

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO E
PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL

Marília Tanure Caram Pereira

**ILUMINAÇÃO NA CONSERVAÇÃO PREVENTIVA DE COLEÇÕES EM MUSEUS –
estudo de caso no Museu Histórico Abílio Barreto (Belo Horizonte / MG)**

Belo Horizonte
2022

Marília Tanure Caram Pereira

**ILUMINAÇÃO NA CONSERVAÇÃO PREVENTIVA DE COLEÇÕES EM MUSEUS –
estudo de caso no Museu Histórico Abílio Barreto (Belo Horizonte / MG)**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, do Programa de pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais.

Linha de Pesquisa: Tecnologia do Ambiente Construído

Orientador: Prof. Dr. Willi de Barros Gonçalves

Co-orientadora: Prof. Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza

Belo Horizonte

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

P436i

Pereira, Marília Tanure Caram.

Iluminação na conservação preventiva de coleções em museus [manuscrito] : estudo de caso no Museu Histórico Abílio Barreto (Belo Horizonte / MG) / Marília Tanure Caram Pereira. - 2022.

130 f. : il.

Orientador: Willi de Barros Gonçalves.

Coorientadora: Roberta Vieira Gonçalves de Souza.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

1. Métodos de conservação em museus - Teses. 2. Iluminação - Teses. 3. Conservação preventiva - Teses. 4. Museus - Fatores climáticos - Teses. 5. Museus históricos. I. Gonçalves, Willi de Barros. II. Souza, Roberta Vieira Gonçalves. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. IV. Título.

CDD 069.53

Ficha catalográfica: Maryne Mirydyane Medeiros - CRB 1/2997.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AMBIENTE CONSTRUÍDO E PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Iluminação na conservação preventiva de coleções em museus – estudo de caso no Museu Histórico Abílio Barreto (Belo Horizonte/MG)"

MARÍLIA TANURE CARAM PEREIRA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia dezessete de dezembro de dois mil e vinte e um, pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Profa. Dra. Louise Land Bittencourt Lomardo

Universidade Federal Fluminense (UFF)

Profa. Dra. Rejane Magiag Loura

Escola de Arquitetura/UFMG

Prof. Dr. Willi de Barros Gonçalves - Orientador

PPG-ACPS/UFMG

Profa. Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza - Coorientadora

Escola de Arquitetura/UFMG

Belo Horizonte, 13 de dezembro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por Roberta Vieira Gonçalves de Souza, Professora do Magistério Superior, em 21/01/2022, às 16:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Willi de Barros Gonçalves, Professor do Magistério Superior, em 21/01/2022, às 16:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Louise Land Bittencourt Lomardo, Usuária Externa, em 20/05/2022, às 09:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Rejane Magiag Loura, Professora do Magistério Superior, em 07/07/2022, às 11:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 1159459 e o código CRC BAFF7535.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus: nos momentos mais difíceis, a fé ajuda a entender que Ele está guiando, iluminará o caminho e que tudo acontece do jeito que deve ser. Agradeço aos meus pais, Júlio e Lourdinha, por estarem comigo e me apoiarem em todas as minhas decisões. Ao meu marido, Alexandre, por me dar forças e me escutar, por ser companheiro e compartilhar a vida comigo. A toda a minha família e às minhas amigas queridas, que mesmo no distanciamento social da pandemia se fizeram sempre presentes. Em especial agradeço à Debora e Michelle, amigas irmãs, pelos conselhos e apoio que tornaram o período do mestrado mais leve.

Agradeço ao meu orientador, professor doutor Willi de Barros, por todos os ensinamentos, reuniões online, revisões de texto e por ser um grande exemplo de professor e pesquisador. À minha co-orientadora, professora doutora Roberta Vieira, por todo conhecimento passado e apoio durante os últimos anos. A todos os meus professores da UFMG e funcionários da biblioteca da Escola de Arquitetura, que contribuíram para a minha educação e formação, e resolveram tantas dúvidas.

Ao LACICOR (Laboratório de Ciência da Conservação da Escola de Belas Artes da UFMG) pela disponibilização dos equipamentos utilizados na pesquisa. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro para participação em eventos e concessão de bolsa de mestrado. Ao Programa de Pós Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável por ter me recebido e apoiado.

