provida. Ressalta que em muitos casos pode haver um excesso de recomendações, muitas vezes conflitantes, e que o importante é compreender quais – e em que circunstâncias – devem ser obrigatoriamente atendidas, e quais são facultativas. O grau de precisão das recomendações tende a estar relacionado às consequências em caso de não atendimento. Assim, a assertividade da recomendação é maior quando o não cumprimento implica em riscos à saúde, segurança ou contraria políticas públicas. Quando as consequências são leves ou incertas, recomendações mais genéricas que expressem uma intenção sobre o como a luz deve se comportar são suficientes.

Boubekri (2008) identificou que existem, de um modo geral, três tipos de legislação relacionadas à iluminação natural: por zoneamento solar, pelo dimensionamento de aberturas e por determinação de níveis de iluminação. As principais referências legais e normativas encontradas no Brasil podem ser classificadas nesses três tipos e serão resumidamente exemplificadas a seguir. Considera-se o contexto específico do município de Belo Horizonte, onde se localiza o projeto tomado como objeto de estudo desta pesquisa.

2.2.1.1 Legislação por zoneamento Solar

Esse tipo de legislação procura garantir o acesso dos edifícios e seus ocupantes à luz solar por determinado período de tempo, através do estabelecimento de parâmetros urbanísticos para determinar a altura e os afastamentos que as edificações devem respeitar (BOUBEKRI, 2008). Tomando-se a Lei de Uso e Ocupação do Solo (LUOS) de Belo

Horizonte, os artificios que podem ajudar a garantir o acesso solar aos edifícios são (BELO HORIZONTE, 2010):

- a) Coeficiente de aproveitamento (art. 45): determina o potencial construtivo de um terreno, influenciando, conseqüentemente, a altimetria dos edifícios e o grau de adensamento urbano.
- b) Taxa de Ocupação (art. 48): estabelece a máxima projeção horizontal de uma edificação em função do lote em que se insere.
- c) Afastamento Frontal (art. 51): definido em função da hierarquia viária.
- d) Afastamentos Laterais e de Fundos (art. 54): são definidos proporcionalmente à altura da edificação e visam garantir iluminação, ventilação e insolação adequadas para uma edificação.
- e) Altura na Divisa (art. 59): estabelece limites para a altura da construção junto aos limites do lote.

2.2.1.2 Legislação sobre o dimensionamento de aberturas

Segundo Boubekri (2008), trata-se do tipo de legislação mais comum de se encontrar em códigos de edificações pelo mundo, e se baseia na definição de requisitos para o dimensionamento de janelas, geralmente em relação à área de piso do ambiente. O código de edificações de Belo Horizonte, instituído pela Lei nº 9.725, de 15 de julho de 2009, dispõe de um capítulo em que estabelece regras para a iluminação e ventilação, sem qualquer distinção entre esses dois aspectos ambientais. Os critérios variam conforme a classificação do ambiente, que pode ser de permanência transitória ou de permanência prolongada. Os requisitos envolvem principalmente (BELO HORIZONTE, 2009):

- a) Limite da profundidade dos compartimentos em função do pé-direito.
- b) Regras para iluminação e ventilação indireta, através de espaços como reentrâncias no corpo da edificação, fossos de iluminação e varandas ou áreas de serviços.
- c) Vãos mínimos para iluminação e ventilação em relação à área do piso. As frações são definidas em tabelas e variam conforme o tipo de uso do edifício e conforme a classificação do ambiente.

2.2.1.3 Legislação baseada em níveis de iluminação

Devido à natureza dinâmica da luz natural, requisitos de níveis mínimos de iluminação natural só podem ser prescritos se considerados em conjunto com a variável tempo. Boubekri (2008) atribui a esse fato a

dificuldade em estabelecer esse tipo de requisito. No Brasil, níveis mínimos de iluminação e outras recomendações para a iluminação dos ambientes são estabelecidos por normas específicas, entre as quais estão sintetizadas a seguir as mais importantes:

- a) NBR ISO/CIE 8995/1 2013 - Iluminação de Ambientes de Trabalho. Estabelece critérios quantitativos que devem ser observados em ambientes de trabalho quanto às iluminâncias médias mantidas (por luz natural ou artificial), quanto ao Índice de Ofuscamento Unificado (UGR) e quanto ao Índice de Reprodução de cores das lâmpadas. Estabelece recomendações qualitativas que devem ser observadas para os diversos parâmetros que compõem o ambiente luminoso: distribuição da luminância, iluminância, ofuscamento, direcionalidade da luz, aspectos da cor da luz e superfícies, cintilação, luz natural, manutenção.
- b) NBR 15215-1 – Iluminação Natural – Parte 1. Estabelece os conceitos e define os termos relacionados com a iluminação natural e o ambiente construído.
- c) NBR 15215-2 – Iluminação Natural – Parte 2. Estabelece procedimentos estimativos de cálculo da disponibilidade da luz natural em planos horizontais e verticais externos, para condições de céu claro, encoberto e parcialmente encoberto ou intermediário.
- d) NBR 15215-3 – Iluminação natural – Parte 3. Estabelece procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos.
- e) NBR 15215-4 – Iluminação natural – Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações - Método de medição. Prescreve os métodos para a verificação experimental das condições de iluminância e luminância de ambientes internos.
- f) NBR 15575-1 – Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Estabelece os requisitos e critérios de desempenho que se aplicam às edificações habitacionais, como um todo integrado, bem como de forma isolada para um ou mais sistemas específicos. Na seção 13 estabelece os critérios relativos especificamente ao Desempenho Lumínico, para qual define como requisitos a Iluminação Natural e a Iluminação Artificial. Para iluminação natural define dois critérios. Pelo critério de simulação, estabelece o nível geral de iluminação mínimo a ser obtido exclusivamente pela luz natural e método de avaliação que deve ser adotado. Pelo critério de medição, estabelece o valor percentual mínimo para ao Fator de Luz Diurna (FLD) e o método de

avaliação que deve ser adotado. Para iluminação artificial, estabelece o nível de iluminação mínimo que deve ser obtido conforme o cômodo.

2.2.2 Breve histórico dos métodos de avaliação da iluminação natural

Historicamente, a utilização de ferramentas para avaliação da luz natural tem origem a partir da Revolução Industrial, concomitantemente aos primeiros desenvolvimentos dos estudos da fotometria. As mudanças sociais e tecnológicas que marcaram o período trouxeram também mudanças importantes nas aplicações, requisitos e sistemas para iluminação natural. Para atender às novas regulamentações daquele período, inicialmente, foram criadas ferramentas para tratar da análise da luz solar direta e, com maior impulso a partir dos anos 1970, para a análise da luz refletida (GEEBELEN, 2003).

O artigo de Geebelen (2003) traz uma visão geral da evolução dessas ferramentas desde seus primórdios até as simulações computacionais. Nesse artigo são abordados: as principais aplicações e limitações do uso de maquetes para análises qualitativas e quantitativas; os principais métodos gráficos, tabulares e de cálculos manuais utilizados para análise da luz direta, da componente refletida, a combinação de ambas e estimativa anual; ferramentas digitais simplificadas, baseadas em métodos de cálculo manuais; os princípios que fundamentam as ferramentas de simulação de transferência luminosa utilizadas pelos softwares de simulação atuais.

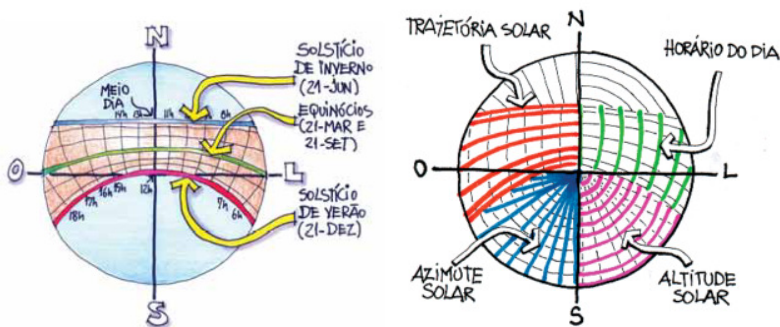
Para a IEA-SHC (2009), ferramentas de projeto para a iluminação natural podem ser divididas em ferramentas simples – como equações empíricas, tabelas, nomogramas, transferidores e cartas solares – e ferramentas computacionais, embora algumas ferramentas simples também possam ser encontradas em programas CAD (*Computer-Aided Design*). Ferramentas simples são consideradas essenciais para auxiliar o projetista nas decisões iniciais que têm grande impacto no desempenho do edifício (IEA-SHC, 2009).

2.2.3 Simulação da geometria solar: incidência solar, sombreamento e obstruções.

A geometria solar é considerada por Lamberts, Dutra e Pereira (2014) como um dos mais importantes aspectos da arquitetura bioclimática e um conhecimento essencial aos arquitetos. Cartas solares

(Figura 2.2) representam a projeção das trajetórias solares durante todo ano, e através delas se pode extrair informações importantes para o projeto, como as horas de Sol e sombra incidentes sobre uma dada orientação de fachada. Como recurso de projeto, torna possível determinar um sombreamento ótimo para cada abertura, permitindo a iluminação sem o ganho solar. Ferramentas computacionais que representam as cartas solares ou, de alguma forma, auxiliem a visualização da trajetória solar em relação ao projeto são muito úteis para a realização de estudos de sombreamento, incidência e penetração solar, auxiliando a tomada de decisões de projeto visando a iluminação natural.

Figura 2.2 – Representação das cartas solares e informações que dela podem ser extraídas.



Fonte: LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014. p.123.

2.2.4 Simulação da irradiação solar

A utilização da energia solar, assim como da luz do dia para um dado local depende da quantidade do fluxo radiante, sendo que esse fluxo sofre variações mensais e diurnas. A maior parte dos dados de radiação disponíveis é dada em termos da quantidade de energia recebida por uma superfície horizontal, seja ela proveniente diretamente do Sol ou difusamente da abóbada celeste. Para aplicações relacionadas à arquitetura, entretanto, há necessidade de se estimar também a quantidade de energia incidente em superfícies inclinadas em orientações diversas, o que pode ser feito a partir dos dados de energia direta e global correspondentes. (MUNEER, 2004)

Mapas de radiação solar seriam, portanto, a representação dessas estimativas sobre as diversas superfícies de um modelo arquitetônico, através de gráficos de cores gerados de forma análoga à utilização de

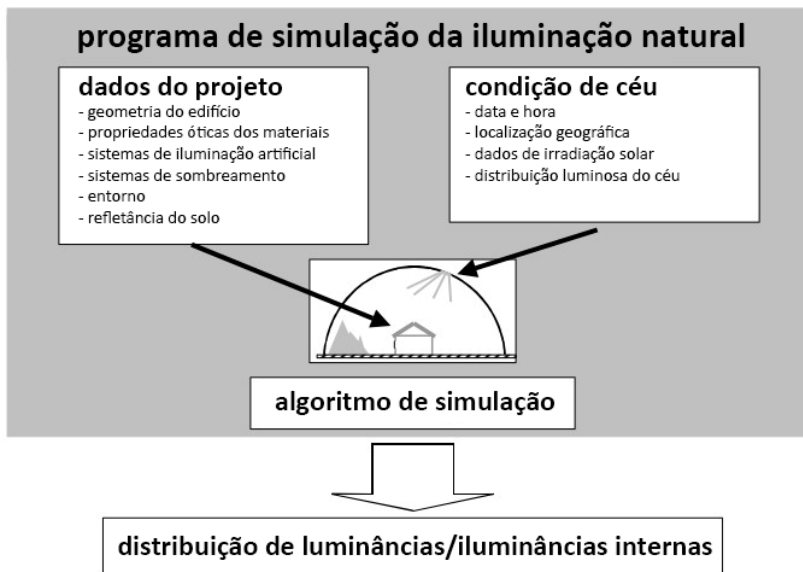
curvas isolux para a representação dos mapas de iluminâncias.

2.2.5 Simulação computacional de iluminação natural

Atualmente as pesquisas e esforços para a integração das simulações ao processo de projeto estão concentrados em ferramentas computacionais. Hitchcock (1995) apresentou três requisitos para que houvesse uma transição entre programas de simulação e análise de iluminação autônomas para programas de auxílio ao projeto baseado em simulações. Os requisitos seriam: o uso de motores de cálculo especializados em iluminação; métodos facilitados para a criação de modelos descritivos do edifício passíveis de simulação e técnicas automáticas para prover orientações ao projeto no que diz respeito à iluminação. O autor já apontava, em 1995, a necessidade de se considerar dados climáticos para avaliar o desempenho ao longo do ano. Muitos avanços já podem ser observados quanto aos dois primeiros requisitos, enquanto ainda parece haver muito por ser desenvolvido quanto ao terceiro. Nesta seção são apresentados conceitos fundamentais para o entendimento dos processos de simulação computacional da iluminação natural. Tais conceitos são comuns às diversas ferramentas de simulação disponíveis, mesmo que as abordagens de aplicação sejam diversas.

Os programas de simulação da iluminação natural fazem uso de algoritmos de cálculo para prever iluminâncias e luminâncias de um dado ponto num dado instante com base em um modelo geométrico do edifício e nas condições do céu nesse dado instante (REINHART, 2010). Os algoritmos de cálculo interpretam os dados do projeto, relacionando-os com os dados climáticos que caracterizam as condições de céu, seja para um instante no tempo ou ao longo dos dias, meses e ano. A Figura 2.3 ilustra esquematicamente o processo de cálculo dos algoritmos de simulação da iluminação natural, em que os dados do projeto e os dados das condições de céu constituem os dados de entrada para os algoritmos, que processam os cálculos e fornecem como dados de saída valores de iluminâncias e luminâncias do espaço simulado.

Figura 2.3 – Esquema genérico dos programas de simulação da iluminação natural



Fonte: Adaptado de REINHART (2010). p.18.

2.2.5.1 Dados do projeto

A iluminação natural em um ambiente resulta, portanto, de uma série de dados de projeto, indicados na Figura 2.3, acima, e descritos a seguir.

2.2.5.1.1 Geometria do projeto

É o principal dado para as simulações, pois é a representação tridimensional do espaço para o qual se deseja avaliar a iluminação natural. Deve ser modelada da forma mais realista possível. Em processos de projeto BIM, o grau de detalhes da geometria corresponde ao Nível de Desenvolvimento do Modelo, que evolui na mesma medida em que se avançam as etapas formais de projeto, conforme abordado na seção 2.1.4.1. A IES (2013) recomenda que os ambientes sejam modelados de forma mais fiel possível à realidade, em casos de edifícios existentes, ou conforme definições do projeto arquitetônico, como considerado no Experimento indireto desta pesquisa.

2.2.5.1.2 Propriedades ópticas superficiais dos materiais

As propriedades ópticas dos materiais relevantes para a iluminação são as refletâncias, dos materiais opacos, e a transmitância à luz visível (VLT ou *Visible Light Transmittance*), de materiais translúcidos. As refletâncias das superfícies nos ambientes internos têm um grande impacto na distribuição dos níveis de iluminação no espaço, pois determinam as inter-reflexões da luz no ambiente. As transmitâncias dos elementos translúcidos determinam quanto da luz natural disponível irá penetrar no ambiente através das aberturas (IES, 2013).

2.2.5.1.3 Sistemas de iluminação artificial

Os sistemas de iluminação artificial devem ser modelados caso o objetivo seja avaliar sua integração com a iluminação natural. A pesquisa tem como ênfase avaliar o desempenho da iluminação natural para as decisões arquitetônicas em etapas iniciais, quando não se conta ainda com um projeto luminotécnico definido, e por isso, a iluminação artificial não será objeto de investigação.

2.2.5.1.4 Dispositivos de sombreamento

Dispositivos de sombreamento podem ser fixos ou móveis, operados manual ou automaticamente. Dispositivos fixos são elementos arquitetônicos integrantes do edifício e definidos em projeto, e devem ser modelados de forma fiel à proposta arquitetônica. Em simulações dinâmicas (seção 2.2.5.3) a operação de dispositivos móveis é relevante para várias métricas de análise e programas de operação (*operation schedules*) são utilizados como dados de entrada em programas de simulação.

2.2.5.1.5 Condições do entorno

O entorno edificado ou natural tem efeito significativo nas condições de iluminação de um ambiente interno, pois podem constituir obstruções à visibilidade da abóbada celeste. A IES (2013) recomenda que sejam modeladas quaisquer obstruções que estejam a uma distância de até 30m dos ambientes em análise. Edifícios vizinhos, elementos opacos e árvores devem ser representados com suas respectivas refletâncias. Se estas não forem conhecidas, valores padrão de 30% para

edifícios e elementos opacos e de 20% para árvores podem ser adotados.

2.2.5.1.6 Refletância média do solo

Parte integrante do entorno, o solo tem sua contribuição para iluminação dos ambientes internos ao refletir a luz da abóbada celeste para superfícies internas. A IES (2013) recomenda que sejam representadas as refletâncias reais ou, caso não sejam conhecidas, o valor de 20%.

2.2.5.2 Modelos de céu

A luz do dia pode ser dividida entre luz direta, proveniente do Sol, e luz difusa, proveniente da abóbada celeste após ser refletida e espalhada enquanto atravessa a atmosfera. As iluminâncias produzidas na superfície terrestre cobrem uma grande faixa de variação, atingindo entre 1000 lux, num dia de céu encoberto, e 150.000lux, num dia de céu claro (BOYCE, 2003). Modelos de céu são entendidos aqui como modelos do padrão de distribuição das luminâncias na abóbada celeste, e foram elaborados com base em análises regressivas de parâmetros como altura solar, grau de umidade no ar, irradiação solar difusa e global, entre outros. A partir desses parâmetros são definidas categorias de claridade da abóbada e parâmetros discretos atribuídos a cada categoria são inseridos em fórmulas matemáticas que determinam, para cada data e hora desejada, os valores de iluminância global no plano horizontal, iluminância difusa no plano horizontal e iluminância direta normal à direção do sol e a luminância no Zênite (CLARO, 2015).

Cunha (2011) organizou cronologicamente a evolução histórica dos modelos matemáticos para a caracterização da distribuição das luminâncias na abóbada celeste. De acordo com a pesquisa desse autor, os primeiros modelos padronizados pela *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE) foram propostos por Moon e Spencer (1942) *apud* Cunha (2011), para caracterizar a distribuição das luminâncias com céu encoberto, e por Kittler (1967) *apud* Cunha (2011), para caracterizar a distribuição das luminâncias com céu claro. A evolução desses modelos iniciais resultou também em modelos para condições intermediárias que são adotados por programas de simulação da iluminação natural. Os dois modelos de céu-padronizados pela CIE são os mais comumente utilizados em simulações estáticas e representam dois extremos das condições de céu: o Céu Claro CIE e Céu Encoberto CIE. Há ainda os modelos padronizados para condições intermediárias, como o Céu Parcialmente

Encoberto e o Céu Uniforme. Preetham, Shirley e Smits (1999) propuseram ainda um modelo, denominado como Céu Colorido Utah, para aplicação gráfica de reprodução de cenas ao ar livre, quando o efeito do ar é perceptível e altera a coloração da luz e dos objetos distantes.

O Modelo de Perez consagrou-se como o modelo para caracterização das condições de céu mais comumente utilizado em ferramentas para as simulações dinâmicas da iluminação natural e consiste em dois modelos independentes (REINHART, 2010). O modelo de Eficácia Luminosa, composto por um conjunto de equações propostas em Perez *et al* (1990), é associado ao modelo de Distribuição Luminosa, composto por formulações matemáticas desenvolvidas posteriormente e apresentadas em Perez, Seals e Michalsky (1993). As equações de Eficácia Luminosa têm a função de converter dados climáticos de radiação solar, medidos em W/m^2 , em dados de iluminância. Com essas equações, dados de irradiação difusa e global medidos em estações climáticas são associados a parâmetros de altura solar, grau de umidade do ar, entre outros dados, para determinar valores de iluminância horizontal global, iluminância horizontal direta normal à direção do sol, iluminação horizontal difusa e a luminância no Zênite. Com base nesses parâmetros são estabelecidas 8 categorias de luminosidade, ou tipos de céu, que compreendem desde o céu claro ao céu encoberto, passando por condições intermediárias de nebulosidade. Cada umas dessas 8 categorias estão associadas ao modelo de Distribuição Luminosa, que calcula as luminâncias para cada parcela da abóbada em função da luminância do Zênite.

Posteriormente, Kittler, Perez e Darula (1997) *apud* Claro (2015) apresentaram novos modelos derivados da concepção original de Perez, com uma abordagem similar e ampliada, que trataremos nesta dissertação simplesmente como Modelo de Kittler. Novos parâmetros foram introduzidos às formulações matemáticas e os 8 tipos de céu do modelo de Perez foram expandidos e resultaram em 15 tipos de céu. Os 15 tipos de céu do Modelo de Kittler foram adotados e consolidados pela norma ISO 15.469:2004: *Spatial distribution of daylight - CIE Standard General Sky*. De acordo com Cunha (2011) esta norma estabelece uma base universal para classificar as medições e calcular as distribuições de luminâncias na abóbada para efeitos de cálculos da iluminação natural.

Uma implicação prática desses dois modelos, apontada por Claro (2015) é que, na formulação original de Perez, a leitura dos dados climáticos conduzia inequivocamente a um dos 8 tipos céu, enquanto no Modelo de Kittler a leitura dos dados climáticos pode resultar em parâmetros que permitem enquadrar as condições climáticas em mais de

um dos 15 tipos consolidados pela Norma.

As formulações matemáticas e todos os parâmetros desses dois modelos são detalhados nos trabalhos supracitados e são mencionadas em revisão bibliográfica do trabalho de Claro (2015) como base teórica para elaboração de seu Método para Estimativa Anual de Luz Natural utilizando o Modelo Vetorial Esférico.

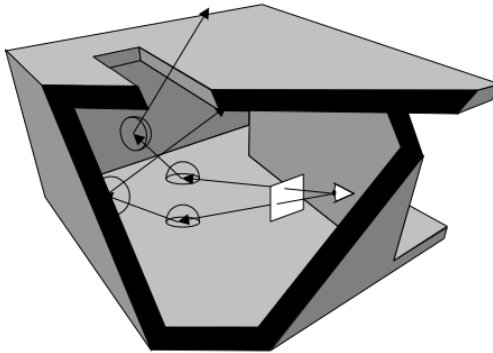
2.2.5.3 Algoritmos de simulação e métodos de cálculo de iluminação.

Os algoritmos utilizados pelos programas de simulação para o cálculo das iluminâncias e luminâncias internas do ambiente se baseiam em métodos de cálculo com duas abordagens principais: o método da Radiosidade (*Radiosity*) e o método do Raio Traçado (*Ray Tracing*). Assim como foi mencionado no trabalho de Claro (2015), não se pretende aqui um aprofundamento no histórico da evolução de cada método ou mesmo nas formulações matemáticas que os constituem, mas compreender conceitualmente suas aplicações para as simulações de iluminação natural.

2.2.5.3.1 Método do Raio Traçado (*Ray Tracing*)

Historicamente foi a primeira técnica para cálculo da iluminação global. Foi desenvolvida por Whitted (1979) e tinha como intuito gerar uma visualização bidimensional para uma cena tridimensional. Consiste na investigação de um número limitado de raios luminosos em uma cena e apresenta duas variações reconhecidas pelos termos em inglês *forward ray tracing* e *backward ray tracing*. Na primeira variação, traduzida como Raio Traçado Progressivo, os raios são traçados a partir da fonte luminosa em direção à cena. Na segunda, traduzida como Raio Traçado Recursivo, mais comumente utilizada pelos programas de simulação, os raios são traçados a partir de um ponto de vista determinado, em quantidade limitada àqueles considerados mais importantes para a cena (GEEBELEN, 2003). Esquematicamente, o método do Raio Traçado Recursivo é ilustrado pela Figura 2.4.

Figura 2.4 – Método do Raio Traçado. Representação das trocas luminosas em raios partindo do ponto de vista do observador.



Fonte: GEEBELEN (2003). p.20.

Em uma abordagem mais atual, foram desenvolvidos algoritmos que utilizam o método do Raio Traçado bidirecional. De acordo com Walter *et al.* (2006), o algoritmo é capaz de calcular a iluminação em um ponto gerada por fontes complexas, tais como superfícies iluminadas, modelos de céu, mapas HDR¹ e fontes indiretas de luz. O método é denominado bidirecional, pois identifica cada fonte de luz atuante em uma cena como fontes pontuais, organizadas hierarquicamente e, através de análise discreta, estimam a integralização da contribuição de cada fonte para cada pixel da cena. Em seguida, traça os raios para cada ponto de vista para coletar a contribuição de cada pixel (WALTER *et al.*, 2006).

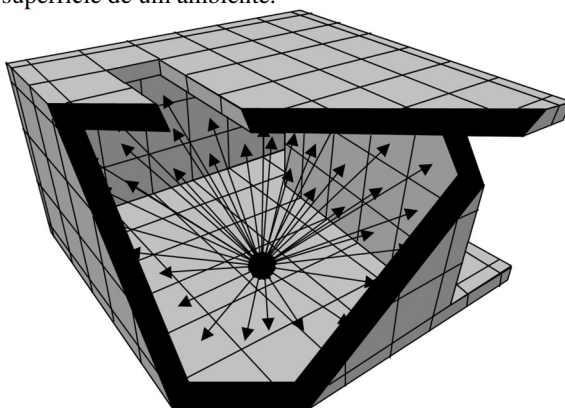
2.2.5.3.2 Método da Radiosidade

O método da **radiosidade** foi desenvolvido inicialmente para o cálculo de trocas térmicas por radiação entre duas superfícies. A partir dos anos 1980 passou a ser aplicado também em cálculos de iluminação para computação gráfica (REINHART, 2010). Utilizando uma abordagem de elementos finitos, um ambiente é dividido em um número

¹ *High-Dynamic Range* - ou ampla faixa dinâmica. Consiste em métodos digitais utilizados para representar mais precisamente as áreas mais claras e mais escuras de uma imagem.

definido de parcelas e seus respectivos vértices, e considera que todas as trocas luminosas ocorrem entre esses vértices. O termo fracionamento é utilizado pelo programa Apolux para representar tal subdivisão. Um fator de forma descreve as trocas luminosas entre dois nós, relacionando, assim, a luminosidade emitida por uma superfície àquela que chega a uma outra superfície diretamente (GEEBELEN, 2003). Esquemáticamente, o método é ilustrado pela Figura 2.5.

Figura 2.5 – Método da radiosidade. Representação das trocas luminosas entre parcelas de superfície de um ambiente.



Fonte: GEEBELEN (2003). p.21

2.2.5.3.3 Consequências para o processo de simulação.

Para Geebelen (2003), cada método apresenta vantagens e desvantagens, podendo mesmo ser considerados complementares, de modo que alguns programas de simulação usam algoritmos que mesclam as duas técnicas. A tabela a seguir faz uma síntese comparativa.

Tabela 2.1 – Comparativo entre os métodos Raio Traçado e da Radiosidade.

| Ray Tracing | Radiosidade |
|--|--|
| Dependente do Ponto de Vista | Independente do Ponto de Vista |
| Manipula melhor o comportamento especular | Manipula melhor o comportamento difuso |
| Manipula qualquer geometria | Manipula melhor geometrias facetadas |
| Pode manipular transparência | Funciona melhor com superfícies opacas |
| Não computa a completa distribuição de luz da cena | Computa a completa distribuição de luz da cena |
| Tem dificuldade com a iluminação indireta | A iluminação indireta é corretamente tratada |

Fonte: GEEBELEN (2003). p. 22. Tradução do autor.

Tomando por referência o trabalho de Claro (2015), pode-se dizer

que nos métodos baseados no Raio Traçado os ambientes são simulados com base no cálculo das trocas luminosas de um número limitado de raios que partem de um ponto de vista definido ou de um conjunto de sensores. O método não computa a completa distribuição de luz da cena e a precisão da simulação é determinada pelo tamanho da amostragem de raios calculados. Para os pontos das superfícies não atingidos pelos raios calculados é feita uma interpolação para a completa reprodução do resultado. Os tempos de cálculo dependem principalmente do número de pontos analisados, do número de raios emitidos e do número de reflexões internas (*bounces*¹) definido para os cálculos. Variam em progressão geométrica, em função dos valores definidos para esses parâmetros. O tamanho do modelo geométrico, portanto, não interfere diretamente no tempo de processamento dos cálculos.

Ainda com referência ao trabalho de Claro (2015), em simulações realizadas pelo método da Radiosidade os cálculos independem do ponto de vista. Todas as superfícies do modelo são fracionadas em parcelas, que são representadas por seus vértices, e o cálculo dos fatores de forma relaciona cada vértice a todos os demais para determinar as trocas luminosas. A distribuição da iluminação da cena é calculada para todas as superfícies constantes no modelo geométrico. Dessa forma, o tamanho e número total de superfícies constantes no modelo geométrico e o fator de fracionamento determinam o número total de vértices calculados, tendo grande impacto nos cálculos dos fatores de forma. Os tempos de processamento variam exponencialmente, em função do quadrado do número total de vértices e linearmente em função do número de ciclos de radiosidade². O fator de fracionamento também tem grande influência na precisão dos resultados. Como consequência, o tamanho do modelo geométrico é determinante para o tempo de processamento e para a precisão dos resultados. As simulações podem mesmo se tornar inviáveis a partir de um determinado número de vértices do modelo geométrico, fazendo-se necessário limitar o seu tamanho.

¹ O termo *bounce*, pode ser traduzido do inglês como salto, quique. No contexto dos programas de simulação, refere-se ao número de reflexões calculadas no percurso de um raio luminoso que parte de um ponto de análise.

² O número de ciclos de radiosidade é análogo aos *bounces*, embora conceitualmente sejam diferentes.

2.2.5.4 Coeficiente de Luz Diurna (DLC - Daylight Coefficient)

De acordo com Tregenza e Waters (1983), que propuseram o conceito do Coeficiente de Luz Diurna, a quantidade de luz natural que chega a uma superfície de um ambiente depende de dois fatores independentes: da distribuição das luminâncias na abóbada e da forma e dos materiais das superfícies do ambiente. O Coeficiente de Luz Diurna (DLC) seria, então, um fator que depende das geometrias do ambiente e do seu entorno, das refletâncias das superfícies e transmitâncias das aberturas, e define a sensibilidade das iluminâncias internas em relação às mudanças das luminâncias de cada parcela do céu (TREGENZA e WATERS, 1983).

Galatioto e Beccali (2016) afirmam que atualmente todos os métodos científicos para avaliar a disponibilidade da luz natural têm como ponto de partida o DLC proposto por Tregenza e Waters (1983).

2.2.5.5 Simulações estáticas e simulações dinâmicas

Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006) atribuem o crescimento das simulações para iluminação natural, sejam elas estáticas ou dinâmicas, ao maior acesso a computadores com grande poder de processamento, à agilidade e interesse nas tecnologias da informação da atual geração de arquitetos e à disponibilidade de interfaces aprimoradas para a geração de modelos geométricos para simulação e apresentação gráfica dos resultados. Assim, a análise de resultados de simulações vem se tornando cada vez mais acessível aos projetistas, deixando de ser restrita aos especialistas.

No contexto desta dissertação, simulações estáticas são definidas como sendo aquelas em que a iluminação natural dos ambientes é simulada para um dado instante no tempo sob determinada condição de céu. De acordo com Gherri (2015), a avaliação com esse tipo de simulação se dá pela comparação do resultado com um nível de iluminação ótimo, assim estabelecido como um limite para o desenvolvimento de uma tarefa visual prevalecente no ambiente. A autora considera, entretanto, que análises estáticas são simplistas e imprecisas, e não são capazes de representar as reais condições e distribuição da luz, e nem o potencial inerente ao uso apropriado da luz natural para estratégias de economia de energia.

As simulações dinâmicas surgem, portanto, da necessidade de se obter uma medida realística para o desempenho dos edifícios considerando um longo período de tempo. O período ideal de um ano é

sugerido para captar todas as variações das condições de Sol e céu decorrentes do clima e das estações do ano. E com medidas realizadas a cada hora para que se possa observar também variações de um curto período, ao longo de um dia (MARDALJEVIC, 2000). O fluxo de trabalho resultante, segundo Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006) é basicamente o mesmo que se utiliza para simulações estáticas. Envolve o tratamento do modelo geométrico tridimensional, especificação das propriedades ópticas das superfícies internas e externas e a definição de uma malha de sensores para o cálculo de iluminâncias. A principal diferença consiste na utilização de um arquivo climático que fornece dados horários de irradiação global, direta e difusa. O modelo proposto por Mardaljevic (2000) utiliza os arquivos climáticos no formato TRY¹, que minimiza condições peculiares de um ano atípico, e tem os seguintes procedimentos básicos:

- Obtenção dos dados climáticos no formato TRY para Radiação Global e Radiação Difusa.
- Conversão dos dados de Radiação em dados de Iluminância através de modelos de eficácia luminosa, como o Modelo de Perez, abordado na seção 2.2.4.2.
- Determinação da distribuição das luminâncias na abóbada usando um modelo de céu.

A abordagem do DLC é utilizada para tornar viável o cálculo das aproximadamente 3500 horas úteis do ano. Esta abordagem permite a simplificação dos cálculos das inter-reflexões internas, que demandariam tempo e capacidade computacional impraticáveis se tivessem de ser realizados para cada uma das diferentes condições de céu de cada hora útil do ano (MARDALJEVIC, 2000; CLARO, 2015).

A evolução dos métodos de análise que tinham como base simulações estáticas para métodos de análise com base em valores de iluminâncias para cada hora útil do ano representa um grande salto em complexidade, de modo que os resultados dos cálculos precisam ser apresentados de forma inteligível para o analista. Dessa evolução decorre a necessidade de criação de métricas sumárias que sejam úteis como um indicativo final do desempenho de um projeto. As principais vantagens dessa categoria de métricas, segundo Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006), é que elas permitem que sejam consideradas as variações diárias e sazonais nas características da luz natural e a irregularidade de eventos meteorológicos, além de aspectos quantitativos. Ressalva-se, porém, que

¹ *Test Reference Year* ou Ano Climático de Referência

tal sumarização pode implicar na perda de informações significativas e/ou instrutivas dos dados originais, o que requer cuidado e conhecimento para uma análise coerente (MARDALJEVIC, 2000).

2.2.5.6 Visualização de resultados e métricas para análise de simulações estáticas

Um importante campo de pesquisas relacionado às simulações para análise da iluminação natural é o desenvolvimento de métricas e critérios que sejam representativos do desempenho dos espaços. De acordo com Mardaljevic, Heschong e Lee (2009), o termo ‘métrica’ pode ser definido como uma combinação matemática de medidas e/ou dimensões e/ou condições representadas em uma escala contínua, enquanto o termo ‘critério’ refere-se a uma demarcação da métrica para determinar se um ambiente está em conformidade.

Apresentam-se a seguir algumas das principais métricas para análise da iluminação natural obtidas por simulações estáticas.

2.2.5.6.1 *Mapas de Iluminâncias*

Os mapas de iluminâncias são a representação gráfica, obtida através do traçado de curvas de isoiluminância (ou isolux, como são popularmente conhecidas), que unem pontos com os mesmos valores de iluminância em um plano. A NBR 15215-4 (ABNT, 2004) recomenda esse tipo de representação de resultados para a análise da variação e distribuição das iluminâncias em um ambiente. Kremer (2002) aponta que esse tipo de representação tem linguagem familiar para a análise por arquitetos e indica ainda outros parâmetros para análises de distribuição dos níveis de iluminação que podem ser obtidos a partir dos valores observados nos gráficos, tais como coeficiente de variação, a razão de uniformidade e a razão de diversidade.

2.2.5.6.2 *Daylight Factor (DF) ou Fator de Luz Diurna (FLD)*

Também denominado como Contribuição da Iluminação Natural (CIN), o Fator de Luz Diurna (FLD) é definido como a razão entre a iluminância interna de um ponto do edifício e a iluminância externa em um plano horizontal desobstruído sob o modelo de céu padrão CIE Encoberto (*Overcast*).

A ampla aceitação do FLD pode ser atribuída à sua capacidade de influenciar diversos aspectos de um projeto, tais como a geometria do

edifício, o entorno paisagístico ou edificado e as características superficiais dos espaços (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006). A simplicidade do método – que também favorece sua aceitação – e a utilização da pior condição de céu - o céu encoberto - são os principais argumentos de seus proponentes, segundo Mardaljevic (2000). Sua maior fraqueza, entretanto, é que considera apenas a condição de Céu Encoberto CIE, que é simétrico para todas as direções da abóbada e independente da latitude. Como consequência, a orientação do edifício não influencia os resultados dos FLD que, por sua vez tendem a subestimar as iluminâncias internas (REINHART, 2010).

2.2.5.7 Métricas de análise por simulações dinâmicas

Apresentam-se a seguir as principais métricas utilizadas para análise da iluminação natural obtidas por simulações dinâmicas.

2.2.5.7.1 *Daylight Glare Probability (DGP) ou Probabilidade Ofuscamento pela Luz Diurna*

A Probabilidade de Ofuscamento pela Luz Diurna, ou DGP, é um importante índice para avaliar o desconforto humano, que fornece uma análise compreensiva anual do fenômeno do ofuscamento (GALATIOTO; BECCALI, 2016). A formulação matemática que descreve o percentual de pessoas em desconforto sob uma dada situação de iluminação natural foi apresentada em Wienold (2007). Relaciona as variáveis Iluminância vertical ao nível do olho, luminância da fonte, ângulo sólido da fonte e o índice de posição de Guth.

2.2.5.7.2 *Daylight Autonomy (DA) ou Autonomia de Luz Diurna*

A Autonomia de Luz Diurna (DA) é uma métrica de simulação dinâmica que utiliza as iluminâncias no plano de trabalho horizontal como indicador para determinar se o espaço dispõe de luz natural em quantidade suficiente para que tarefas visuais sejam realizadas sem o uso de luz artificial. Pode ser definida como “a porcentagem das horas de ocupação do ano em que o mínimo requerido para o nível de iluminação em um sensor é atingido apenas pela luz natural” (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006. p. 16, tradução do autor).

2.2.5.7.3 *Continuous Daylight Autonomy (cDA) ou Autonomia de Luz Diurna Contínua*

É uma variação do conceito de DA que foi proposta por Rogers (2006, *apud* REINHART, MARDALJEVIC e ROGERS, 2006) como uma forma de atribuir créditos proporcionais para os níveis de iluminância proporcionados pela luz natural em cada instante de medição/simulação que forem ligeiramente inferiores ao limite mínimo considerado em DA. Assim, se um sensor registra num instante um valor que seja, por exemplo, de 400 lux quando o mínimo seria de 500 lux, um crédito proporcional de 80% é considerado. Desta forma, suaviza-se o limite mínimo estabelecido, leva-se em consideração a percepção distinta e preferências pessoais de cada indivíduo e se reconhece a contribuição parcial da iluminação natural mesmo para valores de iluminâncias inferiores ao limite de referência. (REINHART, MARDALJEVIC e ROGERS, 2006)

2.2.5.7.4 *Useful Daylight Illuminance (UDI) (ou Iluminâncias Úteis de Luz Diurna)*

É uma importante medida dinâmica para avaliar o desempenho da luz natural e, assim como o DA, se baseia nas iluminâncias no plano de trabalho horizontal. Foi proposta por Nabil e Mardaljevic (2005). Seu propósito é determinar quando os níveis de iluminação natural são úteis para o ocupante do espaço, ou seja, que o espaço não fique nem muito escuro, abaixo do limite inferior de 100lux, e nem excessivamente iluminado, acima do limite superior de 2000lux. Os limites entre 100lux e 2000lux foram propostos pelos autores, mas podem variar conforme necessidades das tarefas visuais. Os limites inferior e superior conduzem a derivação de três métricas, que seriam os percentuais de horas ocupadas em que o UDI fica abaixo, compreendido entre ou acima de tais limites. O percentual do UDI acima de do limite superior é considerado como indicativo da possibilidade de desconforto do ocupante, tanto térmico quanto visual, pois sinaliza admissão excessiva de radiação solar e a possível sobrecarga térmica e/ou o risco de ofuscamento (REINHART, MARDALJEVIC e ROGERS, 2006). Outras referências, no entanto, também consideram como limite superior o valor de 3000lux (MARDALJEVIC, 2013; GALATIOTO e BECCALI, 2016).

Um nível intermediário de 300lux foi introduzido por Mardaljevic (2013), estabelecendo-se em consequência novas faixas percentuais para o UDI:

- **UDI_{<100}**: percentual de horas em que o UDI fica abaixo do limite inferior de 100lux, indicando o tempo em que a luz natural é

desprezível.

- **UDI₁₀₀₋₃₀₀**: percentual de horas em que o UDI fica entre 100 e 300 lux, indicando o tempo em que a iluminação natural deve ser complementada por luz artificial.
- **UDI₃₀₀₋₂₀₀₀**: percentual de horas em que o UDI fica entre 300 e 2000 lux, indicando que a iluminação natural é capaz de suprir sozinha a necessidade do ambiente.
- **UDI_{>2000}**: percentual de horas em que o UDI fica acima de 2000 lux, indicando o tempo que se fazem necessários recursos para evitar o sobreaquecimento ou o risco de desconforto por ofuscamento.

Para representação gráfica da métrica UDI é necessário representar separadamente a distribuição dos percentuais de horas que cada ponto do ambiente está compreendido em cada uma das faixas de iluminâncias. A análise, portanto é feita com base em 4 gráficos para cada ambiente.

2.2.5.7.5 *Spatial Daylight Autonomy (sDA) ou Autonomia Espacial de Luz Diurna*

É a métrica recomendada pela IES (*Illuminating Engineering Society*) para se avaliar a suficiência da disponibilidade de luz natural em um espaço interior. Os critérios e limites adotados foram definidos com base em estudos realizados em espaços reais com o propósito específico de dar suporte à sua definição. A métrica é definida como o percentual da área de análise que atinge um nível mínimo de iluminação por um percentual definido das horas úteis anuais. Para atender ao critério estabelecido pela IES, o nível de iluminação limite é padronizado em 300 lux, embora outros valores possam ser adotados conforme as necessidades do tipo de tarefa visual que ocorra no ambiente. O percentual de horas úteis que deve ser atingido é de 50% e considera um período diário de 10 horas – 8h às 18h. Como critério de aceitação, definem-se dois níveis: preferível (75%) ou aceitável (55%). (IES, 2013)

A notação padronizada indica o nível mínimo de referência para iluminância e o percentual das horas úteis anuais que deve ser atingido. Assim, como exemplo, o indicador $sDA_{300,50\%}$, sinaliza o percentual da área do ambiente que apresenta um valor mínimo de 300 lux de iluminância no plano de trabalho horizontal durante pelo menos 50% das horas úteis anuais. (CLARO, 2015)

Complementarmente aos critérios de avaliação de suficiência da luz natural obtidos pelo sDA, um espaço interno deve também garantir o conforto visual dos ocupantes e prevenir ganhos térmicos excessivos.

Para avaliar tais aspectos, esta métrica é analisada em conjunto com a Exposição Anual à Luz Solar, descrita a seguir.

2.2.5.7.6 Annual Sunlight Exposure (ASE) ou Exposição Anual à Luz Solar

A Exposição Anual à Luz Solar é uma métrica que descreve o potencial de desconforto visual em espaços interiores e foi oficialmente descrita na publicação da IES (2012). Por definição, representa o percentual da área do plano de análise que excede um valor determinado para iluminância pela luz solar direta por um número de horas anuais maior que o número estabelecido. Foi elaborada com base em estudos de campo direcionados especificamente ao seu desenvolvimento. Verificou-se que quanto mais tempo um plano de tarefa é exposto à luz direta do Sol, maior a probabilidade de desconforto visual do usuário/ocupante. Os limites para a iluminância pela luz solar direta e para o número de horas foram padronizados com base nesses estudos para que permitam a comparação entre diferentes ambientes de forma mais fiel. Utilizando os mesmos parâmetros de modelagem e simulação da sDA, são computados os pontos de análise que excedem 1000 lux de luz direta do Sol por mais que 250 horas por ano. A notação padronizada nestas condições seria ASE_{1000,250h}. Como critério de conformidade, foram estabelecidos três níveis baseados em pesquisas de campo (IES LM-83-12)¹:

- Até 3% para ASE_{1000,250h} o espaço é considerado aceitável.
- Até 7% para ASE_{1000,250h} o espaço é considerado neutro.
- Acima de 10% para ASE_{1000,250h} o espaço é considerado insatisfatório.

Assim, com base nos valores definidos para análise, a ASE fornece um indicativo da necessidade de uso de proteção para a incidência da luz direta do Sol. Para considerar somente a componente direta, faz-se necessário que as simulações sejam realizadas sem o cálculo de qualquer inter-reflexão interna do ambiente.

2.2.6 Pesquisas sobre simulação e análise no processo de projeto

De acordo com Donn, Selkowitz e Bordass (2009), há um consenso

¹ O documento oficial em que consta o método aprovado para ASE não menciona o critério intermediário para os percentuais acima de 7% e até 10%.

entre os analistas de simulação de desempenho de que as primeiras decisões de projeto são críticas para o desempenho futuro do edifício, e tal consenso tem levado muitos pesquisadores a desenvolver ferramentas de suporte para as decisões dos projetistas desde as etapas iniciais.