Aos meus colegas de mestrado Ana Júlia, Helder, Júlio e Daniel, pela amizade e colaboração nos trabalhos, artigos e disciplinas. Aos arquitetos Marina Garcia e Daniel Amaral pela preciosa ajuda com os programas Rhinoceros e Climate Studio, e com a configuração dos modelos de simulação. Ao Museu Histórico Abílio Barreto, em especial Isabela Guerra e Juliana Fabrino, pela liberação do acesso, disponibilização do espaço e informações concedidas para o estudo de caso desta dissertação.

RESUMO

Esta dissertação discute o tema da iluminação nos museus, tratando da dialética entre expor e conservar, levando em consideração o atendimento a requisitos de conforto luminoso e minimização de riscos de foto deterioração das coleções. O objetivo principal desta pesquisa foi investigar a iluminação na conservação preventiva de coleções em museus, por meio da análise da iluminação do Museu Histórico Abílio Barreto, em Belo Horizonte — criando uma metodologia para alcançar a iluminação adequada para a conservação e exposição de bens culturais, e o conforto luminoso para os usuários. O método incluiu uma revisão dos requisitos relativos a um bom desempenho da iluminação em espaços expositivos, parâmetros fundamentais para a conservação preventiva das coleções, principais danos causados por foto deterioração, recomendações técnicas e estado da arte da tecnologia para preservar bens culturais expostos. Foram realizadas medições de iluminância *in loco*, observando a norma NBR 15.215, em planos vertical e horizontal relevantes para a expografia, em duas salas, separando-se as componentes de luz natural e artificial. Foram efetuadas simulações estática e dinâmica de iluminação natural utilizando o *programa Climate Studio*. Os resultados abrangem a descrição das estratégias de iluminação utilizadas no MhAB, e isocurvas de iluminância nas salas estudadas. Com base nos resultados, apresenta-se uma análise das estratégias de iluminação no MhAB, com foco na conservação preventiva do acervo, em equilíbrio com os requisitos de conforto luminoso humano, tendo como referência requisitos de conservação de coleções propostos no relatório técnico CIE 157:2004, como por exemplo níveis máximos de iluminância e doses máximas de exposição anuais. Propõe-se um zoneamento das salas estudadas, indicando quais tipos de acervo podem ser expostos em cada zona, atendendo aos requisitos da CIE 157:2004. Dentre as conclusões destaca-se que, apesar de, à primeira vista, as estratégias de iluminação para conforto luminoso e para conservação preventiva das coleções parecerem opostas, elas podem ser complementares, alcançando-se os dois objetivos ao mesmo tempo, atendendo aos requisitos normativos.

Palavras-chave: Conservação preventiva de coleções; Conforto luminoso; Iluminação; Gerenciamento ambiental de coleções; Expografia.

ABSTRACT

This dissertation discusses the theme of lighting in museums, dealing with the dialectic between exhibiting and preserving, taking into account the fulfillment of luminous comfort requirements and minimization of the risks of photo deterioration of collections. The main objective of this research was to investigate lighting for preventive conservation of collections in museums, through an analysis of the lighting of Abílio Barreto Historical Museum, in Belo Horizonte — creating a methodology to achieve adequate lighting for conservation and exhibition of cultural assets, and luminous comfort for users. Methodology included a review of the requirements for good lighting performance in exhibition spaces, fundamental parameters for the preventive conservation of collections, major damage caused by photo deterioration, technical recommendations and state-of-the-art technology to preserve exhibited cultural goods. Illuminance measurements were carried out *in loco*, observing the NBR 15.215 standard, in vertical and horizontal planes relevant to the exhibition, in two rooms, separating the natural and artificial light components. Static and dynamic simulations of natural lighting were performed using the Climate Studio program. The results cover the description of the lighting strategies used in MhAB, and illuminance isocurves in the studied rooms. Based on the results, an analysis of the lighting strategies at the MhAB is presented, with a focus on preventive conservation of the collection, in balance with the requirements of human luminous comfort, with reference to conservation requirements of collections proposed in the CIE 157 technical report: 2004, such as maximum illuminance levels and maximum annual exposure doses. A zoning of the studied rooms is proposed, indicating which types of collections can be exhibited in each zone, meeting the requirements of CIE 157:2004. Among the conclusions it is highlighted that, although, at first sight, the lighting strategies for luminous comfort and for preventive conservation of the collections seem opposite, they can be complementary, reaching both objectives at the same time, meeting the regulatory requirements.

Keywords: Preventive conservation of collections; Luminous comfort; Lighting; Environmental management of collections; Exhibition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Faixas do espectro eletromagnético relevantes para a iluminação de museus.....	19
Figura 2 - Cor refletida pelos objetos conforme propriedades espectrais da fonte de luz.....	22
Figura 3 - Iluminação zenital no Museu Nacional de Belas Artes do Rio de Janeiro.	27
Figura 4 - Claraboias no Museu Guggenheim de Nova York	28
Figura 5 - Iluminação cênica de destaque no Museu do estado do Pará.....	29
Figura 6 - Ângulo ótimo entre fonte de luz e quadro exposto	30
Figura 7 - Fonte de luz lateral para objeto vertical	30
Figura 8 - Projetores de luz para vitrines de vidro centrais	31
Figura 9 - Faixa de iluminâncias percebidas pelo homem, em escala logarítmica (lx)	41
Figura 10 - Claraboia do museu SeMA interna e externamente.....	47
Figura 11 - Distribuição de iluminâncias produzida por medição no Salão dos Quinhentos.....	49
Figura 12 - Iluminação mista no verão - existente à esquerda e simulada à direita..	49
Figura 13 - Distribuição das iluminâncias no Mosteiro de Santa Maria de el Paular .	50
Figura 14 - Fator de risco global (GRF_a) para as paredes de exposição dos quadros à óleo	51
Figura 15 - Fachada genérica pixelada em grid para medição das iluminâncias	53
Figura 16 - Mapa de iluminâncias para fachadas em Sydney (esquerda), Berlim e Cairo (direita).....	53
Figura 17 - Mapa de Localização do Museu Histórico Abílio Barreto	60
Figura 18 - Casarão do Museu Histórico Abílio Barreto atualmente.....	60
Figura 19 - Edifício Anexo (sede) do Museu Histórico Abílio Barreto.....	61

Figura 20 - Casarão na antiga Fazenda do Leitão	63
Figura 21 - Casarão na Fazenda do Leitão entre 1935 e 1939	65
Figura 22 - Planta do primeiro pavimento do casarão	66
Figura 23 - Planta do segundo pavimento do casarão	66
Figura 24 - Corte AA do casarão.....	67
Figura 25 - Janela de prospecção mostrando vedação original do casarão em pau a pique	67
Figura 26 - Pisos atuais do pavimento superior (à esquerda) e inferior (à direita) do casarão	68
Figura 27 - Planta do primeiro pavimento do Anexo do MhAB.....	69
Figura 28 - Corte AA do Anexo do MhAB.....	70
Figura 29 - Aberturas para iluminação natural no casarão.....	71
Figura 30 - Trilhos e spots para iluminação artificial	71
Figura 31 - Foto da entrada envidraçada da sala de exposições do Anexo.....	72
Figura 32 - Sheds para Iluminação zenital e iluminação artificial com trilhos e <i>spots</i>	72
Figura 33 - Mezanino envidraçado na sala de exposições do anexo	72
Figura 34 - Bonde elétrico, exposição permanente do MhAB	74
Figura 35 - Complexa Cidade - peças em exposição no casarão	76
Figura 36 - Maquete exposta no pavimento inferior do Casarão.....	78
Figura 37 - Foto dos luxímetros ITLD-300 (à direita) e luxímetro de referência LDR 225 (à esquerda).....	80
Figura 38 - Foto da caixa de papelão, pintada de preto	81
Figura 39 - Foto durante a medição de aferição.....	81
Figura 40 - Planta do 2º Pavimento do MhAB – salas selecionadas para medição ..	83
Figura 41 - Sala de exposições do anexo do MhAB.....	84
Figura 42 - Janela padrão do casarão.....	85