Inicialmente, segundo Papamichael (1997), ferramentas de simulação foram desenvolvidas por pesquisadores para propósitos específicos de pesquisa e, devido ao grande volume de dados de entrada e saída e à linguagem e estrutura através da qual são manipulados, eram difíceis de serem usadas e forneciam resultados igualmente difíceis de interpretar. Ainda assim, a possibilidade de simular o comportamento dos edifícios e/ou de seus sistemas, por meio de simulação computacional, associada à crescente demanda por edifícios energeticamente mais eficientes trouxe importantes mudanças para a indústria de AEC. Kalay (1999) chegou a propor um novo paradigma. Em lugar daquele vigente, em que o projeto era o resultado de um processo sustentado na noção Aristotélica da convergência entre forma e função, o autor propõe uma abordagem alternativa, do projeto baseado na performance. Essa nova abordagem se fundamenta na noção de performance como sendo decorrente da forma e função associadas ao contexto. A avaliação do desempenho seria, portanto, uma medida de quão desejável seria o comportamento de uma dada solução na confluência entre a forma, a função e o seu contexto.

Marsh (1997), atribuía às ferramentas de simulação um caráter muito voltado à visão de engenheiros, em função do grande volume de dados tratados de uma forma que pouco se relaciona com a forma de pensar necessária à concepção dos projetos, o que seria uma das razões para que houvesse pouca aceitação entre os arquitetos como auxílio a essa etapa de concepção. Mais de uma década mais tarde, a questão da adequação das ferramentas de simulação às dinâmicas do processo de projeto permanece como objeto de investigação em pesquisas. Souza (2012) aborda essa questão apontando contrastes de paradigmas entre a forma de pensar o projeto dos usuários de ferramentas de simulação e dos arquitetos da área de projetos. Para essa autora, os contrastes residem nas diferenças quanto à base de conhecimentos e quanto à natureza da prática profissional. A diferença entre as visões de mundo desses profissionais seria uma das causas para a utilização incipiente dessas ferramentas ao longo de todo o processo de projeto. A autora sugere a necessidade de aproximação e colaboração entre esses dois paradigmas.

No Brasil, a fraca disseminação do uso de simulação de desempenho termoenergético em escritórios de projetos é atribuída por Mendes *et al* (2005) à complexidade das ferramentas computacionais

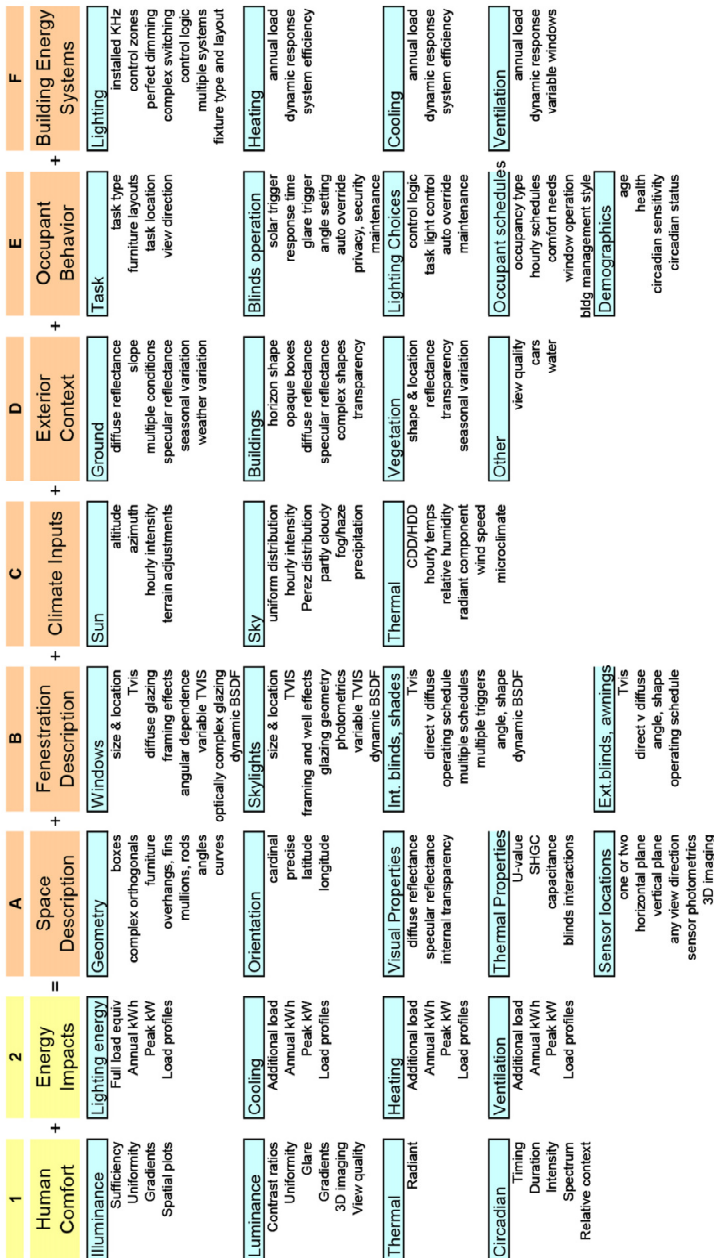
existentes e à carência de programas de incentivo para a eficiência energética das edificações.

Análises de desempenho de edifícios envolvem múltiplos aspectos muitas vezes interconectados. Daqueles mais diretamente relacionados à eficiência energética e ao impacto ambiental, é notável a estreita relação entre o desempenho lumínico e térmico. Papamichael (1997), entretanto, já apontava que a simulação desses aspectos interdependentes envolve diferentes técnicas de modelagem dos dados, em função da natureza dos fenômenos físicos envolvidos. Nesse contexto, é importante destacar a necessidade de esforços para a integração desses múltiplos aspectos. Marsh (1997) mencionou em sua tese iniciativas de organizações internacionais nessa direção, como as da *International Building Performance Simulators Association (IBPSA)* e da *International Alliance for Interoperability (IAI)*¹. Em sua tese, o autor defendia também a necessidade de uma nova abordagem que permitisse superar a barreira psicológica entre o projeto e análise, criada pelas ferramentas de simulação, e lançava as bases conceituais para a criação de ferramentas voltadas à etapa de concepção conceitual do projeto. Donn, Selkowitz e Bordass (2009) apoiaram-se na opinião de projetistas para afirmar a necessidade de ferramentas que permitam analisar ideias e questões específicas relacionadas ao local e programa de um projeto durante sua concepção. Esses autores defendem uma abordagem para ferramentas de suporte às decisões de projeto que permita a criação de um “esboço de desempenho”², que seja capaz de fornecer respostas quantitativas rapidamente, de forma análoga a um croqui desenhado por um arquiteto, com o objetivo de representar a síntese da ideia arquitetônica. Em contraponto, criticam a abordagem BIM para simulações, que pressupõe a análise de um modelo do edifício completo, quando muitas decisões de projeto relevantes para o desempenho do edifício já terão sido tomadas e dificilmente serão modificadas. Shi e Yang (2013) compartilham visão semelhante e acreditam que seja necessário o desenvolvimento de técnicas efetivas para conduzir processos de projeto e otimização orientados pelo desempenho a partir da perspectiva dos arquitetos.

¹ A International Alliance for Interoperability posteriormente se reestruturou e assumiu o nome de BuildingSmart Alliance.

² Tradução do autor para o termo “performance sketch”, utilizado na publicação.

Figura 2.6 – Estrutura de Análise da Luz Natural.



Metodologias e técnicas de análise também têm sido desenvolvidas com o foco específico para o desempenho da iluminação natural, que envolve, por si só, fenômenos bastante complexos. Denotando tal complexidade, Heschong e Saxena (2010) utilizam a seguinte expressão como título de uma seção de artigo: “Utilizar a iluminação natural envolve muitas partes em movimento” (HESCHONG; SAXENA, 2010, p. 3-105, tradução do autor). Nessa seção, discorrem sobre a variabilidade da luz natural – decorrente da trajetória solar, estações do ano e condições do tempo – e sobre o importante e complexo balanço entre a admissão de luz natural e as cargas térmicas associadas a um mesmo sistema de aberturas, por exemplo. No artigo, as autoras apresentam uma Estrutura de Análise para a Iluminação Natural, ilustrada na Figura 2.6, que fornece uma visão sobre o escopo futuro das capacidades de uma ferramenta ideal para análise da iluminação natural.

A estrutura de análise proposta tem como base recomendações da IES para orientar pesquisas e desenvolvimento de métricas anuais de desempenho da iluminação natural. As recomendações da IES citadas pelas autoras são:

- Análise por ambiente, em detrimento à análise por edifício
- Comparação entre estratégias alternativas.
- Foco no conforto visual.
- Foco na qualidade da iluminação, em detrimento do desempenho energético.
- Aplicabilidade em códigos, normas e especificações técnicas.
- Capacidade de otimizar o desempenho anual.

Padronização dos métodos para obtenção das métricas, em vez de critérios.

As recomendações da IES também definem três níveis de análise para orientar metodologias de modelagem para análise da iluminação natural:

- Nível 1: mais simples, apropriado para estudos esquemáticos para avaliação de estratégias de projeto.
- Nível 2: com nível de detalhamento suficiente para verificar a conformidade com códigos e normas.
- Nível 3: detalhamento das simulações apropriado para avaliação de espaços e edifícios existentes.

Reinhart e Wienold (2011) apontaram os avanços mais recentes nas formas de analisar numericamente o desempenho de espaços naturalmente iluminados, que seriam: tendência de adoção de simulações dinâmicas em detrimento de abordagens estáticas, métodos mais

refinados para avaliar ofuscamento, modelos de ocupação que mimetizam o comportamento dos usuários no controle da iluminação e dispositivos de sombreamento e novos métodos de avaliação para modelagem de propriedades óticas e térmicas. Também indicaram algumas barreiras à adoção dessas inovações pela comunidade de projetistas para, enfim, apresentar um Painel Analítico da Iluminação Natural (*Daylighting Dashboard*). A proposta dos autores reflete sua visão sobre como as novas técnicas de análise da luz natural que vêm sendo elaboradas podem ser utilizadas ao longo do processo de projeto. Consiste numa forma de apresentação dos resultados de simulação de tal forma que um profissional que não seja especialista em simulações seja capaz de compreender e tirar partido das análises. Para isso, são consideradas três categorias de desempenho que devem ser contempladas por métricas específicas: **Disponibilidade de Luz Natural, Conforto Visual e Eficiência Energética** (consumo com iluminação artificial e cargas térmicas). Os autores defendem a necessidade de uma tomada de decisão conjunta por parte da equipe de projeto quanto às métricas que devem ser simuladas, de acordo com as necessidades particulares de cada empreendimento, mas que contemplem essas três categorias.

Uma abordagem semelhante, e talvez mais aprofundada, é apresentada por Andersen e Guillemain (2013). A partir de uma análise das métricas e ferramentas – disponíveis e em desenvolvimento – que se destinam à integração da análise de desempenho de edifícios ao processo de projeto, os autores afirmam que um dos principais desafios nesses esforços é a definição de metas adequadas para orientar os projetos de forma objetiva em busca de melhor performance. Mas argumentam que a avaliação do desempenho da iluminação natural, em particular, guarda necessariamente uma parcela de subjetividade que deve ser considerada conforme objetivos que variam em função do tempo, do perfil dos ocupantes e conforme as intenções dos arquitetos. Considerando a complexidade e variabilidade inerentes à iluminação natural, a abordagem proposta contempla cinco perspectivas para o desempenho da iluminação natural, para as quais procuram associar métricas adequadas à definição de objetivos de performance:

- Iluminação para tarefa visual: as necessidades visuais são traduzidas em metas de níveis ou razões de iluminâncias nos planos de tarefas.
- Iluminação Confortável: em que se buscam métricas para medir o potencial desconforto causado por ofuscamento, tido como o principal fator para interação do ocupante com dispositivos de sombreamento e principal causa de insatisfação com o ambiente

luminoso.

- Iluminação Sazonal: relacionada ao balanço necessário entre os níveis de iluminação, insuficientes ou excessivos, e as cargas térmicas correspondentes aos ganhos solares.
- Iluminação Saudável: que procura relacionar os efeitos da exposição à luz natural aos ciclos circadianos e à saúde e bem-estar humanos.
- Iluminação para Deleite: associada à percepção qualitativa da iluminação em ambientes internos, normalmente não contemplada pelas métricas correntes. Busca-se associar o interesse e satisfação dos ocupantes com médias de luminâncias ou medidas de sua variabilidade em cena.

A fim de contemplar essas cinco perspectivas, uma estrutura unificada para visualização do desempenho é proposta utilizando o conceito original e intuitivo desenvolvido com a plataforma de simulação *Lightsolve*. Essa estrutura possibilita a visualização de séries de imagens renderizadas de cenas associadas a gráficos de cores ilustrando cada métrica simulada (ANDERSEN; GAGNE; KLEINDIENST, 2013).

As abordagens de Reinhart e Wienold (2011) e Andersen e Guillemin (2013) são exemplos que têm em comum a busca por uma análise compreensiva de múltiplos aspectos do desempenho quanto à iluminação natural e por metodologias que possam ser aplicadas desde as etapas de concepção do projeto. Outros exemplos com abordagens similares, mas com foco mais específico, também podem ser citados. São os casos das ferramentas COMFEN (HITCHCOCK *et al.*, 2008) e Fener (BUENO *et al.*, 2015), que tinham como propósito a otimização de sistemas complexos de fenestração, considerando o balanço entre os desempenhos térmico e lumínico. Ou ainda a metodologia *ThermalOpt*, elaborada para automatizar o processo de simulações térmicas multidisciplinares a partir de modelos BIM (WELLE; HAYMAKER; ROGERS, 2011). A metodologia se baseia na utilização de um *middleware*¹ para integrar e automatizar a transferência de dados de modelos BIM para motores de simulação energética, como o *EnergyPlus*, e simulação da iluminação natural, como o *Radiance*.

2.2.7 Principais programas de simulação no contexto atual

¹ Termo sem tradução para o português, que se refere a um tipo específico de software intermediário destinado a transferir dados entre dois softwares com diferentes aplicações (Dictionary.com).

Esta seção faz uma breve revisão das principais ferramentas computacionais para simulação da iluminação natural utilizadas no contexto dessa pesquisa.

2.2.7.1 Radiance

O Radiance é um programa de simulação desenvolvido por Greg Ward, no *Lawrence Berkeley National Laboratories*, que é vinculado ao Departamento de Energia do Governo dos Estados Unidos. Com base no método do Raio Traçado Recursivo e técnicas estatísticas para definição dos raios relevantes para cálculo de uma cena, o programa permite simular fisicamente a distribuição de luminâncias e iluminâncias em ambientes internos, considerando superfícies difusas, especulares ou semiespeculares (REINHART; WALKHORST, 2001). Os motores de cálculo do Radiance são utilizados por vários programas, que desenvolveram interfaces gráficas para criação dos dados de entrada para simulação em formatos compatíveis, tais como *OpenStudio*, *DIVA-for-RHINO*, *DAYSIM*, entre outros (RADSITE, 2016; BEST DIRECTORY, 2016).

2.2.7.2 DAYSIM

O DAYSIM é uma ferramenta de simulação de iluminação natural baseada no Radiance, que utiliza o conceito de DLC e o modelo de céu de Perez para simular iluminâncias internas sob qualquer condição de céu ao longo do curso de um ano (REINHART; WALKHORST, 2001). Os resultados em sequência temporal de valores de iluminâncias e luminâncias para pontos definidos pelos usuários podem ser usados para a obtenção de métricas de iluminação natural com base no clima, análises de ofuscamento e consumo energético com iluminação. (DAYSIM, 2016).

2.2.7.3 DIVA-for-RHINO

É um plug-in desenvolvido para o programa de modelagem Rhinoceros destinado à análise de iluminação e suas consequências para o desempenho energético, através da integração de um modelo arquitetônico pré-existente com os algoritmos dos programas Radiance e DAYSIM (JAKUBIEC e REINHART, 2011). O termo DIVA é um

acrônimo de “*Design, Iterate, Validate, Adapt*”¹ que revela a intenção do programa de funcionar como uma ferramenta de auxílio às decisões de projeto em relação aos fenômenos da iluminação natural. Permite ao usuário que realize uma série de avaliações ambientais de edifícios individuais e paisagens urbanas (SOLEMMA, 2016).

2.2.7.4 Apolux

Programa de cálculo da iluminação natural desenvolvido pelo prof. Dr. Anderson Claro. Utiliza o Modelo Vetorial Esférico com o algoritmo da radiosidade para simulações estáticas e dinâmicas de iluminação natural em ambientes arquitetônicos e urbanos (LABCON, 2016; APOLUX IV, 2016).

2.2.7.5 Autodesk Insight 360

O Autodesk Insight 360 provê acesso integrado, através da plataforma de projetos BIM Revit, a dados e análises de desempenho obtidos com motores de cálculo reconhecidos pela indústria. Dessa forma, permite que o projeto seja analisado quanto ao desempenho energético global, cargas térmicas para aquecimento ou resfriamento, incidência de radiação solar e análises de iluminação natural.

O programa é operado como um *plug-in* da plataforma Autodesk Revit e é disponibilizado mediante assinatura de uso dessa plataforma. Para fins de pesquisa, licenças educacionais são disponibilizadas gratuitamente (BEST DIRECTORY, 2016).

2.2.7.6 Outras ferramentas de simulação

A *International Building Performance Simulation Association* (IBPSA) mantém o portal *Building Energy Simulation Tools Directory* (BEST Directory) que disponibiliza um diretório completo de ferramentas de simulação de diversos aspectos do desempenho dos edifícios. Uma análise rápida do portal permite observar que há atualmente um grande número de programas destinados à simulação e à análise de iluminação natural. Destacam-se a seguir mais alguns programas, com abordagens complementares aos apresentados acima.

Lightstanza é um programa que opera com base em modelos do

¹ Projetar, Iterar, Validar, Adaptar, em tradução do autor.

SketchUp, por meio de um plug-in que carrega o modelo geométrico para os servidores do programa. A interface para configurações e para realização das simulações é feita via internet, através do navegador, e os cálculos são processados em nuvem. Realiza simulações estáticas e dinâmicas gratuitamente, com resolução restrita, ou por meio de assinatura para o acesso ao pacote completo de serviços que o programa oferece (LIGHTSTANZA, 2017)

Groundhog é uma extensão gratuita e de código aberto para o *SketchUp* destinada à realização de análises de iluminação de forma rápida e simplificada, com base no mecanismo de cálculo do Radiance (BEST DIRECTORY, 2017).

Ecotect é uma ferramenta de simulação que permite análises solares, térmicas, de iluminação, acústicas e de custo através da conexão com modelos tridimensionais. Desenvolvido pela Autodesk, teve sua comercialização descontinuada para direcionamento dos recursos para o desenvolvimento de ferramentas de análise ambiental com base na plataforma Revit e processamento em nuvem. (BEST DIRECTORY, 2017; AUTODESK, 2017)

O *Virtual Environment*, desenvolvido pela *Integrated Environmental Solution*, ou simplesmente IES-VE, é uma plataforma de análises integradas composta por módulos para modelagem e análise através de um único modelo de dados integrado. As ferramentas de análise incluem diversos aspectos do desempenho ambiental dos edifícios, tais como consumo energético e de carbono anuais, cargas térmicas, iluminação artificial e natural, clima, consumo de água e ventilação, além de análises para créditos de selos de certificação de sustentabilidade. A plataforma conta com recursos para a interoperabilidade com modelos BIM, por meio dos formatos de dados gbXML e IFC (BELL, 2014).

O **Design Builder** também é uma plataforma para modelagem e análises ambientais, com capacidades muito semelhantes às do IES-VE. Também possibilita a avaliação de diversos aspectos do desempenho ambiental e a integração com modelos BIM (<https://designbuilder.co.uk/>).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos foram estabelecidos com base nas perguntas e objetivos de pesquisa e sintetizados no Quadro 3.1. Buscam integrar os dois campos de conhecimento centrais – a tecnologia BIM e as simulações para análise da iluminação natural – aplicando-os às etapas formais do processo de projeto.

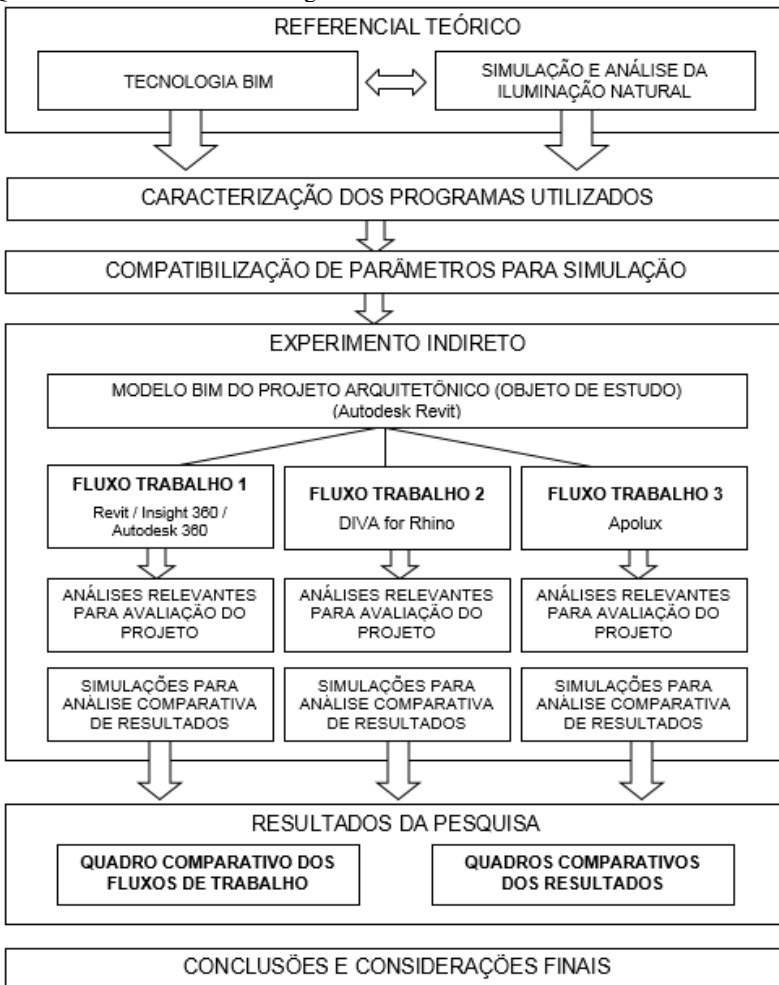
Quadro 3.1 – Objetivos, métodos e resultados esperados

| | OBJETIVOS | MÉTODOS | RESULTADOS ESPERADOS |
|-------------|--|---|---|
| GERAL | Comparar fluxos de trabalho de simulações de iluminação natural em processos de projeto iniciados em tecnologia BIM, identificando potencialidades e limitações de cada um para a sua efetiva utilização durante etapas formais do desenvolvimento do projeto arquitetônico. | Revisão bibliográfica sobre a tecnologia BIM e sua implementação no Brasil e sobre os processos e programas de simulação da iluminação natural. Simulações de um projeto arquitetônico tomado como objeto de estudo para avaliação de três fluxos de trabalho para a integração de simulações ao processo de projeto. | Conclusões e considerações finais da pesquisa. Quadro com as principais potencialidades e limitações de cada fluxo de trabalho. Identificação das principais contribuições da tecnologia BIM para integração de simulações e análises da iluminação natural aos processos de projeto. |
| ESPECÍFICOS | Descrever os fluxos de trabalho e ações necessárias para que um projeto arquitetônico desenvolvido com ferramentas de projeto BIM seja simulado e analisado quanto à iluminação natural com programas representativos de três abordagens distintas de simulação. | Exploração dos programas de simulação selecionados. Experimentação das simulações possíveis com cada programa selecionado, utilizando o projeto arquitetônico tomado como objeto de estudo. | Descrição completa dos três fluxos de trabalho, identificando etapas do processo de simulação, passos necessários, parâmetros de projeto, parâmetros de simulação e tipos de simulação possíveis. |
| | Analisar comparativamente os fluxos de trabalho descritos quanto às características dos programas, abordagens de simulação e tipos de análises possíveis. | Identificação e organização dos aspectos relevantes e etapas do processo de simulação comuns aos três fluxos de trabalho. | Quadro comparativo quanto às características dos programas utilizados. Quadros relacionando os tipos de simulações e análises aos dois momentos de desenvolvimento do projeto e aspectos da iluminação natural que permitem avaliar. |
| | Comparar gráfica e qualitativamente os resultados obtidos por simulações estáticas e dinâmicas com os programas que caracterizam cada fluxo de trabalho analisado | Seleção de tipos de simulações estáticas e dinâmicas comuns aos três programas de simulação e realização das simulações para os ambientes tomados como exemplo do objeto de estudo. | Quadros comparativos e análises dos resultados análogos obtidos pelos três fluxos de trabalho. |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para relacionar e integrar as duas temáticas, o trabalho se desenvolveu em etapas macro, ilustradas pelo Quadro 3.2: Referencial Teórico, Caracterização dos Programas adotados, Compatibilização de Parâmetros para simulação, realização de um Experimento Indireto, Discussão e Análise de Resultados e Conclusões, sucedidas pelas Considerações Finais.

Quadro 3.2 – Síntese metodológica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na primeira etapa, foi realizada pesquisa bibliográfica, essencial a qualquer pesquisa para a construção do Referencial Teórico. A revisão da literatura teve as três finalidades descritas por Koche (2002). Buscou-se:

- ampliar os conhecimentos disponíveis para compreender e delimitar melhor o problema da pesquisa;
- obter domínio sobre os temas, fundamentando assim o estudo e as premissas consideradas;
- e, por fim, descrever o estágio atual das pesquisas sobre as duas temáticas e esforços para integração entre elas.

Com base principalmente em livros e artigos científicos, as duas temáticas principais foram tratadas tanto de forma independente quanto em relação à sua integração aos processos de projeto. Uma abordagem exploratória, conforme definida por Richardson (2012), busca descobrir as relações existentes entre as duas temáticas. O estudo exploratório dos programas de simulação se inicia para a construção do Referencial Teórico, mas toma corpo com um experimento indireto em que se utiliza como objeto de estudo um projeto arquitetônico real, concebido para o município de Belo Horizonte, MG, para delinear e descrever os fluxos de trabalho para simulação e análise da iluminação natural com os programas selecionados.

Num segundo momento são apresentados e caracterizados os programas utilizados para a realização do estudo, conforme descrito adiante, na seção 3.2. Com base nas características de cada programa de simulação são realizados testes e procedimentos para a compatibilização dos parâmetros que serão usados nas simulações, que são descritos na seção 3.3. Os programas selecionados determinam os fluxos de trabalho necessários para a simulação e análise dos resultados.

Como não há uma prática estabelecida para o uso das simulações de iluminação natural em processos de projeto, especialmente com o uso da tecnologia BIM, a investigação toma por base um experimento indireto em que um projeto arquitetônico é tomado como objeto de estudo que é utilizado para subsidiar a elaboração e descrição dos fluxos de trabalho, que cumprem, por sua vez, uma função dupla na investigação. A exploração dos percursos necessários para proceder às simulações e análises de iluminação natural a partir de um modelo BIM constitui-se como o método de investigação das ferramentas de simulação selecionadas. Esse método caracteriza-se como pesquisa ação na medida em que o próprio autor da dissertação se coloca na posição de projetista e/ou analista, sendo o operador das ferramentas de simulação e análise. A descrição dos fluxos de trabalho decorrente desse processo exploratório constitui-se, portanto, como o resultado para o primeiro objetivo

específico, ao mesmo tempo que subsidia as etapas subsequentes.

Para a etapa de Análise e Discussão dos Resultados é utilizado um método comparativo (MARCONI; LAKATOS, 2003) que permeia os três objetivos da pesquisa. A descrição dos fluxos de trabalho identifica cada etapa e os passos necessários para que se proceda às simulações a partir do modelo BIM. As etapas dos fluxos de trabalho descritos são comparadas com base nas características dos programas de simulação que os definem. São analisados e comparados também os tipos de simulações e análises que cada programa possibilita realizar. Por fim, são comparados os resultados de dois tipos de análises obtidos com cada um dos três fluxos de trabalho.

As conclusões e considerações finais do trabalho buscam responder às perguntas de pesquisa que deram origem aos objetivos geral e específicos.

3.1 PREMISSAS E CONDIÇÕES DE INTEGRAÇÃO

Como ponto de partida para os procedimentos metodológicos, foram consideradas algumas premissas relacionadas às perguntas da pesquisa e às duas temáticas centrais – a tecnologia BIM e as simulações para análise de desempenho da iluminação natural – que buscam contextualizar o trabalho ao estágio atual de desenvolvimento e implementação das tecnologias e quanto às práticas correntes em processos de projeto.

Conforme abordado na seção 2.1.3 do Referencial Teórico, a implementação da tecnologia BIM no Brasil encontra-se num momento de transição do CAD para o BIM (ASBEA, 2015). Esse momento pode ser equiparado ao primeiro estágio de implementação definido por Succar (2009), em que modelos BIM são criados para a representação e produção do objeto arquitetônico, mas de forma restrita ao âmbito do escritório, sem que haja intercâmbio significativo de informações do modelo para colaboração com outras disciplinas. A **primeira premissa** da pesquisa, portanto, considera que os fluxos de trabalho delineados se aplicam à realidade de escritórios de arquitetura que já tenham implementado o Revit como plataforma BIM para desenvolvimento de seus projetos, num estágio correspondente ao mencionado acima.

A **segunda premissa**, por outro lado, considera que não há no Brasil uma prática corrente significativa do uso de simulações integradas ao processo de projeto e, portanto, para que ela ocorra, deve haver um interesse particular em avaliar o desempenho dos projetos que ultrapasse as exigências legais relacionadas à iluminação natural. Tal interesse pode

partir da própria equipe de projetos, a partir de uma crescente conscientização com a sustentabilidade ambiental, ou por exigência de sistemas de certificação pretendidos pelos clientes.

Quanto aos programas de simulação e técnicas de análise da iluminação natural, constata-se que há, atualmente, uma forte tendência para a utilização de métricas e técnicas de análise que consideram o desempenho em função das variações climáticas no curso do ano: as chamadas simulações dinâmicas. A **terceira premissa** considera que as novas métricas e métodos baseados em simulações dinâmicas são importantes para a análise de desempenho dos projetos, e podem ser usadas em complemento às análises e simulações estáticas, mesmo que não encontrem ainda respaldo da legislação brasileira.

Para que ocorra a integração das simulações às etapas do processo de projeto a partir do BIM, consideram-se duas condições de integração para a pesquisa:

Condição 1:

Que a operação das ferramentas de simulação e a análise dos resultados sejam realizadas por arquitetos envolvidos diretamente no desenvolvimento do projeto. Esta seria a condição para que análises de iluminação natural possam ser realizadas em escritórios que disponham de equipes e recursos reduzidos.

Condição 2:

Que a equipe de projeto conte com o suporte de um especialista para realização das simulações, análise dos resultados e auxílio à tomada de decisão.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS ADOTADOS

Paralelamente às leituras necessárias à construção do Referencial Teórico, foram explorados alguns dos programas de simulação da iluminação natural que poderiam vir a fazer parte do estudo comparativo. A partir dessa exploração inicial, e considerando a viabilidade de acesso aos programas, optou-se por trabalhar com três programas de simulação com abordagens distintas quanto às suas bases conceituais e quanto às suas formas de associação à plataforma BIM, com a qual o projeto arquitetônico é desenvolvido.

3.2.1 Plataforma BIM

A plataforma BIM selecionada para o estudo foi o **Autodesk Revit**. Uma razão inicial para sua escolha é à sua representatividade e posição de liderança no mercado brasileiro entre as plataformas BIM disponíveis. De acordo com Eastman *et al.* (2011), esta é também a plataforma que oferece o maior conjunto de aplicações e soluções BIM para a indústria de AEC e a ela associadas. Entre tais aplicações, está a segunda razão de sua escolha. Através de um *plug-in* do programa Insight 360 e do serviço de processamento computacional em nuvem Autodesk 360 Rendering, o Revit dispõe de ferramentas para análise da iluminação natural de mesma base proprietária e incorporadas à plataforma de projeto. Também teve influência na escolha o maior domínio do autor nessa plataforma, decorrente da experiência profissional prévia à pesquisa.

3.2.2 Programas de simulação da iluminação natural

A escolha dos programas de simulação que serão associados ao Revit para definir os fluxos de trabalho precisou levar em conta alguns critérios que foram estabelecidos na medida em que se evoluía com a revisão da bibliográfica.

Um primeiro critério considerou a realidade dos escritórios de arquitetura brasileiros, que se encontram atualmente em processo de transição nos processos de trabalho baseados em CAD para processos BIM (ADDOR, 2015). A implementação do BIM no Brasil é abordada na seção 2.1.3. Neste contexto, é bastante comum que projetistas de outras especialidades desenvolvam seus projetos por meio de tecnologias e processos CAD, mesmo quando o projeto de arquitetura é desenvolvido com um plataforma BIM. Análises de iluminação natural já podem, de forma análoga, ser realizadas com ferramentas interoperáveis diretamente com modelo BIM ou por ferramentas que utilizam modelos geométricos de base CAD. Para retratar esse cenário, é importante que o estudo comparativo seja feito entre fluxos de trabalho definidos por ferramentas de simulação que operem com o modelo BIM e também com fluxos híbridos, definidos por ferramentas de simulação que operam com modelos geométricos de base CAD.

Um segundo critério está relacionado aos tipos de simulações. Simulações estáticas têm grande utilidade para a avaliação de soluções de projeto quanto a aspectos qualitativos, estéticos e de conforto ambiental, considerando-se um dado instantâneo e condição climática por vez. Diversos programas realizam esses tipos de simulação, que podem ser muito úteis

no processo decisório dos arquitetos. Novas abordagens de simulações dinâmicas vêm sendo desenvolvidas, conforme foi abordado no Referencial Teórico, que permitem a análise do comportamento do edifício quanto à luz natural durante o curso de um ano e levam em conta a grande variabilidade das condições climáticas e, conseqüentemente, da disponibilidade da luz natural. As simulações dinâmicas são complementares às estáticas, pois permitem avaliar aspectos quantitativos que dão uma dimensão do desempenho anual do edifício, mas não cobrem os mesmos aspectos que as análises estáticas. Assim, era importante para a pesquisa que as duas abordagens fossem contempladas. Se por um lado, como plataforma de projeto, o BIM está na vanguarda quanto à criação de modelos de edifícios e na definição de novos processos de trabalho, por outro, as ferramentas de simulação interoperáveis com modelos BIM são ainda limitadas e não incorporaram muitas das novas métricas obtidas por simulações dinâmicas. Os programas de referência para a realização de simulações dinâmicas, por outro lado, têm suporte apenas para modelos geométricos de base CAD.

Como terceiro critério, julgou-se interessante confrontar os processos definidos por programas com diferentes abordagens. Quanto à base tecnológica, um dos fluxos de trabalho deveria representar um processo integralmente baseado na tecnologia BIM, para permitir uma análise comparativa com processos híbridos, definidos por programas de simulação que operam com modelos geométrico de base CAD. Quanto aos métodos de cálculo adotados, buscou-se confrontar programas que utilizam os dois principais métodos, descritos no item 2.2.4.3: o método da Radiação e do Raio Traçado. As implicações desses dois métodos para os fluxos de trabalho serão discutidas na análise comparativa da seção 5.2.1.

Os programas selecionados serão apresentados e caracterizados a seguir quanto aos seguintes aspectos:

- a) Interface e interoperabilidade com a plataforma de projetos
- b) Métodos de cálculo
- c) Modelos de céu
- d) Tipos de Simulação e Ferramentas de Análise

Aos tipos de simulação possíveis com cada um dos programas, será atribuído um código para referência posterior nos capítulos 5 e 6.

3.2.2.1 Revit, Insight 360 e Autodesk 360 (versão 2017)

Para caracterizar um processo integralmente baseado na tecnologia BIM foi utilizado um conjunto de programas e ferramentas, todos eles

proprietários da Autodesk e associados à plataforma BIM do Revit, versão 2017, que permitem diferentes tipos de análises relacionadas à iluminação natural. As ferramentas de trajetória solar e sombras do Revit, embora não envolvam cálculos de iluminação, permitem análises preliminares que auxiliam as decisões do arquiteto, e por isso são exploradas com o objeto de estudo. A ferramenta *Render in Cloud*, do Revit, possibilita a renderização de gráficos de iluminância para uma cena através do serviço de processamento computacional em nuvem Autodesk 360 Rendering. E o *plug-in* para o Revit do Insight 360 possibilita a criação de modelos energéticos a partir do modelo BIM, análise de cargas térmicas, análises de iluminação e da radiação solar incidente sobre o modelo. Análises energéticas e térmicas não são objeto de estudo da pesquisa e não serão exploradas. Somente as análises de iluminação, realizadas com a ferramenta Lighting Analysis, e incidência de radiação, com a ferramenta Solar Analysis, são exploradas por sua relevância para o desempenho da iluminação natural.

O Insight 360 conecta o modelo BIM ao Autodesk 360, onde são processados os cálculos de iluminação. O acesso ao Revit e ao *plug-in* do Insight 360 e serviços Autodesk 360 se deu por licença educacional para o pacote de aplicativos da Autodesk.

3.2.2.1.1 Interface e interoperabilidade

Os programas e ferramentas mencionados acima são todos operados através do ambiente de trabalho do Revit, que é a plataforma BIM adotada para o processo de projeto. Quanto à interoperabilidade, os conjuntos de dados geométricos, de propriedades ópticas dos materiais e de localização do projeto são, todos eles, transmitidos de forma direta e consistente para o programa de simulação.

3.2.2.1.2 Métodos de cálculo

Análises preliminares, realizadas com as ferramentas de trajetória solar e sombras do Revit, não envolvem cálculos de iluminação, e são analisadas por sua importância como suporte às decisões do arquiteto. Por outro lado, as simulações realizadas com o Autodesk 360 e com as ferramentas Solar Analysis e Lighting Analysis do Insight 360 envolvem métodos e algoritmos de cálculo da iluminação. Nestes casos, os cálculos são realizados pelo motor de processamento em nuvem do Autodesk 360, denominado *Multidimensional Lightcuts* (AUTODESK, 2016a). Os algoritmos são baseados no método do Raio Traçado bidirecional e são

capazes de aproximar rápida e precisamente centenas de milhões de pontos enquanto calcula efetivamente somente uma pequena fração desses pontos, possibilitando processamento mais rápido e a reprodução de fenômenos complexos de iluminação (WALTER *et al.*, 2006).

3.2.2.1.3 Modelos de Céu

Os modelos de céu disponíveis para simulação com o Insight 360 são:

- 1) Céu Claro recomendado pela CIE
- 2) Céu Encoberto recomendado pela CIE
- 3) Céu Parcialmente Encoberto recomendado pela CIE
- 4) Céu Uniforme recomendado pela CIE
- 5) Modelo padrão para determinação do Fator de Luz Diurna (*Daylight Factor Sky*)
- 6) Modelo de Perez para todos os climas.

Em simulações estáticas, o usuário pode escolher entre qualquer um desses modelos e inserir manualmente os dados de Irradiação Global Horizontal (GHI), Irradiação Difusa Horizontal (DHI) e Irradiação Direta Normal (DNI), que são dados em Watt/m², ou adotar os valores da base de dados climáticos do *Green Building Studio*. Em simulações dinâmicas, o Modelo de Perez é utilizado com os dados climáticos de GHI, DNI e DHI que são carregados automaticamente dessa mesma base de dados.

3.2.2.1.4 Tipos de Simulação e Ferramentas de Análise

As capacidades de simulação da iluminação do conjunto de programas associado ao Revit são ainda bastante limitadas e dão grande ênfase a métricas de avaliação da iluminação adotadas pelo selo LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*). Acredita-se, no entanto, que novas métricas e possibilidades de simulações ainda venham a ser incorporadas. Como exemplo desta tendência, vale destacar que o trabalho se iniciou com a versão 2016 do Revit e do *plug-in* Insight 360. Nessa versão, somente simulações estáticas eram possíveis. No decorrer da pesquisa, foi lançada a versão 2017 que incorporou métricas dinâmicas de análise. Além de simulações que envolvem cálculos de iluminação, há ainda algumas ferramentas de análise que auxiliam as tomadas de decisão. O Quadro 3.3 relaciona os tipos de análises e simulações possíveis.

Quadro 3.3 – Simulações e análises que podem ser realizadas com Revit, Insight 360 e Autodesk 360.

| FERRAMENTA | TIPOS DE SIMULAÇÃO |
|--|--|
| Ferramentas de trajetória solar e sombras do Revit | ◦ Análise de Incidência Solar e Sombreamento |
| Solar Analysis (Insight 360) | ◦ Mapas de radiação solar |
| Render in Cloud (Autodesk 360 Rendering) | ◦ Mapas de Iluminâncias sobre as superfícies do modelo ◦ Imagens renderizadas da iluminação da cena |
| Lighting Analysis (Insight 360) | ◦ Mapas de Iluminâncias para um plano de análise horizontal ◦ Autonomia Espacial de Luz Diurna (sDA) ◦ Exposição Anual à Luz Solar (ASE) |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2.2 DIVA-for-Rhino (versão 4)

O programa DIVA-for-Rhino foi concebido para contemplar a análise das três categorias de critérios para a avaliação do desempenho da iluminação natural de um projeto indicadas por Reinhart (2014): a disponibilidade da luz natural, o conforto do usuário e a eficiência energética. Sua escolha para compor um dos fluxos de trabalho investigados pela pesquisa se deve também ao fato de utilizar os motores de cálculo do Radiance e algoritmos do DaySim, que são os softwares mais amplamente testados, confiáveis e reconhecidos pela indústria e comunidade acadêmica para cálculos de iluminação e simulações dinâmicas, respectivamente. Por esta razão, os resultados obtidos com este programa são considerados como referência para efeito das análises comparativas de resultados estáticos e dinâmicos.

O acesso ao programa se deu por meio de licença educacional gratuita.

3.2.2.2.1 Interface e interoperabilidade

O DIVA-for-Rhino é um *plug-in* do *Rhinoceros*¹ e sua operação é realizada através do ambiente de trabalho desse modelador de base CAD. A interoperabilidade de dados do modelo BIM criado no Revit é feita por

¹ Rhinoceros 5 SR5.

arquivos em formato DWG e é, portanto, bastante reduzida, pois limita-se aos elementos geométricos do modelo, que ainda precisa ser manipulado por intermédio do Rhinoceros antes que possa ser simulado com o DIVA. Propriedades ópticas dos materiais e a localização do projeto não são transmitidas e precisam ser reinseridas no modelo através das ferramentas do DIVA, no ambiente de trabalho do Rhinoceros.

Todas as funções do plug-in DIVA-for-Rhino são acessadas por quatro ferramentas, que terão suas funções descritas no contexto dos fluxos de trabalho: *Location, Nodes, Materials e Metrics*¹.

3.2.2.2.2 Métodos de cálculo

Os cálculos para análise de iluminação são realizados pelo Radiance, com algoritmos baseados no método do Raio Traçado Recursivo, atendendo ao terceiro critério para a escolha dos programas. Nos cálculos anuais para simulações dinâmicas são usados os algoritmos do DaySim e a abordagem dos Coeficientes de Luz Diurna (DLC).

3.2.2.2.3 Modelos de Céu

Os modelos de céu disponíveis ao usuário para simulação com o DIVA são:

- 1) Céu Claro recomendado pela CIE
- 2) Céu Encoberto recomendado pela CIE
- 3) Céu Parcialmente Encoberto recomendado pela CIE
- 4) Céu Uniforme
- 5) Céu intermediário sem a presença do Sol
- 6) Céu claro sem a presença do Sol
- 7) Céu colorido Utah (PREETHAM; SHIRLEY; SMITS, 1999)
- 8) Modelo de Perez para todos os climas.

Em simulações estáticas, o usuário pode escolher entre qualquer um desses modelos. Se a opção for pelo modelo de Perez, deve ser inserido manualmente o valor de Irradiação Global Horizontal (GHI). Em simulações dinâmicas, o Modelo de Perez é utilizado com os dados climáticos extraídos do arquivo climático em formato EPW.

3.2.2.2.4 Tipos de Simulação e Ferramentas de Análise

Embora o programa se proponha a realizar análises integradas de desempenho lumínico e desempenho energético, o foco da pesquisa recai sobre o primeiro aspecto e somente as simulações para iluminação natural são apresentadas neste trabalho. O DIVA não dispõe de ferramentas de análise que não envolvam cálculos de iluminação natural. Todas as simulações possíveis são realizadas através da ferramenta *Metrics* (métricas) e são organizadas em três grupos: *Daylight Images*, *Daylight grid-based* e *Thermal Single-Zone*. O grupo *Thermal Single-Zone* refere-se às análises energéticas e não será abordado.

O Quadro 3.4 relaciona os tipos de análises e simulações possíveis com a ferramenta *Metrics*.

Quadro 3.4 – Simulações e análises que podem ser realizadas com a ferramenta *Metrics*, do DIVA.

| GRUPO DE SIMULAÇÕES | TIPOS DE SIMULAÇÃO |
|--|---|
| Daylight Images (Imagens de Luz Diurna) | <ul style="list-style-type: none"> ° Mapas de Luminâncias sobre as superfícies do modelo ° Mapas de Iluminâncias sobre as superfícies do modelo ° Sequência de imagens renderizadas de iluminação natural (Timelapse) ° Mapas de radiação solar (Radiation Map) ° Ofuscamento em uma cena – DGP (Point-in-time Glare) ° Ofuscamento Anual – DGP (Annual Glare) |
| Daylight grid-based | <ul style="list-style-type: none"> ° Fator de Luz Diurna (Daylight Factor ou FLD) ° Mapa de Iluminâncias no plano de análise (Point-in-time Illuminance) |
| (Climate Based) | <ul style="list-style-type: none"> ° Autonomia de Luz Diurna (DA ou Daylight Autonomy) ° Autonomia Contínua de Luz Diurna (cDA ou Continuous Daylight Autonomy) ° Disponibilidade de Luz Diurna (Daylight Availability) ° Iluminâncias Úteis de Luz Diurna (UDI ou Useful Daylight Illuminance) ° Autonomia Espacial de Luz Diurna (sDA ou Spatial Daylight Autonomy) ° Exposição Anual à Luz Solar (ASE ou Annual Sunlight Exposure) |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2.3 APOLUX (versão IV)

O programa Apolux foi o escolhido para compor o terceiro fluxo de trabalho. Privilegiou-se, nesse caso, o fato de ser um programa independente e dedicado à simulação da iluminação natural e artificial, desenvolvido no Laboratório de Conforto Ambiental da UFSC pelo professor Dr. Anderson Claro. O programa é de acesso gratuito e pode ser baixado em <http://foton.arq.ufsc.br>.

3.2.2.3.1 Interface e interoperabilidade

A interface do APOLUX é dividida em dois módulos. O módulo Fractal se destina à preparação do modelo geométrico e o módulo Foton realiza os cálculos de iluminação e gera os gráficos para a visualização dos resultados. Os cálculos de iluminação são realizados no Módulo Foton. Particularmente para o propósito desta pesquisa, os modelos foram criados com o Revit e exportados com a extensão DXF. No entanto, os modelos exportados do Revit contêm entidades geométricas, como blocos e sólidos, que não são suportadas pelo módulo Fractal e, por isso, precisam ser manipulados com o AutoCAD, onde um novo arquivo DXF é criado. Essa extensão de arquivo carrega somente dados geométricos e, por esta razão, assim como ocorre com o DIVA, a interoperabilidade com o modelo BIM fica reduzida. As propriedades ópticas dos materiais e dados de localização precisam ser reinseridos manualmente.

3.2.2.3.2 Métodos de cálculo

Os cálculos de iluminação no APOLUX são processados com base no Modelo Vetorial Esférico, proposto por Claro (1998), relativo à caracterização da abóbada celeste, e aplicado ao método da Radiosidade para o cálculo da iluminação. Atende-se assim ao terceiro critério para seleção dos programas de simulação.

3.2.2.3.3 Modelos de Céu

Os modelos de céu adotados pelo APOLUX são os 15 modelos propostos por Kittler, Perez e Darula (1997) *apud* Claro (2015) e consolidados pela norma ISO 15.469:2004: *Spatial distribution of daylight - CIE Standard General Sky*, além do modelo de céu encoberto antigo recomendado pela CIE. São eles:

- 1) CIE – Padrão céu encoberto (novo)
- 2) Céu encoberto I
- 3) Céu encoberto II
- 4) Céu encoberto III
- 5) Céu de luminância uniforme
- 6) Céu parcialmente nublado I-A
- 7) Céu parcialmente nublado I-B
- 8) Céu parcialmente nublado I-C
- 9) Céu parcialmente nublado II-A
- 10) Céu parcialmente nublado II-B
- 11) Céu branco – azul
- 12) CIE – padrão céu claro I
- 13) CIE – padrão céu claro II
- 14) Céu turvado sem nuvens
- 15) Céu turvado branco – azul
- 16) CIE – padrão céu encoberto (antigo)

Para os tipos de céu numerados de 1 a 6, que caracterizam variações de céus encobertos, o usuário pode controlar o parâmetro denominado “razão entre iluminância difusa e iluminância extraterrestre horizontal”. Para os tipos de céu numerados de 7 a 15, o usuário pode controlar o parâmetro de turvamento da atmosfera. O ajuste desses parâmetros altera a luminância do zênite e, por consequência, os valores absolutos de luminância de cada parcela da abóbada. Na caixa de diálogo do programa em que o usuário define o tipo de céu e parâmetros, é exibida a previsão de valores da **luminância do zênite** e as **iluminâncias global, difusa e direta** prováveis em um plano horizontal desobstruído.

3.2.2.3.4 Tipos de Simulação e Ferramentas de Análise

Com o APOLUX, o usuário pode realizar basicamente três tipos de análises que dão suporte às decisões de projeto relacionadas à iluminação: resultados de simulações estáticas e dinâmicas que envolvem cálculos de grandezas fotométricas, e análises que não envolvem cálculos de iluminação, através da visualização de máscaras. O Quadro 3.5 relaciona os tipos de análises e simulações possíveis com o APOLUX.

Quadro 3.5 – Simulações e análises que podem ser realizadas com o APOLUX.

| FERRAMENTA | TIPOS DE SIMULAÇÃO |
|--------------------------|--|
| Visualização de Máscaras | <ul style="list-style-type: none"> ◦ Estudos de trajetória solar ◦ Incidência solar e sombras ◦ Janela visível de céu, com distribuição de luminâncias |
| Simulações Estáticas | <ul style="list-style-type: none"> ◦ Mapas de Luminâncias sobre as superfícies do ambiente ◦ Mapas de Iluminâncias sobre as superfícies do ambiente ◦ Mapas de Iluminâncias no plano de análise ◦ Fator de Luz Diurna (Daylight Factor), ou FLD ◦ Análise de classes de iluminâncias ◦ Vetor Foton |
| Simulações dinâmicas | <ul style="list-style-type: none"> ◦ Autonomia de Luz Diurna (DA): ◦ Iluminâncias Úteis de Luz Diurna (UDI): ◦ Autonomia Espacial de Luz Diurna (sDA ou Spatial Daylight Autonomy) ◦ Exposição Anual à Luz Solar (ASE ou Annual Sunlight Exposure) |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 COMPATIBILIZAÇÃO DE PARÂMETROS PARA CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CÉU.

Como foi visto na caracterização dos programas, os modelos de céu e as possibilidades de controle pelo usuário variam bastante. O Insight 360 e o DIVA adotam, em comum, os modelos de céu básicos recomendados pela CIE – céu claro, encoberto e parcialmente encoberto – para a realização de simulações estáticas. No DIVA, o usuário pode escolher os tipos de céu, mas não controla as variáveis climáticas, cujos valores são extraídos do arquivo climático, enquanto com o Insight 360 o usuário pode optar por usar valores da base de dados climáticos do *Green Building Studio*, carregados automaticamente pelo programa, ou inserir manualmente os valores de GHI, DNI e DHI. Para o caso das simulações dinâmicas, ambos adotam o modelo de Perez, mas com dados climáticos de fontes distintas. Enquanto com o DIVA o usuário define o arquivo de dados climáticos utilizado, com o Insight 360 esses dados são carregados automaticamente pelo programa, tal como ocorre para as simulações estáticas, mas sem qualquer possibilidade de inserção manual.

Com o APOLUX, a diferença fundamental está nos próprios

modelos de céu adotados. Em simulações estáticas, em vez de três ou quatro tipos de céu, o usuário pode escolher qualquer um dos 16 tipos suportados e ainda tem a possibilidade de ajustar parâmetros específicos de alguns deles, como o turvamento, para os diferentes tipos de céu claro e parcialmente encoberto, ou a razão entre a iluminância difusa e iluminância extraterrestre horizontal, para os diferentes tipos de céu encoberto. Para o caso das simulações dinâmicas, o programa faz a leitura do arquivo de dados climáticos e seleciona, para cada hora em que a iluminação é calculada, um dos 15 tipos de céu do modelo de Kittler, consolidados pela norma ISO 15.469:2004.

Diante dessas diferenças conceituais - e para que se possa proceder à comparação de resultados correspondente ao terceiro objetivo específico da pesquisa - faz-se necessário padronizar ou compatibilizar minimamente os parâmetros adotados nas simulações com os três fluxos de trabalho. Os procedimentos adotados para padronizar os parâmetros climáticos que caracterizam as condições de céu são descritos na seção 4.4.

3.4 DEFINIÇÃO DOS FLUXOS DE TRABALHO ESTUDADOS.

A integração de simulações e análises de iluminação natural ao processo de projeto BIM depende diretamente da forma como cada programa de simulação interage com a plataforma BIM. No contexto dessa dissertação, foram denominados fluxos de trabalho os conjuntos de procedimentos e passos necessários para que um modelo BIM de um projeto arquitetônico possa ser simulado e analisado quanto à iluminação natural. Os procedimentos variam de acordo com o programa de simulação selecionado. A associação dos programas de simulação (caracterizados na seção 3.1) com a plataforma BIM definiu os três fluxos de trabalho que serão analisados na pesquisa e são apresentados a seguir.

O Fluxo de Trabalho 1 (FT1) utiliza ferramentas do próprio Revit e dos programas Insight 360 e Autodesk 360, mencionados na seção 3.1.2.1 e representa um processo de trabalho baseado integralmente em programas compatíveis com o modelo BIM. Neste fluxo de trabalho, a simplicidade do processo decorrente da interoperabilidade dos dados, por sua vez possibilitada pelo uso de ferramentas do mesmo fabricante, é mais relevante para o estudo que as capacidades de simulação das ferramentas, sabidamente limitadas e propositalmente simplificadas com o intuito de serem operadas pelo profissional de projeto.

O Fluxo de Trabalho 2 (FT2) representa um processo híbrido, em que o modelo BIM criado no Revit é exportado e convertido em modelo

geométrico de base CAD para ser simulado com o programa DIVA-for-Rhino. Este fluxo de trabalho representa também um processo de simulação baseado no método de cálculo do Raio Traçado, que é a base dos algoritmos do motor de cálculo do Radiance, programa de simulação mais amplamente estudado e utilizado para cálculos de iluminação.

O **Fluxo de Trabalho 3 (FT3)** também representa um processo híbrido. Analogamente ao **FT2**, o modelo BIM gerado no Revit é exportado e convertido em modelos geométricos de base CAD para simulações e análises utilizando o Apolux IV. Quanto ao mecanismo de cálculo, este fluxo de trabalho representa processo de simulação baseado no método da Radiosidade. Privilegia-se aqui o fato de ser um programa gratuito e nacional, que oferece um contraponto aos métodos consagrados internacionalmente, representados pelo DIVA.

A descrição detalhada de cada fluxo de trabalho será apresentada no capítulo 5, organizando-se em etapas principais comuns aos três processos de simulação, que foram identificadas durante o desenvolvimento da pesquisa. A cada etapa são descritos os passos necessários para a condução das simulações e os parâmetros que podem ser controlados pelo usuário.

A primeira etapa, denominada **“Preparação do Modelo BIM”**, ocorrerá sempre utilizando a plataforma Autodesk Revit, onde assume-se que o projeto arquitetônico é desenvolvido. No **FT1**, esta etapa consiste na verificação dos parâmetros do projeto que são relevantes para a análise de iluminação – localização e propriedades ópticas dos materiais – e no gerenciamento das vistas do modelo destinadas ao propósito das simulações. Nos **FT2** e **FT3** as vistas do modelo BIM destinam-se à delimitação do modelo geométrico, que será gerado a partir da exportação dessas vistas em formatos de arquivo DXF ou DWG.

A etapa seguinte, denominada **“Preparação do Modelo Geométrico”**, consiste no tratamento necessário para que o modelo BIM seja convertido em modelo geométrico e possa ser utilizado com os programas de simulação. Exceção é feita para o **FT1**, em que esta etapa não se aplica, pois as simulações são realizadas dentro do próprio ambiente do Revit e não há necessidade de exportação ou importação de modelo geométrico.

A etapa de **“Simulação”** consiste na descrição das ações que o usuário deve tomar antes de dar início aos cálculos de iluminação. São destacadas ferramentas utilizadas em cada programa de simulação e os parâmetros que podem ser controlados pelo usuário.

A etapa de **“Visualização dos Resultados”** consiste na abordagem das formas de visualização e análise dos resultados simulados, e também

tem o intuito de fornecer uma amostragem das possibilidades de análise que podem ser feitas com cada fluxo de trabalho. Nesse tópico serão exemplificados os resultados de simulações que são peculiares a um programa, ou comuns a apenas dois dos três selecionados, e que propiciam análises de diferentes aspectos da iluminação natural.

3.5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS FLUXOS DE TRABALHO

A análise comparativa dos fluxos de trabalho, que será apresentada na seção 5.2, cumpre com o segundo objetivo específico da pesquisa. Assim, busca-se evidenciar as diferenças e semelhanças dos fluxos de trabalho e suas implicações para a adoção durante as etapas formais do processo de projeto.

3.5.1 Quanto às características dos programas

Num primeiro momento, são discutidas as características dos programas de simulação que constituem os fluxos de trabalho e suas consequências para as etapas do processo de simulação. A discussão é organizada em tópicos correspondentes às seguintes características:

- Interface com o usuário.
- Interoperabilidade dos dados de projeto
- Modelos de céu adotados pelos programas
- Motores e métodos de cálculo

3.5.2 Quanto aos tipos de simulação, tipos de análise e categorias de critérios

Num segundo momento, comparam-se as capacidades de simulação dos programas que definem os fluxos de trabalho e os tipos de análises relacionadas ao desempenho da iluminação natural que possibilitam. Os diversos tipos de análises são organizados em quadros síntese segundo as etapas do projeto em que podem ser realizadas, os tipos de simulação em que podem ser agrupados e as categorias de critérios para avaliação da iluminação natural considerados por Reinhart e Wienold (2011), conforme sintetizado no quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Categorias de critérios para avaliação da iluminação natural.

| | | |
|--|--|--|
| ETAPAS DE PROJETO (Apresentadas na seção 2.1.4) | Concepção do Partido Arquitetônico Análises que podem ser feitas a partir do modelo BIM representativo das etapas Estudo de Viabilidade (EV) ou Estudo Preliminar (EP). Ver seção 4.2.1. | |
| | Desenvolvimento Inicial Análises que podem ser feitas a partir do modelo BIM representativo das etapas Estudo Preliminar (EP) Anteprojeto (AP) ou Projeto Legal (PL). Ver seção 4.2.2 | |
| TIPOS DE SIMULAÇÃO (Apresentados nas seções 2.2.2, 2.2.3 e 2.2.4 do Referencial Teórico) | Simulação da Geometria Solar | |
| | Simulação de Irradiação Solar | |
| | Simulação da Iluminação Natural | Simulações estáticas Simulações dinâmicas |
| CATEGORIAS DE CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO (Considerados por Reinhart e Wienold (2011) e mencionados na seção 2.6) | Disponibilidade da Iluminação Natural | |
| | Conforto Humano | |
| | Eficiência Energética | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS RESULTADOS

A avaliação qualitativa dos resultados, que será discutida na seção 5.3, cumpre com o terceiro objetivo específico da pesquisa e busca compreender os impactos que as diferenças conceituais dos programas têm sobre os resultados que são obtidos para análise da iluminação natural. Para este propósito foram selecionados tipos de simulações que podem ser obtidas com os três fluxos de trabalho e que são representativos das duas principais abordagens de simulação correntes: estáticas e dinâmicas.

3.6.1 Comparação de resultados de simulações estáticas

Para a comparação de resultados estáticos, optou-se por analisar graficamente os Mapas de Iluminâncias gerados sobre um plano de análise. Esses gráficos permitem avaliar os ambientes qualitativamente quanto ao padrão de distribuição dos níveis de iluminação, identificar regiões em que a luz natural é deficiente, suficiente ou excessiva para as condições simuladas.

Primeiramente são destacadas as principais diferenças na forma de

apresentação dos resultados gráficos e no grau de detalhes dos dados numéricos obtidos.

Mapas de iluminâncias podem ser gerados para diferentes datas, horários e condições de céu para cada ambiente que se queira analisar, possibilitando incontáveis combinações desses três parâmetros. A fim de se obter uma amostragem representativa que tenha valor para as decisões arquitetônicas, as simulações para análise comparativa são realizadas para duas datas-chaves – solstício de inverno e solstício de verão –, três horários representativos da trajetória solar ao longo do dia – 9h, 12h, 15h – e duas condições extremas de céu – céu claro e céu encoberto, conforme listado no Quadro 4.1.

Os resultados obtidos com cada programa são organizados em quadros comparativos conforme cada combinação de data, horário e condição de céu simuladas. Os gráficos de falsas cores que representam os mapas de iluminâncias são comparados graficamente quanto às ordens de grandeza das iluminâncias resultantes das simulações e padrões de distribuição.

3.6.2 Comparação de resultados de simulações dinâmicas

Para a comparação dos resultados de simulações dinâmicas, foram tomadas as duas métricas que têm seus métodos padronizados e aprovados através da publicação IES LM-83-12 (IES, 2012). As duas métricas se complementam para avaliar a conformidade do projeto, como um todo ou de ambientes isolados, segundo os critérios estabelecidos pelo método aprovado. A **Autonomia Espacial de Luz Diurna (sDA)** permite avaliar a suficiência da disponibilidade de luz natural em um espaço interior, fornecendo o percentual da área analisada que atinge um nível mínimo de iluminação por 50% das horas úteis anuais. Como a sDA estabelece como critério apenas níveis mínimos, não é possível avaliar o eventual excesso de luz natural. Por essa razão, analisa-se, complementarmente, a **Exposição Anual à Luz Solar (ASE)**, que representa o percentual da área do plano de análise que excede um determinado nível de iluminância pela luz solar direta por um número de horas anuais maior que o número estabelecido.

Os resultados são comparados, graficamente, por sua representação sobre o plano de análise e, numericamente, pelos percentuais que representam seus resultados.

4 APRESENTAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

Para cumprir os objetivos da pesquisa, a proposta metodológica se baseia em um experimento indireto. Nesta seção, o projeto arquitetônico adotado como objeto de estudo é apresentado e são abordados os aspectos relevantes para a investigação dos fluxos de trabalho para as simulações da iluminação natural. Salienta-se que os procedimentos de simulação não fizeram parte do processo de projeto original, mas foram realizados pelo autor da pesquisa para seu propósito específico. A ênfase do experimento está no percurso necessário à realização das simulações a partir do modelo BIM pré-existente do projeto arquitetônico. Não faz parte dos objetivos desta pesquisa obter uma avaliação do desempenho desse objeto de estudo quanto à iluminação natural, mas sim compreender, delinear e descrever os passos necessários para a realização das simulações frente às condicionantes do projeto e segundo as etapas formais de desenvolvimento.

4.1 LOCALIZAÇÃO, PROGRAMA E CONDICIONANTES NATURAIS E URBANOS

O projeto selecionado como objeto de estudo foi elaborado ao longo dos anos de 2015 e 2016 e é um exemplar de um empreendimento imobiliário de uso comercial para o mercado imobiliário de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais. O terreno localiza-se aos 19,97° de latitude Sul e 43,96° de longitude Oeste, no bairro Estoril, região Oeste do município. É composto por três lotes urbanos que totalizam uma área de 2.874m². A proximidade com a Serra do Curral, que é um dos cartões postais do município, e a topografia acentuadamente íngreme do lote requerem cuidados tanto para inserção do objeto arquitetônico na paisagem quanto pelas implicações técnicas para a construção, como movimentação de terra e contenções. A localização em cota altimétrica elevada confere condições de visadas a partir do terreno para o horizonte urbano e para a Serra do Curral, que são importantes fatores na concepção do partido arquitetônico. As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram, respectivamente, a localização do terreno em relação às principais vias de acesso e sua situação na vizinhança imediata.

Figura 4.1 – Localização do terreno e principais vias de acesso.



Fonte: BLOC Arquitetura.

Figura 4.2 – Delimitação do lote e entorno imediato.



Fonte: BLOC Arquitetura.

As principais condicionantes legais para o terreno são estabelecidas pela Lei de Uso e Ocupação do Solo de Belo Horizonte

(LUOS-BH), Lei 9.959/2010, que determina os seguintes parâmetros urbanísticos:

- Coeficiente de aproveitamento: determina o potencial construtivo para o terreno. É estabelecido um Coeficiente de Aproveitamento Básico, igual a 1, e um Máximo, igual a 1,3, obtido por dispositivos da LUOS-BH. O Coeficiente de aproveitamento obtido pelo projeto foi de 1,2.
- Taxa de Ocupação: limita a área de projeção da edificação a 70% da área do terreno. O projeto atingiu 49,5%.
- Taxa de Permeabilidade: estabelece que o percentual mínimo de 20% da área do terreno deve ser permeável às águas superficiais.
- Limite altimétrico: delimita a cota 1035, em relação ao nível do mar, como limite de altura para a edificação.

A situação dos lotes que compõem o terreno em relação à malha urbana lhe confere duas testadas, com possibilidade de acesso principal pela Avenida Prof. Mário Werneck - via arterial - ou pela rua Desembargador Amilcar de Castro - via local - que apresentam um desnível de 32m. Tais desníveis são comuns na região e muitos edifícios residenciais e comerciais lançam mão de estruturas aparentes e subtilizadas, abaixo do nível de acesso, para vencer os grandes desníveis entre a testada e o fundo dos lotes, ocasionando um impacto visual negativo na paisagem urbana.

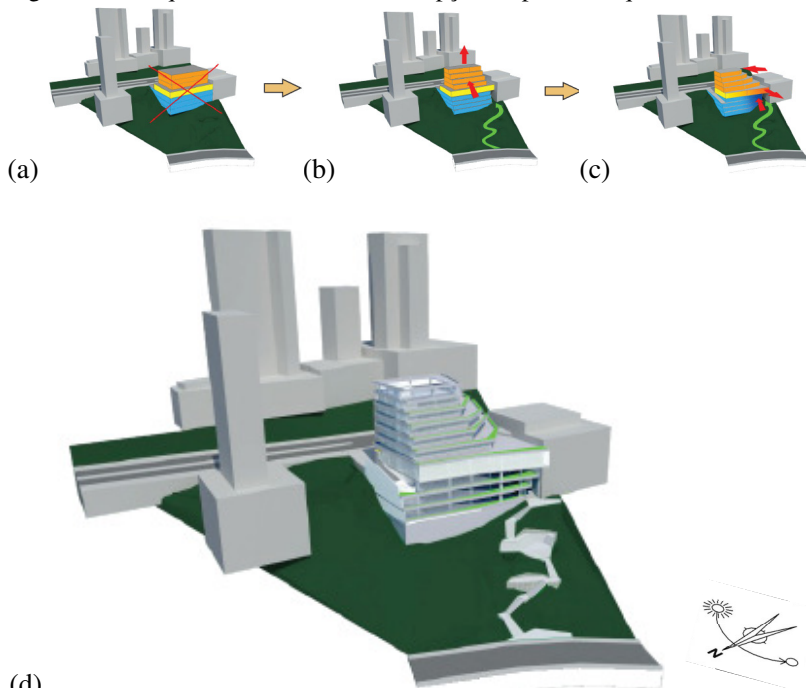
O programa arquitetônico do projeto é composto por:

- 3 pavimentos em subsolo destinados a garagens.
- 1 pavimento térreo destinado a lojas com acesso direto à via.
- 5 pavimentos destinados a salas comerciais.

O partido arquitetônico, ilustrado na Figura 4.3, resulta dessa condição topográfica, dos condicionantes legais, do programa de necessidades e da intenção conceitual dos arquitetos. A fim de se evitar uma solução trivial, que ocupa as alturas máximas permitidas nas divisas e ocasiona um grande paredão na parte posterior da edificação (Figura 4.3a), foi adotada uma solução de pavimentos escalonados (Figura 4.3b) que proporcionam terraços para os pavimentos tipos. Para o melhor aproveitamento do potencial construtivo, o pavimento térreo foi ampliado. O escalonamento foi adotado também na divisa lateral e os pavimentos de subsolo foram recuados para a criação de acesso de

pedestres e praça pública conectando as duas testadas do terreno (Figura 4.3c). A volumetria resultante é ilustrada em (Figura 4.3d) (BLOC Arquitetura, 2016).

Figura 4.3 – Esquema conceitual da concepção do partido arquitetônico.



(d)
Fonte: BLOC Arquitetura.

4.2 MODELOS BIM REPRESENTATIVOS DAS ETAPAS DE ETAPAS DE PROJETO

Embora o aproveitamento da iluminação natural não tenha sido a principal premissa conceitual explorada pelos arquitetos, sabe-se que a etapa de concepção volumétrica do partido arquitetônico é determinante para o desempenho dessa variável ambiental. A definição da volumetria determina as formas dos pavimentos e dimensões em planta, enquanto a implantação no terreno define as orientações das fachadas e suas relações com o entorno, que por sua vez irão determinar as condições de disponibilidade de luz natural. Neste momento de síntese arquitetônica, em que diversos aspectos são considerados simultaneamente pelos

arquitetos, o uso de ferramentas de análise computacional pode possibilitar um olhar mais atento para o desempenho das soluções arquitetônicas quanto à iluminação natural.

Etapas subsequentes à concepção do partido arquitetônico trarão novas definições ao projeto, que também influenciarão seu desempenho, tais como distribuição, dimensionamento e sistemas de aberturas, compartimentação interna dos pavimentos, materiais de acabamentos internos e externos e definição de elementos compositivos da fachada.

Assim, para avaliar a integração das simulações com ênfase às etapas iniciais de projeto, são considerados dois momentos do desenvolvimento do projeto arquitetônico:

- a) **Concepção do Partido Arquitetônico**
- b) **Desenvolvimento Inicial**

Devido à natureza intrinsecamente iterativa e cíclica do processo de projeto de arquitetura, decisões arquitetônicas sobre um determinado aspecto do projeto são tomadas em uma etapa de desenvolvimento e podem ser revistas ou pormenorizadas em etapas posteriores. Assim, os momentos de projeto aqui considerados podem estar associados a mais de uma das etapas formais da atividade técnica de projeto, conforme descritas pela norma ABNT NBR 13532/1995 e abordadas na seção 2.1.4 do referencial teórico. Analogamente, a análise dos resultados obtidos com as simulações poderá ser utilizada como suporte às decisões do arquiteto em mais de uma etapa de projeto.

4.2.1 A concepção do partido arquitetônico

Considera-se que concepção do partido arquitetônico ocorre nas etapas de **Estudo de Viabilidade (EV)** e **Estudo Preliminar (EP)**. É um momento em que são tomadas decisões de projeto determinantes para a qualidade arquitetônica, de um modo geral, e também para o seu desempenho final quanto à iluminação. Tais decisões envolvem, entre outras:

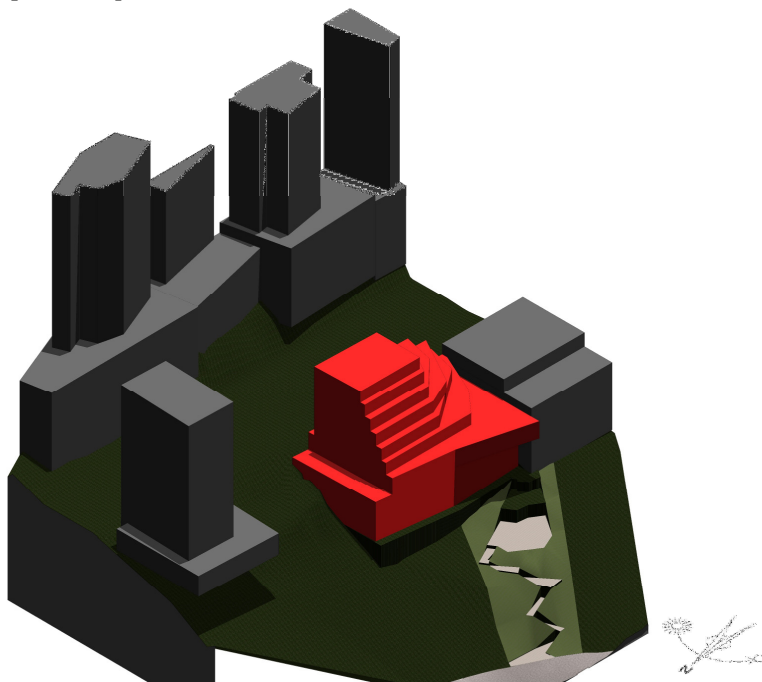
- Análise do entorno imediato e das condicionantes naturais e legais.
- Definição das estratégias de implantação e orientação das fachadas.
- Síntese conceitual do programa de necessidades para o lançamento do partido arquitetônico.

Nessa etapa do projeto tomado objeto de estudo, o SketchUp foi o programa de modelagem utilizado pelos arquitetos para a concepção do partido arquitetônico, cujo processo foi ilustrado esquematicamente na Figura 4.3. No entanto, o Revit dispõe de ferramentas específicas para a

modelagem de estudos de massa volumétricos, de modo que, para atender aos objetivos da pesquisa de analisar os fluxos de trabalho partindo sempre de um modelo BIM, o estudo volumétrico e o entorno foram remodelados utilizando essas ferramentas. No modelo volumétrico correspondente à concepção do partido arquitetônico, ilustrado na Figura 4.4, não há ainda definição de qualquer compartimentação interna ou a representação de qualquer elemento construtivo, mas somente as superfícies que compõem o volume. Esse modelo foi utilizado para as seguintes simulações ou análises:

- Estudos de trajetória solar, insolação e sombreamento
- Mapas de radiação solar
- Visualização de máscaras de obstrução do entorno

Figura 4.4 – Vista tridimensional do modelo BIM representativo da concepção do partido arquitetônico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Desenvolvimento Inicial

Consideram-se aqui como desenvolvimento inicial as etapas

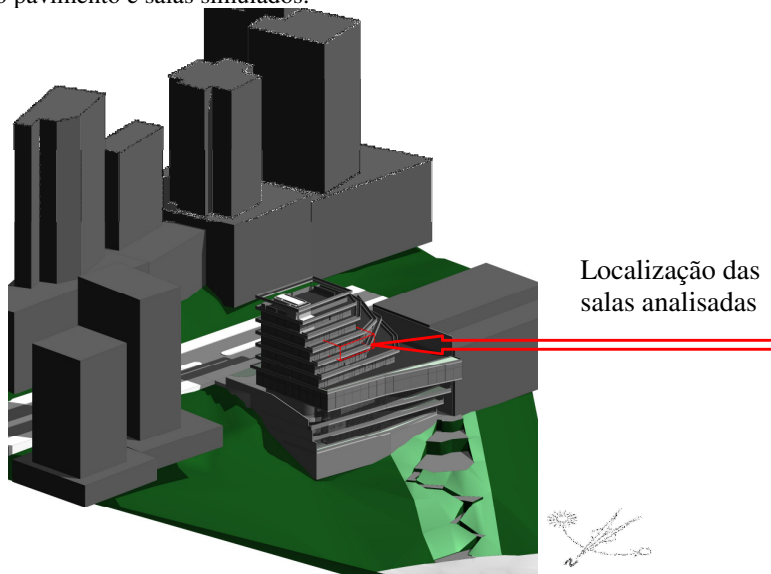
subsequentes à concepção do partido arquitetônico e que antecedem a submissão do projeto para aprovação junto aos órgãos competentes. Este momento do projeto corresponde às etapas de **Estudo Preliminar (EP)**, **Anteprojeto (AP)** e **Projeto Legal (PL)**. As principais decisões de projeto associadas a estas etapas e que influenciam diretamente a iluminação natural são, entre outras:

- Distribuição e dimensionamento dos itens do programa de necessidades.
- Adequação do partido aos condicionantes legais e programáticos do empreendimento.
- Distribuição e dimensionamento das aberturas.
- Definição conceitual dos materiais de acabamentos.

No projeto adotado como objeto de estudo estas etapas foram desenvolvidas com o Revit. O modelo arquitetônico utilizado para a exploração dos fluxos de trabalho foi disponibilizado pelos autores do projeto e possui um nível de desenvolvimento correspondente à etapa de Projeto Legal. Para efeito da pesquisa este modelo BIM foi considerado representativo de qualquer uma das três etapas de projeto tratadas aqui como o momento de desenvolvimento inicial – EP, AP e PL.

A Figura 4.5 ilustra uma vista do modelo BIM correspondente a essas etapas de projeto e é usada como base para a exportação dos modelos geométricos utilizados nas simulações.

Figura 4.5 – Vista tridimensional do modelo BIM completo, com destaque para o pavimento e salas simulados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para viabilizar a análise dos três fluxos de trabalho em função do tempo disponível e dos objetivos da pesquisa, as simulações foram limitadas a um conjunto de duas salas comerciais de um único pavimento tipo, representativas do programa e das soluções arquitetônicas do projeto. O modelo geométrico mais leve é particularmente importante para o **FT3**, que adota algoritmos de cálculo baseados no método da radiosidade. As implicações desse método de cálculo para a definição do tamanho do modelo geométrico serão discutidas na seção 5.2.1.5.

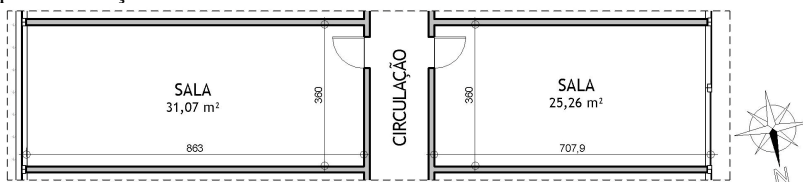
A Figura 4.6 representa a planta do pavimento selecionado e destaca as salas 403 e 409, para as quais serão as simulações e análises. As salas são representadas em detalhe na Figura 4.7, na mesma posição relativa em que serão apresentados os resultados das simulações. Para melhor visualização, a planta foi rotacionada em relação àquela da Figura 4.6, que mostra o pavimento inteiro.

Figura 4.6 – Planta do pavimento tipo que será submetido às simulações



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.7 – Planta do pavimento tipo que será submetido aos fluxos de trabalho para simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

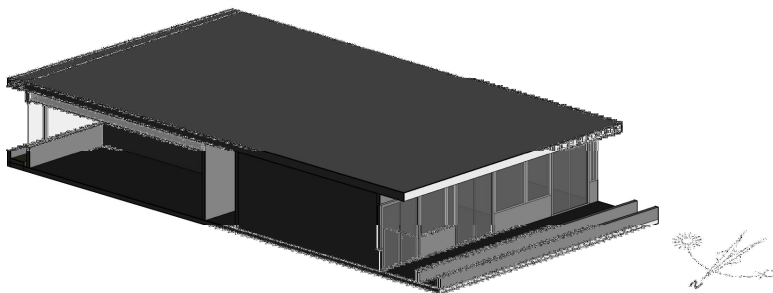
A sala 403 tem 24,95m², mede 3,60m de largura por 6,93m de profundidade e 2,60m de pé-direito. As aberturas são voltadas para Oeste e constituídas por uma porta de vidro, medindo 2,00m de largura por 2,55m de altura, e uma janela, medindo 1,60m por 1,75m de altura e 0,80m de peitoril. A sala 409 tem 31,07m², mede 3,60m de largura por 8,63m de profundidade e 2,60m de pé-direito. A abertura é composta por uma janela voltada para Leste, medindo 3,60m de largura por 1,75m de altura e peitoril de 0,80m.

Para os Fluxos de Trabalho 2 e 3, em que há necessidade de exportação do modelo BIM para um modelo geométrico de base CAD

(arquivos com extensão DWG ou DXF), uma nova vista tridimensional é criada no Revit para este fim. A vista a ser exportada é obtida do modelo BIM ilustrado na Figura 4.5, contendo as mesmas categorias de elementos do modelo visíveis. Trata-se do mesmo modelo BIM, com a diferença que, nesse caso, foram utilizadas ferramentas do Revit para delimitar o modelo geométrico, conforme ilustrado pela Figura 4.8. Esse modelo foi utilizado para as seguintes simulações ou análises:

- Estudos de trajetória solar, insolação e sombreamento
- Visualização de máscaras
- Mapas de Iluminâncias
- Mapas de Luminâncias
- Imagens renderizadas
- Ofuscamento
- Classes de iluminâncias
- Vetor Foton
- Autonomia de Luz Diurna (DA)
- Autonomia Espacial de Luz Diurna (sDA)
- Exposição Anual à Luz Solar (ASE)

Figura 4.8 – Delimitação do modelo BIM para a exportação do modelo geométrico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 DADOS DE PROJETO

Todos os dados de projeto necessários, bem como os dados de entrada para as simulações, conforme abordados na seção 2.2.4.1, são definidos originariamente no modelo BIM criado no Revit e devem ser transmitidos ou reinsertados nos programas de simulação. Em empreendimentos como o do objeto de estudo, destinados ao mercado

imobiliário, alguns desses conjuntos de dados de projeto usualmente não estão definidos nas etapas iniciais. Mobiliários, dispositivos de sombreamento móveis e, em muitos casos, até mesmo os sistemas de iluminação artificial são definidos pelos futuros usuários, que serão conhecidos somente após a conclusão do projeto. Por esta razão, serão desconsiderados na análise dos fluxos de trabalho. Os acabamentos dos espaços internos, que definem as refletâncias das superfícies, também estão sujeitos a definição ou redefinição conforme o uso final destinado aos espaços. Para os procedimentos de simulação foram adotados valores padrão, tomando-se como referência as recomendações da IES-LM-83-12 (IES, 2013). Esses, assim como outros dados de projeto adotados para a pesquisa, serão detalhados a seguir:

a) Localização

Os dados de localização relevantes para as simulações são a latitude e a longitude do local do projeto, que determinam a trajetória solar em relação a ele. Em **FT1**, esta informação é dada pelos parâmetros de localização do próprio Revit. Em **FT2**, a latitude e longitude consideradas são aquelas que constam no arquivo climático e correspondem, de fato, à localização da estação meteorológica de onde os dados foram obtidos. Em **FT3**, latitude e longitude são definidas nas caixas de diálogo do Apolux previamente aos cálculos da iluminação.

Temos, portanto:

- Para FT1 e FT3, foram usados os dados reais do terreno: 19,97° de latitude Sul e 43,96° de longitude Oeste
- Para FT2, foram usados os dados do Aeroporto da Pampulha: 19,82° de latitude Sul e 43,96° de longitude Oeste.

b) A geometria do edifício

Para avaliar os fluxos de trabalho tendo como ponto de partida comum o modelo BIM do projeto arquitetônico, adotou-se como princípio que toda informação geométrica do projeto seria gerada no Revit e transferida para os programas de simulação com o mínimo de intervenção possível. Inicialmente, o entorno construído não foi considerado para que se pudesse trabalhar com arquivos de modelos geométricos mais leves. Nesse caso, o modelo geométrico utilizado é aquele representado na Figura 4.8, que foi utilizado em todos os testes preliminares realizados e na grande maioria das simulações exemplificadas e analisadas comparativamente nesse trabalho.

Num segundo momento, no entanto, foi percebida a importância

de avaliar os impactos que a consideração do entorno construído pode representar sobre a etapa de preparação do modelo geométrico e sobre os resultados das simulações. Para isso uma nova bateria de simulações foi realizada, gerando Mapas de Iluminâncias adicionais. Os modelos geométricos utilizados nesse caso são apresentados na Figura 5.21, seção 5.2.5, quando esses impactos são discutidos.

c) Propriedades ópticas dos materiais.

Para as superfícies opacas são adotados os valores de refletâncias recomendados pela IES LM-83-12, discriminados a seguir:

- Pisos: 20%
- Paredes: 50%
- Forros/tetos: 70%
- Mobiliário: 50%
- Portas, esquadrias e outros elementos: 50%
- Fachada Externa: 30%
- Solo: 20%

Para os elementos translúcidos, a transmitância a luz visível adotada foi de 88%.

4.4 PARÂMETROS PARA SIMULAÇÕES ESTÁTICAS E DINÂMICAS

Além dos dados de projeto, a realização das simulações requer a definição de outros parâmetros que precisam ser padronizados para as análises comparativas. Desse conjunto de parâmetros, há alguns aplicáveis somente às simulações estáticas, outros somente às dinâmicas e outros aplicáveis a ambas.

4.4.1 Parâmetros aplicáveis tanto às simulações estáticas quanto às dinâmicas

a) Plano e área de análise

O uso de simulações em processo de projeto pressupõe a definição prévia quanto aos ambientes que serão objeto de investigação. Os planos e áreas de análise devem ser definidos conforme o tipo de uso do ambiente e suas necessidades em termos de iluminação natural. As salas comerciais destacadas na Figura 4.7 não têm uso definido e por isso toda sua área é considerada para análise. Um plano horizontal, a uma altura de 76cm do piso, foi definido como plano de análise.

b) Malha de pontos ou sensores

A malha de pontos de análise define os sensores para os quais serão calculados os níveis de iluminação. O espaçamento adotado para os sensores foi definido em 15cm, estando em conformidade com a recomendação da IES LM-83-12 (IES, 2013). Devido às particularidades da interface de cada programa de simulação, a disposição dos pontos pode variar sutilmente e será explicitada na descrição dos fluxos de trabalho.

c) Limites de iluminâncias

Aplicável a todas as métricas baseadas em malha de pontos dos planos de análise, que compreendem algumas estáticas e todas as dinâmicas.

O nível de iluminância mínimo para ambientes de trabalho é definido pela Norma NBR ISO/CIE 8995, conforme o tipo de atividade realizada. O projeto utilizado como objeto de estudo é destinado ao uso comercial, mas a atividade final não é conhecida - dependerá de seus futuros usuários. Para os procedimentos da pesquisa, foi definido o valor de genérico de 300 lux, considerado o plano de análise a uma altura de 76cm do piso (equivalente a 30 polegadas). Nas simulações estáticas este valor é usado como referência para avaliar a distribuição e a suficiência da luz natural no ambiente. Nas simulações dinâmicas, é usado como referência para as métricas DA, e sDA.

O limite de iluminância máximo de 1000lux proporcionado pela luz solar direta é adotado como critério de conformidade para a ASE, de acordo a IES LM-83-12 (IES, 2013).

4.4.2 Parâmetros aplicáveis somente às simulações estáticas**a) Condições de céu**

As simulações estáticas foram realizadas para as condições de céu claro e de céu encoberto, consideradas como extremas em termos da maior e da menor disponibilidade de luz natural (REINHART, 2010). No entanto, os modelos de céu disponibilizados por cada um dos programas diferem entre si, assim como também são diferentes as possibilidades de controle de parâmetros pelo usuário. Por isso, foram necessários procedimentos para a compatibilização dos parâmetros que caracterizam as condições de céu, que são apresentados na seção 4.4.

b) Datas e horários

O Quadro 4.1 apresenta as 12 combinações de data e horário para

as quais foram simulados os Mapas de Iluminâncias. Essa bateria principal de simulações tem como propósito a comparação dos resultados obtidos pelos programas que definem cada fluxo de trabalho. O modelo utilizado foi aquele representado na Figura 4.8, que desconsidera o entorno construído. Para avaliar o impacto do entorno sobre os resultados, novas simulações foram realizadas com cada fluxo de trabalho, utilizando os modelos representados na Figura 5.21. Com essa configuração, foram gerados os Mapas de Iluminância para o Solstício de verão, às 9h, com céu claro, destacados em cinza no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Datas, horários e tipos de céu simulados para comparação de resultados.

| | | | |
|----|-------------------------------------|---------------|-----|
| 1 | Solstício de Verão - 21 de dezembro | Céu Claro | 9h |
| 2 | Solstício de Verão - 21 de dezembro | Céu Claro | 12h |
| 3 | Solstício de Verão - 21 de dezembro | Céu Claro | 15h |
| 4 | Solstício de Inverno - 21 de junho | Céu Claro | 9h |
| 5 | Solstício de Inverno - 21 de junho | Céu Claro | 12h |
| 6 | Solstício de Inverno - 21 de junho | Céu Claro | 15h |
| 7 | Solstício de Verão - 21 de dezembro | Céu Encoberto | 9h |
| 8 | Solstício de Verão - 21 de dezembro | Céu Encoberto | 12h |
| 9 | Solstício de Verão - 21 de dezembro | Céu Encoberto | 15h |
| 10 | Solstício de Inverno - 21 de junho | Céu Encoberto | 9h |
| 11 | Solstício de Inverno - 21 de junho | Céu Encoberto | 12h |
| 12 | Solstício de Inverno - 21 de junho | Céu Encoberto | 15h |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os programas de simulação dos **FT1** e **FT2** consideram o horário definido para as simulações como correspondente ao horário solar, quando horário de 12h é definido pelo ângulo de 0° para o azimute solar, enquanto no **FT3** o horário definido pelo usuário corresponde à hora civil local. Nesse caso, cada fuso-horário está compreendido em uma faixa correspondente a aproximadamente 15° de longitude, ajustados de acordo com fronteiras estaduais e nacionais, e a diferença entre o horário solar e o horário civil pode variar até quase 1 hora. Este é o caso de Belo Horizonte, cuja longitude é de $43,96^\circ$ Oeste, onde o horário civil está praticamente 1 hora à frente do horário solar. Portanto, para que houvesse a correspondência do horário solar e as simulações com os três fluxos de trabalho fossem realizadas com os mesmos ângulos de altura e azimute

solares, aproximadamente, as simulações realizadas com o **FT3** foram realizadas para os horários civis, às 10h, 13h e 16h.