Figura 43 - Planta da sala 19 - layout e iluminação artificial	85
Figura 44 - Sala 19.....	88
Figura 45 - Planta de layout e iluminação da sala de exposições do anexo	89
Figura 46 - Entrada de luz natural pelos corredores do 2° e 3° pavimentos	90
Figura 47 - Sala de exposições do anexo	91
Figura 48 - Cubo com exposição ao fundo da sala de exposições do anexo.....	92
Figura 49 - Malha de pontos para medição da sala 19 do casarão.....	93
Figura 50 - Malha de pontos para medição na sala de exposições do anexo	93
Figura 51 - Luxímetro posicionado na área externa, céu parcialmente encoberto	94
Figura 52 - Planta de situação com posicionamento das edificações e árvores do entorno	98
Figura 53 - Modelo 3D desenvolvido para as simulações	99
Figura 54 - Formatos de copas vegetais	99
Figura 55 - Abstração de modelos de vegetação em programas de simulação	100
Figura 56 - Leque de cores Sherwin Williams utilizado para conferência das refletâncias.....	100
Figura 57 - Modelo 3D da sala 19 do casarão.....	101
Figura 58 - Modelo 3D da sala de exposições do anexo externa e internamente ...	101
Figura 59 - Distribuição de iluminância natural normalizada, medida na sala 19 (25/10/2021, 16h -17h).....	106
Figura 60 - Distribuição da proporção de radiação UV na luz natural visível, medida na sala 19 (25/10/2021, 16h -17h)	106
Figura 61 - Distribuição de iluminância natural normalizada, medida na sala de exposições do anexo (25/10/2021, 15h - 16h)	107
Figura 62 - Distribuição da iluminância artificial medida na sala 19 (data da medição 25/10/2021).....	108

Figura 63 - Distribuição da proporção de radiação UV na luz artificial visível, medida na sala 19 (25/10/2021)	109
Figura 64 - Distribuição de iluminância artificial, medida na sala de exposições do anexo (25/10/2021)	109
Figura 65 - Resultado da simulação estática – distribuição da iluminância natural para a sala 19 (valores médios para dia 8/10 do arquivo TMY)	111
Figura 66 - Resultado da simulação estática – distribuição da iluminância natural para a sala de exposições do anexo (valores médios para o dia 8/10 do arquivo TMY)	112
Figura 67 - Distribuição da iluminância natural na sala 19, obtida por simulação dinâmica (inverno).....	113
Figura 68 - Simulação dinâmica da sala 19 - sDA.....	114
Figura 69 - Distribuição da iluminância natural na sala de exposições do anexo, obtida por simulação dinâmica (inverno).....	115
Figura 70 - Iluminâncias totais para o inverno para a sala 19 (componente natural simulada + média artificial medida)	116
Figura 71 - Zoneamento proposto para a sala 19, visando à conservação preventiva do acervo.....	116
Figura 72 - Iluminâncias totais para o inverno para sala de exposições do anexo..	117
Figura 73 - Zoneamento proposto para a sala de exposições do anexo, visando à conservação preventiva do acervo.....	118