4.4.3 Parâmetros aplicáveis somente às simulações dinâmicas

a) Arquivo Climático

Nas simulações dinâmicas, a caracterização das condições de céu é definida com base em dados climáticos. Para as simulações realizadas com o APOLUX e com o DIVA, o arquivo de dados climáticos é definido pelo usuário e foi utilizado um arquivo TMY (*Typical Meteorological Year*) com extensão no formato EPW (*Energy Plus Weather File*). Com o Insight 360, os dados climáticos são automaticamente da base de dados da Autodesk para o *Green Building Studio*.

b) Período de Análise

O período de análise equivale às horas úteis anuais. É adotada a recomendação da IES LM-83-12 (IES, 2013), que estabelece o período das 8h às 18h, considerando-se o horário de verão local, totalizando 10 horas diárias e 3650 horas anuais.

c) Limite temporal

O limite temporal aplicável à métrica sDA é estabelecido pela IES LM-83-12 (IES, 2013), que determina que são computados os pontos de medição do ambiente que atingirem o valor mínimo de 300 lux por pelo menos 50% das horas úteis anuais.

4.5 COMPATIBILIZAÇÃO DE PARÂMETROS QUE CARACTERIZAM AS CONDIÇÕES DE CÉU

Nesta seção são apresentados os procedimentos para a compatibilização de parâmetros que caracterizam as condições do céu quanto à disponibilidade global da luz diurna, distribuída na abóbada celeste conforme modelos de céu. Os procedimentos aplicam-se somente aos casos das simulações estáticas, para as quais o usuário escolhe os tipos de céu que deseja simular e tem possibilidades de controle de parâmetros específicos. Nas simulações dinâmicas, a caracterização das condições de céu é definida com base nos dados climáticos relativos a cada hora útil anual.

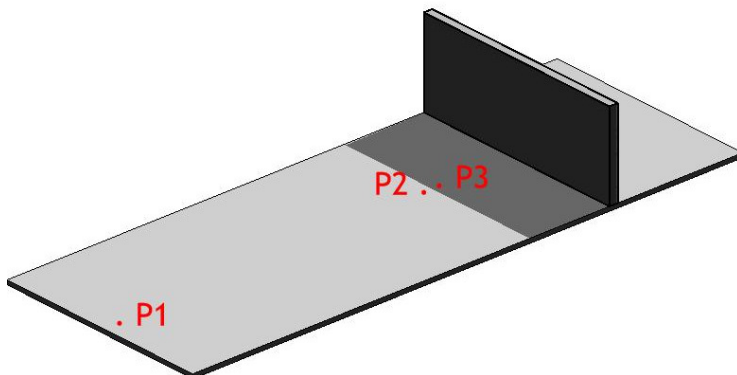
Dos três programas de simulação em estudo, o DIVA é o mais amplamente testado e reconhecido pela comunidade acadêmica e profissional. Também é o único que teve resultados validados com base

em um ambiente real para o ano inteiro. Por estas razões, foi tomado como referência para compatibilização desses parâmetros.

4.5.1 Modelo e simulação de teste

Foi elaborado um modelo de teste consistindo de um plano horizontal com um anteparo vertical, ilustrado pela Figura 4.9.

Figura 4.9 – Modelo de teste para compatibilização das variáveis dos modelos de céu.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo foi simulado com o DIVA com o intuito de se determinar o fluxo luminoso total que atinge um ponto contido em um plano horizontal desobstruído, bem como as parcelas de contribuição da luz direta, proveniente do Sol, e da luz difusa, proveniente do céu. As simulações foram feitas para as 12 combinações de data, horário e tipo de céu relacionados na tabela 3.1, e determinaram os valores de iluminâncias nos pontos P1, P2 e P3. O ponto P1 foi definido a uma distância tal que recebesse o mínimo de influência das reflexões no anteparo vertical e de sua obstrução à abóbada. A iluminância lida para este ponto foi tomada como a Iluminância Global Horizontal (IllumGloHor) em um plano desobstruído. A IllumGloHor corresponde ao somatório das contribuições da luz direta e difusa. O ponto P2 teve sua posição variável conforme data e horário de tal modo que estivesse exposto à luz direta do Sol, mas imediatamente adjacente à região sombreada pelo anteparo vertical. O ponto P3 também teve sua posição variável conforme data e horário, mas de tal modo que não recebesse luz direta do Sol e estivesse no limiar da região sombreada para a região exposta ao Sol. Da diferença entre a

iluminância em P2 e da iluminância em P3 se obtém a Iluminância Direta Horizontal (IlumDirHor) em um plano desobstruído, que seria a iluminância resultante unicamente da luz direta do Sol. Da diferença entre a IlumGloHor e a IlumDirHor se obtém a Iluminância Difusa Horizontal (IlumDifHor) para um plano desobstruído, em valores aproximados. Os resultados das simulações com o modelo de teste para dias de céu claro são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados das simulações com o modelo de teste para dias de céu claro.

| Data | Horário | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------------------------|---------|---------------------------|-------------|-------------|---------------------|---------------------|
| | | P1 IlumGloHor (lux) | P2 (lux) | P3 (lux) | IlumDirHor (lux) | IlumDifHor (lux) |
| SOLSTÍCIO DE VERÃO (21/12) | 9h | 64.680 | 61.150 | 4.620 | 56.530 | 8.150 |
| | 12h | 101.170 | 89.614 | 11.804 | 77.810 | 23.360 |
| | 15h | 61.397 | 57.757 | 4.405 | 53.352 | 8.045 |
| SOLSTÍCIO DE INVERNO (21/06) | 9h | 39.917 | 36.820 | 5.625 | 31.195 | 8.722 |
| | 12h | 63.903 | 58.820 | 5.785 | 53.035 | 10.868 |
| | 15h | 38.485 | 35.590 | 5.540 | 30.050 | 8.435 |

Legenda:

Ilum GloHor: Iluminância Global Horizontal

IlumDirHor: Iluminância Direta Horizontal (col 2 - col 3)

Ilum DifHor: Iluminância Difusa Horizontal (Col 1 - Col 4)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados para as simulações realizadas com o céu encoberto. Nesse caso não há luz direta do Sol e somente o valor da IlumGloHor, obtido em P1, foi considerado.

Tabela 4.2 – Resultados de iluminâncias do modelo de teste para céu encoberto.

| Data | Horário | P1 IlumGloHor (lux) |
|---------------------------------|---------|------------------------|
| SOLSTÍCIO DE VERÃO (21/12) | 9h | 14.449 |
| | 12h | 18.795 |
| | 15h | 13.783 |
| SOLSTÍCIO DE INVERNO (21/06) | 9h | 9.129 |
| | 12h | 13.783 |
| | 15h | 8.950 |

Legenda:

Ilum GloHor: Iluminância Global Horizontal

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.2 Compatibilização para o APOLUX

Para que as simulações estáticas do objeto de estudo com o APOLUX fossem realizadas com as condições as mais próximas possíveis daquelas realizadas com o DIVA, buscou-se identificar a combinação entre os tipos de céu e o ajuste dos parâmetros do programa que resultasse nos valores de *IlumGloHor* e *IlumDifHor* mais próximos daqueles obtidos com as simulações do modelo de teste.

Tabela 4.3 – Compatibilização de parâmetros céu do APOLUX para céu claro.

| Data | Horário | Programa e tipo de céu | Turvamento | IlumGloHor | IlumDirHor | IlumDifHor | Razão IlumDif Hor/ IlumGlo Hor | Razão IlumGlo Hor APOLUX/ DIVA |
|---------------------------------|---------|------------------------|-----------------|--------------------|------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| SOLSTÍCIO DE VERÃO (21/12) | 9h | DIVA | XXXX | 64.680 | 56.530 | 8.150 | 0,13 | XXXX |
| | | APOLUX CÉU12 | 0,95 | 98.280 | 90.064 | 8.216 | 0,08 | 1,52 |
| | | APOLUX CÉU13 | 3,00 | 83.733 | 68.863 | 14.870 | 0,18 | 1,29 |
| | | APOLUX CÉU13 | 6,80 | 77.460 | 41.790 | 35.670 | 0,46 | 1,20 |
| | 12h | DIVA | XXXX | 101.170 | 77.810 | 23.360 | 0,23 | XXXX |
| | | APOLUX CÉU12 | 0,95 | 135.211 | 121.218 | 13.993 | 0,10 | 1,34 |
| | | APOLUX CÉU13 | 3,00 | 123.497 | 98.675 | 24.822 | 0,20 | 1,22 |
| | | APOLUX CÉU13 | 6,90 | 117.706 | 66.609 | 51.097 | 0,43 | 1,16 |
| | 15h | DIVA | XXXX | 61.397 | 53.352 | 8.045 | 0,13 | XXXX |
| | | APOLUX CÉU12 | 3,00 | 93.199 | 85.238 | 7.961 | 0,09 | 1,52 |
| | | APOLUX CÉU13 | 3,00 | 78.843 | 64.311 | 14.532 | 0,18 | 1,28 |
| | | APOLUX CÉU13 | 6,50 | 73.350 | 39.681 | 33.669 | 0,46 | 1,19 |
| SOLSTÍCIO DE INVERNO (21/06) | 9h | DIVA | XXXX | 39.917 | 31.195 | 8.722 | 0,22 | XXXX |
| | | APOLUX CÉU12 | 0,95 | 58.713 | 52.779 | 5.934 | 0,10 | 1,47 |
| | | APOLUX CÉU13 | 3,00 | 46.046 | 34.556 | 11.490 | 0,25 | 1,15 |
| | | APOLUX CÉU13 | 5,00 | 43.762 | 22.823 | 20.939 | 0,48 | 1,10 |
| | 12h | DIVA | XXXX | 63.903 | 53.035 | 10.868 | 0,17 | XXXX |
| | | APOLUX CÉU12 | 0,95 | 93.109 | 85.161 | 7.948 | 0,09 | 1,46 |
| | | APOLUX CÉU13 | 3,00 | 78.746 | 64.239 | 14.507 | 0,18 | 1,23 |
| | | APOLUX CÉU13 | 6,50 | 73.239 | 39.622 | 33.617 | 0,46 | 1,15 |
| | 15h | DIVA | XXXX | 38.485 | 30.050 | 8.435 | 0,22 | XXXX |
| | | APOLUX CÉU12 | 0,95 | 56.713 | 50.884 | 5.829 | 0,10 | 1,47 |
| | | APOLUX CÉU13 | 3,00 | 44.227 | 32.889 | 11.338 | 0,26 | 1,15 |
| | | APOLUX CÉU13 | 4,90 | 42.130 | 21.913 | 20.217 | 0,48 | 1,09 |

Legenda:

IlumGloHor: Iluminância Global Horizontal

IlumDirHor: Iluminância Direta Horizontal

IlumDifHor: Iluminância Difusa Horizontal (simulado com DIVA)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos com APOLUX, em comparação com os obtidos com o DIVA para condições de céu claro. Para esta condição, foram testadas três configurações de tipos de céu. Com o céu claro de número 12, o turvamento foi ajustado para aproximar os valores de *IllumDifHor* aos obtidos com o DIVA. Este ajuste foi descartado, pois os valores para *IllumGloHor* ficaram muito maiores que os valores de referência do modelo de teste, entre 34% e 52% acima. Com o céu claro de número 13 foram feitos dois ajustes no turvamento. Primeiro com o valor 3,00, que é o menor valor possível para esse tipo de céu, e em seguida com o turvamento que resultasse no menor e mais próximo valor para *IllumGloHor*. Esse último ajuste também foi descartado, pois os valores da *IllumDifHor* e da razão *IllumDifHor/IllumGloHor* excederam em muito aqueles obtidos com o DIVA. O ajuste intermediário, com o tipo de céu claro número 13 e turvamento com o valor 3,00 foi adotado, por fim, para a realização das simulações estáticas do objeto de estudo. Com essa configuração, os valores de *IllumGloHor*, *IllumDirHor* e *IllumDifHor* foram sempre maiores que os obtidos com o DIVA no modelo de teste, sendo que para *IllumGloHor* ficaram entre 15% e 29% acima. Presume-se daí que, mesmo com os procedimentos de compatibilização, os resultados das simulações com céu claro realizados com Apolux tenderão a mostrar, para os mesmos pontos do ambiente, níveis de iluminância superiores àqueles das simulações realizadas com o DIVA.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos com APOLUX, em comparação com os obtidos com o DIVA para condições de céu encoberto. Para esta condição não há incidência direta da luz solar e o valor de *IllumGloHor* será igual ao valor da *IllumDifHor*. O tipo de céu selecionado foi o Céu Encoberto de número 1 e o parâmetro ajustado foi a razão da **iluminância difusa** pela **iluminância extraterrestre horizontal**. Nestes casos os valores de *IllumGloHor* foram praticamente iguais aos obtidos com o DIVA. Diferentemente do que ocorre com o céu claro, presume-se que os resultados das simulações com céu encoberto realizados com Apolux tenderão a mostrar níveis de iluminação bastante próximos para os mesmos pontos do ambiente.

Tabela 4.4– Compatibilização de parâmetros céu do APOLUX para céu encoberto.

| Data | Horário | Programa | IlumGloHor (Lux) | Razão Iluminância Difusa / Extraterrestre Horizontal |
|------------------------------|---------|----------|------------------|--|
| SOLSTÍCIO DE VERÃO (21/12) | 9h | DIVA | 14.449 | |
| | | APOLUX | 14.508 | 0,142 |
| | 12h | DIVA | 18.795 | |
| | | APOLUX | 18.962 | 0,142 |
| | 15h | DIVA | 13.783 | |
| | | APOLUX | 13.816 | 0,142 |
| SOLSTÍCIO DE INVERNO (21/06) | 9h | DIVA | 9.129 | |
| | | APOLUX | 9.144 | 0,142 |
| | 12h | DIVA | 13.783 | |
| | | APOLUX | 13.806 | 0,142 |
| | 15h | DIVA | 8.950 | |
| | | APOLUX | 8.869 | 0,142 |

Legenda:

Ilum GloHor: Iluminância Global Horizontal

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.3 Compatibilização para o Insight 360

Com o Insight 360 os parâmetros que podem ser definidos pelo usuário são os dados climáticos de irradiação solar, GHI, DNI e DHI, medidos em W/m². O modelo de teste forneceu os valores de referência em termos de iluminâncias, *IlumGloHor*, *IlumDirHor* e *IlumDifHor*, medidos em lux. A compatibilização para o Insight 360 consistiu, portanto, na conversão dos dados de iluminância em dados de irradiação, adotando-se valores aproximados de Eficácia Luminosa, conforme Lamberts, Dutra e Pereira (p.76, 2014). A Tabela 4.5 apresenta os resultados de conversão para céu claro, onde:

- Valores de GHI foram obtidos pela divisão de *IlumGloHor* (coluna 1) pela eficácia luminosa de 115 lm/W (coluna 4).
- Valores de DHI foram obtidos pela divisão de *IlumDifHor* (coluna 3) pela eficácia luminosa de 150 lm/W (coluna 6).
- Valores de DNI foram obtidos subtraindo-se DNI de GHI, para encontrar os valores de **irradiação direta horizontal** (DirHI), e em seguida dividir pelo seno do ângulo da altura solar.

Tabela 4.5 – Compatibilização de parâmetros climáticos do Insight 360 para céu claro.

| Data | Hora | Dados do Modelo de Teste | | | Dados para Insight 360 | | | | | | |
|------------------------------|------|--------------------------|-------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|------------------|-------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | Ilum GloHor (lux) | Ilum DirHor (lux) | Ilum DifHor (lux) | Efic. Lum. GHI (lm/W) | GHI (W/m ²) | Efic. Lum. DHI (lm/W) | DHI (W/m ²) | DirHI (W/m ²) | Altura Solar (°) | DNI (W/m ²) |
| SOLSTÍCIO DE VERÃO (21/12) | 9h | 64.680 | 56.530 | 8.150 | 115 | 562 | 150 | 54 | 508 | 50,4 | 659 |
| | 12h | 101.170 | 77.810 | 23.360 | | 880 | | 156 | 724 | 84,9 | 727 |
| | 15h | 61.397 | 53.352 | 8.045 | | 534 | | 54 | 480 | 45,5 | 673 |
| SOLSTÍCIO DE INVERNO (21/06) | 9h | 39.917 | 31.195 | 8.722 | | 347 | | 58 | 289 | 28,8 | 600 |
| | 12h | 63.903 | 53.035 | 10.868 | | 556 | | 72 | 483 | 46,6 | 665 |
| | 15h | 38.485 | 30.050 | 8.435 | | 335 | | 56 | 278 | 27,8 | 597 |

Legenda:

Ilum GloHor: Iluminância Global Horizontal (simulado com DIVA)

Ilum DirHor: Iluminância Direta Horizontal (simulado com DIVA)

Ilum DifHor: Iluminância Difusa Horizontal (simulado com DIVA)

Efic. Lum. GHI: Eficácia luminosa para Iluminância global horizontal

GHI: Irradiação Global Horizontal (=col 1/col 4)

Efic. Lum. DHI: Eficácia luminosa para Iluminância difusa horizontal

DHI: Irradiação Difusa Horizontal (=col 3/col 6)

DirHI: Irradiação Direta Horizontal (=col 5 - col 7)

DNI: Irradiação Direta Normal (= col 8 / sen(col 9))

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados de conversão para céu encoberto, onde os valores de *IlumGloHor* são divididos pela eficácia luminosa de 125lm/W para se obter os valores de GHI.

Tabela 4.6 – Compatibilização de parâmetros climáticos do Insight 360 para céu encoberto.

| Data | Horário | Dados do Modelo de Teste | Eficácia Luminosa Considerada (lumen/W) | Dados para Insight 360 |
|------------------------------|---------|--------------------------|---|-------------------------|
| | | Ilum GloHor (lux) | | GHI (W/m ²) |
| SOLSTÍCIO DE VERÃO (21/12) | 9h | 14.449 | 125 | 116 |
| | 12h | 18.795 | | 150 |
| | 15h | 13.783 | | 110 |
| SOLSTÍCIO DE INVERNO (21/06) | 9h | 9.129 | | 73 |
| | 12h | 13.783 | | 110 |
| | 15h | 8.950 | | 72 |

Legenda:

Ilum GloHor: Iluminância Global Horizontal (simulado com DIVA)

GHI: Irradiação Global Horizontal

Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante observar que os valores de Eficácia Luminosa utilizados nas tabelas 4.6 e 4.7 visam uma aproximação para permitir uma comparação de resultados obtidos com parâmetros tão próximos quanto possível com os três fluxos de trabalho. Os cálculos de conversão de dados de radiação em iluminâncias são realizados pelos programas de simulações por algoritmos e equações matemáticas mais complexas, sobre as quais não se justifica aprofundamento maior para os objetivos da pesquisa.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa, conforme seus objetivos específicos. As seções 5.1, 5.2 e 5.3 a seguir discutem os resultados correspondentes a cada um dos objetivos específicos, respectivamente.

5.1 DESCRIÇÃO DOS FLUXOS DE TRABALHO.

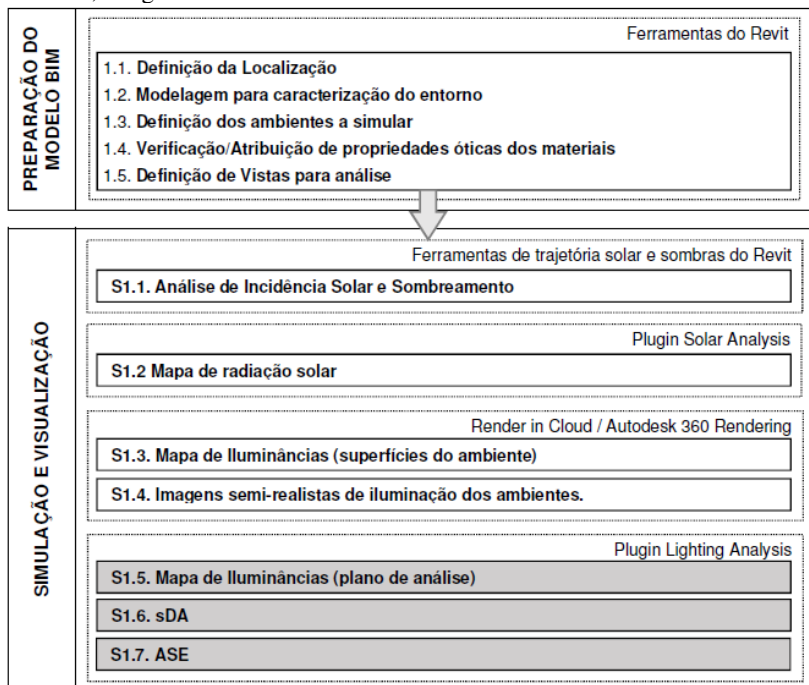
Os resultados do estudo exploratório dos programas de simulação investigados pela pesquisa são apresentados a seguir na forma da descrição dos fluxos de trabalho. Tais fluxos caracterizam os processos de simulação e análise da iluminação natural com cada programa sob a perspectiva de sua integração ao processo de projeto BIM. As descrições dos fluxos de trabalho constituem-se como resultados para o primeiro objetivo específico da pesquisa.

5.1.1 Fluxo de Trabalho 1 – Revit, Insight 360, Autodesk 360

Neste fluxo de trabalho, somente três das quatro etapas do processo de simulação que foram descritas na seção 3.3 de fato ocorrem. Como todo o processo é realizado no ambiente de trabalho do Revit e não há exportação do modelo geométrico, a etapa de “Preparação do Modelo Geométrico” não se aplica, pois o modelo geométrico corresponde ao próprio modelo BIM.

A seguir, são descritas as etapas e passos deste Fluxo de Trabalho, que é ilustrado pelo Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Fluxo de Trabalho 1. Simulações e análises utilizando ferramentas do Revit, Insight 360 e Autodesk 360.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.1.1 Etapa de preparação do modelo BIM

Esta etapa consiste, na realidade, em uma verificação dos dados de projeto definidos na seção 4.4. Os dados referentes à localização são normalmente definidos no modelo BIM no início do projeto. Dados de geometria e propriedades dos materiais se modificam constantemente, conforme a evolução da modelagem e especificações do projeto em desenvolvimento. Com o foco voltado para a análise da iluminação natural, tais informações são conferidas para certificar que os mesmos dados de projeto são utilizados em todos os fluxos de trabalho.

Inicialmente, devem ser verificadas a latitude e longitude da localidade do projeto (passo 1.1). Os edifícios do entorno devem ser modelados, caso não o tenham sido para o processo regular de projeto (passo 1.2). Para a modelagem do entorno recomenda-se a utilização das

ferramentas para estudo de Massas do Revit. Nos modelos BIM criados com o Revit, cada ambiente do projeto é representado por um objeto denominado “Room”, para os quais é atribuído um parâmetro que informa ao programa se serão incluídos ou não nas simulações realizadas com o Insight 360. Deve-se, dessa maneira, identificar quais os ambientes serão analisados (passo 1.3).

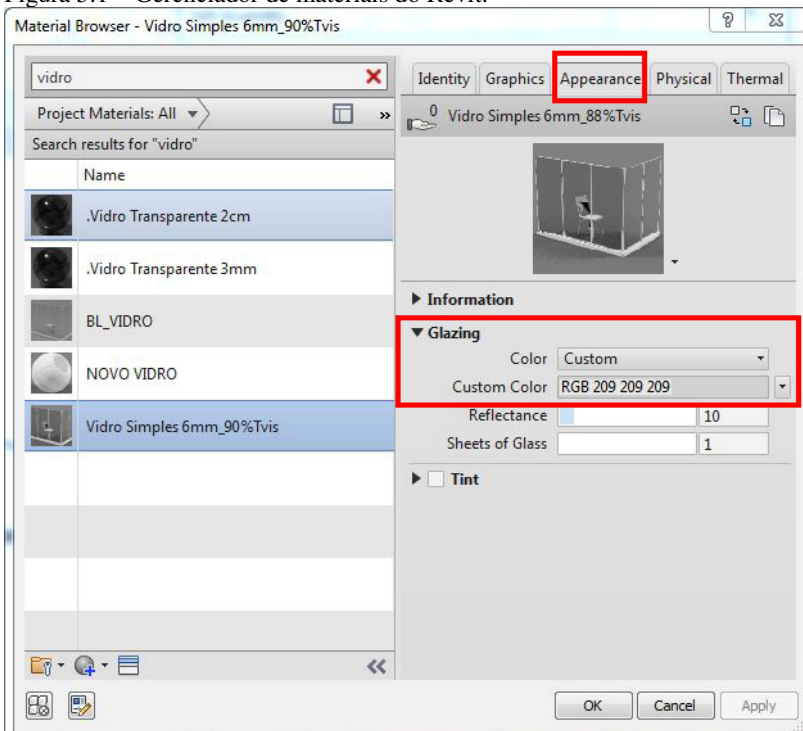
As propriedades ópticas de refletância e transmitância dos materiais de acabamento são definidas no Revit pelo seu gerenciador de materiais, ilustrado na Figura 5.1, na aba que controla sua aparência no modelo. Independentemente do interesse de se realizar simulações de iluminação, tais características dos materiais são sempre definidas no modelo BIM. Um detalhe importante a ser observado no gerenciador de materiais do Revit são as abas para controle de parâmetros gráficos, parâmetros de aparência, parâmetros físicos e parâmetros térmicos. Por sua importância para o desempenho da iluminação, os valores de refletância e transmitância devem ser sempre verificados antes do início de qualquer simulação (passo 1.4). Os valores de refletância dos materiais opacos são definidos por sua cor no padrão RGB¹, análogo ao destaque da Figura 5.1, conforme a seguinte equação:

$$\text{Refletância} = (0,2126 \times R + 0,7152 \times G + 0,0722 \times B).$$

Analogamente, a transmitância (Tviz) dos elementos translúcidos é definida pelo perfil RGB de sua cor, em destaque na Figura 5.1, como também pela espessura dos sólidos que representam objetos translúcidos. Os valores de transmitância foram definidos com o auxílio da tabela do Apêndice A.

¹ Representação digital das cores segundo sua composição espectral em Red, Green e Blue

Figura 5.1 – Gerenciador de materiais do Revit.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, vistas do modelo BIM são criadas e gerenciadas através do Revit para os propósitos específicos das simulações (passo 1.5). Quando se inicia a primeira simulação, uma vista 3D isométrica do modelo BIM, como a ilustrada na Figura 4.5, é criada automaticamente. Através do controle de visibilidade dos objetos nessa vista, são determinados os elementos geométricos que serão computados nas simulações. Objetos ocultos não serão considerados. Vistas em planta dos pavimentos simulados devem ser criadas para o propósito de visualização dos resultados gráficos.

5.1.1.2 Etapa de simulação

- a) Ferramentas de Análise de Geometria Solar
As ferramentas de trajetória solar e sombras do Revit podem

oferecer um importante auxílio ao arquiteto na tomada de decisões relacionadas à iluminação natural. São consideradas ferramentas de análise, pois não envolvem cálculos de trocas luminosas, mas permitem realizar estudos interativos de incidência solar em aberturas, sombreamento do entorno e penetração solar nos ambientes para avaliar, por exemplo, a eficiência de elementos de proteção ou os efeitos de luz e sombras desejados. O uso dessas ferramentas de análise pode ocorrer tanto nas etapas de projeto correspondentes à **Concepção do Partido Arquitetônico**, quanto nas etapas correspondentes ao **Desenvolvimento Inicial**, conforme o agrupamento descrito na seção 4.1.2.

b) Ferramentas *Solar Analysis*

As simulações realizadas com a ferramenta *Solar Analysis* aplicam-se somente aos elementos geométricos modelados com as ferramentas de Estudo de Massa do Revit. Por isso, têm aplicação somente nas etapas do projeto correspondentes à **Concepção do Partido Arquitetônico**, quando elementos construtivos tais como paredes, lajes, portas e janelas ainda não estão definidos no modelo BIM. Os parâmetros controlados pelo usuário são: o período de análise, resolução do grid de análise, superfícies do modelo incluídas e tipo de cálculo, que pode ser cumulativo, médio ou pico.

c) Ferramentas *Render in Cloud*

A ferramenta *Render in Cloud* aplica-se à reprodução da iluminação de uma determinada cena do projeto, podendo ocorrer somente em etapas de projeto correspondentes ao **Desenvolvimento Inicial**. Foi utilizada para gerar mapas de iluminâncias projetados sobre as superfícies do modelo e para reprodução de uma imagem semirrealista da iluminação natural. O usuário define a posição da câmera, ângulos de abertura, a data, o horário e as condições de céu. Para a geração dos gráficos em falsas cores, pode-se definir os limites mínimos e máximos de iluminâncias, com escala linear ou logarítmica.

d) Ferramentas *Lighting Analysis*

As simulações realizadas com a ferramenta *Lighting Analysis*, do Insight 360, são acessadas pelo menu “*Analyze*”, do Revit. O uso dessas ferramentas também se aplica apenas às etapas de projeto correspondentes ao **Desenvolvimento Inicial**. Uma vez verificados os dados de projeto, as simulações são realizadas de forma bastante direta. A caixa de diálogo ilustrada na Figura 5.2, permite escolher o tipo de simulação e os respectivos parâmetros que podem ser controlados pelo

usuário. Ao iniciar a simulação, os dados do modelo BIM são carregados para os servidores da Autodesk onde são realizados os cálculos. Quando concluídos, uma nova caixa de diálogo é apresentada solicitando ao usuário que aceite os resultados, que são então armazenados para o carregamento e visualização posteriores.

Figura 5.2 – Caixa de diálogo da ferramenta Lighting Analysis.

Select Analysis Type

For best results, follow the best practices checklist in Help

Analysis: Illuminance Analysis

Levels: 4º PAVIMENTO

Environment

Location: -19.9673309326172,-43.9553718566895

Date/Time: ... Define Environments in Analysis Settings

The following environments are defined

6/21 12 - GHI: 556, DNI: 665, DHI: 72

6/21 3 - GHI: 335, DNI: 597, DHI: 56

Illuminance Settings

Threshold: Lower: 100 Upper: 3000 Lux

Analysis Plane Height: 30 inches above floor

Thresholds are used for results in Room and Floor Schedules

Cloud Credits

Resolution: 12 inch grid

Required: 2 Credits

Available: Education

Email: Ravimotta when complete

v3.0.0.0

Start Analysis Cancel

Fonte: AUTODESK REVIT 2017.

5.1.1.3 Visualização dos resultados

Neste tópico, são apresentados exemplos das simulações e análises que podem ser obtidas pelo **FTI** e que foram consideradas mais relevantes para suporte às decisões do processo de projeto, em complemento àquelas que serão objeto da análise comparativa de resultados.

As simulações realizadas são armazenadas em rede e vinculadas ao arquivo do projeto, e podem ser carregadas para visualização a qualquer tempo. No entanto, os resultados armazenados registram apenas o tipo de simulação e o horário em que foi realizado. Para que não se perca

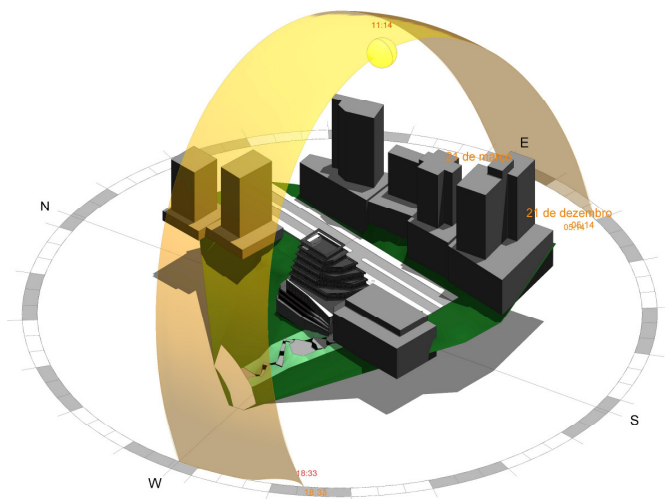
a referência dos parâmetros utilizados, recomenda-se que as visualizações sejam salvas em arquivos de imagem tão logo os resultados estejam disponíveis.

5.1.1.3.1 Ferramentas de Análise

a) Análise de Incidência Solar e Sombreamento:

Permite analisar a trajetória solar em relação ao modelo e as condições de incidência de insolação e sombreamento de forma interativa a qualquer tempo do processo de projeto. Os estudos de sombras podem ser feitos tanto para um dado instante no tempo, quanto para um período definido pelo usuário. Este período pode ser o curso de um dia, um mês, estação do ano ou para ano inteiro. As trajetórias solares são melhor visualizadas em vistas 3D isométricas. A projeção das sombras no projeto pode ser analisada em plantas, fachadas ou vistas tridimensionais do modelo BIM. A Figura 5.3 exemplifica a visualização da trajetória solar e respectiva projeção de sombras sobre as faces externas do modelo BIM. Estudos dinâmicos da trajetória solar e sombras do modelo podem ser visualizados em animação no próprio Revit ou salvos em vídeos.

Figura 5.3 – Estudo de sombreamento para o dia 21/12, às 11h. Visualização da Trajetória Solar correspondente aos meses de verão – período de 21/12 a 21/3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

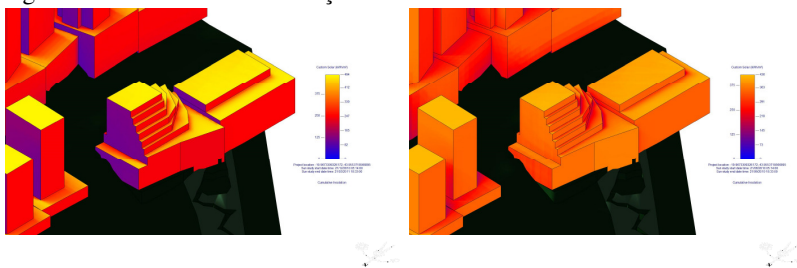
5.1.1.3.2 Simulações Estáticas

a) (S1.2) Mapas de radiação solar:

Os resultados são visualizados sobre o Estudo de Massa do modelo BIM, por meio de gráfico em cores indicando a intensidade de incidência de radiação sobre cada face do modelo. Os valores podem ser mostrados em kWh/m² para a incidência acumulada, média ou seus picos. A visualização da intensidade de radiação solar incidente pode subsidiar decisões relativas à volumetria, implantação e orientação do edifício. Contribuem para identificar fachadas com maior ou menor necessidade de proteção solar auxiliando também na avaliação de estratégias para proteção ou admissão da luz solar direta.

O exemplo da Figura 5.4 mostra a incidência acumulada durante os meses de verão e durante os meses de inverno, respectivamente.

Figura 5.4 – Incidência de radiação solar acumulada. Vista Noroeste do Modelo.



(A) Meses de Verão. 21/12 a 21/3

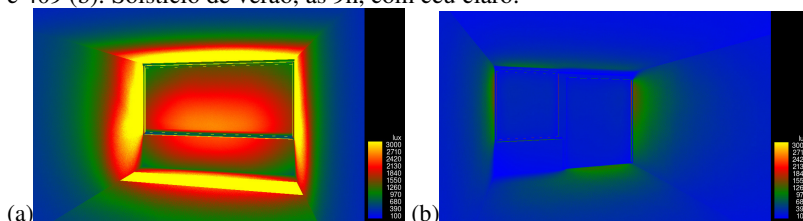
(B) Meses de Inverno. 21/6 a 21/9

Fonte: Elaborado pelo autor.

b) (S1.3) Mapas de Iluminâncias sobre as superfícies do modelo:

Consistem na visualização em uma perspectiva interna dos gráficos de iluminâncias projetados sobre as superfícies do modelo. Permite avaliar a distribuição das iluminâncias em planos de tarefas diversos. Os resultados são visualizados apenas graficamente e ficam armazenados em arquivos de imagem salvos em rede pelo Autodesk 360, vinculado ao perfil do usuário. A representação dos resultados obtidos é exemplificada na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Mapas de iluminâncias sobre as superfícies do modelo. Salas 403 (a) e 409 (b). Solstício de verão, às 9h, com céu claro.

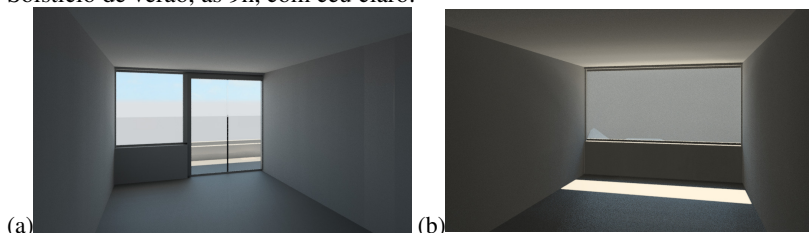


Fonte: Elaborado pelo autor.

- (S1.4) Imagens renderizadas da iluminação da cena:

Consistem na visualização em uma perspectiva interna de uma imagem *renderizada* da iluminação da cena. Permite avaliar qualitativamente os efeitos da iluminação para as soluções arquitetônicas propostas. Esse tipo de visualização é exemplificado na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Imagens renderizadas da iluminação para as salas 403(a) e 409(b). Solstício de verão, às 9h, com céu claro.



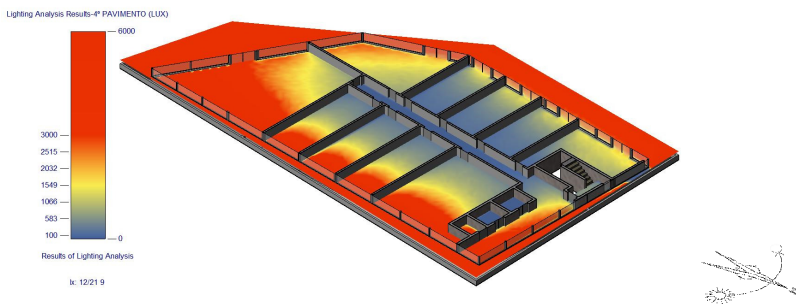
Fonte: Elaborado pelo autor.

- (S1.5) Mapas de Iluminâncias para um plano de análise horizontal:

Podem ser simulados pavimentos inteiros e/ou ambientes selecionados pelo usuário, em datas, horários, condições de céu e altura a partir do plano de análise em relação ao piso definidos pelo usuário. O usuário também pode definir os limites de iluminâncias mínimos e máximos e escolher entre dois níveis de resolução da malha de pontos de análise, ou optar por realizar as simulações de acordo com os critérios estabelecidos para os créditos de iluminação natural do selo LEED.

Os resultados gráficos são visualizados sobre o modelo BIM em uma planta do pavimento ou sobre uma vista isométrica tridimensional, como exemplificado pela Figura 5.7 cortada horizontalmente ao nível do pavimento.

Figura 5.7 – Mapas de Iluminâncias sobre o plano de análise. Visualização em vista tridimensional do modelo BIM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As visualizações em planta serão objeto da análise comparativa de resultados e serão apresentadas e discutidas na seção 5.2.1. Complementarmente às visualizações gráficas, são geradas tabelas mostrando os percentuais de área de cada ambiente compreendidos nos limites de iluminâncias definidos.

5.1.1.3.3 Simulações Dinâmicas

- a) (S1.6) Autonomia Espacial de Luz Diurna (sDA) e (S1.7) Exposição Anual à Luz Solar (ASE)

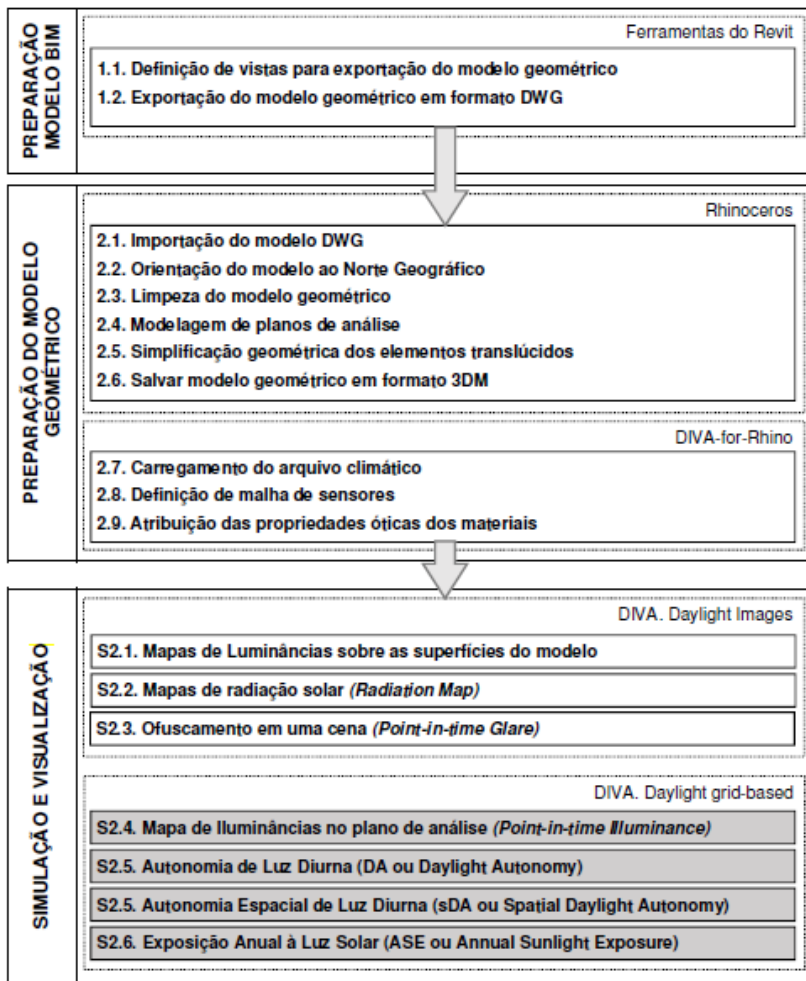
As simulações são realizadas segundo os critérios estabelecidos pelo método padronizado aprovado pela IES LM-83-12 (IES, 2013). Ao usuário cabe apenas definir qual(is) pavimento(s) será(ão) simulado(s).

A visualização gráfica é projetada sobre vista em planta do modelo BIM, e distingue as áreas em conformidade ou não em relação aos critérios estabelecidos para cada uma das métricas. Os valores percentuais que representam a sDA e a ASE são informados em uma caixa de diálogo temporária apresentada no momento em que o usuário solicita o carregamento dos resultados. As visualizações em planta destas duas métricas também são objeto da análise comparativa de resultados e serão apresentadas e discutidas na seção 5.2.1.

5.1.2 Fluxo de Trabalho 2 – Revit para DIVA-for-Rhino

O Quadro 5.2 sintetiza as etapas e passos necessários às simulações com o **FT2**, que são descritos a seguir.

Quadro 5.2 – Fluxo de Trabalho 2. Simulações e análises utilizando o DIVA-for-Rhino



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.2.1 Etapa de preparação do modelo BIM

A etapa de preparação prévia do modelo BIM consiste, basicamente, na definição da vista do modelo BIM que será exportada como modelo geométrico.

No passo 1.1, define-se uma vista 3D Isométrica do modelo BIM,

na qual se controla a visibilidade dos objetos, com ferramentas do Revit, para deixar visíveis somente os elementos construtivos que serão efetivamente considerados nas simulações. Com a ferramenta *section box*, delimita-se o trecho do modelo que será exportado. Embora não exista, em princípio, uma limitação ao tamanho e à complexidade do modelo geométrico que pode ser lido pelo Rhinoceros e simulado pelo DIVA, esse procedimento foi adotado para reduzir o modelo geométrico e favorecer as análises comparativas de resultados.

Para a exportação do modelo do Revit para o Rhinoceros, passo 1.2, recomenda-se que geometria de sólidos deve ser exportada no modo ACIS Solids. Essa definição é feita nas configurações de exportação do Revit, que também definem os *layers* que serão atribuídos a cada categoria de objeto. A definição de *layers* é importante para a posterior atribuição das propriedades ópticas dos materiais.

5.1.2.2 Etapa de preparação do modelo geométrico.

A etapa de preparação do modelo geométrico necessária para a realização das simulações com este fluxo de trabalho é feita em dois estágios, que envolvem o uso de ferramentas do modelador Rhinoceros e ferramentas do *plug-in* DIVA-for-Rhino.

Utilizando as ferramentas do Rhinoceros, o modelado importado (passo 2.1) deve ser rotacionado de modo que o Norte geográfico do projeto corresponda à parte superior da tela (passo 2.2). Blocos resultantes do modelo exportado do Revit devem ser explodidos, linhas e curvas excluídas e devem permanecer no modelo somente os elementos do tipo *surface* ou *polysurface* (passo 2.3). Qualquer superfície plana do modelo geométrico, como os pisos, por exemplo, pode ser usada como plano de análise. Recomenda-se, no entanto, que os planos de análise sejam modelados no Rhinoceros para este fim (passo 2.4). Janelas e outros planos de vidro são representados no Revit por elementos sólidos, enquanto que para as simulações com o Diva os elementos translúcidos devem estar representados por planos simples. A simplificação geométrica desses elementos deve ser feita no Rhinoceros, utilizando o script *CleanupWindowSurfaces_PS.rvb* (passo 2.5). Após estes passos o modelo é salvo com a extensão 3DM e está apto a ser trabalhado com o DIVA.

Os passos de preparação do modelo realizados com o DIVA correspondem a três das quatro ferramentas do software. Com a ferramenta *Location*, carrega-se o arquivo climático, do qual os dados de latitude e longitude da estação de medição são tomados como a

localização do projeto (passo 2.7). Com a ferramenta *Nodes*, definem-se o espaçamento e a altura da malha de pontos a partir dos planos selecionados como planos de análises (passo 2.8). Com a ferramenta *Materials*, são atribuídas as propriedades ópticas dos materiais, no formato de arquivos padronizado para uso como dados de entrada para o *Radiance*, de acordo com os *layers* do arquivo do modelo geométrico e conforme valores de refletâncias e transmitâncias indicados na seção 4.2 (passo 2.9).

5.1.2.3 Etapa de simulação

Concluída a etapa de preparação do modelo geométrico, a etapa de simulação do DIVA ocorre de forma bastante direta. Com a ferramenta *Metrics*, o usuário pode selecionar o tipo de simulação que deseja fazer através da caixa de diálogo exemplificada pela Figura 5.8, que mostra o que o usuário pode controlar para obter Mapas de Iluminâncias sobre um plano de análise. O usuário pode realizar quantas simulações se fizerem necessárias aos objetivos do projeto e os tempos de processamento variam conforme a métrica selecionada e parâmetros definidos.

Conforme o tipo de simulação que se deseja realizar, seja pelo grupo *Daylight Images*, seja pelo grupo *Daylight Grid-Based*, são apresentados ao usuário um conjunto de parâmetros pertinente à simulação selecionada. Podem ser controlados parâmetros como a resolução da imagem de saída, o período de análise, a data, hora e condição de céu, o tipo de câmera (perspectiva ou olho de peixe), além de parâmetros avançados do *Radiance*.

Os parâmetros avançados do *Radiance* determinam a precisão e tempo de processamento das simulações. Destacam-se adiante aqueles considerados mais relevantes, para os quais são indicados os valores definidos para as simulações realizadas com o objeto de estudo. As definições desses parâmetros foram dadas por Reinhart (2010):

- *ab (ambiente bounces)*: determina o número de ciclos de inter-reflexões internas do raio traçado antes que ele seja descartado. Definido com o valor 6.
- *ad (ambient division)*: determina o número de raios emitidos por um ponto de uma superfície qualquer do ambiente calculado. Definido com o valor 1000.
- *as (ambient sampling)*: determina o número de raios extras calculados para áreas com alto gradiente de brilho. Definido com o valor 20.
- *aa (ambient accuracy)* e *ar (ambient resolution)*: a combinação

desses dois parâmetros com a máxima dimensão do modelo fornece a medida do refinamento com que a distribuição de luminâncias da cena é calculada. A relação (máxima dimensão do modelo \times aa / ar) determina a dimensão dos menores detalhes que serão computados. Foram definidos os valores aa=0.1 e ar=85 em função das dimensões do modelo geométrico utilizado.

Figura 5.8 – Caixa de diálogo da ferramenta Metrics. Acesso às simulações do DIVA.

The image shows the DIVA Metrics dialog box. At the top, there is a header with the DIVA logo and a navigation bar with tabs: "Daylight Images", "Daylight Grid-Based" (highlighted in red), "Thermal Single-Zone", "Daylight Factor", "Point-in-Time Illuminance" (highlighted in red), "Climate-Based", and "Radiation Map". Below the navigation bar, there are several input fields with dropdown menus and question marks:

- Metric:** Illuminance
- Sky Condition:** Overcast Sky (CIE Overcast S)
- Date and Time:** 06 21 15
- Units:** Lux

Below these fields is a section titled "Advanced Parameters" with a horizontal line separator. It contains the following settings:

- Radiance Parameters:** -ab 6 -ad 1000 -as 20 -ar 85 -aa
- Hide Dynamic Shading:**
- Geometric Density:** 100
- Cleanup Temporary Directory:**

At the bottom of the dialog box, there are two buttons: "Run Simulation" and "Restore Defaults".

Fonte: DIVA-for-Rhino. 2017.

Os arquivos digitais com os resultados das simulações são armazenados em uma pasta criada automaticamente pelo DIVA. No caso das simulações dinâmicas, quando se realiza a primeira simulação, são calculados os DLC, o que exige um tempo significativo de processamento. A obtenção de outras métricas dinâmicas pode utilizar o mesmo arquivo gerado para os cálculos do DLC, reduzindo assim o tempo de processamento para métricas adicionais.

5.1.2.4 Visualização de resultados para análise

Neste tópico, são apresentados exemplos das simulações que

podem ser obtidas pelo **FT2** e que foram consideradas mais relevantes para suporte às decisões do processo de projeto, em complemento àquelas que serão objeto da análise comparativa de resultados. Em relação às etapas de projeto, as únicas simulações realizadas com o modelo do Objeto de estudo correspondente à **Concepção do Partido Arquitetônico** foram os Mapas de Radiação Solar (S2.2). Todas as demais simulações foram realizadas com o modelo considerado para as etapas correspondentes ao **Desenvolvimento Inicial do Projeto**.

Os resultados armazenados podem ser carregados a qualquer tempo e são visualizados de diferentes maneiras, conforme o tipo de simulação. As simulações baseadas em malha de pontos (do grupo *Daylight Grid-based*) são visualizadas graficamente projetadas sobre o modelo geométrico, no ambiente de trabalho do Rhinoceros, de onde podem ser salvas em arquivos de imagem. Os resultados numéricos das simulações dinâmicas são apresentados em Relatório de Simulação do Daysim, em formato HTML. Já as simulações do grupo *Daylight Images*, que geram imagens de uma determinada perspectiva do modelo, são visualizadas pelo programa *WXFalseColor*, que é vinculado ao DIVA e gera gráficos de cores e imagens semirrealistas da iluminação da cena.

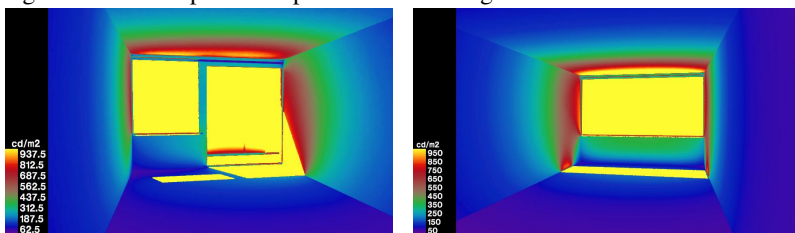
5.1.2.4.1 Simulações Estáticas

A seguir são dados exemplos de resultados obtidos com o DIVA para o Objeto de estudo.

a) (S2.1) Mapas de Luminâncias sobre as superfícies do modelo

Os mapas de luminâncias foram selecionados para análise com o **FT2** por sua importância para avaliar os contrastes encontrados em uma cena. Este tipo de análise permite avaliar a harmonia geral das luminâncias do ambiente e sua suscetibilidade à ocorrência de ofuscamentos para determinado ponto de vista. A visualização dos resultados se dá em gráficos de falsas cores, conforme exemplificado pela Figura 5.9, obtida para as salas 403 e 409 a partir de um ponto logo que se adentra no ambiente.

Figura 5.9 – Exemplo de Mapa de Luminância gerado com o DIVA.



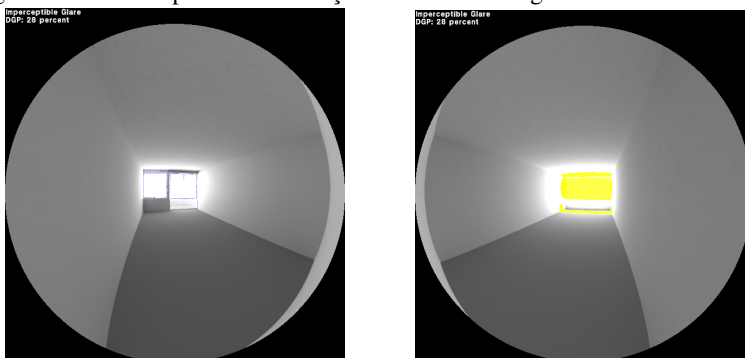
(A) Sala 403. Solstício de Verão. Céu Claro. 15h (B) Sala 409. Solstício de Verão. Céu Claro. 9h

Fonte: Elaborado pelo autor em simulação realizada com o DIVA-for-Rhino.

- (S2.3) Ofuscamento em uma cena – DGP (*Point-in-time Glare*):

Essa métrica simula o conforto visual de uma pessoa. O cálculo do Ofuscamento pela Luz Diurna, ou DGP (*Daylight Glare Probability*), é feito com base nos contrastes de luminâncias e no brilho geral do campo visual de um dado ponto de vista. O índice é calculado para um ponto do ambiente, em data, horário e condição de céu definidos pelo usuário. O resultado é visualizado em perspectiva interna obtida com lente do tipo olho de peixe, como exemplificado pela Figura 5.10, gerada para os mesmos pontos para os quais foram gerados os mapas de luminâncias mostrados na Figura 5.9.

Figura 5.10 – Exemplo de visualização do índice DGP gerado com o DIVA.



(A) Sala 403. Solstício de Verão. Céu Claro. 15h
DGP = 28%. Ofuscamento imperceptível

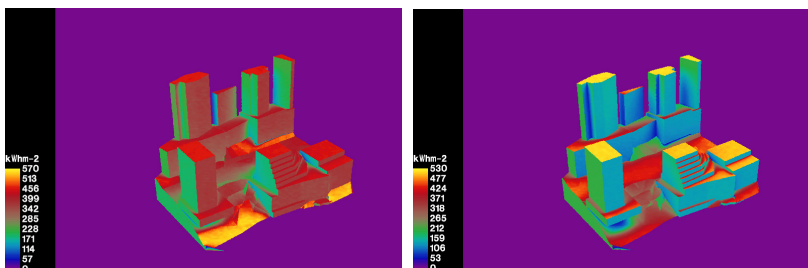
(B) Sala 409. Solstício de Verão. Céu Claro. 9h
DGP = 28%. Ofuscamento imperceptível

Fonte: Elaborado pelo autor em simulação realizada com o DIVA-for-Rhino.

- (S2.2) Mapas de radiação solar (Radiation Map):

Esta simulação é análoga à S1.2, obtida com o **FT1**, e permite avaliar os mesmos fenômenos. Com o **FT2**, no entanto, pode-se obter o mapa de radiação solar projetado sobre as superfícies do modelo, em estudos volumétricos, como exemplificado pela Figura 5.11, ou para uma malha de pontos em um plano de análise.

Figura 5.11 – Exemplo de Mapa de Radiação Solar gerado com o DIVA.



(A) Cumulativo para os meses de verão (B) Cumulativo para os meses de inverno

Fonte: Elaborado pelo autor em simulação realizada com o DIVA-for-Rhino. 2017.

- (S2.4) Mapa de Iluminâncias no plano de análise (*Point-in-time Illuminance*):

Mapas de iluminâncias são simulados no DIVA com base na malha de pontos definida pelo plano de análise selecionado pelo usuário. Os resultados gráficos são visualizados no ambiente de trabalho do Rhinoceros e projetados sobre o grid de análise criado pelo DIVA. As simulações realizadas para o estudo comparativo proposto na pesquisa são apresentadas na seção 5.2.1, juntamente com os resultados obtidos pelos demais fluxos de trabalho.

5.1.2.4.2 Simulações Dinâmicas

- a) (S2.5) Autonomia de Luz Diurna (DA ou *Daylight Autonomy*); (S2.6) Autonomia Espacial de Luz Diurna (sDA ou *Spatial Daylight Autonomy*); (S2.7) Exposição Anual à Luz Solar (ASE ou *Annual Sunlight Exposure*)

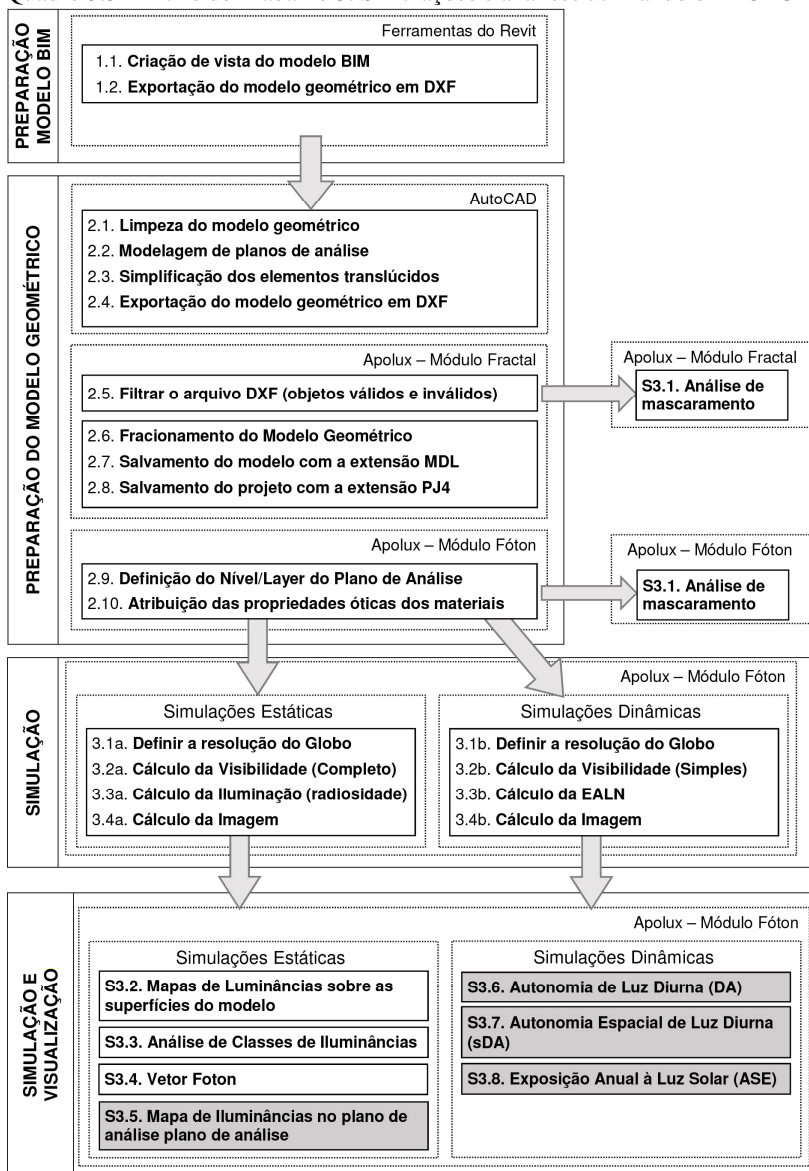
Essas três métricas estão entre as opções de simulação obtidas com base em malha de ponto e nos dados do clima (*Climate Based*). São

agrupadas aqui, pois são inter-relacionadas e calculadas simultaneamente pelo DIVA. As simulações são realizadas segundo os critérios estabelecidos pelo método padronizado aprovado pela IES LM-83-12 (IES, 2013). Tal como para os mapas de iluminâncias, os resultados gráficos são visualizados no ambiente de trabalho do Rhinoceros, projetados sobre o grid de análise criado pelo DIVA. A visualização gráfica para a DA indica também o resultado numérico de sDA e ASE. O gráfico para ASE pode ser carregado separadamente. Os resultados obtidos com este fluxo de trabalho são objeto da análise comparativa de resultados e serão apresentados e discutidos na seção 5.2.2.

5.1.3 Fluxo de Trabalho 3 – Revit para Apolux

O Quadro 5.3, sintetiza as etapas e passos característicos para o FT2, que são descritos a seguir.

Quadro 5.3 – Fluxo de Trabalho 3. Simulações e análises utilizando o APOLUX.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.3.1 Etapa de preparação do modelo BIM

A preparação do modelo BIM para as simulações pelo **FT3** é praticamente a mesma realizada para o **FT2**. A mesma vista do modelo BIM (passo 1.1) exportada para o **FT2** é exportada também para o **FT3**. A única diferença é que a geometria de sólidos deve ser exportada no modo *Polymesh*, em vez de *ACIS Solids*, para a correta leitura do modelo Módulo Fractal do APOLUX.

5.1.3.2 Etapa de preparação do modelo geométrico

A preparação do modelo para simulação com o **FT3** é feita em três estágios, que envolvem respectivamente o AutoCAD, o módulo Fractal e o módulo Foton do APOLUX.

Em função do método de cálculo da Radiosidade, adotado pelo APOLUX, o tamanho e a complexidade do modelo geométrico têm uma influência significativa no tempo de processamento dos cálculos, pois depende do número total de vértices em que o modelo é subdividido. Tomando-se o exemplo do objeto de estudo, mesmo com a delimitação do modelo antes de ser exportado do Revit, ilustrada na Figura 4.8, e em função das características da modelagem BIM orientada aos objetos, muitos dos elementos importados para o modelo geométrico são irrelevantes para os efeitos da iluminação do ambiente em análise, mas representam vértices adicionais a serem calculados.

A limpeza do modelo geométrico (passo 2.1), realizada com o AutoCAD, é recomendada para que ele contenha o mínimo de objetos irrelevantes para os cálculos, como, por exemplo, as faces externas de paredes e lajes. Objetos agrupados em blocos também devem ser desassociados e linhas e as curvas devem ser apagadas. Para a leitura do modelo pelo módulo Fractal todos os objetos remanescentes devem ser entidades do tipo *mesh*, *polymesh* ou *3dface*. Num segundo momento, os planos de análise devem ser modelados no AutoCAD e identificados em um *layer* específico (passo 2.2). Os elementos translúcidos de portas e janelas devem ter sua geometria simplificada, convertendo-se os sólidos provenientes do modelo BIM em planos simples (passo 2.3). Por fim, o arquivo é novamente exportado com a extensão DXF para que a preparação do modelo prossiga no módulo Fractal.

No Módulo Fractal, a primeira ação é a filtragem do arquivo DXF para eliminar eventuais objetos inválidos (passo 2.5). A partir deste ponto do processo já é possível analisar máscaras de obstrução do modelo com as ferramentas do módulo Fractal, conforme será abordado na seção

5.1.3.4. O fracionamento do modelo (passo 2.6) é um procedimento inerente ao método da Radiosidade, em que se determinam o fator de divisão dos planos e o número de vértices em que o modelo será subdividido para o cálculo dos fatores de forma. Fatores de divisão diferenciados podem ser definidos para o fracionamento editando-se os níveis (*layers*). Esse recurso é importante para que se defina uma hierarquia dos elementos do modelo, permitindo que alguns planos sejam mais refinados e que outros não sejam nem mesmo fracionados, sendo considerados como planos de luminância uniforme. Em seguida o modelo é salvo com a extensão MDL, pra registrar as ações realizadas no módulo Fractal (passo 2.7) e o projeto é salvo com a extensão PJ4, para a abertura no Módulo Foton (passo 2.8).

Os últimos passos de preparação do modelo geométrico são dados no Módulo Foton. Os níveis no APOLUX são equivalentes aos *layers* do AutoCAD, e os planos de análise modelados anteriormente são identificados como tais atribuindo-se esta função ao nível correspondente (passo 2.9). A definição do nível dos planos de análise é importante para que o programa os desconsidere como refletores de luz, utilizando-os apenas para o cálculo dos níveis de iluminância. A atribuição das propriedades óticas dos materiais (passo 2.10) define os valores de refletâncias e transmitâncias dos objetos e os caracterizam como planos opacos difusos, transmissores difusos ou especulares, ou planos de luminância uniforme absoluta ou relativa ao céu.

5.1.3.3 Etapa de simulação

A etapa de simulação com o APOLUX se desenvolve basicamente em quatro passos. Com base no Modelo Vetorial Esférico, o programa possibilita ao usuário selecionar a resolução do globo, que é determinada pelo número de parcelas em que a abóbada celeste é dividida para o efeito da distribuição das luminâncias e do cálculo do fator de forma. O primeiro passo, portanto, é a definição da resolução do globo que será utilizado nos cálculos (passo 3.1). Em seguida, calcula-se a visibilidade para determinar os fatores de forma do modelo (passo 3.2). O cálculo da visibilidade pode ser feito no modo simples, que considera o fluxo luminoso médio total a partir das refletâncias e transmitâncias médias dos materiais, ou no modo completo, que considera o fluxo luminoso dividido conforme seu perfil RGB da refletância e transmitância dos materiais. O modo simples pode ser usado tanto para simulações estáticas quanto dinâmicas, enquanto o módulo completo permite apenas simulações estáticas. Diante dessas duas possibilidades, o processo de simulação

pode se ramificar, seguindo um percurso para as simulações estáticas e outro para as simulações dinâmicas.

Para as simulações estáticas realizadas para o objeto de estudo foi utilizado o modo completo do cálculo da visibilidade (passo 3.2a). Nesse caso, prossegue-se com os cálculos da iluminação (radiosidade) (passo 3.3a). Com o mesmo cálculo da visibilidade podem ser realizados diversos cálculos da iluminação, para simular inúmeras situações de projeto, quando se pode variar a localização, a orientação do Norte, datas, horários, e condições de céu. Para o objeto de estudo foram realizados cálculos de iluminação para as 12 situações indicadas no Quadro 4.1. O último passo (3.4a) para simulações estáticas é o cálculo da imagem, que gera as visualizações gráficas dos diferentes dados de saída obtidos com simulações listados no Quadro 5.3 e exemplificados adiante – S3.2, S3.3, S3.4 e S3.5.

Para as simulações dinâmicas, o modo simples do cálculo da visibilidade deve necessariamente ser utilizado (passo 3.2b). Procedese com o cálculo da Estimativa Anual de Luz Natural (EALN) (passo 3.3b). De acordo com Claro (2015), o dimensionamento do cálculo da EALN envolve três variáveis: a resolução das direções em que a abóbada é subdividida, o número de vértices em que o modelo geométrico é fracionado e o número de horas calculadas no curso de um ano. A partir da combinação destas variáveis, o programa pode realizar os cálculos segundo 3 métodos, também descritos por Claro (2015): o método do DLC¹, o método do CR² ou o método da Radiosidade Plena. O programa sugere o método mais indicado de acordo com a combinação de variáveis. Antes de iniciar o cálculo da EALN, devem ser definidos o número de ciclos de radiosidade, a refletância média do solo, os limites de iluminância aplicáveis às métricas DA e UDI, o arquivo climático, o número de horas úteis que serão calculadas e um nome e local para salvamento do arquivo de saída. Analogamente às estáticas, o último passo (3.4b) para simulações dinâmicas é o cálculo da imagem, que gerará os gráficos para análise das métricas dinâmicas.

Os resultados dos cálculos realizados pelo APOLUX são armazenados em arquivos específicos que possibilitam o carregamento posterior para a visualização de resultados.

5.1.3.4 Visualização de resultados para análise

¹ *Daylight Coefficient* ou Coeficiente de Luz Diurna.

² Coeficiente de Radiosidade.

Neste tópico, são apresentados exemplos das simulações que podem ser obtidas pelo **FT3** e ferramentas de análise a ele associadas, que foram consideradas mais relevantes para suporte às decisões do processo de projeto, em complemento àquelas que serão objeto da análise comparativa de resultados.

Em relação às etapas de projeto, o modelo correspondente à **Concepção do Partido Arquitetônico** pôde ser aplicado somente para a visualização de máscaras para avaliação de obstruções do entorno construído. Todas as demais simulações foram realizadas com o modelo considerado para as etapas correspondentes ao **Desenvolvimento Inicial do Projeto**. A visualização de máscaras com esse modelo também foi considerada relevante para analisar as obstruções do entorno e a visibilidade da abóbada para pontos internos dos ambientes.

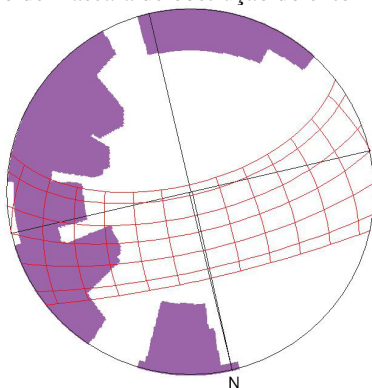
5.1.3.4.1 Ferramentas de Análise

a) (S3.1) Visualização de máscaras:

A visualização de máscaras é uma importante ferramenta de auxílio ao projetista, pois permite analisar, em uma única imagem, a trajetória solar aparente de um ano inteiro para um ponto qualquer do projeto e a influência de obstruções internas e externas a essa trajetória. Pode ser obtida tanto através do módulo Fractal quanto Foton, embora com níveis de detalhes e informações diferentes.

O módulo Fractal também dispõe de ferramentas para a modelagem de protetores solares, que podem tomar por base as análises das máscaras geradas para o modelo gerado no Revit e auxiliar na proposição de soluções para tais elementos, permitindo uma reformulação interativa nas proposições de protetores. A máscara de obstrução da Figura 5.12 foi gerada no módulo Fractal e exemplifica uma simulação do entorno para um ponto do terreno, previamente ao lançamento do partido arquitetônico. Esse tipo de análise pode ser útil, antes mesmo que se inicie o projeto, para orientar estratégias de implantação do edifício em função da parcela visível e obstruída da abóbada celeste e da trajetória solar.

Figura 5.12 – Exemplo de máscara de obstrução do entorno do terreno.

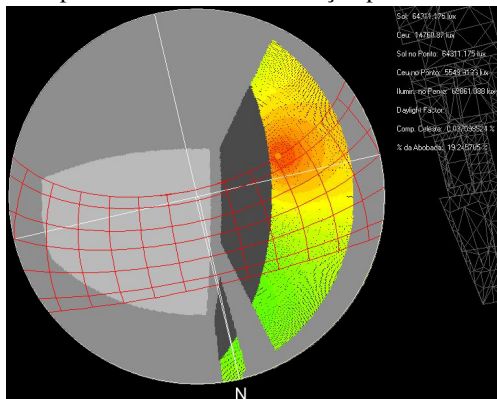


Fonte: Elaborado pelo autor em simulação realizada com o APOLUX.

No módulo Foton, além da trajetória solar e das projeções do modelo geométrico, também se pode visualizar os padrões de distribuição de luminâncias da abóbada para cada um dos 16 tipos de céu suportados pelo programa e conforme o horário analisado. A resolução para visualização da distribuição de luminâncias é dada pela resolução de globo selecionada. Este recurso é importante para que o projetista oriente suas decisões de projeto em função da luminosidade da abóbada e de suas obstruções.

As Figuras 5.13 e 5.14 foram geradas pelo módulo Foton e exemplificam a visualização da máscara para pontos internos das salas analisadas do Objeto de estudo. A Figura 5.13 mostra a máscara de um ponto próximo à janela da sala 403, que tem aberturas voltadas para Oeste. Através da análise da Figura 5.12, anterior, já se poderia afirmar que não haveria obstrução da abóbada pelo entorno em aberturas voltadas para esta orientação.

Figura 5.13 – Exemplo de Máscaras de obstrução para o ambiente.

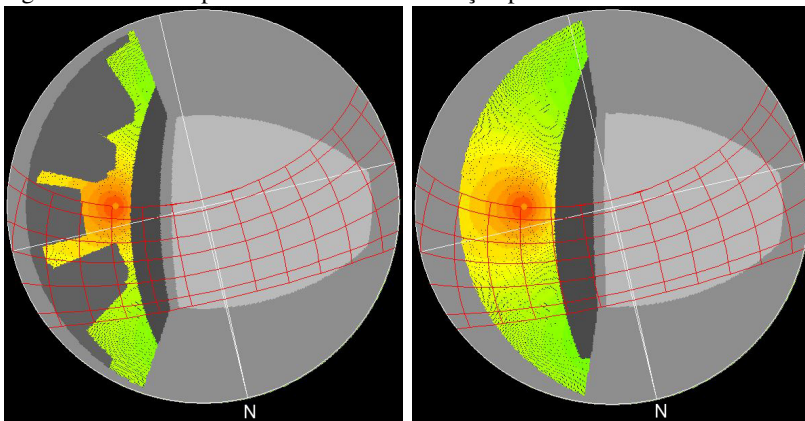


Máscara para um ponto da sala 403.

Fonte: Elaborado pelo autor em simulação realizada com o APOLUX.

A Figura 5.14 mostra a máscara de um ponto próximo à janela da sala 409, que por sua vez tem aberturas voltadas para Leste. Como já se podia antever, para essa orientação o entorno edificado pode ter grande influência na iluminação natural. O impacto do entorno para a visibilidade da abóbada - e, conseqüentemente para o desempenho da iluminação natural do ambiente - pode ser observado pela comparação visual da Figura 5.14A e 5.14B.

Figura 5.14 – Exemplo de Máscaras de obstrução para o ambiente.



(A) Sala 409. Máscara com entorno construído.

(B) Sala 409. Máscara sem o entorno construído.

Fonte: Elaborado pelo autor em simulação realizada com o APOLUX.

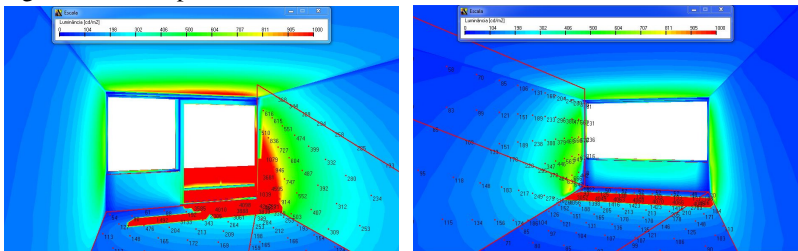
5.1.3.4.2 Simulações Estáticas

Para visualização dos resultados de simulações estáticas devem ser carregados os arquivos do cálculo de visibilidade e fatores de forma, e também arquivos dos cálculos da iluminação (radiosidade). Para cada cálculo de iluminação carregado, realiza-se o cálculo da imagem para gerar um conjunto de resultados exemplificados a seguir.

a) (S3.2) Mapas de Luminâncias sobre as superfícies do modelo

A Figura 5.15 exemplifica os mapas de luminâncias obtidos com o APOLUX, gerados para as salas 403 e 409 do Objeto de estudo. Os gráficos são semelhantes àqueles de S2.1, obtido com o **FT2**, mas permitem uma avaliação mais detalhada através da grade de valores projetada sobre os planos do modelo. Diferentemente das simulações análogas obtidas com o DIVA, o APOLUX calcula luminâncias apenas de planos translúcidos difusos, de modo que os planos translúcidos especulares das aberturas não são representados.

Figura 5.15 – Mapas de luminâncias obtidos com o APOLUX.



(A) Sala 403.

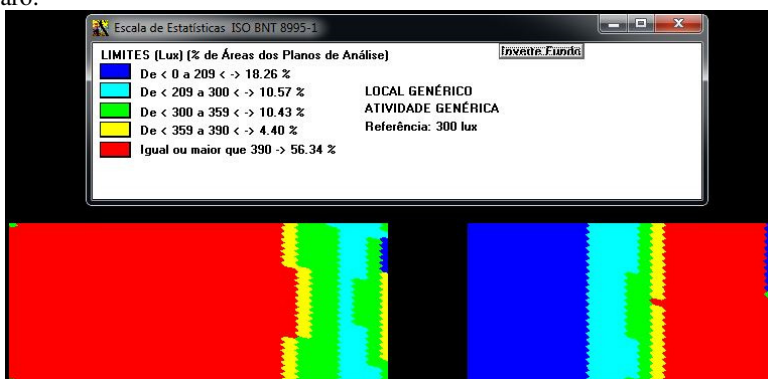
(B) Sala 409.

Fonte: Elaborado pelo autor em simulação realizada com o APOLUX.

- (S3.3) Análise de classes de iluminâncias

Essa é também uma forma de visualização dos resultados de iluminâncias sobre um plano de análise, similar à utilizada no trabalho de Kremer (2002), e pode ser usada para a análise de conformidade dos níveis de iluminação natural em relação à meta de iluminância média mantida, definida pela norma brasileira NBR ISO CIE 8995 para cada tipo de uso do espaço. Com base em percentuais da meta de iluminância, a ferramenta estabelece faixas de transição inferior, superior e um limite excessivo para os valores de iluminância encontrados. A Figura 5.16 ilustra a representação gráfica das classes de iluminâncias.

Figura 5.16 – Análise de classes de iluminâncias. Solstício de verão. 9h. Céu claro.

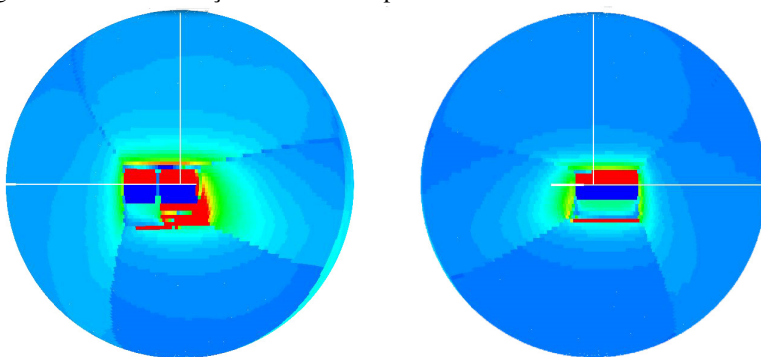


Fonte: Elaborado pelo autor em simulação realizada com o APOLUX.

- (S3.4) Vetor Foton:

Consiste na visualização dos gráficos de luminâncias a partir de um ponto do ambiente através de lente tipo olho de peixe e destina-se a analisar os contrastes presentes no campo visual e avaliar riscos de ofuscamento. A avaliação neste caso requer do analista uma compreensão avançada e subjetiva do fenômeno, uma vez não fornece um resultado numérico como o índice DGP, sendo útil, entretanto, para análises comparativas qualitativas. A Figura 5.17 exemplifica esse tipo de visualização.

Figura 5.17 – Visualização do ambiente pelo vetor foton.



(A) Sala 403.

(B) Sala 409.

Fonte: Elaborado pelo autor em simulação realizada com o APOLUX.

- (S3.5) Mapa de Iluminâncias no plano de análise:

Da mesma forma que são gerados gráficos de luminâncias, podem ser gerados gráficos de iluminâncias, tanto para as superfícies do modelo, analogamente à figura 5.15, como para o plano de análise. Os mapas de iluminâncias sobre os planos de análise serão objeto da análise comparativa de resultados e serão apresentados e comentados na seção 5.3.1.

5.1.3.4.3 Simulações Dinâmicas

O procedimento para a visualização dos resultados de simulações dinâmicas é análogo ao das estáticas. A diferença é que em vez de serem carregados os cálculos da iluminação (radiosidade), são carregados os arquivos do cálculo da EALN. O cálculo da imagem de EALN gera os resultados gráficos que são projetados sobre o plano de análise do modelo.

- a) (S3.6) Autonomia de Luz Diurna (DA):
- b) (S3.7) Autonomia Espacial de Luz Diurna (sDA)
- c) (S3.8) Exposição Anual à Luz Solar (ASE)

Conforme foi dito na descrição do **FT2**, essas três métricas são agrupadas devido a sua inter-relação. O APOLUX, no entanto, gera gráficos somente para a DA, com visualização análoga aos mapas de iluminâncias. Os resultados em termos percentuais da sDA e ASE são calculados e fornecidos em forma de arquivo de texto, que pode ser convertido em planilhas. Os gráficos para ASE são gerados com base nesses dados com o auxílio do programa *WinSurfer*.

Os resultados obtidos com este fluxo de trabalho são objeto da análise comparativa de resultados e serão apresentadas e discutidos na seção 5.3.2.

5.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS FLUXOS DE TRABALHO

A análise comparativa dos fluxos de trabalho corresponde aos resultados para o segundo objetivo específico da pesquisa. O que se espera com tal análise comparativa é subsidiar um escritório de arquitetura interessado em avaliar o desempenho de seus projetos, conforme as premissas da pesquisa, provendo informações úteis para a escolha do processo mais adequado à sua realidade. Nesse sentido, as características dos programas de simulação são aspectos determinantes na constituição dos fluxos de trabalho investigados e, portanto relevantes para essa escolha. As seções subsequentes discutem cada uma dessas características, que foram sintetizadas no Quadro 5.4, relacionando-os aos seus reflexos sobre as etapas dos fluxos de trabalho.

Quadro 5.4 – Quadro comparativo dos fluxos de trabalho. Características dos programas.

| | FLUXO DE TRABALHO 1 Autodesk Insight 360, Autodesk 360, Autodesk Revit | FLUXO DE TRABALHO 2 DIVA-for-Rhino | FLUXO DE TRABALHO 3 APOLUX |
|--|--|--|---|
| Interfaces com o usuário | Todo o fluxo de trabalho acontece no ambiente de trabalho do Revit. | Modelo Geométrico criado no Revit. Manipulação do modelo no ambiente de trabalho do Rhinoceros. Simulações realizadas com o plug-in DIVA. | Modelo Geométrico criado no Revit. Manipulação do modelo no ambiente de trabalho do AutoCAD. Preparação do modelo e simulações nos módulos Fractal e Foton do APOLUX. |
| Interoperabilidade dos dados de projeto. | Modelo Geométrico, propriedades ópticas, localização. | Modelo Geométrico (parcialmente). | Modelo Geométrico (parcialmente). |
| Motores de cálculo | Autodesk 360 Rendering Multi-Dimensional Lightcut | Radiance Daysim | Módulo Fóton. Modelo Vetorial Esférico |
| Método de cálculos | Raio traçado bidirecional | Raio traçado recursivo | Radiosidade |
| Modelos de céu suportados. | <ul style="list-style-type: none"> °Céu Claro CIE °Céu Encoberto CIE °Céu Parcialmente Encob. CIE °Céu Uniforme CIE °Céu para Fator de Luz Diurna °Modelo de Perez para todos os climas. | <ul style="list-style-type: none"> °Céu Claro CIE °Céu Encoberto CIE °Céu Parcialmente Encob. CIE °Céu Uniforme CIE °Céu intermediário sem Sol °Céu claro sem Sol °Céu colorido Utah °Modelo de Perez para todos os climas. | <ul style="list-style-type: none"> °15 padrões da Norma ISO 15469- 2004 (E)CIE S 011-E. °Céu Encoberto CIE °Permite controlar parâmetros de turvamento para simulações estáticas |
| Controle de Parâmetros de simulação. | <ul style="list-style-type: none"> °Ajustes mínimos de resolução da malha de pontos. °Dados de radiação solar (GHI, DHI e DNI) | <ul style="list-style-type: none"> °Resolução da malha de pontos °Parâmetros avançados do Radiance: <ul style="list-style-type: none"> °ab (ambiente bounces) °ad (ambient division) °as (ambient sampling) °aa (ambient accuracy) °ar (ambient resolution) °entre outros | <ul style="list-style-type: none"> °Parâmetros de resolução de Globo. °Parâmetros das condições de céu. °Parâmetros de resolução do modelo (Fracionamento). °Parâmetros da abóbada. °Seleção do método de cálculo do fluxo luminoso. °Ciclos de Radiosidade °Propriedades ópticas dos materiais. |

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.1 Quanto às características dos programas

5.2.1.1 Interface com o usuário

Segundo a premissa de que o Revit é a plataforma BIM utilizada no processo de projeto, a adoção do **FT1** significa que a interface para a realização das simulações será muito similar à interface da própria ferramenta de projeto a que o projetista está habituado. As ferramentas de simulação são acessadas diretamente do ambiente de trabalho do Revit, com caixas de diálogo simplificadas de modo a favorecer o uso pela própria equipe de projetos, conforme preconizado pela primeira hipótese da pesquisa. Com isso, a interface contribui em grande medida para que o processo de simulação seja, de modo geral, o mais simples dentre os três investigados. Em contrapartida, mesmo que os métodos de cálculo sejam validados segundo protocolos de testes e a acurácia dos resultados seja anunciada pelo fabricante (AUTODESK, 2016a), o usuário tem controle sobre um número muito reduzido de parâmetros de simulação, limitando a precisão dos resultados aos parâmetros pré-estabelecidos.

A adoção do **FT2** implica na necessidade de domínio básico do ambiente de trabalho e ferramentas de um segundo programa de modelagem. Além do Revit, são necessárias ações de modelagem no Rhinoceros, descritas na seção 5.1.2.2. Quanto ao *plug-in* do DIVA, sua interface é bastante simples e direta, com as ferramentas sendo dispostas na sequência lógica das etapas de preparação do modelo geométrico e simulação. Para cada simulação desejada, uma caixa de diálogo é aberta, e nela se encontram todos os parâmetros que podem ser controlados pelo usuário.

De forma análoga, o **FT3** também implica na necessidade de domínio de ferramentas e ambientes de trabalho distintos daquele em que o projeto é desenvolvido. Neste caso, deve-se conhecer a interface dos dois módulos do programa APOLUX e de um dos programas de modelagem, cujo formato de arquivo de dados geométricos é suportado (Rhinoceros, *SketchUp* ou AutoCAD). Nos procedimentos no experimento indireto, o AutoCAD foi adotado para a **Etapas de Preparação do Modelo Geométrico**.

5.2.1.2 Interoperabilidade dos dados de projeto

A interoperabilidade, entendida como a capacidade de transferir dados do modelo BIM para programas com diferentes aplicações, é uma

importante característica da tecnologia BIM que, como visto no Referencial Teórico, ainda não se encontra plenamente desenvolvida, mas é de grande relevância para o desenvolvimento das práticas de simulação integradas ao processo de projeto. Enquanto as plataformas BIM disponíveis no mercado e os principais programas de simulação ainda não são capazes de intercambiar dados do modelo BIM de forma consistente e automatizada, os procedimentos para essa transferência têm um impacto significativo nos fluxos de trabalho. No contexto dos fluxos de trabalho analisados, a interoperabilidade refere-se à transferência dos dados de projeto referentes à geometria do modelo, às propriedades óticas das superfícies e à localização do projeto. Para que sejam transferidos do modelo BIM para os programas de simulação são necessárias ações que se estendem pelas duas primeiras etapas dos fluxos de trabalho. Inicia-se na **Etapa de Preparação do Modelo BIM**, cuja principal função é a delimitação de quais elementos desse modelo são relevantes para as análises, e se completa na **Etapa de Preparação do Modelo Geométrico**, quando se definem os materiais e a localização.

A necessidade de procedimentos manuais para a transferência desses dados é a principal característica que distingue o **FT2** e **FT3** do **FT1**. Enquanto no **FT1** os programas de simulação são integrados à plataforma BIM e todas as informações são transferidas diretamente aos algoritmos de cálculo de iluminação, os programas utilizados no **FT2** e **FT3** não são capazes de reconhecer esses mesmos dados no formato em que são gerados no Revit. Como consequência dessa interoperabilidade reduzida, a **Etapa de Preparação do Modelo Geométrico** se faz necessária nesses dois fluxos de trabalho e significa retrabalho para a equipe de projeto, que precisa reinserir informações já constantes no modelo BIM. Esses procedimentos dão margem a erros humanos que podem ser significativos conforme a complexidade do projeto. Tal esforço extra pode representar uma importante barreira para a integração da prática das simulações ao processo de projeto, já que a complexidade de procedimentos que não fazem parte da rotina de um escritório pode ser encarada com resistência pelos profissionais. Também podem desencorajar modificações rápidas ou radicais nas soluções de projeto (DONN, SELKOWITZ e BORDASS, 2009).

Quanto à interoperabilidade, o **FT1** é o que mais se aproxima da base conceitual do BIM proposta por Chuck Eastman e apresentada na seção 2.1.1, em que “a partir da mesma descrição de elementos”, representada na pesquisa pelo modelo BIM do Objeto de estudo, “qualquer tipo de análise quantitativa pode ser diretamente vinculado à sua descrição (...) fornecendo uma única base de dados integrada para

análises visuais e quantitativas” (EASTMAN, 1975, *apud* LAISERIN, 2008, p. XI, *tradução do autor*).

5.2.1.3 Modelos de Céu

Como foi visto na seção 2.2.4, além dos dados de projeto, as condições de céu são dados de entrada fundamentais para simulações da iluminação natural. Os modelos de céu, na forma como são utilizados pelos programas de simulação, têm como principal função determinar a distribuição de luminâncias da abóbada para diferentes condições climáticas, de tal maneira que os programas sejam capazes de calcular a contribuição das parcelas visíveis do céu para a iluminação de um determinado ponto do projeto.

A seção 2.2.4.2 abordou brevemente a evolução histórica dos modelos matemáticos para a caracterização da distribuição das luminâncias na abóbada celeste. Na seção 3.2.2 foram citados os tipos de céu disponibilizados por cada um dos programas de simulação que definiram os fluxos de trabalho. Os modelos matemáticos adotados e os tipos de céu disponibilizados pelos programas têm implicações para os fluxos de trabalho analisados tanto na operação das ferramentas quanto nos resultados finais. Comparando-se o que cada programa disponibiliza, destacam-se aqui as principais diferenças.

Os programas Insight 360 e DIVA, que definem o **FT1** e o **FT2**, respectivamente, se assemelham quanto aos modelos de céu adotados. Ambos os programas disponibilizam os modelos clássicos recomendados pela CIE, para simulações estáticas, e adotam o modelo de Perez para as simulações dinâmicas, quando é necessário determinar a condição de céu para cada hora útil do ano com base em dados climáticos. Pelo **FT3**, por outro lado, o APOLUX adota o Modelo de Kittler. Para simulações estáticas, o programa permite que o usuário escolha qualquer um dos 15 tipos de céu, além do céu encoberto clássico. Para as dinâmicas os algoritmos do programa determinam o tipo de céu para cada hora útil do ano. Os diferentes modelos adotados distinguem o **FT3** dos outros dois e representam diferenças significativas também do ponto de vista prático da operação dos programas.