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Porcentagem de cobertura do céu por nuvens ao longo do ano, de acordo com arquivo climático TMYx da estação Carlos Prates	56
Gráfico 2 - Radiação normal direta ao longo do ano, de acordo com arquivo climático TMYx da estação Carlos Prates.....	57
Gráfico 3 - Radiação Global – dados do INMET em 25/10/2021 e dados do arquivo TMYx para 10/10.....	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Níveis de iluminância, dose de exposição e UV recomendados pela CIE de acordo com a sensibilidade dos materiais.....	35
Quadro 2 - Resumo dos estudos levantados sobre iluminação em museus.....	43
Quadro 3 - Resumo dos estudos levantados sobre simulação de iluminação em museus.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - IRC, eficiência luminosa, vida média e emissão UV por fonte luminosa ..	20
Tabela 2 - Recomendações de iluminação da NBR ISO/CIE 8995-1.....	25
Tabela 3 - Recomendações de iluminação da NBR 5413 para museus	25
Tabela 4 - tempo para deterioração dos materiais segundo a ISO Blue wool, com e sem UV	37
Tabela 5 - Tempo para descoloração dos materiais segundo sensibilidade dos materiais e nível de iluminância	38
Tabela 6 - Desvios médios absolutos e percentuais do procedimento de aferição ...	82
Tabela 7 - Dados informados pelo INMET no dia 25 de outubro de 2021 – Estação Belo Horizonte (Cercadinho- código F501)	96
Tabela 8 - Refletâncias e transmitâncias atribuídas às superfícies no modelo de simulação	102
Tabela 9 - Tabela comparativa dos resultados da medição <i>in loco</i> e simulação estática.....	112
Tabela 10 - Tempo de exposição recomendado em meses, de acordo com a dose de exposição média calculada em cada sala	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ASE – Annual Sunlight Exposure
- BEN - Balanço Energético Nacional
- CBDM – Climate Based Daylight Modelling
- CCAHA – Conservation Center for Art and Historical Artefacts
- CCI – Canadian Conservation Institute
- CIE - *Commission Internationale de L'Eclairage* (Comissão Internacional de Iluminação)
- CS – *Climate Studio*
- DA – *Daylight Autonomy*
- EBC - Empresa Brasil de Comunicação
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- FLD – Fator de Luz Diurna
- IBRAM - Instituto Brasileiro de Museus
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
- ICOM - *International Council of Museums*
- IES - *Illuminating Engineering Society*
- IESNA - *Illuminating Engineering Society of North America*
- IWEC – *International Weather for Energy Calculations*
- IMC - Instituto dos Museus e da Conservação
- IRC – Índice de Reprodução de Cor
- IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
- ISO - *International Organization for Standardization*

IV – Radiação Infravermelha

ICCROM - *International Centre for the study of the Preservation and Restoration of Cultural Property*

LACICOR – Laboratório de Ciência da Conservação da Escola de Belas Artes da UFMG

LACONPRE – Laboratório de Conservação Preventiva

LED – *Light Emitting Diode*

MAP – Museu de Arte da Pampulha

MhAB – Museu Histórico Abílio Barreto

MME – Ministério de Minas e Energia

NBR – Norma Brasileira

PBH – Prefeitura Municipal de Belo Horizonte

sDA – *Spatial Daylight Autonomy*

SeMA – Museu de Arte de Seul

SWERA – *Solar and Wind Energy Resource Assessment*

TC – Temperatura de Cor

TMY – *Test Meteorological Year*

TRE – Tribunal Regional Eleitoral

TRY – *Test Reference Year*

UDI – *Useful Daylight illuminance*

UGR – *Unified Glare rate*

USGBC - *United States Green Building Council*

UV – Radiação Ultravioleta

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Objetivos	13
1.2. Justificativa	14
1.3. Estrutura do trabalho	16
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1. Luminotecnia e fenômenos ópticos	19
2.2. Conforto luminoso e conforto visual	23
2.2.1. Parâmetros de conforto luminoso	23
2.2.2. Conforto luminoso e luz natural	26
2.2.3. Conforto luminoso e luz artificial	28
2.2.4. A luz como recurso arquitetônico, compositivo e narrativo em exposições	31
2.3. Parâmetros luminotécnicos para conservação preventiva das coleções..	32
2.4. Estudos sobre iluminação para conforto luminoso e conservação preventiva em museus	38
2.5. Estado da arte da simulação de iluminação	43
2.5.1. Métricas da iluminação	44
2.5.2. Programa de simulação de iluminação: Climate Studio	45
2.5.3. Estudos de simulação de iluminação em museus	46
2.6. Disponibilidade de luz natural.....	54
3. CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	58
3.1. Localização e entorno	58
3.2. Histórico	61
3.3. Arquitetura e técnicas construtivas	65
3.4. Sistema de Iluminação natural e artificial	70
3.5. Acervo, coleções e exposições atuais	73