Com o **FT1** o tipo de céu é selecionado pelo usuário em simulações estáticas, através da caixa de diálogo exemplificada pela Figura 5.18.

Figura 5.18 – Caixa de diálogo para definição do tipo de céu com o FT1.

Sky Model: CIE Overcast Sky
 Date/Time 1: junho 21 03:00
 Solar Data 1: GHI: 591 DNI: 154 DHI: 267 W/m²
 Use Weather Data
 Date/Time 2: junho 21 03:00
 Solar Data 2: GHI: 716 DNI: 746 DHI: 92 W/m²
 Use Weather Data (0% sky cover)
 Apply Cancel

Fonte: Autodesk Revit.

Como em qualquer simulação estática, o usuário pode selecionar condições pré-definidas do céu, a data e o horário. Mas nesse caso, também pode escolher entre usar dados climáticos, que seriam extraídos automaticamente da base de dados do *Green Building Studio*, ou preencher manualmente valores de radiação (GHI, DNI e DHI). Os modelos de Perez ou de Kittler interpretam esses dados de radiação para fazer a conversão luminosa e determinar as condições momentâneas do céu. Mas quando se opta por uma simulação com a condição de céu pré-definida, como com céu claro, encoberto ou parcialmente encoberto, esses dados são implícitos. Para as simulações dos mapas de iluminâncias pelo **FT1**, e com o propósito de comparar os resultados, esses campos foram preenchidos manualmente com os dados das tabelas 4.6 e 4.7, obtidos a partir da compatibilização de parâmetros descrita na seção 4.4. Durante o processo de projeto, no entanto, essas informações dificilmente estariam disponíveis de forma acessível para a equipe de projetos. Testes processuais mostraram que modificações arbitrárias nos valores de GHI, DNI e DHI, quando se adotam os modelos clássicos de céu claro ou céu encoberto, por exemplo, alteram significativamente os resultados gerados. Diante da hipótese de que as simulações estáticas venham a ser realizadas por um projetista que não esteja habituado a lidar com dados climáticos de radiação solar, esse é um ponto que pode induzir a erros de avaliação devidos à análise de resultados equivocados. No caso de simulações dinâmicas, utiliza-se o Modelo de Perez, e a caracterização da

condição de céu é definida pelos dados climáticos, que são carregados automaticamente. Os resultados gerados também podem ser duvidosos, dependendo da localidade, já que não há possibilidade de o usuário se certificar da confiabilidade desses dados. A fonte dos dados climáticos também distingue o **FT1**, que utiliza a base de dados do *Green Building Studio*, dos outros dois, que permitem ao usuário inserir o arquivo climático em formato EPW.

Com o **FT2**, a seleção do tipo de céu para as simulações estáticas, seja por um projetista que não conheça profundamente os modelos de céu ou por um especialista, não dá margem aos mesmos equívocos que podem ocorrer com o **FT1**. Para simulações dinâmicas, o arquivo climático é carregado pelo usuário e o modelo de Perez o interpreta para determinar as condições de céu hora a hora.

Com o **FT3**, a abordagem dos tipos de céu para simulações é bem mais detalhada, demandando conhecimento mais especializado por parte do usuário. Se nas simulações estáticas com o **FT1**, o usuário escolhe uma entre quatro opções de tipos de céu, e com o **FT2**, uma entre sete opções, com o **FT3** são 16 opções e ainda há a possibilidade de controlar e visualizar parâmetros relativos ao Modelo de Kittler.

Pela análise da Figura 5.19, observa-se que para cada um dos “Tipos de Céu” que o usuário pode selecionar são apresentados os “Parâmetros do Tipo de Céu”, com suas características básicas e parâmetros relacionados ao Modelo de Kittler. Os “Tipos de Céu” numerados de 1 a 6 representam variações de céu encoberto, para as quais pode ser controlado o parâmetro “Razão Iluminância Difusa / Extraterrestre Horizontal”. Os “Tipos de Céu” numerados de 7 a 15 representam gradações de nebulosidade que variam desde o parcialmente nublado ao céu claro, para os quais pode ser ajustado o parâmetro de “Turvamento”. Qualquer ajuste nesses dois últimos parâmetros reflete-se imediatamente nos valores mostrados das “Iluminâncias Prováveis” para um plano horizontal desobstruído e da “Luminância do Zênite”. Diante de tantas possibilidades para a seleção do tipo de céu em uma simulação estática, um usuário que não tenha domínio desses conceitos pode ficar em dúvida quanto ao melhor ajuste a ser adotado, sendo desejável a colaboração de um especialista para as escolhas mais adequadas.

Figura 5.19 – Caixa de diálogo com as configurações para simulações estáticas com o FT3. Destaques para parâmetros relativos ao tipo de céu.

CALCULAR ABÓBADA COM
 Parâmetros Locais Azimute / Altura Angular do Sol

Parâmetros Geográficos
 Local: Belo Horizonte, bairros - MG
 Latitude: 19.95 Norte Sul Longitude: 43.97 Leste Oeste Altitude: 1000 (metros)
 (Decimal de 0.0 a 90.0) (Decimal de 0.0 a 180.0)

Parâmetros Temporais
 Mês: Dezembro Dia: 21 Hora: 12 Minutos: 0

Parâmetros do Tipo de Céu
 Características: Com atmosfera poluída.
 Grupo de Graduação: 5
 Grupo de Indicador: 5

Definição de Parâmetros:
Valores de Referência
 Turbamento: 5.500 3.000 8.000 Valor Médio
 Razão Iluminância Difusa / Extraterrestre Horizontal: 0.300 0.150 0.450 Valor Médio

Iluminâncias Prováveis
 Global: 102434.9
 Difusa: 29433.3
 Direta: 74001.7
 (Azimute Sol: 108.1 gr)
 (Altura Sol: 77.2 gr)

Tipo de Cálculo
 Sol e Céu
 Somente Sol
 Somente Céu

Tipos de Céu

- 1) CIE - Padrão Céu Encoberto (Novo)
- 2) Céu Encoberto I
- 3) Céu Encoberto II
- 4) Céu Encoberto III
- 5) Céu de Luminância Uniforme
- 6) Céu Parcialmente Nublado I-A
- 7) Céu Parcialmente Nublado I-B
- 8) Céu Parcialmente Nublado I-C
- 9) Céu Parcialmente Nublado II-A
- 10) Céu Parcialmente Nublado II-B
- 11) Céu Branco - Azul
- 12) CIE - Padrão Céu Claro I
- 13) CIE - Padrão Céu Claro I
- 14) Céu Turvado Sem Nuvens
- 15) Céu Turvado Branco - Azul
- 16) CIE - Padrão Céu Encoberto (Antigo)

Luminância do Zenit: 18791.1 cd/m2

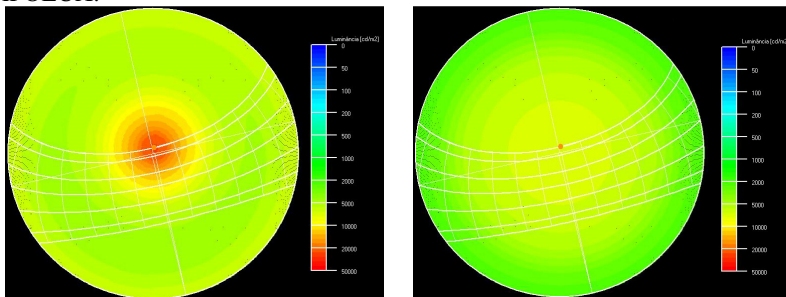
OK Cancela Ajuda

Fonte: APOLUX IV.

Por outro lado, a utilização do APOLUX pode ser instrutiva quanto à infinidade de condições que o céu pode assumir e auxiliar na compreensão de fenômenos simulados. Conforme as configurações definidas na caixa de diálogo ilustrada na Figura 5.19, o programa conta com recurso para exibir a distribuição resultante de luminâncias da abóbada. A Figura 5.20 exemplifica a distribuição de luminâncias da abóbada para condições de céu claro e céu encoberto utilizadas para as simulações do Objeto de estudo. Esse tipo de visualização da abóbada também é de grande interesse quando associado à visualização de máscaras de obstrução, como foi mostrado nas Figuras 5.13 e 5.14.

Para simulações dinâmicas pelo FT3, os algoritmos do APOLUX interpretam os dados do arquivo climático selecionado pelo usuário para determinar qual dos 15 tipos de céu do modelo de Kittler melhor se enquadra às condições de céu a cada hora.

Figura 5.20 – Visualização de distribuição de luminâncias da abóbada com o APOLUX.



(a) Céu Claro. 21/dez. 12h.

(b) Céu Encoberto. 21/dez. 12h.

Fonte: APOLUX IV.

5.2.1.4 Motores e Métodos de Cálculo

Os fluxos de trabalho investigados confrontaram programas que adotam os dois principais métodos de cálculo da iluminação, como foi visto na caracterização dos programas adotados: o método da radiosidade e o método do raio traçado. Os programas de simulação do **FT1** utilizam o método do Raio Traçado bidirecional, através dos algoritmos do motor de cálculo *Multidimensional Lightcuts*, desenvolvido por Walter *et al.* (2006). Para o **FT2**, o DIVA utiliza o método do Raio Traçado recursivo, aplicado pelos algoritmos do Radiance, que é o motor de cálculos de iluminação consagrado pela comunidade acadêmica internacional e pela indústria de softwares. O **FT3** se diferencia dos dois primeiros, pois o APOLUX adota o método da radiosidade para os cálculos da iluminação.

Nesta seção, são ressaltadas as consequências para as etapas do processo de simulação decorrentes dos diferentes métodos de cálculo adotados pelos programas de cada fluxo de trabalho. A diferença entre o método do Raio Traçado, adotado pelo **FT1** e **FT2**, e o método da Radiosidade, adotado pelo **FT3**, tem impactos importantes na **Etapa de Preparação do Modelo BIM** e na **Etapa de Preparação do Modelo Geométrico**, pois requer níveis diferentes de intervenção no modelo BIM elaborado para o projeto arquitetônico.

Com o **FT1**, as simulações são realizadas diretamente a partir do modelo BIM, através do próprio ambiente de trabalho do Revit, e não há nem mesmo a necessidade de exportação e preparação de um modelo geométrico para o propósito específico das simulações, como foi visto na

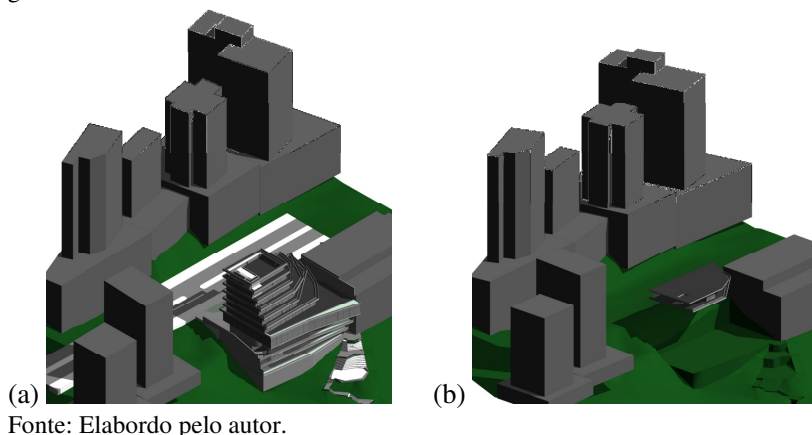
descrição desse fluxo de trabalho. Com o **FT2**, o modelo BIM de todo o edifício pode ser exportado para a geração do modelo geométrico. Um modelo geométrico muito grande pode exigir maior atenção na **Etapa de Preparação do Modelo Geométrico** devido à sua maior complexidade, mas não inviabiliza a realização das simulações em função do seu tamanho, pois o tempo de processamento dependerá primariamente do número de sensores que serão calculados. Por outro lado, para as simulações com o APOLUX, pelo **FT3**, a recomendação é que o modelo não ultrapasse 120.000 vértices, após o fracionamento, para que os cálculos não se inviabilizem. Por isso, o modelo BIM deve ser cuidadosamente delimitado para que sejam exportados somente os elementos geométricos relevantes para os ambientes que se deseja simular. Casos se deseje simular ambientes e/ou pavimentos diversos em um mesmo projeto, o processo de exportação e a **Etapa de Preparação do Modelo Geométrico** deverá se repetir para cada grupo de ambientes simulados, observando-se sempre essa limitação do número de vértices.

Para permitir a análise comparativa dos resultados, as simulações com os três fluxos de trabalho deviam ser realizadas em condições as mais semelhantes possíveis, o que inclui a utilização dos mesmos dados geométricos. Assim, para as simulações do objeto de estudo, a delimitação que precisou ser feita para o **FT3** em função do limite do número de vértices do modelo geométrico, conforme é ilustrada na Figura 4.8, precisou ser adotada também com o **FT1** e **FT2**. Decorreu daí a opção inicial por analisar no objeto de estudo somente um conjunto de duas salas, desconsiderando-se o entorno edificado. No entanto, o entorno edificado pode ter grande influência para o desempenho de um projeto quanto à iluminação natural e, posteriormente, julgou-se importante avaliar também o seu impacto nos resultados das simulações, bem como o impacto que sua inclusão teria para a **Etapa de Preparação do Modelo Geométrico**.

A Figura 5.21 ilustra duas condições de visualização do modelo BIM para exemplificar os procedimentos necessários para as simulações incluindo o entorno edificado. A Figura 5.21a representa o modelo BIM completo, sem a delimitação comentada acima, tal qual seu estágio de desenvolvimento no projeto. Com essa configuração, as simulações foram realizadas através do **FT1** sem qualquer intervenção e sem que se percebesse acréscimo significativo nos tempos de processamento dos cálculos. Com o **FT2**, a exportação do modelo geométrico com essa mesma configuração também se mostrou viável para as simulações, embora a **Etapa de Preparação do Modelo Geométrico** tenha sido pouco mais trabalhosa em função do maior número de objetos no modelo.

Contudo, vencida essa etapa, qualquer dos ambientes do projeto poderia ser simulado a partir do mesmo modelo. Com o **FT3**, os impactos na **Etapa de preparação do modelo BIM** e na **Etapa de Preparação do Modelo Geométrico** são significativamente maiores que nos outros dois. Nesse caso é imprescindível que os ambientes a serem simulados sejam definidos previamente à exportação do modelo geométrico, que deve se restringir ao estritamente necessário, como ilustrado na Figura 5.21b.

Figura 5.21 – Delimitação do modelo BIM para a exportação do modelo geométrico.



Mesmo ocultando a maior parte dos elementos geométricos do projeto original, o entorno edificado, incluindo edifícios e topografia, é constituído de grandes planos, que podem se desdobrar em um número de vértices ainda muito elevados e inviabilizar os cálculos. O programa APOLUX, no entanto, conta com alguns recursos para lidar com a situação de modelos de maior complexidade, como acredita-se que venha a ser o caso de qualquer projeto desenvolvido com a tecnologia BIM. No módulo Fractal, é possível atribuir fatores diferenciados de fracionamento para diferentes categorias de objetos¹, o que permite criar uma hierarquia de fracionamento em que planos menos relevantes para as trocas luminosas podem ser menos fracionados, reduzindo-se o número total de

¹ Os objetos paramétricos que caracterizam o modelo BIM são classificados no Revit em diferentes categorias. Quando o modelo é exportado com a extensão DWG ou DXF para tratamento no AutoCAD, é atribuído um *layer*, ou camada, a cada categoria. Os *layers* são interpretados pelo APOLUX como “níveis”.

vértices. E no módulo Foton, é possível diferenciar os objetos quanto às suas propriedades óticas para definir que determinados planos do modelo sejam considerados como sendo de luminância uniforme relativa ao céu e funcionem como fontes secundárias de iluminação natural. Essa definição foi adotada para os planos dos edifícios vizinhos, para os quais foi atribuído o fator de fracionamento igual a 0. A geometria correspondente à topografia foi excluída do modelo e a componente de luz refletida do solo foi considerada pelo fator solo do módulo Foton, que atribui uma refletância constante para o plano abaixo da linha do horizonte.

O projeto selecionado como objeto de estudo para a pesquisa conta com múltiplos pavimentos, com áreas e dimensões diferentes e salas comerciais com orientações e tamanhos diversos. Para os objetivos da pesquisa, apenas duas dessas salas foram simuladas e as diferenças pontuadas aqui não foram percebidas de forma tão acentuada, pois cada fluxo de trabalho foi percorrido apenas uma vez. Caso se desejasse avaliar uma amostragem maior das salas comerciais do projeto o impacto seria significativamente maior.

5.2.2 QUANTO AOS TIPOS DE SIMULAÇÃO E FERRAMENTAS DE ANÁLISE

Os tipos de simulação que os programas são capazes realizar e as ferramentas de análise da iluminação natural para auxílio ao projetista de que dispõem foram listados na seção 3.2.2. Aqueles considerados mais relevantes foram exemplificados na descrição dos fluxos de trabalho, na seção 5.1. Para analisá-los comparativamente, no entanto, é importante compreender quais aspectos da iluminação natural podem ser avaliados com as simulações e análises. E tendo em vista o objetivo geral da pesquisa, também é importante situar em que momentos do desenvolvimento do projeto as simulações e análises podem vir a ser integradas.

5.2.2.1 Concepção do Partido Arquitetônico

O Quadro 5.5 destacou as simulações e análises exploradas com o modelo do Objeto de Estudo representativo da fase de Concepção do Partido Arquitetônico associando-as às três categorias de Reinhart e Wienold (2011) e aos dados de saída listados por Heschong e Saxena (2010) destacados no Quadro 3.6.

Nesse momento do desenvolvimento do projeto, os fluxos de

trabalho investigados possibilitam a análise de intensidades de radiação incidente sobre volume projetado e estudos de incidência solar e sombras. O **FT1** é o único que contempla ambas, sendo que o **FT2** não dispõe de ferramentas para análise da Geometria Solar e o **FT3** não gera Mapas de Radiação solar dados em W/m². A visualização de máscaras do **FT3** tem, em certa medida, aplicação semelhante às ferramentas de trajetória solar e sombras do Revit, exemplificada na Figura 5.3, pois também permitem avaliar a incidência, penetração solar e sombreamento do entorno construído. A principal diferença reside nas formas de visualização e interação com as ferramentas. Com o Revit, insolação e sombras são projetadas sobre vistas do modelo internas ou externas conforme a data e horário selecionados, e a trajetória solar em relação ao projeto pode ser visualizada em uma vista tridimensional. A análise anual pode ser feita a partir animações ou sequências de imagens. As máscaras, por sua vez, permitem analisar a trajetória solar anual aparente, em projeção estereográfica, para um ponto de vista específico em uma única imagem. Essas análises são importantes, por exemplo, para avaliar a eficiência de dispositivos de proteção solar.

Quadro 5.5 – Categorias de critérios e dados de saída para avaliação da iluminação natural durante a Concepção do Partido Arquitetônico.

| TIPOS DE ANÁLISE | TIPOS DE SIMULAÇÃO | CATEGORIA DE CRITÉRIO |
|---|--------------------|--------------------------------|
| FLUXO DE TRABALHO 1 | | |
| (S1.1) Análise de Incidência Solar e Sombreamento | Geometria Solar | Disponibilidade da Luz Natural |
| (S1.2) Mapas de radiação solar | Irradiação Solar | Conforto Humano |
| FLUXO DE TRABALHO 2 | | |
| (S2.1) Mapas de radiação solar | Irradiação Solar | Conforto Humano |
| FLUXO DE TRABALHO 3 | | |
| (S3.1) Visualização de máscaras | Geometria Solar | Disponibilidade da Luz Natural |

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2.2 Desenvolvimento Inicial do Projeto

Para esse momento do desenvolvimento do projeto as simulações estáticas e as simulações dinâmicas exploradas no Objeto de Estudo foram organizadas nos Quadros 5.6 e 5.7, respectivamente.

As análises de incidência solar e sombreamento do **FT1** e a visualização de máscaras do **FT3** foram incluídas no Quadro 5.6, pois também são aplicáveis a esse momento do projeto.

Quadro 5.6 – Categorias de critérios e dados de saída para avaliação da iluminação natural durante a Desenvolvimento Inicial. Simulações estáticas.

| TIPOS DE ANÁLISE | TIPOS DE SIMULAÇÃO | CATEGORIA DE CRITÉRIO |
|---|--------------------|---|
| FLUXO DE TRABALHO 1 | | |
| (S1.1) Análise de Incidência Solar e Sombreamento | Geometria Solar | Disponibilidade da Luz Natural |
| (S1.3) Mapas de Iluminâncias sobre as superfícies do modelo | Iluminação Natural | Disponibilidade da Luz Natural Conforto Humano |
| (S1.4) Imagens renderizadas | Iluminação Natural | Conforto Humano |
| (S1.5) Mapas de Iluminâncias sobre um plano de análise horizontal | Iluminação Natural | Disponibilidade da Luz Natural Conforto Humano |
| FLUXO DE TRABALHO 2 | | |
| (S2.1) Mapas de Luminâncias | Iluminação Natural | Conforto Humano |
| (S2.3) Ofuscamento DGP | Iluminação Natural | Conforto Humano |
| (S2.4) Mapa de Iluminâncias no plano de análise | Iluminação Natural | Disponibilidade da Luz Natural Conforto Humano |
| FLUXO DE TRABALHO 3 | | |
| (S3.1) Visualização de máscaras | Geometria Solar | Disponibilidade da Luz Natural |
| (S3.2) Mapas de Luminâncias | Iluminação Natural | Conforto Humano |
| (S3.3) Classes de iluminâncias | Iluminação Natural | Disponibilidade da Luz Natural |
| (S3.4) Vetor Foton | Iluminação Natural | Conforto Humano |
| (S3.5) Mapas de Iluminâncias no plano de análise | Iluminação Natural | Disponibilidade da Luz Natural Conforto Humano |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Mapas de iluminâncias são simulações estáticas comuns aos três fluxos de trabalho e permitem avaliar tanto a Disponibilidade da Luz Natural, a partir da análise de suficiência em termos de iluminâncias, como o Conforto Humano, a partir da análise de uniformidade, gradientes e o eventual excesso de iluminâncias. O **FT2** e **FT3** podem exibir ainda valores numéricos sobrepostos aos gráficos. O **FT1** e o **FT2** apresentam também dados percentuais das áreas de análise que atingem os limites de iluminâncias estabelecidos. A análise de classes de iluminâncias, que

pode ser útil para avaliar o atendimento às normas brasileiras, por exemplo, é exclusiva do **FT3**.

A impossibilidade de avaliar o conforto humano através de análises de luminâncias é a principal carência do **FT1**. O **FT2** e o **FT3** abordam esse aspecto, mas de formas distintas. Ambos geram mapas de luminâncias sobre as superfícies do modelo para a análise qualitativa em termos de uniformidade, gradientes e risco de ofuscamento. O **FT2**, no entanto, é o único que calcula o índice DGP, que mede o risco de ofuscamento de um determinado ponto de vista. A avaliação do risco de ofuscamento pelo **FT3** pode ser feita pelo vetor foton, que permite visualizar os gráficos de luminâncias de um ponto de vista em 360°, através de lente olho de peixe e de forma interativa. Exige-se do analista, nesse caso, experiência e sensibilidade para a interpretação da adequação ou não dos contrastes observados.

Com os três fluxos de trabalho podem ser geradas imagens que reproduzem a iluminação da cena para análises qualitativas da uniformidade, ofuscamento por excesso de luz, gradientes, imagens e qualidade da vista para o exterior.

O Quadro 5.7 agrupou as simulações dinâmicas, onde são exibidas apenas as métricas que terão seus resultados comparados na seção 5.3. As métricas sDA e ASE, que contam com métodos aprovados e critérios de desempenho estabelecidos pela IES LM-83-12 (IES, 2012), são comuns aos três fluxos de trabalho e são úteis para avaliar, no curso do ano, a suficiência e disponibilidade da luz natural em contraponto ao risco de desconforto por iluminação excessiva. O resultado numérico para sDA é derivado da distribuição dos valores de DA e os gráficos dessa métrica são gerados apenas pelo **FT2** e **FT3**. Pelo **FT1**, o gráfico indica apenas as áreas que atendem ou não aos critérios da IES LM-83-12. Com o **FT3**, os gráficos são gerados com o auxílio de programas auxiliares a partir da planilha de dados numéricos resultantes do cálculo de EALN. Essa planilha gerada pelo **FT3** traz um dado complementar à ASE: a iluminância média dos pontos que excedem o limite máximo das horas acima de 1000 lux. Esse dado é importante para que se avalie de forma mais aprofundada o excesso da luz natural no ambiente.

A métrica UDI não foi aplicada no Objeto de Estudo, mas também pode ser obtida pelo **FT2** e pelo **FT3** e é útil para avaliar a suficiência, a disponibilidade e o excesso de luz natural. Além dessas, outras métricas dinâmicas podem ser obtidas apenas com o **FT2**, que permitem avaliar os mesmos aspectos com abordagens diferentes.

Quadro 5.7 – Categorias de critérios e dados de saída para avaliação da iluminação natural durante o Desenvolvimento Inicial. Simulações dinâmicas.

| TIPOS DE ANÁLISE | TIPOS DE SIMULAÇÃO | CATEGORIA DE CRITÉRIO |
|---|--------------------|---|
| FLUXO DE TRABALHO 1 | | |
| (S1.6) Autonomia Espacial de Luz Diurna (sDA) | Iluminação Natural | Disponibilidade da Luz Natural Conforto Humano |
| (S1.7) Exposição Anual à Luz Solar (ASE) | Iluminação Natural | Conforto Humano |
| FLUXO DE TRABALHO 2 | | |
| (S2.5) Autonomia de Luz Diurna (DA) | Iluminação Natural | Disponibilidade da Luz Natural Conforto Humano |
| (S2.6) Autonomia Espacial de Luz Diurna (sDA) | Iluminação Natural | Disponibilidade da Luz Natural Conforto Humano |
| (S2.7) Exposição Anual à Luz Solar (ASE) | Iluminação Natural | Conforto Humano |
| FLUXO DE TRABALHO 3 | | |
| (S3.6) Autonomia de Luz Diurna (DA) | Iluminação Natural | Disponibilidade da Luz Natural Conforto Humano |
| (S3.7) Autonomia Espacial de Luz Diurna (sDA) | Iluminação Natural | Disponibilidade da Luz Natural Conforto Humano |
| (S3.8) Exposição Anual à Luz Solar (ASE) | Iluminação Natural | Conforto Humano |

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 COMPARAÇÃO GRÁFICA E QUALITATIVA DOS RESULTADOS

Faz-se importante neste momento, destacar a diferença existente entre os resultados da pesquisa, em si, e os resultados das simulações que seriam utilizados para análise e avaliação do desempenho da iluminação natural. Assim, os resultados das simulações realizadas com o objeto de estudo são partes integrantes de quadros comparativos que, estes sim, compõem os resultados da pesquisa para o terceiro objetivo específico. Não faz parte dos propósitos desta pesquisa obter um diagnóstico do desempenho do projeto utilizado como objeto de estudo, mas sim compreender as diferenças em termos de qualidade das análises de iluminação natural que podem ser feitas por meio de cada fluxo de trabalho investigado dentro do contexto interdisciplinar inerente ao desenvolvimento do projeto arquitetônico.

Conforme definido na seção 3.6, os mapas de iluminâncias foram os resultados de simulação estática destacados para análise comparativa,

enquanto os mapas de distribuição de Autonomia de Luz Diurna (DA) e as métricas Autonomia Espacial de Luz Diurna (sDA) e Exposição Anual à Luz Solar (ASE). Os quadros comparativos dos resultados obtidos por essas métricas são apresentados e discutidos a seguir.

5.3.1 SIMULAÇÕES ESTÁTICAS

Todos os resultados de simulações apresentados nesta seção foram obtidos a após os procedimentos de compatibilização de parâmetros descritos na seção 4.4. É importante destacar que tal compatibilização foi realizada especificamente para cumprir com o objetivo da pesquisa de comparar os resultados obtidos por simulações em condições semelhantes pelos três fluxos de trabalho analisados. Em circunstâncias reais de projeto, a tendência é que apenas um dos fluxos de trabalho seja adotado, o que impossibilitaria a realização desse procedimento de compatibilização de parâmetros.

Os programas de simulação utilizados em cada fluxo de trabalho possibilitam diferentes opções de controle da aparência dos gráficos e escala de valores dos mapas de iluminâncias e fornecem resultados em dados numéricos com diferentes níveis de detalhes. Assim, antes de comparar de forma ampla os mapas de iluminâncias para todas as combinações de datas, horário e combinações de céu, foi necessário ajustar da melhor forma possível a aparência dos gráficos

5.3.1.1 Da forma de apresentação dos resultados

Comparando-se inicialmente a forma de apresentação dos resultados das simulações estáticas, destacam-se os seguintes aspectos relacionados aos mapas de iluminâncias:

- a) Ajuste da escala numérica de valores de iluminâncias:
 - FT1: Revit permite personalização manual da escala de valores. Entretanto, não faz distinção de valores acima de 6000lux, que são representados sempre com a mesma cor.
 - FT2: DIVA não permite personalizar totalmente a escala de valores, mas apenas os limites mínimos e máximos usados como referência para as estatísticas de áreas abaixo, acima ou compreendidas dentro desses limites. Os valores intermediários são interpolados em progressão linear.
 - FT3: APOLUX permite personalização manual total da escala de valores ou a personalização em progressões lineares, geométricas

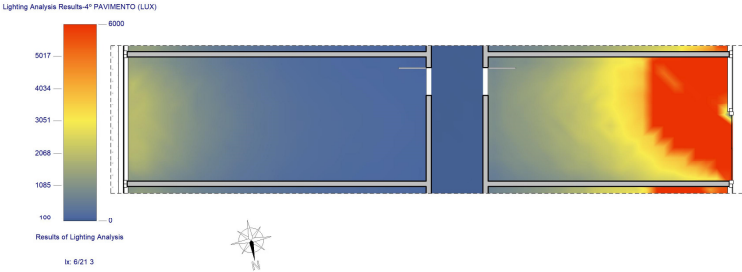
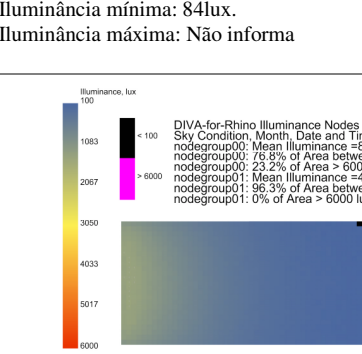
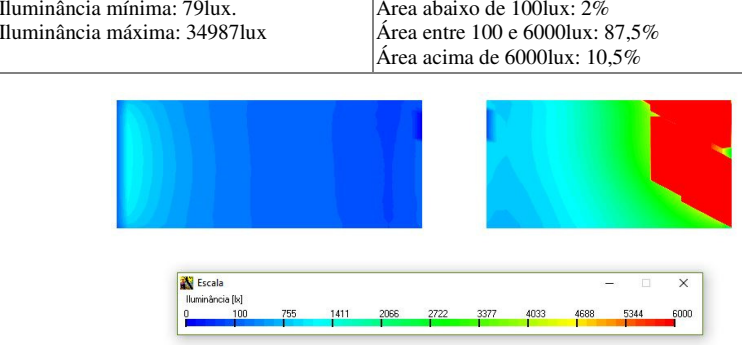
ou logarítmicas.

- b) Ajuste de cores para representação gráfica:
- FT1: Revit permite personalização manual das cores.
 - FT2: DIVA não oferece três opções de padrões de cores.
 - FT3: APOLUX não permite personalização das cores.
- c) Apresentação de resultados numéricos e estatísticas de áreas.
- FT1: Revit apresenta estatísticas dos percentuais de áreas dos ambientes simulados compreendidos abaixo, acima ou dentro dos limites de iluminâncias estabelecidos. Indica na escala gráfica o menor valor de iluminância encontrado, mas não indica qualquer valor superior a 6000lux.
 - FT2: DIVA apresenta estatísticas dos percentuais de áreas dos ambientes simulados compreendidos abaixo, acima ou dentro dos limites de iluminâncias estabelecidos. Indica os valores mínimos e máximos encontrados no momento em que os resultados são carregados.
 - FT3: APOLUX fornece relatório completo dos resultados da simulação em arquivo de texto, detalhando, entre outros dados, as contribuições de iluminância direta, global e difusa. Entretanto não fornece estatísticas de áreas de forma direta, sendo necessário o tratamento manual dos dados.

Os gráficos do Quadro 5.8 mostram os resultados de mapas de iluminâncias para o solstício de inverno, às 15h, com o céu claro. A escala de valores foi ajustada para expressar a faixa mais ampla de valores comum aos três programas analisados, tendo sido limitada pelo valor máximo de 6000lux em função da limitação observada no FT1. São apresentados ainda os dados estatísticos que podem ser obtidos automaticamente pelo FT1 e FT2. Os mesmo dados foram calculados manualmente com os resultados das simulações com o APOLUX, pelo FT3.

Graficamente, os três fluxos de trabalho apresentaram resultados muito semelhantes. Também foram muito semelhantes as estatísticas dos percentuais de áreas compreendidos abaixo, acima e entre os limites de iluminâncias delimitados.

Quadro 5.8 – Mapas de Iluminância. 09h. Céu Claro. Solstício Verão (21/12)

| | | |
|---------------------|--|--|
| Fluxo de Trabalho 1 |  <p>Lighting Analysis Results-4º PAVIMENTO (LUX)</p> <p>Results of Lighting Analysis li: 8213</p> | <p>Iluminância mínima: 84lux. Iluminância máxima: Não informa</p> <p>Área abaixo de 100lux: 3% Área entre 100 e 6000lux: 86% Área acima de 6000lux: 11%</p> |
| Fluxo de Trabalho 2 |  <p>Illuminance, lux</p> <p>DIVA-for-Rhino Illuminance Nodes Analysis Sky Condition, Month, Date and Time: csky062115 nodegroup00: Mean Illuminance = 8135,05 lux nodegroup00: 76.8% of Area between 100 & 6000 lux nodegroup00: 23.2% of Area > 6000 lux; 0% of Area < 100 lux nodegroup01: Mean Illuminance = 437,38 lux nodegroup01: 96.3% of Area between 100 & 6000 lux nodegroup01: 0% of Area > 6000 lux; 3.7% of Area < 100 lux</p> | <p>Iluminância mínima: 79lux. Iluminância máxima: 34987lux</p> <p>Área abaixo de 100lux: 2% Área entre 100 e 6000lux: 87,5% Área acima de 6000lux: 10,5%</p> |
| Fluxo de Trabalho 3 |  <p>Escala</p> <p>Illuminância [lx]</p> | <p>Iluminância mínima: 73lux. Iluminância máxima: 41070lux</p> <p>Área abaixo de 100lux: 15% Área entre 100 e 6000lux: 75% Área acima de 6000lux: 10%</p> |

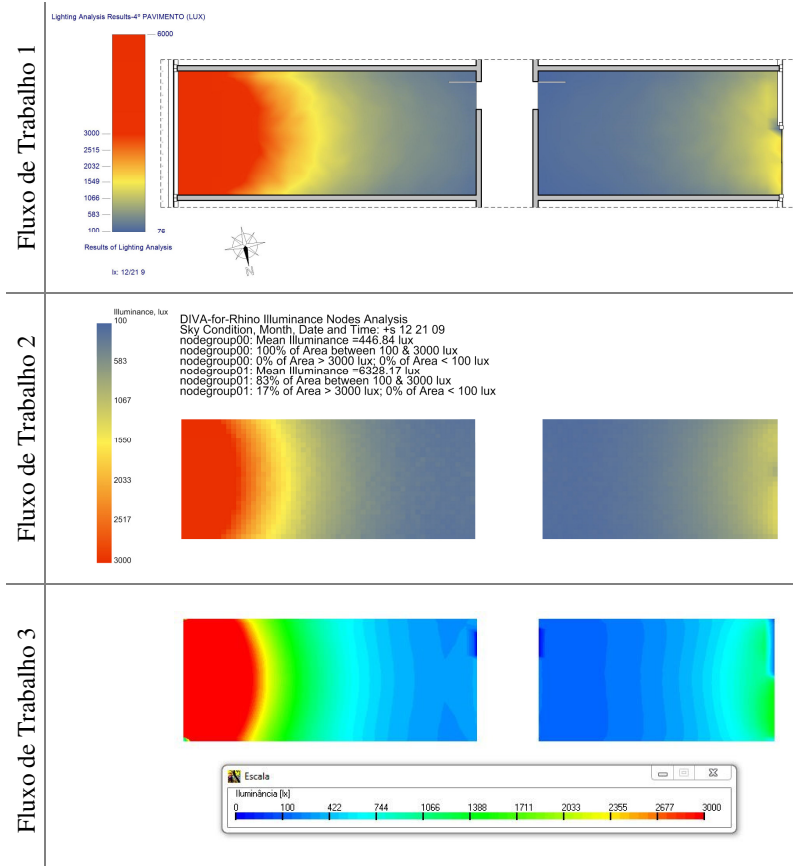
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.1.2 Comparação gráfica dos mapas de iluminâncias.

A visualização de mapas de iluminâncias com uma faixa muito extensa de iluminâncias, como as do Quadro 5.8, camufla graficamente as variações compreendidas dentro de uma faixa que seja útil para usos comerciais ou residenciais. Por isso, com intuito de melhor visualizar a distribuição e variação das iluminâncias no ambiente para todas as combinações de datas, horários e condições de céu analisadas, os limites de iluminâncias foram ajustadas e a comparação qualitativa limitou-se a avaliar graficamente os resultados. Os limites de iluminâncias foram estabelecidos entre 100lux (inferior) e 3000lux (superior), tomando por referência valores encontrados na bibliografia.

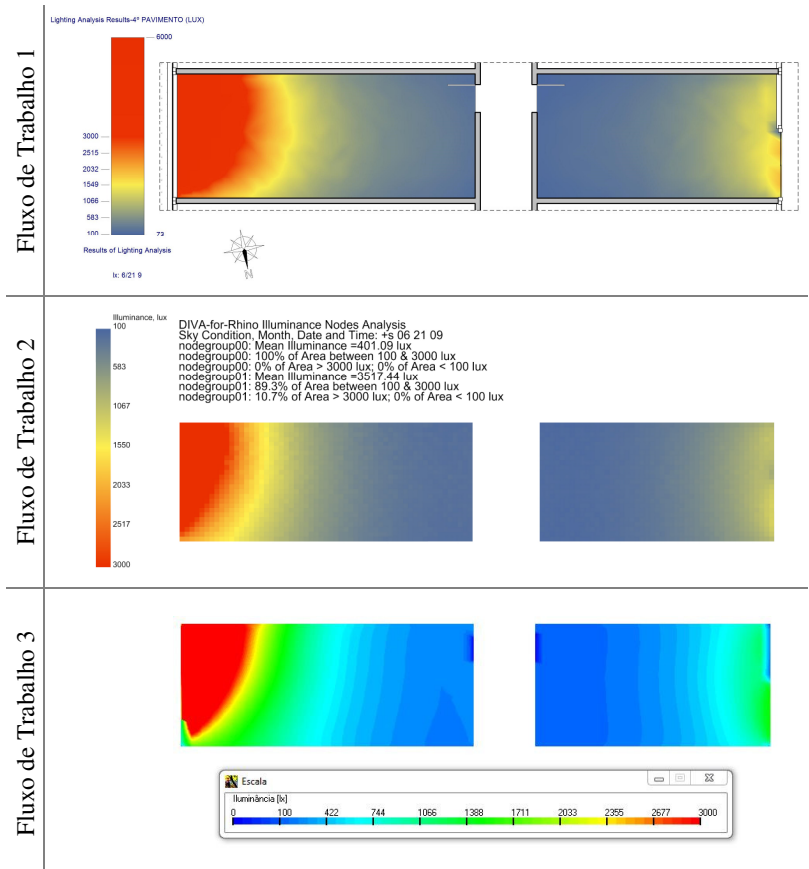
Os Quadros 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 apresentam os resultados gráficos dos mapas de iluminâncias simulados para a condição de céu claro.

Quadro 5.9 – Mapas de Iluminância. 09h. Céu Claro. Solstício Verão (21/12)



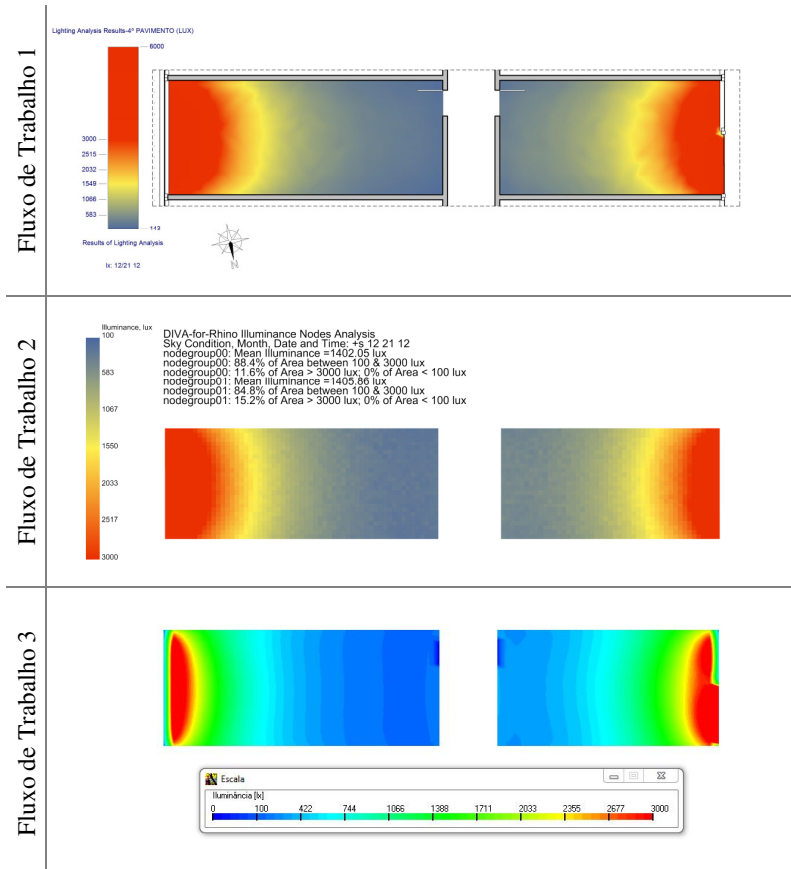
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5.10 – Mapas de Iluminância. 09h. Céu Claro. Solstício de Inverno (21/06)



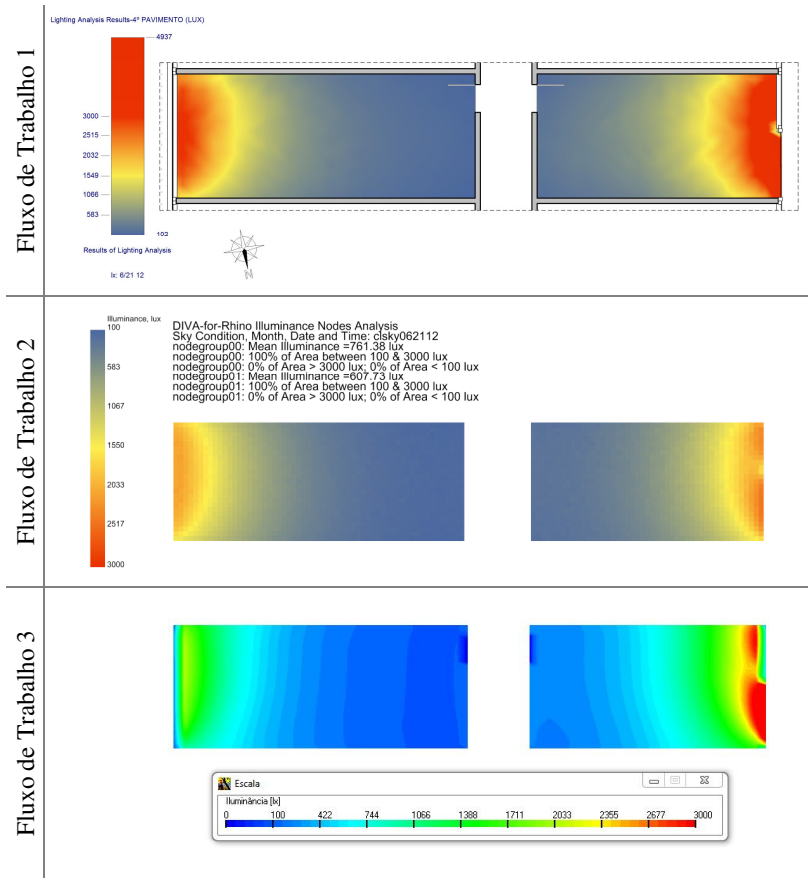
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5.11– Mapas de Iluminância. 12h. Céu Claro. Solstício Verão. (21/12)



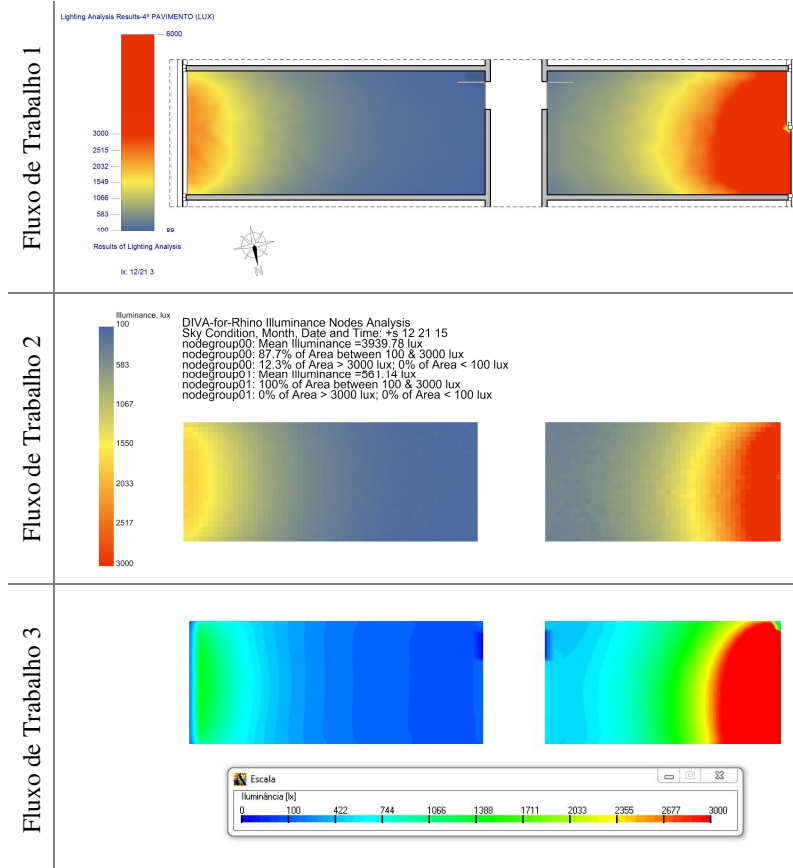
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5.12 – Mapas de Iluminância. 12h. Céu Claro. Solstício Inverno (21/06)



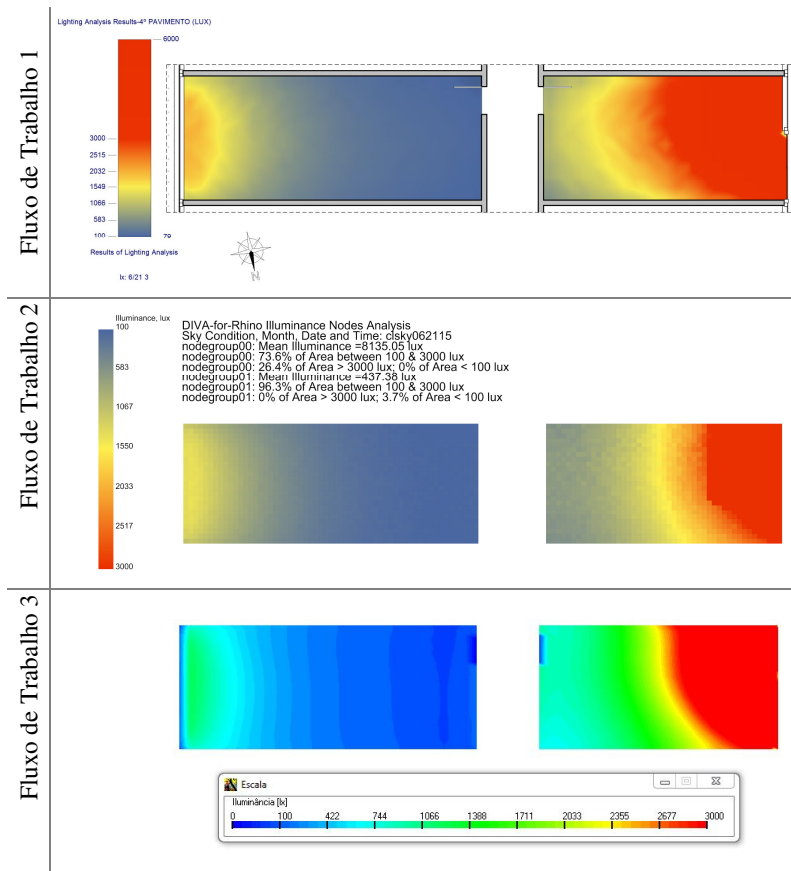
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5.13 – Mapas de Iluminância. 15h. Céu Claro. Solstício Verão. (21/12)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5.14 – Mapas de Iluminância. 15h. Céu Claro. Solstício Inverno. (21/06)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A sala 409 (à esquerda nos gráficos), orientada para Leste, recebe insolação direta às 9h, enquanto a sala 403 (à direita nos gráficos), orientada para Oeste, recebe insolação direta às 15h. Às 12 horas, ambos os ambientes recebem apenas luz difusa. Na presença da luz direta do Sol, tanto no solstício de verão quanto no de inverno, observa-se pela extensão da mancha vermelha, indicativa de iluminâncias acima de 3000lux, que os resultados do **FT1** mostraram níveis de iluminação superiores em relação aos do **FT3**, que, por sua vez, foram superiores aos encontrados com o **FT2**. Às 12h, na ausência da luz direta do Sol, os níveis de iluminação do **FT1** também foram os mais altos, mas os níveis de

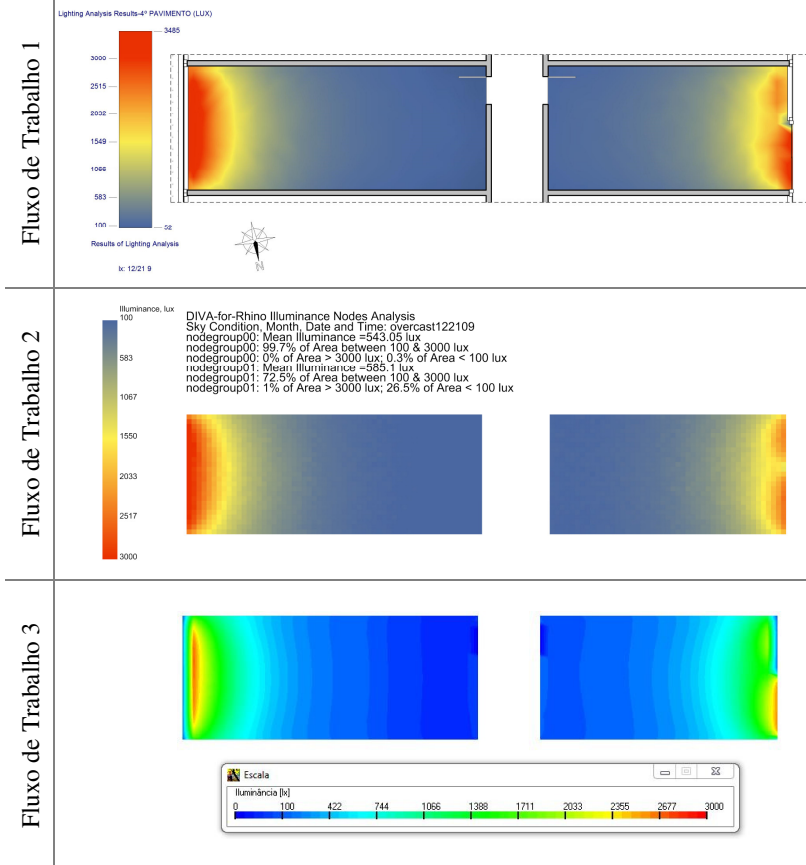
iluminação obtidos com o **FT3** foram inferiores aos do **FT2**.

Mesmo diante de resultados gráficos que denotam diferenças quantitativas, os resultados dos três fluxos de trabalho mostraram padrões de distribuição de iluminâncias muito semelhantes. Para que um arquiteto possa avaliar soluções propostas ao longo do desenvolvimento do projeto, o padrão de distribuição associado a uma ordem de grandeza das iluminâncias fornecem critérios qualitativos suficientes para embasar suas decisões, num momento em que valores numéricos absolutos teriam pouco significado. Dessa forma, as análises obtidas com os três fluxos de trabalho permitiriam chegar praticamente às mesmas conclusões acerca das soluções de iluminação projetadas para o ambiente:

Na sala 409, os resultados indicam a necessidade de sombreamento no período da manhã. O mesmo ocorre para a sala 403, mas a necessidade de sombreamento seria para o período da tarde. Ao meio dia do solstício de verão, mesmo sem incidência direta do Sol, as duas salas apresentaram iluminação excessiva próxima às aberturas. No solstício de inverno, ao meio dia, e nos períodos em que as salas não estão expostas ao Sol, em ambas as datas, o padrão de distribuição mostrou-se mais uniforme. Nesse caso, observa-se uma região bem iluminada próxima às aberturas e com níveis de iluminação mais baixos no fundo da sala, onde seria necessária complementação com luz artificial.

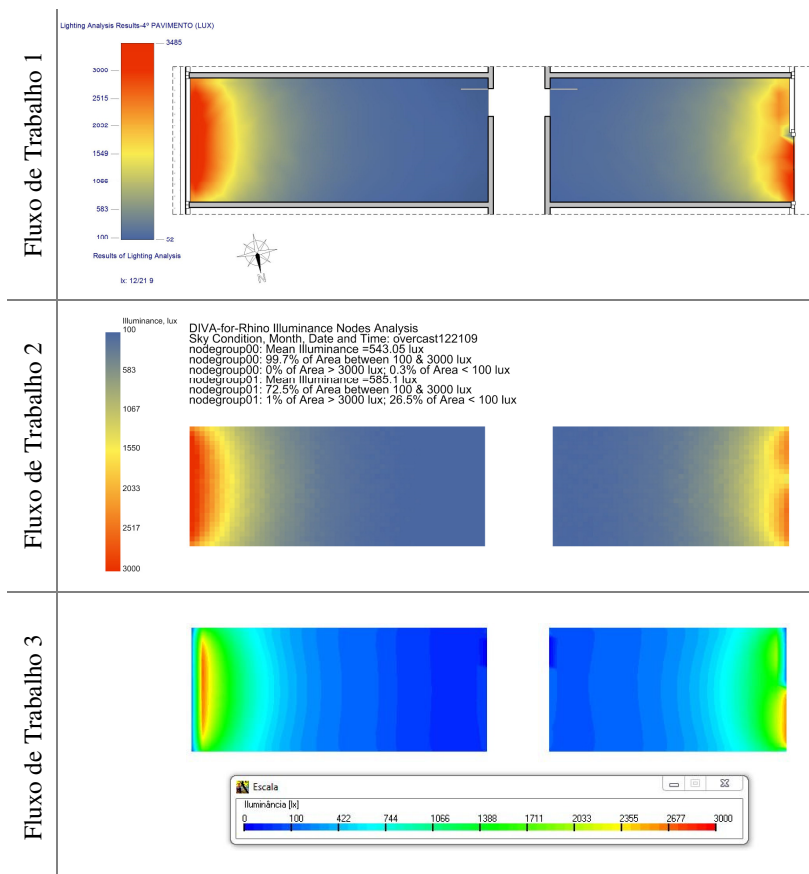
Os Quadros 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20 apresentam os resultados gráficos dos mapas de iluminâncias simulados para a condição de céu encoberto. Comparam-se os resultados obtidos por cada fluxo de trabalho, nas datas de solstício de verão e de inverno.

Quadro 5.15 – Mapa de Iluminância. 09h. Céu Encoberto. Solstício Verão. (21/12)



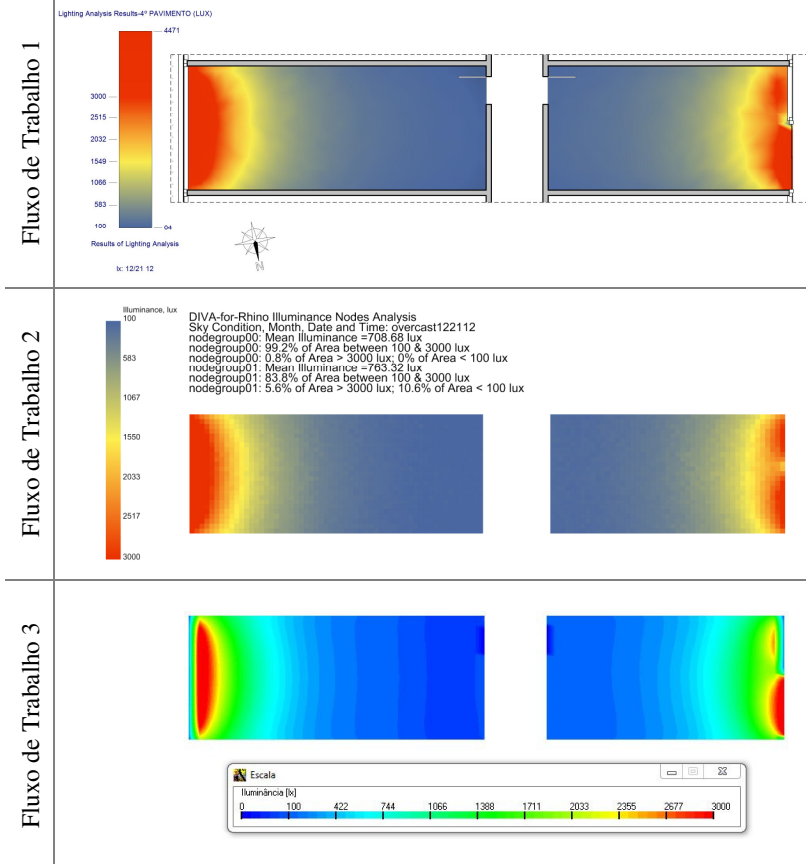
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5.16 – Mapas de Iluminância. 09h. Céu Encoberto. Solstício Inverno. (21/12)



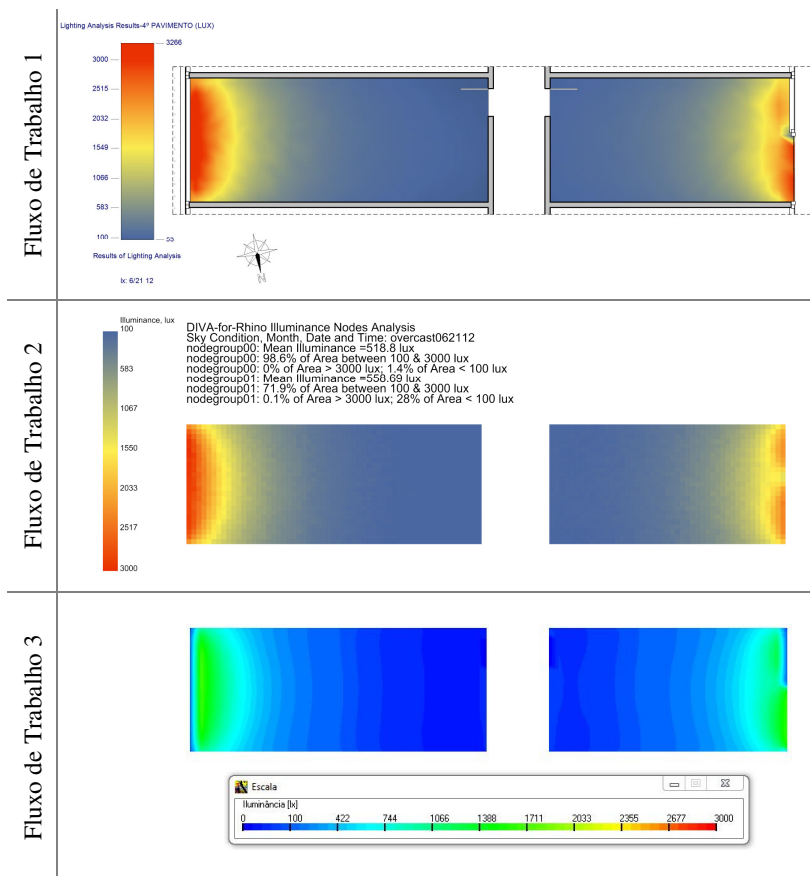
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5.17 – Mapas de Iluminância. 12h. Céu Encoberto. Solstício Verão (21/12)



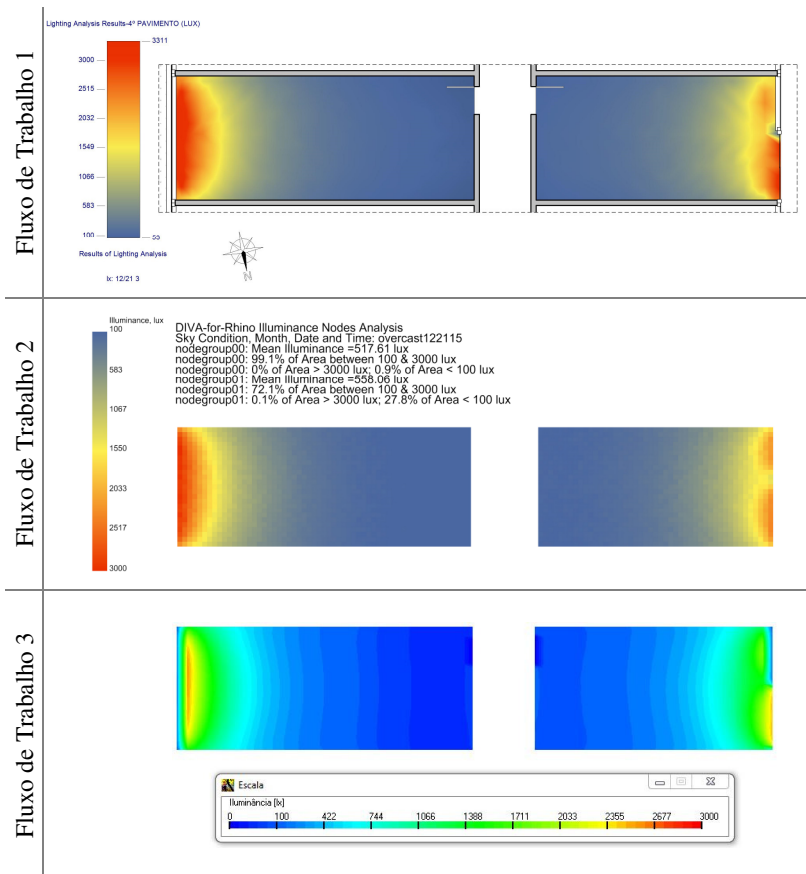
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5.18 – Mapas de Iluminância. 12h. Céu Encoberto. Solstício Inverno. (21/06)



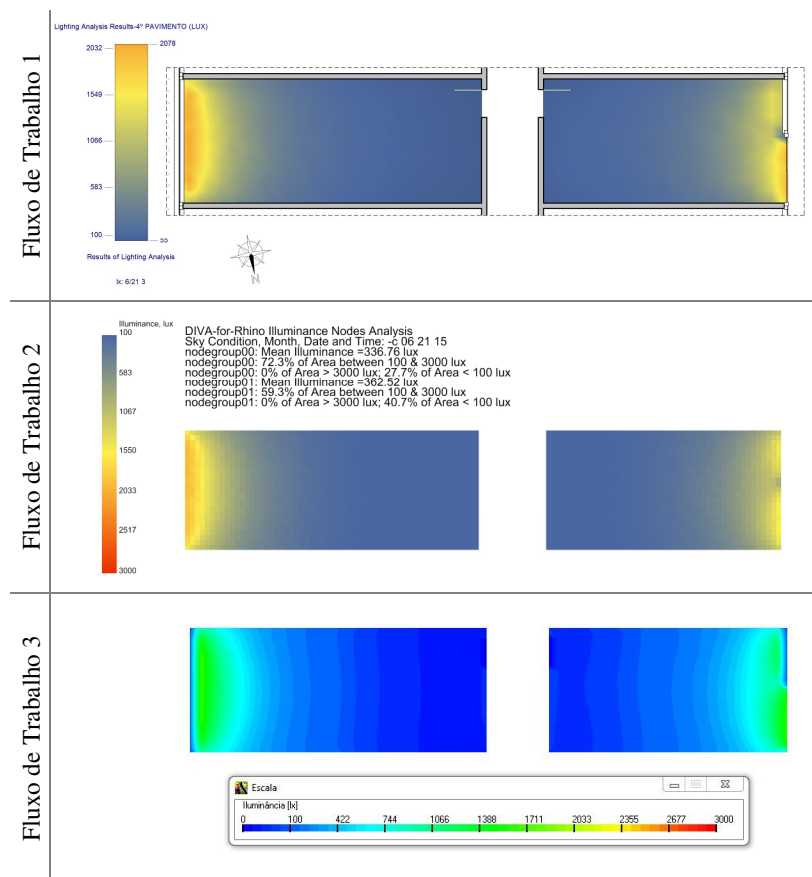
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5.19 – Mapas de Iluminância. 15h. Céu Encoberto. Solstício Verão (21/12)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5.20 – Mapas de Iluminância. 15h. Céu Encoberto. Solstício Inverno (21/06)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quantitativamente, observou-se a mesma relação proporcional dos níveis de iluminâncias que nos momentos em que o Sol não incidia nos ambientes em condição de céu claro. Os níveis de iluminação do **FT1** foram, de modo geral, sempre superiores aos simulados pelo **FT2**, que foram maiores também que os obtidos pelo **FT3**. Qualitativamente, assim como foi para o céu claro, os padrões de distribuição foram muito semelhantes para os três fluxos de trabalho e permitiriam chegar basicamente às mesmas conclusões. O padrão de distribuição também foi semelhante para as diferentes datas e horários, variando apenas em

intensidade. Devido à ausência da insolação direta, tanto nas simulações às 9h quanto às 15h, as salas não tiveram uma diferença tão acentuada nos padrões de iluminação quanto se observou com a presença do Sol. Os níveis de iluminação globais variaram em função da altura solar. Foram mais elevados no solstício de verão, às 12h, data e horário em que o Sol está muito próximo do zênite. A altura solar nos horários de 9h e 15h do solstício de verão, e às 12h, no solstício de inverno, são bem próximas e resultaram em mapas de iluminâncias muito parecidos para esses três horários. Por essa mesma razão, os horários de 9h e 15h do solstício de inverno têm as menores alturas solares e apresentaram os menores níveis de iluminação entre todas as datas e horários simulados. Em todos os casos com céu encoberto, a região dos fundos da sala apresentou necessidades de complementação da luz natural com luz artificial.

Uma conclusão à qual o projetista poderia chegar diante desse conjunto de simulações seria que os ambientes necessitam de dispositivos de sombreamento para as datas e horários com incidência solar direta, que redirecionem a luz solar bloqueada para o interior do ambiente. Devido às orientações das aberturas para Leste e Oeste há grande variação nas condições de exposição ao Sol e nos níveis de iluminação. Um dispositivo de proteção ideal deveria ser móvel para se ajustar às diferentes condições de insolação dos ambientes.

Embora as conclusões das análises comentadas tanto para as condições de céu claro quanto para as condições de céu encoberto sejam aparentemente óbvias, o mais importante a se observar para os objetivos da pesquisa é a semelhança dessas conclusões obtidas com processos de simulação com graus de complexidade e precisão distintos. Diante da complexidade inerente aos processos de simulação, esse tipo de análise normalmente não é feita no dia-a-dia dos escritórios de arquitetura e problemas aparentemente óbvios não são solucionados pois não são evidenciados. Em ambientes de maior complexidade geométrica e espacial evidenciar problemas pode ser particularmente importante para que soluções sejam pensadas. Poder realizar análises de mapas de iluminâncias como as apresentadas nos anteriores de forma rápida e objetiva, mesmo em espaços de maior complexidade pode representar um importante aprimoramento nos processos de projeto visando seu desempenho.

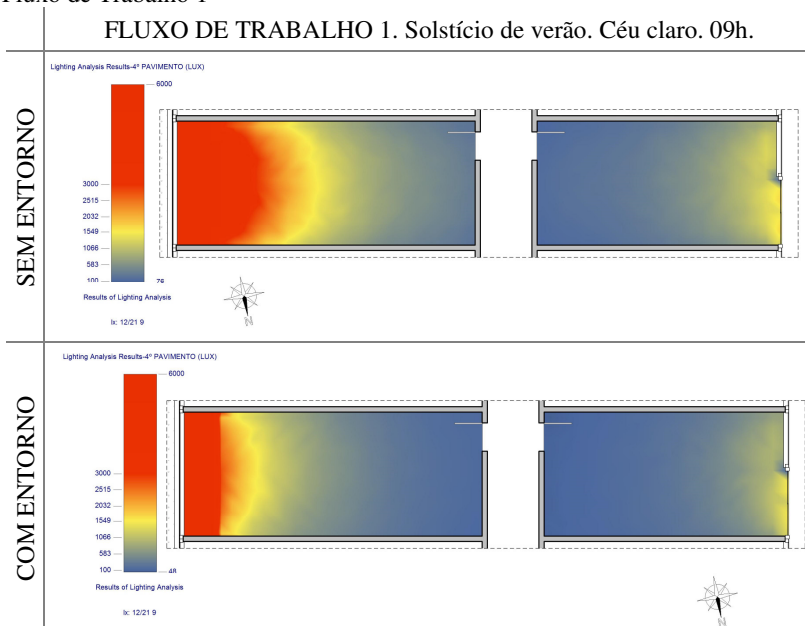
5.3.1.3 Comparativo de resultados com entorno e sem entorno

Os Quadros 5.21, 5.22 e 5.23 apresentam os gráficos dos mapas de iluminâncias obtidos com os modelos geométricos sem o entorno,

representado pela Figura 4.8, e com entorno, representado pela Figura 5.21. Comparando os gráficos da coluna da esquerda com os da coluna da direita, observa-se uma diferença significativa nos resultados. A mancha vermelha indicativa de iluminâncias excessivas (acima de 3000 lux) ficou bastante reduzida quando a obstrução do entorno foi considerada, a tal ponto que se pode distinguir com clareza os limites entre a área que recebe Sol direto e área sombreada pela projeção do pavimento superior. Com o modelo que desconsiderava o entorno esse limite não era perceptível, pois a luz difusa da parcela da abóbada que estaria obstruída também contribuiu para a mancha de iluminação excessiva.

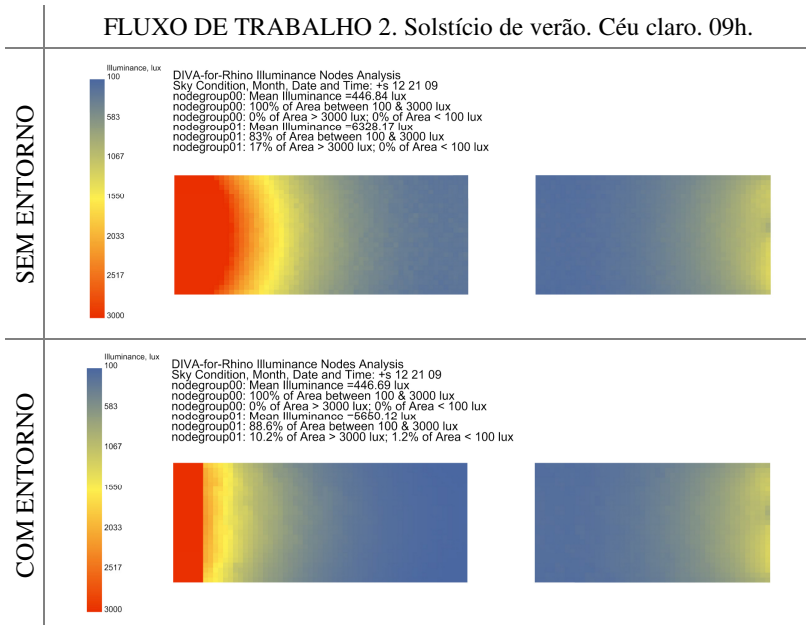
O efeito da inclusão do entorno sobre os resultados foi praticamente o mesmo entre as simulações realizadas com os três fluxos de trabalho, o que demonstra coerência nos resultados para simulações estáticas.

Quadro 5.21 – Mapas de Iluminância. Simulações com entorno e sem entorno. Fluxo de Trabalho 1



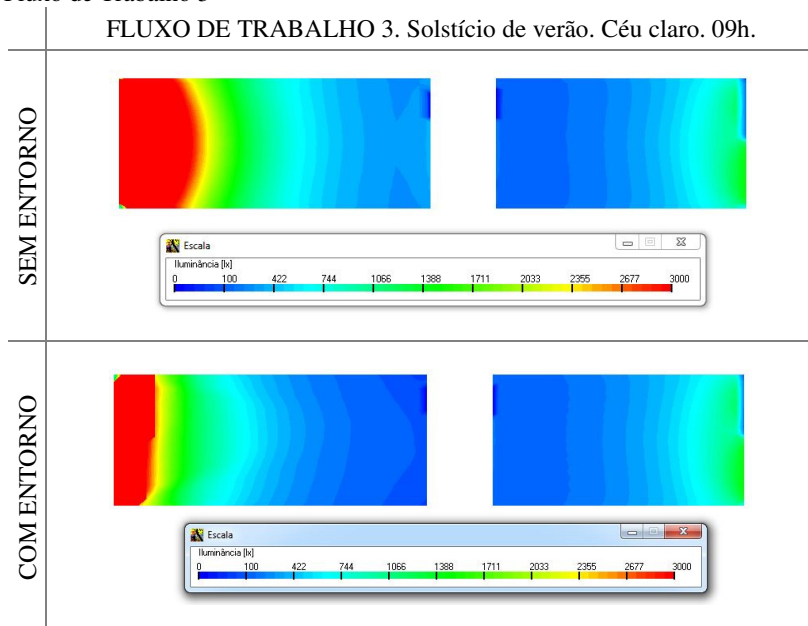
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5.22 – Mapas de Iluminância. Simulações com entorno e sem entorno. Fluxo de Trabalho 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5.23 – Mapas de Iluminância. Simulações com entorno e sem entorno. Fluxo de Trabalho 3



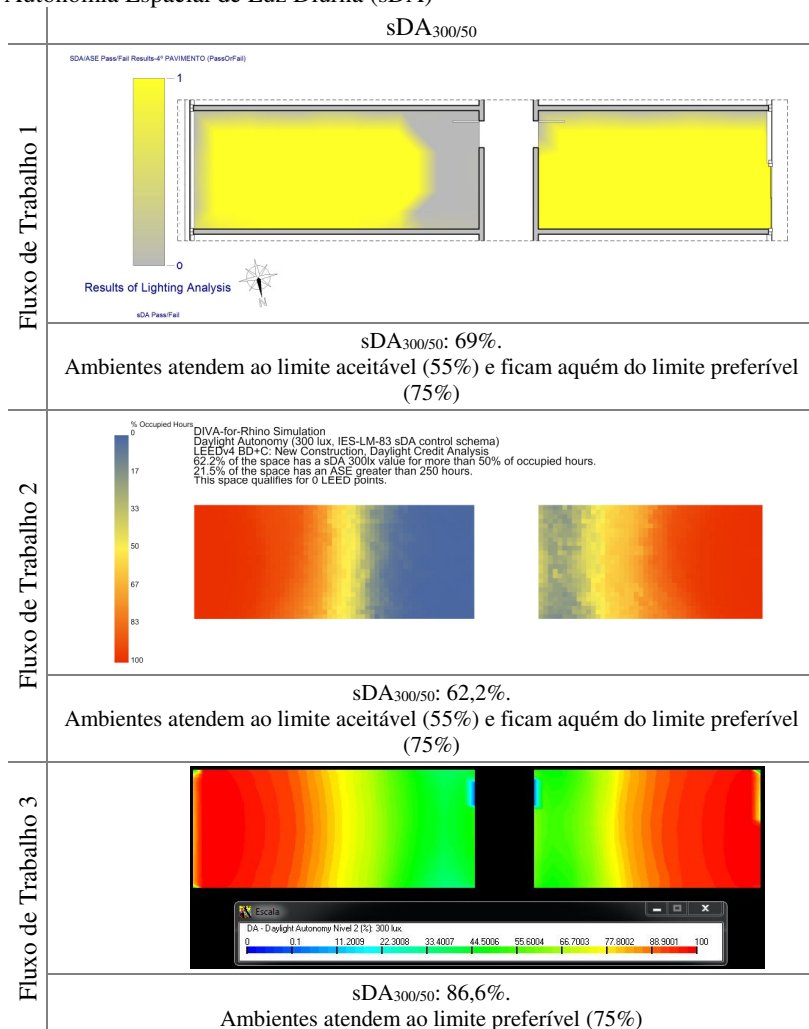
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.2 Simulações dinâmicas

Nesta seção, são apresentados os resultados gráficos e numéricos das métricas dinâmicas selecionadas para análise comparativa.

No Quadro 5.24 estão representados os gráficos de Autonomia de Luz Diurna (DA) e indicados os percentuais das horas úteis anuais em que a iluminância produzida pela luz natural atinge um mínimo de 300lux. Exceção feita para os resultados obtidos com o **FT1**, cuja ferramenta *Lighting Analysis*, do Insight 360, não representa graficamente a DA, mas apenas destaca as áreas dos ambientes em que o percentual de 50% das horas úteis anuais, meta para DA, é atingido. A IES LM-83-12 (IES, 2012) estabelece dois valores percentuais como critério para sDA. O valor mínimo de 55% da área do ambiente atingindo a meta para DA é tido como aceitável, enquanto 75% seria o percentual estabelecido como critério preferível.

Quadro 5.24 – Comparativo para as métricas Autonomia de Luz Diurna (DA) E Autonomia Espacial de Luz Diurna (sDA)



Fonte: Elaborado pelo autor.

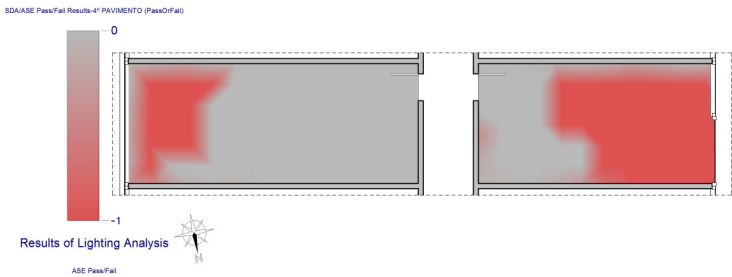
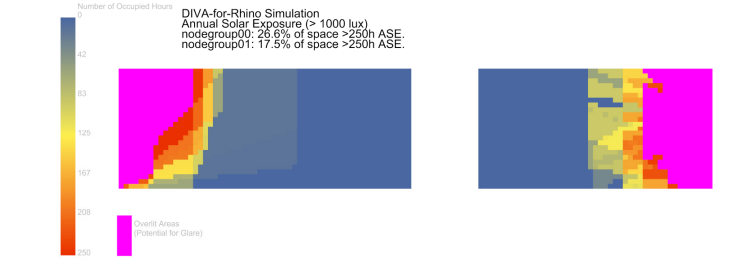

Na simulação realizada pelo **FT1**, 69% da área total dos ambientes atingiram a meta de DA. Esse percentual foi de 62,2% para a simulação pelo **FT2**, e de 86,6% para a simulação pelo **FT3**. Nos dois primeiros casos, os resultados atingiram o critério aceitável e ficaram aquém do

preferível, enquanto no último os ambientes atenderiam também ao critério preferível. Tomando-se por referência as diferenças quantitativas nos resultados dos mapas de iluminâncias, era de se esperar que tais diferenças se refletissem nos resultados de DA. Essa expectativa se confirma em relação aos resultados do **FT3** que, assim como os mapas de iluminâncias mostraram níveis de iluminância superiores, apresentou o percentual de sDA maior que o encontrado pelo **FT2**. Nesses dois fluxos de trabalho foi utilizado o mesmo arquivo climático e a diferença deve decorrer do fato de os programas adotarem modelos de céu e métodos de cálculo distintos.

Comparando-se os resultados do **FT1** com o **FT2**, a diferença não se deu na mesma proporção observada nas simulações estáticas. Isso porque enquanto nas simulações estáticas os parâmetros de radiação solar direta e difusa foram inseridos manualmente, para as simulações dinâmicas são inseridos por meio de arquivo de dados. Mesmo que os métodos de cálculo dos programas do **FT1** e **FT2** sejam semelhantes, baseados no método do Raio Traçado, e ambos adotem os modelos de céu de Perez, os dados climáticos não são os mesmos.

No Quadro 5.25 são apresentados os gráficos de Exposição Anual à Luz Solar (ASE), que representam o número de horas que cada ponto dos espaços supera o limite de 1000 lux exclusivamente pela luz direta do Sol e mostrados os percentuais indicativos do resultado dessa métrica. Mais uma vez a exceção é feita para os gráficos do **FT1**, que indicam apenas as áreas em que esse limite de iluminância é superado por mais que 250h, conforme estabelecido pela IES LM-83-12 (IES, 2012). Graficamente, observam-se diferenças na distribuição das áreas que excedem o limite de 1000 lux por mais que 250h. No **FT1**, a maior área se concentra na sala à direita. No **FT2**, são mais parecidas nos dois ambientes. E no **FT3**, concentraram-se apenas no ambiente à esquerda. Numericamente, os percentuais que expressam a métrica ASE também foram bastante distintos – 32% para o **FT1**, 21,5% para o **FT2** e 11% para o **FT3**. Muito embora os valores absolutos desses percentuais tenham variado quase 300%, em todos os casos, os resultados indicam reprovação dos ambientes quanto ao critério estabelecido.

Quadro 5.25 – Comparativo para a métrica Exposição Anual à Luz Solar (ASE)

| | ASE _{1000/250} | |
|---------------------|---|--|
| Fluxo de Trabalho 1 |  | |
| | <p>ASE_{1000/250}: 32%.</p> <p>Ambientes não atendem ao limite de 10% estabelecido pela IES-LM-83</p> | |
| Fluxo de Trabalho 2 |  | |
| | <p>ASE_{1000/250}: 21,5%.</p> <p>Ambientes não atendem ao limite de 10% estabelecido pela IES-LM-83</p> | |
| Fluxo de Trabalho 3 |  | |
| | <p>ASE_{1000/250}: 11,2%.</p> <p>Ambientes não atendem ao limite de 10% estabelecido pela IES-LM-83</p> | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados encontrados para ASE e sDA, reforçam as conclusões que foram indicadas para as simulações estáticas, quais sejam, as de que há necessidade de um dispositivo de sombreamento que proteja o ambiente da insolação excessiva e redistribua a luz para o interior para suprir a necessidade das áreas mais distantes das aberturas.

6 CONCLUSÕES

As conclusões que se seguem buscam, em última instância, responder à pergunta principal de pesquisa:

Quais as potencialidades e limitações que a recente implementação da tecnologia BIM por empresas e escritórios de arquitetura representa para a aproximação de práticas de simulação da iluminação natural às etapas do processo de projeto?

Desse questionamento inicial foi definido o objetivo geral: Comparar fluxos de trabalho para a realização de simulações e análises de iluminação natural em processos de projeto iniciados em tecnologia BIM, identificando potencialidades e limitações de cada um para a sua efetiva utilização durante etapas formais do desenvolvimento do projeto arquitetônico.

O objetivo geral está diretamente relacionado à **primeira premissa**, que considera como cenário a realidade de escritórios de arquitetura que já tenham implementado o uso do Revit como plataforma BIM para o desenvolvimento de seus projetos.

6.1 SOBRE A DESCRIÇÃO DOS FLUXOS DE TRABALHO

A descrição dos fluxos de trabalho é o resultado do primeiro Objetivo Específico – descrever os fluxos de trabalho e ações necessárias para que um projeto arquitetônico desenvolvido com ferramentas de projeto BIM seja simulado e analisado quanto à iluminação natural com programas representativos de três abordagens distintas de simulação – e decorreu da experimentação indireta do objeto de estudo com os programas de simulação selecionados para compor os fluxos de trabalho. Essa abordagem foi necessária em razão da **segunda premissa**, que “considera que não há no Brasil uma prática corrente significativa de uso de simulações integradas ao processo de projeto” e que “deve haver um interesse particular em avaliar o desempenho dos projetos que ultrapasse as exigências legais relacionadas à iluminação natural”.

Identificar as etapas e os passos necessários para a realização das simulações e análises teve dupla importância. No âmbito do desenvolvimento dos procedimentos metodológicos, foi importante como base para a realização sistemática dos tipos de análises testados e das simulações que tiveram os resultados analisados comparativamente. No âmbito do interesse ou necessidade da equipe de projetos em avaliar o desempenho da iluminação natural, foi importante para delinear os percursos que devem ser percorridos para que um projeto desenvolvido

com o Revit pudesse ser simulado.

Foram evidenciadas, principalmente, as diferenças nas etapas dos processos de simulação entre o **FT1**, que se apoia integralmente em programas desenvolvidos para uma mesma plataforma BIM, e o **FT2** e **FT3**, considerados híbridos por se apoiarem em programas de simulação que utilizam modelos geométricos de base CAD. Observou-se, com a experimentação dos fluxos de trabalho, que a diferença na base tecnológica (BIM ou CAD) dos programas de simulação tem implicação direta nas etapas desses fluxos. Em função da interoperabilidade total dos dados do projeto, a Etapa de Preparação do Modelo BIM pelo **FT1** consiste em mera conferência dos dados constantes no modelo do projeto arquitetônico e a etapa de Preparação do Modelo Geométrico nem sequer se aplica. Fala-se de uma mera conferência dos dados, pois considera-se que o modelo BIM do projeto arquitetônico é construído independentemente do interesse em simular os efeitos da iluminação natural. A interoperabilidade reduzida do **FT2** e **FT3**, por outro lado, torna o processo mais laborioso. Para a Etapa de Preparação do Modelo BIM, que consiste na preparação da vista que será exportada como modelo geométrico, a interoperabilidade reduzida não teve grande influência. Mas, para a etapa de Preparação do Modelo Geométrico, é o que torna necessária uma sequência de ações manuais do usuário que, além de estarem sujeitas a erros, podem desencorajar processos em ciclos iterativos de análise e proposição de soluções.

As diferenças nas etapas de Simulação e de Visualização de Resultados para Análise ficam mais evidentes a partir da análise comparativa das características dos programas.

6.2 SOBRE A ANÁLISE COMPARATIVA DOS FLUXOS DE TRABALHO

As conclusões quanto ao segundo Objetivo Específico – analisar comparativamente os fluxos de trabalho descritos quanto às características dos programas, abordagens de simulação e tipos de análises possíveis – dividem-se em duas partes, conforme as seções subsequentes, e estabelece relações entre as premissas e condições de integração consideradas no trabalho com as características dos programas e suas consequências sobre as etapas do processo de simulação.

6.2.1 Complexidade do processo e as condições de integração

A análise comparativa dos fluxos de trabalho mostrou que as

características dos programas têm consequências diretas sobre as etapas do processo de simulação e análises, especialmente do ponto de vista da operação dos programas e suas ferramentas. A maior ou menor complexidade das ações necessárias pode ser interpretada como fator que venha a favorecer em maior ou menor grau a adoção de um ou de outro fluxo de trabalho, de acordo com as duas condições consideradas na pesquisa para que haja a integração das simulações da iluminação natural ao processo de projeto. As conclusões relacionam essas consequências com as duas condições de integração e refletem a visão do autor desta dissertação, que ora se coloca na posição do projetista, com base na experiência profissional prévia, ora como especialista, com base nos estudos que se fizeram necessários à elaboração deste trabalho. Fundamentam-se, contudo, a partir dos dois paradigmas apontados por Souza (2012) sobre a forma de se pensar o projeto – baseada na visão de mundo de arquitetos projetistas ou na de especialistas em simulações de desempenho – e na visão de Reinhart e Wienold (2011), que apontaram a complexidade dos processos de simulação como uma das principais barreiras para que sejam assimilados pela comunidade de arquitetos.

6.2.1.1 Condição 1: simulações e análises realizadas por arquitetos projetistas

Em relação à primeira condição para integração considerada na pesquisa – de que a operação das ferramentas de simulação e a análise dos resultados sejam realizadas por arquitetos envolvidos diretamente no desenvolvimento do projeto – a avaliação deve considerar o paradigma de pensamento do profissional de projeto. De acordo com Souza (2012), para esses profissionais, tipologias, relações entre elementos que a constituem, forma, materiais, sistemas construtivos, princípios de organização do espaço e vocabulários simbólicos são aspectos que orientam sua atuação, em detrimento de fundamentos físicos e matemáticos, próprios do universo científico. Segundo Geebelen (2003), no decorrer das etapas iniciais de projeto, arquitetos estariam mais interessados em resultados qualitativos que quantitativos. Assim, a simplicidade do processo e a facilidade em associar parâmetros de simulação com aspectos qualitativos do projeto são importantes para que as ações não desviem o foco de seu objetivo principal que é projetar o edifício considerando todos os seus aspectos multidisciplinares.

Conclui-se diante dessa condição que:

- O FT1 é favorecido em função:

De sua interface com o usuário, em que todo o processo ocorre no

ambiente de trabalho que lhe seria mais familiar;

Da interoperabilidade de todos os dados de projeto do modelo BIM com os algoritmos de cálculo;

Da forma direta com que são realizadas as simulações, que possibilita a obtenção de resultados com um número reduzido de ações;

Da possibilidade de visualização dos resultados projetada sobre o modelo BIM do projeto arquitetônico.