4. METODOLOGIA	79
4.1. Testagem e aferição dos equipamentos.....	80
4.2. Escolha das salas para medições <i>in loco</i>	82
4.2.1. Descrição das salas selecionadas.....	84
4.3. Medições <i>in loco</i>	92
4.4. Configuração dos modelos de simulação.....	94
4.4.1. Disponibilidade de luz em Belo Horizonte	95
4.4.2. Terreno e entorno.....	98
4.4.3. Modelagem das edificações do museu e das salas selecionadas	100
4.4.4. Refletâncias dos Materiais	101
4.4.5. Compatibilização das malhas de pontos	102
4.4.6. Métricas de conforto luminoso.....	103
4.4.7. Métricas de conservação preventiva de coleções	103
4.5. Zoneamento e cálculo das doses anuais de exposição	104
5. RESULTADOS.....	105
5.1. Resultados da medição <i>in loco</i>	105
5.1.1. Iluminação natural	105
5.1.2. Iluminação artificial	108
5.2. Resultados da simulação computacional	110
5.2.1. Simulação estática	110
5.2.2. Simulação dinâmica	113
5.3. Zoneamento das salas estudadas e recomendações para exposição do acervo	115
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	120
REFERÊNCIAS.....	123

1. INTRODUÇÃO

Os museus, enquanto lugares de exposição, salvaguarda, pesquisa e exposição de coleções artísticas e bens culturais, exigem um grande cuidado técnico de profissionais de diversas especialidades ligadas à ciência do patrimônio. A luz se configura como uma variável complexa nos museus, quando consideramos os aspectos de conforto luminoso e os parâmetros de controle da iluminação para a conservação preventiva das coleções. Na conservação preventiva a própria exposição é paradigmática uma vez que, a partir do momento em que os objetos são expostos, há foto deterioração. Sabe-se que a luz é uma dimensão fundamental da arquitetura, essencial para o conforto luminoso, para a fisiologia humana, dentre diversos outros fatores, ao passo que o objetivo da conservação preventiva é diminuir ao máximo a taxa de degradação dos bens culturais expostos, pelo maior tempo possível.

Essa dissertação trabalha com a problemática da luz enquanto necessidade para o conforto luminoso humano, integrada às demandas de conservação preventiva de coleções, em que a luz representa um agente de deterioração. Sendo assim, são necessárias estratégias de gerenciamento para que a luz seja um instrumento de projeto arquitetônico, utilizando das tecnologias para proporcionar os níveis suficientes para uma iluminação eficaz, ao mesmo tempo em que evita a foto deterioração das coleções.

Na arquitetura, a luz está presente em todos os espaços, e circunda a existência humana. A luz e as sombras são tratadas desde o início da história impactando diretamente na forma do homem perceber e se conectar com os espaços. Steane (2011) enfatiza que, apesar disso, a luz natural tem sido pouco tratada, à medida que a iluminação artificial permitiu edificações com plantas largas, inteiramente dependentes da luz artificial. Segundo essa autora, as estratégias para aproveitamento da luz fazem com que os arquitetos precisem ser criativos ao desenvolver projetos para explorá-la, avaliando a quantidade e distribuição recomendada para cada atividade, e entendendo o impacto que a luz natural causará nos ocupantes das edificações (STEANE, 2011, p.5)

A iluminação artificial por muito tempo foi considerada complementar, utilizada apenas quando da falta de disponibilidade de luz natural. Hoje as soluções de iluminação artificial representam não só uma maneira mais prática de controle da exposição de coleções à luz, por ter parâmetros mais constantes do que a luz natural, mas também uma estratégia cenográfica nos museus. Por outro lado, os sistemas de iluminação artificial passam por rápido desenvolvimento tecnológico, e diversos museus não se adaptam com rapidez a tais avanços, seja por conta das dificuldades orçamentárias ou falta de conhecimento técnico aplicado (HASSANIZADEH; NOORZAI; MOHSENI, 2020).

Muitas pesquisas sobre conforto visual trabalham também com questões de fisiologia humana, mostrando a importância de uma boa iluminação para que os usuários consigam se orientar espacial e temporalmente, influenciando no ajuste do relógio biológico. A luz permite que as pessoas mantenham sua integridade e segurança física, e desempenhem com mínimo esforço as atividades que dependem de bom reconhecimento visual. Com a iluminação natural o homem mantém contato com a natureza, mesmo em ambientes internos, causando sensação de prazer. Entretanto, muitas vezes a luz é obstruída nas aberturas, quando há necessidade de resolver problemas como ofuscamento e calor vindo da incidência direta de raios solares, quando se torna necessário criar soluções para a proteção solar (ALVAREZ, 1995; KOWALTOWSKY *et al.*, 1999).

Foi divulgado em 2020 o Guia para Projetos de Arquitetura de Museus, buscando não só aprofundar e disseminar os conhecimentos técnicos sobre o tema, mas também incentivar um planejamento maior das edificações que abrigam histórias e memórias das culturas. Esse guia discute as mudanças que os museus sofreram nas últimas décadas, não só nas formas e materiais explorados nos projetos de arquitetura, mas também em relação aos percursos internos, aos bens expostos e à própria relação com os visitantes, buscando uma aproximação com públicos variados (IBRAM, 2020).

Quando levamos em conta a arquitetura de museus, temos duas possibilidades: ou a edificação é concebida para esse uso, ou a edificação foi concebida com outro objetivo e é adaptada para se tornar um museu. No primeiro caso, o projeto de iluminação é planejado concomitantemente ao projeto arquitetônico, e precisa

proporcionar uma iluminação que esteja em conformidade com uma série de normas e exigências, além de tratar a luz como uma condicionante geográfica influenciando diretamente o estudo de implantação do projeto (STEANE, 2011). A implantação da edificação é determinante para o controle da insolação no interior das edificações, auxiliando no posicionamento, forma e dimensões das aberturas, assim como na criação de possíveis elementos de proteção solar. Já no segundo caso o projeto de iluminação se adapta às condições pré-existentes de iluminação, criando estratégias diferenciadas para controle e filtragem da luz direta, bem como dos níveis de iluminância a depender das possibilidades de alteração nas fachadas, quando a própria edificação é patrimônio cultural (MIER; SCARAZZATO, 2014).

Uma publicação do IBRAM – Instituto Brasileiro de Museus, de 2011, intitulada *Museus em Números* (IBRAM, 2011), contabilizou que apenas 17,1% das edificações cadastradas no país foram construídas para esse uso. Os outros 82,9% dos museus estão abrigados em edificações que sofreram adaptações para se tornarem espaços adequados de exposição.

No que diz respeito à luz natural, os fatores de variabilidade na intensidade e disponibilidade ao longo dos dias e do ano, os quais dependem da latitude e outros fatores imponderáveis como a nebulosidade, somados ao seu alto potencial de deterioração das coleções, elevam o nível de dificuldade para os profissionais que buscam uma abordagem de integração de iluminação natural e artificial em museus. Por outro lado, no que diz respeito à conservação preventiva, a grande diversidade das coleções — seja em matéria componente, tamanho, idade ou valor, é um fator que denota a complexidade nas pesquisas de arquitetura de museus, devido à dificuldade de fazer equivalências e/ou generalizações de tratamento entre duas coleções, em ambientes de exposição ou de armazenamento (KEENE; STEVENSON; MONTI, 2008).

A conservação preventiva envolve ações indiretas para minimizar deteriorações e perdas nos bens culturais, envolvendo, dentre outras rotinas e protocolos, o gerenciamento ambiental das coleções (ICOM, 2008). Não se trata de isolar os objetos e deixá-los longe do público, e sim de protegê-los, tornando-os acessíveis para que possam continuar sendo usados e expostos novamente (DOUMAS, 2013).

A resolução do ICOM – Conselho Internacional de Museus (2008) define conservação preventiva como:

“Todas as medidas e ações com objetivo de evitar e minimizar futuras deteriorações ou perdas. Elas são realizadas em um contexto ou entorno de um bem cultural, porém, mais comumente no contexto de um conjunto de bens, seja qual for a sua idade e condição. Essas medidas e ações são indiretas – não interferem com os materiais e estruturas dos bens. Elas não modificam a sua aparência” (ICOM-CC, 2008, p.1-2, tradução nossa).