- Favorecem a adoção do FT2 por arquitetos projetistas:
A interface do DIVA, desde que esse profissional tenha domínio básico do Rhinoceros e a disponibilidade para se responsabilizar pela etapa de Preparação do Modelo Geométrico, que demandaria tempo e desvio de foco da atividade principal de projeto. A tendência, nesse caso, seria a adoção de valores pré-definidos para os parâmetros avançados do Radiance e menor grau de exigência com a precisão dos resultados.
- Embora o Apolux tenha sido desenvolvido com o intuito de auxiliar o projetista em decisões relacionadas à iluminação, o FT3 é o que demanda do usuário a maior quantidade de ações e o conhecimento de um grande número de parâmetros relacionados à iluminação natural que não estão diretamente associados à produção arquitetônica. A maior complexidade dos procedimentos não favorece a utilização pelo arquiteto projetista.

6.2.1.2 Condição 2: simulações e análises realizadas com a colaboração de especialista em simulações

Em relação à segunda condição de integração considerada, – de que a equipe de projeto conte com a colaboração de um especialista para realização das simulações, análise dos resultados e auxílio à tomada de decisão – a avaliação deve considerar o paradigma de pensamento do especialista em simulação. Como o trabalho de Souza (2012) se concentra no desempenho térmico, a forma de pensar desse profissional é reinterpretada. Entende-se aqui que, de forma análoga ao que coloca a autora, um especialista em iluminação natural seria um profissional mais habituado a tratar de parâmetros físicos e matemáticos inerentes aos processos de simulação. O foco de sua atuação estaria mais concentrado na avaliação do desempenho de uma solução dada que na concepção dessa solução arquitetônica em seu contexto interdisciplinar.

Conclui-se sobre essa hipótese que:

- O FT1 dificilmente seria adotado por um especialista, pois a

simplicidade na operação das ferramentas tem como contraponto o controle reduzidíssimo de parâmetros de simulação e a consequente incerteza do usuário quanto aos critérios definidores dos parâmetros adotados automaticamente pelo programa e, conseqüentemente, sobre a precisão e confiabilidade dos resultados. Como visto na análise comparativa dos fluxos de trabalho, a escolha dos modelos de céu pode ser feita de forma intuitiva. Entretanto, a necessidade de inserção manual de dados de radiação – GHI, DHI e DNI – para as simulações estáticas é um fator de incerteza que não pode ser desprezado. Isso também pode ser interpretado como uma falha inerente à ferramenta Lighting Analysis que, de acordo com a Autodesk (2017), foi concebida para ser operada por um arquiteto seja capaz de usá-la sem que saiba as diferenças entre os modelos de céu ou distinguir dados de radiação solar. Um arquiteto projetista que usualmente não tem domínio sobre o impacto desses dados para os resultados, poderia, entretanto realizar simulações com valores equivocados inadvertidamente e gerar resultados incoerentes com a realidade.

- A colaboração de um especialista seria também recomendável para simulações mais precisas através do FT2. Esse profissional poderia se responsabilizar pelo processo de simulação desde a etapa de Preparação do Modelo Geométrico e seria indispensável a definição dos melhores ajustes de parâmetros específicos do Radiance. Como o DIVA é o programa investigado com a maior diversidade de métricas para análise da iluminação, o auxílio de um especialista é importante também para definir, juntamente com a equipe de projetistas, o conjunto de métricas e metas de desempenho pertinentes às especificidades de cada projeto, de forma semelhante à proposta de Reinhart e Wienold (2011) para a construção de um Painel Analítico da Iluminação Natural, mencionada no referencial teórico.
- O FT3 é o fluxo de trabalho que demanda do usuário o maior número de ações e exige maior domínio sobre um grande número de informações que precisam ser manipuladas ao longo das etapas do processo de simulação, sendo, por isso, aquele para o qual a colaboração de um especialista é a mais recomendável. A etapa de Preparação do Modelo Geométrico, por exemplo, é influenciada pelas interfaces dos programas com o usuário, pela falta de interoperabilidade dos dados de projeto e, principalmente, pelo método de cálculo da Radiosidade, que impõe uma limitação ao tamanho do modelo geométrico, o que não ocorre da mesma forma

com os programas que utilizam o método do Raio Traçado. Os cuidados especiais na Preparação do Modelo Geométrico ficaram mais evidentes quando foram realizadas as simulações que incluíram o entorno construído, pelas razões descritas na seção 5.2.1.5. Em contrapartida, o APOLUX é o programa que possibilita uma visão mais aprofundada sobre todo o processo de simulação e sobre a interação das diversas variáveis que influenciam o desempenho da iluminação natural. Sua interface oferece possibilidades de controle de parâmetros - relativos aos dados de projeto, à resolução do modelo, à resolução da abóbada, às condições de céu, entre outros - em uma linguagem gráfica e coerente com todo o contexto de simulação.

6.2.2 Tipos de simulação, ferramentas de análise e etapas de projeto.

A **terceira premissa**, que considera a importância de simulações dinâmicas para a análise de desempenho em complemento às simulações estáticas, foi determinante na definição dos programas a serem investigados e direcionou o foco do trabalho para essas duas formas de análise de simulações da iluminação natural. A abordagem exploratória dos fluxos de trabalho, entretanto, trouxe à tona também a importância de algumas ferramentas destinadas à análise da geometria solar durante o processo de projeto.

O papel dessas ferramentas de análise consiste em auxiliar as decisões de projeto que influenciam no desempenho da iluminação natural desde as fases relacionadas à Concepção do Partido Arquitetônico àquelas correspondentes ao Desenvolvimento Inicial. Na medida em que permitem relacionar a definição de elementos arquitetônicos e do entorno construído com a trajetória solar aparente e respectivos efeitos de insolação e sombras, elas auxiliam a compreensão dos resultados gráficos das simulações, principalmente as estáticas. As ferramentas de trajetória solar e sombras do Revit foram associadas ao **FT1** por serem integrantes da plataforma BIM - tal como os programas de simulação *Insight 360* e *Autodesk 360* - mas podem beneficiar qualquer um dos três fluxos de trabalho estudados, em razão de serem ferramentas integradas à plataforma onde o projeto é desenvolvido.

A visualização de máscaras de obstrução através do APOLUX, abordada na seção 5.1.3.4, também é uma ferramenta de análise que pode ser integrada ao processo de projeto de forma independente do fluxo de trabalho adotado para simulações estáticas ou dinâmicas. Sua integração

poderia ocorrer de forma mais simples e direta, através do módulo Fractal, ou com maior riqueza de informações através do módulo Foton, mas com um processo mais laborioso. Embora seja de grande valia para orientar decisões de projeto relacionadas à orientação e proteção solares, a análise de máscaras de obstrução também requer um nível de conhecimento mais especializado.

A análise do Quadro 5.6, abordada na seção 5.2.2, mostrou que as simulações estáticas se prestam à avaliação da Disponibilidade da Luz Natural e do Conforto Humano através de diferentes formas de tratamento de dados relativos a Iluminâncias e Luminâncias. DIVA e APOLUX, associados ao **FT2** e **FT3**, respectivamente, contemplaram os mesmos fenômenos, embora com abordagens e níveis de profundidade e de controle de parâmetros diferentes. As ferramentas do **FT1**, por sua vez mostraram-se limitadas para avaliação de Conforto Humano, principalmente por não permitirem visualizar resultados de simulação em termos de luminâncias. Para o projetista, a análise dos resultados de simulações estáticas pode ser muito útil durante as fases do Desenvolvimento Inicial para avaliar o efeito de uma solução proposta em projeto para condições hipotéticas extremas a que o edifício venha a ser submetido. Auxiliam na associação dos resultados de simulações à solução arquitetônica proposta. Mapas de iluminâncias de um ambiente poderiam, por exemplo, ser analisados em paralelo com uma máscara de um ponto interno, ou com uma vista interna que mostre a penetração solar para a mesma data, horário e condição de céu¹. Dessa forma, simulações estáticas, associadas às ferramentas de análise, seriam mais informativas ao projetista ao longo do desenvolvimento do projeto que as simulações dinâmicas, pois permitem relacionar diretamente as características arquitetônicas dos ambientes e as condições momentâneas da abóbada aos resultados das simulações. Esse tipo de análise de simulações estáticas com o auxílio de ferramentas de análise de trajetória solar pode ocorrer de forma mais simplificada, com o **FT1**, ou mais aprofundada, com o **FT3**. Como o DIVA não conta com ferramentas de análise de geometria solar, a associação só poderia ocorrer de forma descentralizada, recorrendo a outros conjuntos de aplicativos complementares que podem ser associados ao *Rhinoceros*, tais como *Ladybug* e *Grasshopper*, mas que não foram explorados nesta pesquisa.

O propósito das simulações dinâmicas, de acordo com Mardaljevic

¹ A análise da condição, nesse caso, só seria possível com a máscara gerada no módulo Foton, que reproduz a distribuição das luminâncias na abóbada.

(2000), é obter uma medida realística para o desempenho dos edifícios considerando o período de um ano. O autor ressalva, entretanto, que a sumarização das métricas pode implicar na perda de informações significativas e/ou instrutivas para o processo de projeto, tais como o efeito de um elemento de proteção para um horário crítico. Simulações dinâmicas devem, por essa razão, ser avaliadas em complemento às estáticas e são úteis para avaliar o desempenho anual da iluminação natural em termos comparativos para diferentes alternativas de projeto. Os três fluxos de trabalho explorados cumprem esse papel com níveis diferentes de profundidade. O **FT1** é o mais limitado tanto em termos de métricas quanto de detalhamento dos dados de saída. Fornece resultados para análise apenas de métricas que já possuem métodos e critérios normatizados. O **FT2** calcula todas as principais métricas dinâmicas que vêm sendo elaboradas em pesquisas, incluindo-se a avaliação do conforto visual por meio do índice DGP, que não pode ser obtido pelos outros dois fluxos de trabalho. Com o **FT3**, embora o APOLUX gere gráficos apenas das métricas DA e UDI, são fornecidos também resultados na forma de planilha que possibilitam análises mais pormenorizadas e obtenção de gráficos para outras métricas, sendo, para isso, necessário contar com o auxílio de programas complementares, como o Excel e/ou Surfer.

6.3 SOBRE A COMPARAÇÃO GRÁFICA E QUALITATIVA DOS RESULTADOS

O terceiro Objetivo Específico – comparar gráfica e qualitativamente os resultados obtidos por simulações estáticas e dinâmicas com os programas que caracterizam cada fluxo de trabalho analisado – foi definido para compreender a influência da escolha do programa de simulação e respectivo fluxo de trabalho sobre os resultados obtidos para a análise de desempenho do projeto quanto à iluminação natural.

A comparação dos gráficos das simulações estáticas mostrou uma semelhança muito grande entre os resultados obtidos com os três fluxos de trabalho em termos de padrão de distribuição de iluminâncias. A avaliação qualitativa desses aspectos não teria, portanto, tanto impacto em função do programa de simulação utilizado. Quantitativamente, por outro lado, diferenças foram observadas a despeito do esforço empreendido para compatibilização dos parâmetros que caracterizam as condições de céu. Análises em termos de suficiência da iluminação natural ou em termos de valores absolutos de iluminância, por sua vez, são mais influenciadas pelo programa de simulação adotado.

A análise comparativa das simulações dinâmicas mostrou resultados mais discrepantes, pois, de certa forma, a variação encontrada em um momento estático se amplifica quando os cálculos se estendem a todas as horas úteis do ano.

Dos programas analisados com os três fluxos de trabalho, o DIVA é o único que utiliza motores de cálculo (RADIANCE e DAYSIM) validados experimentalmente para simulações dinâmicas (REINHART; WALKENHORST, 2001) e, por essa razão seus resultados são tomados como referência.

Embora não tenha sido objetivo da pesquisa identificar com rigor as causas das diferenças encontradas nos resultados das simulações, os procedimentos adotados e as pesquisas para o referencial teórico permitiram identificar alguns fatores importantes e que devem ser compreendidos para a correta realização de simulações de iluminação natural. As diferenças quantitativas das simulações estáticas podem ser decorrentes, entre outros fatores, das diferenças entre os modelos de céu adotados por cada programa, que podem apresentar padrões de distribuição das luminâncias na abóbada distintos, e dos parâmetros utilizados para a caracterização momentânea das condições de céu. Nos resultados das simulações dinâmicas, as diferenças também podem estar associadas à origem dos dados climáticos, que são interpretados pelos algoritmos dos modelos de céu para caracterizar suas condições para cada hora simulada. A origem dos dados climáticos contrasta o **FT1** com o **FT2** e **FT3**. Para o **FT1** os dados climáticos são inseridos automaticamente da base de dados do *Green Building Studio*, que é a base utilizada pela Autodesk, enquanto no **FT2** e **FT3** o usuário tem liberdade para escolher o arquivo de dados climáticos em formato EPW que será inserido. Os modelos de céu diferenciam o **FT3**, que adota o modelo de Kittler, consolidado pela norma ISO 15.469:2004, com o **FT1** e **FT2**, que adotam o modelo de Perez e modelos padrão recomendados pela CIE.

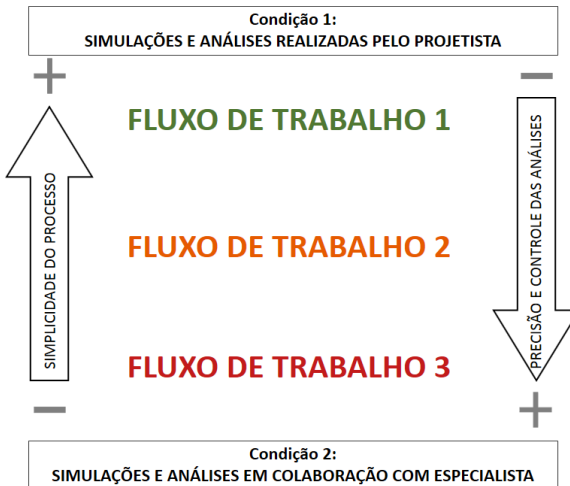
Uma investigação mais metódica e específica seria necessária para determinar o real impacto das diferenças conceituais dos programas sobre os resultados, o que não é objeto deste trabalho.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como síntese da comparação proposta como objetivo geral da pesquisa, pode-se concluir que as características dos programas de simulação são fatores que influenciam bastante a viabilidade de uma ou outra das condições de integração consideradas. De acordo com essas características, os fluxos de trabalho investigados podem ser classificados

segundo o grau de complexidade do processo de simulação e, num sentido inversamente proporcional, segundo o grau de precisão e profundidade com que permitem avaliar e compreender os fenômenos determinantes para o desempenho da iluminação natural. Essas relações são ilustradas pela Figura 6.1.

Figura 6.1 – Relação dos Fluxos de Trabalho com as condições de integração das simulações e análises ao processo de projeto.



Fonte: Elabordo pelo autor.

Quanto mais simples o processo, mais passível ele se torna de ser utilizado por arquitetos projetistas (condição 1). Por outro lado, na medida em que o programa utilizado possibilitou simular maior diversidade de métricas e fazer análises mais aprofundadas, o processo tornou-se mais complexo e laborioso – exigindo do usuário maior controle de parâmetros e domínio de conhecimentos específicos do universo das simulações – e fazendo com que a integração ao processo de projeto fosse factível somente com a colaboração de um especialista (condição 2). Considerando-se essa escala subjetiva de classificação, a sequência numérica atribuída aos fluxos de trabalho – **FT1**, **FT2** e **FT3** – reflete essa progressão entre a simplicidade do processo e a profundidade das análises.

As conclusões do segundo objetivo específico também destacam a importância de ferramentas de análise da geometria solar para auxiliar na compreensão dos resultados de simulações estáticas, como os mapas de iluminâncias. Essa avaliação conjunta pode ser feita tanto pelo **FT1**,

através de estudos de insolação e sombreamento, quanto pelo **FT3**, através da análise de máscaras, que ainda permitem ainda visualizar graficamente a distribuição de luminâncias da abóbada para as condições de céu simuladas. Com isso, pode-se dizer que esses dois fluxos de trabalho seriam os mais recomendados para análises estáticas.

O fato de a análise comparativa dos resultados de simulações estáticas (mapas de iluminâncias) ter se mostrado qualitativamente muito semelhante aos dos demais fluxos de trabalho faz do **FT1** uma alternativa interessante para a realização deste tipo de simulação concomitantemente ao desenvolvimento do projeto, dado que o processo é bem mais simples e fornece resultados mais rapidamente. Ressalvados os cuidados necessários nas configurações do tipo de céu, a simples possibilidade de realizar esse tipo de análise de forma rápida e direta pode representar um grande avanço para o uso de simulações no processo de projeto.

Para simulações dinâmicas, por outro lado, as discrepâncias na comparação dos resultados deixaram em dúvida a validade desse tipo de análise pelo **FT1**. Como o processo para realização de simulações dinâmicas é mais trabalhoso e mais demorado pelo **FT3**, pode-se concluir que o **FT2** seria o mais recomendado avaliações anuais de desempenho da iluminação natural.

Respondendo à pergunta de pesquisa, o Quadro 6.1 destaca as principais potencialidades e limitações de cada fluxo de trabalho.

A partir da experiência com cada um dos fluxos de trabalho pode-se concluir sobre as principais contribuições da implementação da tecnologia BIM para a incorporação de simulações e análises da iluminação natural aos processos de projeto, respondendo, assim, à pergunta de pesquisa que motivou seus objetivos.

A principal contribuição observada com o Fluxo de Trabalho 1 é a interoperabilidade total dos dados de projeto, possível graças a incorporação das ferramentas de simulação e análise à própria plataforma de projeto BIM.

Para as abordagens híbridas, representadas pelo Fluxos de Trabalho 2 e 3, a principal contribuição da tecnologia BIM é a disponibilidade de um modelo geométrico sempre consistente com o estágio de desenvolvimento do projeto. Mesmo que haja a necessidade, em decorrência da interoperabilidade reduzida, de tratamento manual desse modelo antes que ele possa ser simulado, esses procedimentos tendem a ser mais rápidos e menos sujeitos a inconsistências com o projeto arquitetônico do que se houvesse a necessidade de confecção do modelo geométrico para o propósito das simulações.

Quadro 6.1 – Potencialidades e limitações de cada fluxo de trabalho.

| | PRINCIPAIS POTENCIALIDADES | PRINCIPAIS LIMITAÇÕES |
|---------------------|--|--|
| FLUXO DE TRABALHO 1 | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Simplicidade do processo de simulação. ➤ Interface unificada com a plataforma de projeto. ➤ Interoperabilidade total dos dados de projeto do modelo BIM. ➤ Possibilita a análise de mapas de iluminâncias em conjunto com análises de trajetória solar, insolação e sombras. ➤ Custo com a obtenção de licenças já estaria assimilado aos custos do escritório. ➤ Processamento em nuvem, com obtenção de resultados em tempo | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Custo adicional para cada simulação realizada ➤ Limitação dos tipos de simulação disponíveis ➤ Controle reduzido dos parâmetros de simulação ➤ Incoerência na inserção de dados de radiação ➤ Impossibilidade de avaliar o conforto visual com base em dados de luminâncias. |
| FLUXO DE TRABALHO 2 | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Utilização de motores de cálculo amplamente reconhecidos pela indústria. ➤ Possibilita a obtenção das principais métricas estáticas e dinâmicas, que permitem avaliar todos os aspectos do desempenho da iluminação natural. ➤ Admite modelos geométricos sem qualquer restrição de tamanho. | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Interoperabilidade reduzida dos dados de projeto extraídos do modelo BIM. ➤ Necessidade de preparação do modelo geométrico ➤ Ausência de ferramentas de análise de Geometria Solar. ➤ Parâmetros avançados de simulação que não apresentam uma relação clara com o vocabulário arquitetônico. ➤ Custo adicional com a obtenção de licenças dos programas de simulação. |
| FLUXO DE TRABALHO 3 | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Controle completo de parâmetros de simulação com interface que permite associar as variáveis aos fenômenos analisados ➤ Possibilita a análise de simulações estáticas em conjunto com análises de máscaras, trajetória solar, insolação e sombras. ➤ Maior controle sobre a precisão dos resultados. ➤ Disponibilidade de ferramentas para auxiliar o projeto de protetores solares de forma integrada à análise de máscaras de obstrução. ➤ Possibilidade de visualização da distribuição de luminâncias na abóbada para cada tipo de céu. ➤ Gratuidade do programa, que deve ser valorizado como iniciativa nacional. | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Interoperabilidade reduzida dos dados de projeto extraídos do modelo BIM. ➤ Necessidade de preparação do modelo geométrico ➤ Necessidade de limitação do tamanho do modelo geométrico a ser simulado. ➤ Complexidade do processo de simulação. |

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.5.1 Quanto aos programas computacionais investigados

Uma primeira limitação da pesquisa está relacionada à seleção dos programas computacionais utilizados no experimento e que definiram os fluxos de trabalho investigados. Os critérios que nortearam as escolhas foram apresentados na seção 3.2 e as características dos fluxos de trabalho que se desejava comparar foram apresentadas na seção 3.4. Inicialmente, foram identificadas etapas do processo que fossem comuns aos três fluxos de trabalho e características comuns aos programas de simulação que permitissem compará-los. E embora se tenha procurado revelar aspectos que pudessem ser mais gerais e aplicáveis fluxos de trabalho compostos por outros programas, os resultados da pesquisa refletem as particularidades das ferramentas selecionadas.

Quanto à plataforma para criação de modelos BIM e representações do objeto arquitetônico, a escolha do Revit delimita a abrangência do FT1. As ferramentas de simulação e análise, nesse caso, não poderiam ser utilizadas caso outra plataforma BIM fosse adotada. A interoperabilidade observada só ocorreu por se tratarem de ferramentas de um mesmo fabricante e, portanto, terem sido desenvolvidas para que fossem mesmo compatíveis. A interoperabilidade via formato IFC não foi investigada, pois a pesquisa para o referencial teórico indicou que esse formato ainda não se encontra suficientemente desenvolvido para intercambiar os dados relevantes para simulações de iluminação natural. O FT2 e o FT3, por sua vez, sofreriam impacto menor com a adoção de outra plataforma BIM. Apenas diferenças na forma de gerenciar as vistas do modelo BIM e exportar modelos geométricos seriam observadas e afetariam a etapa de Preparação do Modelo BIM. Ainda assim a essência dos procedimentos seria basicamente a mesma e as etapas subsequentes do processo seriam praticamente as mesmas.

A escolha de outros programas de simulação, notadamente como alternativas ao DIVA e ao APOLUX, estas sim, configurariam fluxos de trabalho com substancialmente distintos mesmo que ainda apresentassem aspectos comuns.

Assim, sugere-se para investigações futuras que se realizem estudos comparativos similares ao desta pesquisa considerando a utilização de outras plataformas BIM e outros programas de simulação.

6.5.2 Quanto a metodologia utilizada

Buscava-se com o estudo comparativo, compreender o processo de simulação da iluminação natural principalmente sob o ponto de vista de quem projeta e deve lidar com questões intervenientes de naturezas multidisciplinares, em contraponto com o ponto de vista de um especialista, que se concentra em aspecto específico da edificação. Entretanto, a realização da experimentação indireta dos fluxos de trabalho e todas as análises subsequentes foram realizadas pelo próprio autor da pesquisa, refletindo sua visão pessoal sobre os processos. Assim a pesquisa contribui para esclarecer uma prática que ainda não está estabelecida na indústria de AEC no Brasil, mas não reflete estatisticamente um senso comum dos profissionais atuantes no mercado.

Trabalhos futuros poderiam, portanto, investigar a aplicação dos mesmo fluxos de trabalho por outros profissionais de arquitetura, afim de se obter uma amostragem mais realista da percepção sobre a complexidade e viabilidade de incorporar as práticas de simulação aos processos de projeto.

A metodologia para a descrição dos fluxos de trabalho também pode ser melhor desenvolvida enquanto um processo de negócio inerente à indústria de AEC. Uma importante contribuição da banca defesa foi a sugestão de descrever os fluxos de trabalho segundo a notação BPMN¹, recomendada pelo buildingSMART para representar processos de trocas de informações inerentes à tecnologia BIM. Nesse sentido, a metodologia usada nesta pesquisa poderia ser um ponto de partida para uma compreensão mais aprofundada desses e de outros fluxos de trabalho semelhantes, visando sua aplicação em processos de projeto inseridos em diferentes contextos.

6.5.3 Quanto aos tipos de simulações e análises aplicáveis ao processo de projeto

Um dos aspectos considerados no estudo comparativo dos fluxos de trabalho foi os tipos de simulações e análises que cada programa

¹ BPMN é uma sigla para expressão em inglês *Business Process Modeling Notation* (Notação para Modelagem de Processos de Negócios, em tradução do autor). Essa notação é padronizada pelo *Information Delivery Manual* (IDM), cuja metodologia foi desenvolvida pelo buildingSMART. Fonte: iug.buildingsmart.org. Acesso em setembro de 2017.

permitia realizar. Buscou-se associar os tipos de análises às etapas do processo de projeto. Entretanto, há uma infinidade de análises que podem ser feitas, que variam em diversos aspectos de um programa para outro, e que não encontram amparo na legislação brasileira. Isso dificultou que se estabelecesse de forma mais clara a relação entre os tipos de análises e em que momento do desenvolvimento do projeto elas podem de fato contribuir para a solução arquitetônica.

Assim, foi percebida a necessidade de uma pesquisa mais aprofundada que busque estabelecer um escopo de métricas e análises aplicáveis a tipologias arquitetônicas e contextos organizacionais específicos e peculiares à realidade brasileira.

Ainda sobre os tipos de simulações e análises, sabe-se que há uma forte relação entre o desempenho da iluminação natural e o desempenho térmico, os quais, conjuntamente influenciam na eficiência energética do edifício, sendo essa uma das categorias de critérios defendidas por Reinhart (2014) para classificar o desempenho da iluminação natural. Dos programas utilizados na pesquisa, tanto o DIVA quanto o Revit dispõem de meios para analisar o desempenho térmico em conjunto com o desempenho lumínico, mas que não fizeram parte do escopo da pesquisa.

A última sugestão para pesquisas futuras seria, portanto, a realização de estudo comparativo semelhante a este para avaliar a análise integrada das três categorias de critério – disponibilidade da luz natural, conforto ambiental e eficiência energética – tendo como ponto de partida o modelo BIM.

REFERÊNCIAS

ANDERSEN, M.; GAGNE, J. M. L.; KLEINDIENST, S. Interactive expert support for early stage full-year daylighting design: A user's perspective on Lightsolve. **Automation in Construction**, v. 35, p. 338–352, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.014>>.

ANDERSEN, M.; GUILLEMIN, A. Daylight dynamics to guide early stage design: A user-driven goal-based approach to “good” lighting. **PLEA 2013**, 19th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future, 2013. Disponível em: <http://infoscience.epfl.ch/record/188742/files/AndersenGuillemmin2013_Lightsolve-PLEA_final2.pdf>.

ANDRADE, Max Lira Veras X. de; RUSCHEL, Regina Coeli. BIM: Conceitos, cenário das pesquisas publicadas no Brasil e tendências. **Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído**, São Carlos, p.602-613, 18 nov. 2009.

APOLUX IV. Disponível em: <<http://foton.arq.ufsc.br/>>. Acesso em: setembro de 2016.

AsBEA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS ESCRITÓRIOS DE ARQUITETURA. **Guia AsBEA de Boas Práticas em BIM - Fascículo 2 - Fluxo de Projetos em BIM: Planejamento e Execução**. Brasil, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.532 1995 - Elaboração de projetos de edificações: Arquitetura**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 15.215-1 - Iluminação Natural**. Parte 1: Conceito Básicos e Definições. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15.215-2 - Iluminação Natural**. Parte 2: Procedimentos de Cálculo para a Estimativa da Disponibilidade de Luz Natural. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15.215-3 - Iluminação Natural**. Parte 3: Procedimentos de Cálculo para Determinação da Iluminação Natural em Ambientes Internos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15.215-4 - Iluminação Natural.** Parte 4: Verificação Experimental das Condições de Iluminação Interna de Edificações - Método de Medição. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15.575-1 – Edificações Habitacionais – Desempenho.** Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR ISO/CIE 8995-1.** Iluminação de Ambientes de Trabalho. Parte 1: Interior. Rio de Janeiro, 2013.

AUTODESK. **Ecotect Analysis Discontinuation FAQ.** Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/support/ecotect-analysis/learn-explore/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/Ecotect-Analysis-Discontinuation-FAQ.html>>. Acesso em 15 de setembro 2016.

_____. **Autodesk Knowledge Network: Light Analysis for Revit.** Disponível em: < <https://knowledge.autodesk.com/search-result/caas/CloudHelp/cloudhelp/ENU/BPA-PerformanceStudies/files/GUID-5AE6A81D-B170-47A5-8BF8-190235F25287-htm.html>>. Acesso em 15 de fevereiro de 2017.

_____. **How Illuminance Rendering Works in Revit.** Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/search-result/caas/CloudHelp/cloudhelp/ENU/BPA-PerformanceStudies/files/GUID-C6C58987-9C00-4338-B6A6-B5C9864574B8-htm.html>>. Acesso em: 26 de agosto de 2016a.

BELO HORIZONTE. Lei nº 9.725 de julho de 2009. Institui o Código de Edificações do Município de Belo Horizonte e dá outras providências. **Diário Oficial do Município**, 16 de jul. 2009.

_____. Lei nº 9.959 de 20 de julho de 2010. Altera as leis nº 7.165/96 - que institui o Plano Diretor do Município de Belo Horizonte - e nº 7.166/96 - que estabelece normas e condições para parcelamento, ocupação e uso do solo urbano no Município -, estabelece normas e condições para a urbanização e a regularização fundiária das Zonas de Especial Interesse Social, dispõe sobre parcelamento, ocupação e uso do solo nas Áreas de Especial Interesse Social, e dá outras providências. **Diário Oficial do Município**, 21 jul. 2010.

BEST DIRECTORY. **Radiance.** Disponível em: <<http://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/radiance>>. Acesso em 15 de

setembro de 2016.

_____. **Ecotect**. Disponível em: <<http://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/radiance>>. Acesso em 15 de setembro de 2016a.

_____. **Groundhog**. Disponível em: <<http://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/radiance>>. Acesso em 15 de setembro de 2016b.

_____. **Insight 360**. Disponível em: <<http://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/radiance>>. Acesso em 15 de setembro de 2016c.

BOUBEKRI, Mohamed. **Daylighting, Architecture and Health: Building Design Strategies**. 1. Oxford: Elsevier. 2008. 144 p.

BOYCE, Peter. **Human Factors in Lighting**. 2. London: Taylor and Francis. 2003. 584p.

BRÍGITTE, G. T. N.; RUSCHEL, R. C. Integrated Model Supporting Environmental Performance Simulations in the Early Stages of Building Design. In: Conference of International Building Performance Simulation Association, 13th, 2013, Chambéry. **Proceedings of BS2013**. Chambéry: IBPSA, 2013. p. 856–861

BuildingSMART. **History**. Disponível em: <<http://buildingsmart.org/about/about-buildingsmart/history>>. Acesso em: 04 mai. 2017.

CHRISTIAN, L.; DIONNE, J. **A Construção do Saber: manual de metodologia da pesquisa em ciências humanas**. Tradução de Heloísa Monteiro e Francisco Settineri. Porto Alegre: Artes Médicas Sul; Belo Horizonte: UFMG, 1999. 340p.

CLARO, A. **Método para Determinação da Estimativa Anual de Luz Natural Utilizando o Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade**. 2015. 165 p. Tese (Progressão a professor titular). Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CUNHA, A. DE V. L. DA. **Avaliação do Programa Apolux Segundo Protocolos de Modelos de Céu do Relatório Técnico CIE 171:2006**.

Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

DAYSIM. Home. Disponível em: <<http://daysim.ning.com/>>. Acesso em 15 de setembro de 2016.

DELATORRE, V. **Potencialidades e limites do BIM no ensino de arquitetura**: uma proposta de implementação. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

DONN, M.; SELKOWITZ, S.; BORDASS, B. Simulation in the Service of Design: Asking the Right Questions. In: Conference of International Building Performance Simulation Association, 13th, 2009, Glasgow. **Proceedings of BS2009**. Glasgow: IBPSA, 2009. p. 1314–1321.

EASTMAN, Chuck; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008.

EASTMAN, Chuck; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

GALATIOTO, A.; BECCALI, M. Aspects and issues of daylighting assessment: A review study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. [S.l.; s.n.], 2016

GEEBELEN, B. **Daylighting Computation Methods: From Dot Chart to Digital Simulation**. Syllabus Studiedag Daglichttoetreding in Gebouwen, Antwerpen: KVIV, 2003. Disponível em: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/160607/1/kviv_geebele_n.pdf%20->. Acesso em: 22 de junho de 2015.

GHERRI, B. **Assessment of Daylight Performance in Buildings: Methods and design strategies**”. 1. ed. Southampton: WIT, 2015. 197 p.

GOVERNO DE SANTA CATARINA. **Caderno de Apresentação de**

Projetos em BIM. Santa Catarina, 2015.

HESCHONG, L.; SAXENA, M.; HIGA, R. Improving Prediction of Daylighting Performance. In: Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2010, Pacific Grove, CA. **Proceedings ACEEE 2010.** Pacific Grove, CA: ACEEE, 2010. p. 103-116.

HITCHCOCK, R. J. Advancing Lighting and Daylighting Simulation: The Transition from Analysis to Design Aid Tools. In: Conference of International Building Performance Simulation Association, 5th, 1995, Madison. **Proceedings of BS1995.** Madison: IBPSA, 1995. [p.] Disponível em: <<http://cumincad.scix.net/data/works/att/daa7.content.pdf>>. Acesso em: 5 de maio de 2016.

HOLZER, D. BIM 's Seven Deadly Sins. **International Journal of Architectural Computing**, v. 9, n. 4, p. 463–480, 2012.

HOWELL, I.; BATCHELER, B. **Building Information Modeling Two Years Later:** Huge Potential, Some Success and Several Limitations. *Newforma*, p. 9, 2003.

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **IES Position Statement:** Integrated Building Design (PS-01-09). New York, 2009.

_____. **IES LM-83-12 – Approved Method:** Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). New York, 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Daylight in Buildings:** A Sourcebook on Daylighting Systems and Components. A report of IEA SHC task 21 / ECBS Annex 29. July, 2009.

HITCHCOCK, R. J. Advancing Lighting and Daylighting Simulation: The Transition from Analysis to Design Aid Tools

JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. F. DIVA 2.0: Integrating Daylight and Thermal Simulations Using Rhinoceros 3D, DAYSIM and EnergyPlus. In: Conference of International Building Performance Simulation Association, 12th, 2011, Sydney. **Proceedings of BS2011.** Sydney: IBPSA, 2011. p. 2202–2209, 2011. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0->

4870189464&partnerID =tZOtx3y1>. Acesso em: 2 de fevereiro de 2017.

KOCHE, J. C. **Fundamentos da Metodologia Científica**. 1. ed. Petrópolis: Vozes, 2002. 185 p.

KOTA, S. *et al.* Building Information Modeling (BIM)-based daylighting simulation and analysis. **Energy and Buildings**, v. 81, p. 391–403, out. 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037877881400525>>. Acesso em: 27 de agosto de 2014.

KOWALTOWSKI, Doris; CELANI, Maria; MOREIRA, Daniel; PINA, Silvia; RUSCHEL, Regina; SILVA, Vanessa; LABAKI, Lucila; PETRECHE, João. Reflexão sobre metodologias de projeto arquitetônico. **Ambiente Construído**, v. 6, n. 11, p. 7–19, 2006.

KREMER, A. **A Influência de Elementos de Obstrução Solar no Nível n Na Distribuição Interna de Iluminação Natural**: Estudo de Caso em Protótipo Escolar de Florianópolis. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2002.

LABCON. Laboratório de Conforto Ambiental. **Programas Desenvolvidos – Apolux**. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <http://www.labcon.ufsc.br/>. Acesso em 15 de setembro de 2016.

LAISERIN, Jerry. **Foreword**. In: EASTMAN, Chuck; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008.

DAYSIM. Home. Disponível em: <<http://daysim.ning.com/>>. Acesso em 15 de setembro de 2016.

LIGHTSTANZA. Home. Disponível em: <lightstanza.com>. Acesso em: 3 de março de 2017.

LAISERIN, J. Comparing Pomes and Naranjas. **The LaiserinLetter**. Estados Unidos, n. 16, 16 dez. Disponível em: <<http://www.laiserin.com/features/issue15/feature01.php>>. Acesso em: 23 ago. 2016.

LAISERIN, J. To BIMfinity and Beyond. **Cadalyst – AEC**. p.46-48, Nov. 2007. Disponível em: <<http://www.nxtbook.com/nxtbooks/questex/cadalyst1107/>>. Acesso em: 08 ago. 2016

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. Rio de Janeiro, 2014. 382 p. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Livro%20-%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20na%20Arquitetura.pdf>>.

gbXML. **About**. Disponível em: <http://www.gbxml.org/About_GreenBuilding_XML_gbXML>. Acesso em: 04 mai. 2017.

MARDALJEVIC, John. Simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance. **Lighting Research and Technology**, v. 32, n. 3, p. 111-118, 2000.

MARDALJEVIC, J. Rethinking Daylighting and Compliance. **Journal of Sustainable Design and Applied Research**, v. 1, n. 3, p. 9, 2013.

MARSH, A. **Performance Analysis and conceptual design**. Tese (Doutorado). School of Architecture and Fine Arts. University of Western Australia, 1999. 216 p.

MARTINS, Paola Caliarri Ferrari. **A Interoperabilidade entre Sistemas BIM e Simulação Ambiental Computacional**: estudo de caso. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília. Brasília. 2011.

MENDES, Nathan; Westphal, Fernando Simon; LAMBERTS, Roberto; NETO, José A. Bellini da Cunha. Uso de instrumentos computacionais para análise de desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, out./dez. 2005.

MUNEER, T. **Solar Radiation and Daylight Models**. 2ª Edição ed. Burlington, MA: Elsevier Ltd., 2004.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. **Lighting Research and Technology**, v. 37, n. 1, p. 41–59, 2005.

NEGENDAHL, Kristoffer. Building performance simulation in the early design stage: an introduction to integrated dynamic models. **Automation in Construction**, v. 54, pp. 39-53, 2014.

NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCE. **National Building Information Modeling Standard, Version 1, Part 1: Overview, principles, and methodologies**. 2007. Disponível em: <https://www.wbdg.org/pdfs/NBIMsv1_p1.pdf>. Acesso em: 27 de agosto de 2016.

OLIVEIRA, Ludmila Cabizuca Carvalho Ferreira de. **Características e particularidades das Ferramentas BIM: Reflexos da implantação recente em escritórios de arquitetura**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2011. Disponível em: <<http://www.tede.ufsc.br/teses/PARQ0136-D.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

PAPAMICHAEL, Konstatinos. Designers and Information Overload. **Advanced Buildings Newsletter**, v. 1, n. 18, 1997.

PEREZ, R. *et al.* Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44, n. 5, p. 271–289, 1990.

PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. All-weather model for sky luminance distribution-Preliminary configuration and validation. **Solar Energy**, v. 50, n. 3, p. 235–245, 1993.

PREETHAM, A. J.; SHIRLEY, P.; SMITS, B. A practical analytic model for daylight. In: Conference of International Building Performance Simulation Association, 26th, 1999, Los Angeles. **Proceedings of SIGGRAPH '99**. Los Angeles: ACM SIGGRAPH. p. 91–100, 1999. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=311535.311545>>. Acesso em: 9 de abril de 2017.

RADSITE. 2016. **About**. Disponível em: <<https://www.radiance-online.org/about>>. Acesso em 15 de setembro de 2016.

REINHART, Christoph F. **Daylighting Handbook I: Fundamentals**. Designing with the sun. Vol. 1. Cambridge. 2014.

REINHART, Christoph F.; MARDALJEVIC, John; ROGERS, Zack. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. **LEUKOS**, v. 3, n. 1, p. 7-31, 2006.

REINHART, C. F. **Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design**. Harvard Design School, p. 1–114, 2010.

REINHART, Christoph; WIENOLD, Jan. The daylighting dashboard: A simulation-based design analysis for daylit spaces. **Building and Environment**. v. 46, n. 2, pp. 386-396. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.08.001>>. Acesso em: 20, jun, 2016.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa Social: Métodos e Técnicas**. 2. ed. São Paulo: Atlas. 2012.

RUSCHEL, R. C.; ANDRADE, M. L. V. X. DE; MORAIS, M. DE. O ensino de BIM no Brasil: onde estamos? **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 151–165, 2013.

SILVA, Vanessa Gomes da; SILVA, Maristela Gomes da; AGOPYAN, Vahan. Avaliação de edifícios no Brasil: da avaliação ambiental para avaliação de sustentabilidade. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 3, n. 3, p. 7-18, jul./set. 2003.

SOLEMMA. 2016. **DIVA-for-Rhino**. Disponível em: <<http://www.solemma.net>>. Acesso em 15 de setembro de 2016.

SOUZA, Clarice Bleil de. Contrasting paradigms of design thinking: The building thermal simulation tool user vs. the building designer. **Automation in Construction**, v. 22, pp. 112-122, 2012.

SOUZA, Clarice Bleil de. Studies into the use of building thermal physics to inform design decision making. **Automation in Construction**, v. 30, pp. 81-93, 2013.

SUCCAR, B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation in Construction**, v. 18, n. 3, p. 357–375, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>>.

TREGENZA, P. R.; WATERS, I. M. Daylight Coefficients.

Construction & Building Technology, n. March, p. 65–71, 1983.

WALTER, B. *et al.* Multidimensional lightcuts. **ACM Transactions on Graphics**, v. 25, n. 3, p. 1081, 2006. Disponível em: <<http://www.cs.cornell.edu/projects/lightcuts/>>.

WELLE, Benjamin; ROGERS, Zack; FISCHER, Martin. BIM-Centric Daylight Profiler for Simulation (BDP4SIM): A methodology for automated product model decomposition and recomposition for climate-based daylighting simulation. **Building and Environment**. 2012. Disponível em: <<http://cife.stanford.edu/node/859>>. Acesso em: 20, jun, 2016.

WHITTED, Turner. An improved illumination model for shaded display. In: Conference of International Building Performance Simulation Association, 26th, 1999, Los Angeles. **Proceedings of SIGGRAPH '99**. Los Angeles: ACM SIGGRAPH. p. 91–100, 1999. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=311535.311545>>. Acesso em: 3 de dezembro de 2016.

WIENOLD, J. Dynamic simulation of blind control strategies for visual comfort and energy balance analysis. In: International Building Performance Simulation Association, 2007, Beijing. **Proceedings of BS2007**. Beijing: IBPSA, 2007. p. 1197–1204, 2007. Disponível em: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79954426321&partnerID=tZOtx3y1%5Cnhttp://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p231_final.pdf>.

YAN, W.; KOTA, Sandeep; ALCOCER, Jose Luis Bermudez; DIXIT, Manish. Interfacing BIM With Building Thermal and Daylighting Modeling. In: International Building Performance Simulation Association, 2013, Chambéry. **Proceedings of BS2013**. Chambéry: IBPSA, 2013. p. 3521-3528, 2013.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e método**. [S.l: s.n.], 2001. Disponível em: <https://saudeglobaldotorg1.files.wordpress.com/2014/02/yin-metodologia_da_pesquisa_estudo_de_caso_yin.pdf>

APÊNDICE A - Configuração de propriedades óticas dos materiais no Revit

Tabela para determinar transmitâncias dos materiais translúcidos no Revit, conforme espessura dos elementos sólidos e perfil RGB de sua cor.

| | | R,G,B Tvis | | | | | | | | |
|--------|---------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | Thickness | 90% | 80% | 70% | 60% | 50% | 40% | 30% | 20% |
| single | 3.0 mm | 171 | 24 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 4.0 mm | 189 | 43 | 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 5.0 mm | 201 | 61 | 16 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 6.0 mm | 209 | 78 | 25 | 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 8.0 mm | 219 | 105 | 45 | 17 | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 10.0 mm | 226 | 125 | 64 | 29 | 11 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| | 12.7 mm | 232 | 146 | 86 | 47 | 22 | 9 | 3 | 0 | 0 |
| | 25.4 mm | 243 | 193 | 148 | 109 | 76 | 49 | 27 | 12 | 3 |
| | 28.6 mm | 244 | 199 | 157 | 120 | 87 | 59 | 35 | 17 | 5 |
| | dual | 3.0 mm | - | 154 | 50 | 14 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 4.0 mm | | - | 175 | 76 | 29 | 9 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 5.0 mm | | - | 189 | 96 | 44 | 18 | 5 | 1 | 0 | 0 |
| 6.0 mm | | - | 198 | 113 | 59 | 28 | 11 | 3 | 0 | 0 |
| 8.0 mm | | - | 211 | 139 | 86 | 48 | 24 | 9 | 2 | 0 |
| triple | 3.0 mm | - | - | 137 | 58 | 21 | 6 | 1 | 0 | 0 |
| | 4.0 mm | - | - | 160 | 84 | 39 | 15 | 4 | 0 | 0 |
| | 5.0 mm | - | - | 175 | 105 | 57 | 27 | 10 | 2 | 0 |
| | 6.0 mm | - | - | 186 | 121 | 73 | 39 | 17 | 5 | 0 |
| quad | 3.0 mm | - | - | 224 | 118 | 55 | 21 | 6 | 1 | 0 |
| | 4.0 mm | - | - | 232 | 143 | 81 | 40 | 16 | 4 | 0 |
| | 5.0 mm | - | - | 236 | 160 | 101 | 58 | 28 | 10 | 1 |
| | 6.0 mm | - | - | 239 | 173 | 118 | 74 | 40 | 17 | 4 |