Uma boa iluminação nos museus satisfaz tanto as necessidades dos visitantes quanto de conservação preventiva das coleções: por um lado o conforto visual, a perceptibilidade ótima dos objetos expostos, uma orientação clara e segura no edifício e uma alta qualidade vivencial e por outro lado, a preservação dos objetos expostos, assim como a busca pela sustentabilidade e eficiência energética dos sistemas de iluminação (ERCO, 2012). Nesse contexto, a iluminação nos museus — tanto em edificações preexistentes quanto naquelas construídas com esse propósito — deve buscar equilibrar as questões físicas, básicas em qualquer edificação, de orientação e visualização, mas também solucionar demandas específicas de segurança, conforto, exposição e conservação.

1.1. Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa foi investigar a iluminação na conservação preventiva de coleções em museus, por meio da análise da iluminação do Museu Histórico Abílio Barreto, em Belo Horizonte — criando uma metodologia para alcançar a iluminação adequada para a conservação e exposição de bens culturais, e o conforto luminoso para os usuários.

Os objetivos específicos foram:

- Investigar como a infraestrutura influencia a qualidade da iluminação nos ambientes de museus;
- Investigar as particularidades para o conforto luminoso em museus, avaliando requisitos da iluminação *versus* requisitos de conservação;

- Medir a iluminância e incidência de radiação UV, em salas de exposição previamente selecionadas no Museu Abílio Barreto e avaliar sua adequação frente aos requisitos do relatório técnico CIE 157:2004;
- Simular a iluminação natural nas salas selecionadas do museu e investigar as oportunidades e impactos de integração com a luz artificial, em termos do conforto luminoso e da conservação preventiva do acervo;
- Propor zoneamento da iluminação nas salas estudadas, discutindo as tipologias de coleções que podem ser expostas em cada zona, atendendo aos requisitos do relatório CIE 157:2004.

1.2. Justificativa

A luz natural é importante para o conforto visual, para a fisiologia humana e para o desempenho das tarefas mais básicas às mais complexas, entretanto, diferente do que acontece em outras tipologias arquitetônicas, nos museus o aproveitamento da luz natural precisa ser minuciosamente controlado, pois a exposição em excesso aos raios solares e sua alta carga térmica causam a foto deterioração das coleções. Já a luz artificial pode auxiliar no âmbito funcional ao iluminar os ambientes de maneira geral ou pontual, ao mesmo tempo em que contribui para a percepção visual e criação estética, podendo destacar objetos selecionados, acentuar formas e sombras, hierarquizar ambientes de exposição e circulação, sinalizar percursos, entre outras funções, que a torna imprescindível no projeto da luz em museus (JUNQUEIRA E YUNES, 2014).

Sobre os espaços expositivos, Vianna (2009) levanta a hipótese de que, enquanto os conservadores restauradores em geral priorizam a iluminação artificial, os arquitetos, desde a segunda metade do século XX, defendem que ela não pode substituir totalmente a luz natural, nem mesmo nos espaços expositivos. O autor traz passagens mostrando os ideais do movimento conservacionista na década de 1920, que acreditava que, pelo fato da luz artificial poder ser manipulada pelo homem, e permanecer estática durante qualquer horário do dia ou época do ano, ela seria a melhor opção para conservar as obras de arte que estivessem expostas (VIANNA, 2009, p. 33-34).

Entretanto, esse pensamento diverge da lógica dos arquitetos, tais como Louis Kahn e Frank Lloyd Wright que já estavam convencidos de que o fator de variabilidade, a dinâmica da luz natural, é justamente o que valoriza as obras de arte, porque permite formas de enxergar distintas, causando maior impressão e impacto. Louis Kahn “acreditava que a qualidade de constante transformação da luz do dia oferecesse vida à arquitetura porque a relação da edificação com a luz muda conforme esta a envolve e nela penetra” (VIANNA, 2009, p. 33). Assim, uma perspectiva dessa pesquisa é discutir a falsa oposição entre iluminar para exibir *versus* iluminar para conservar nos museus.

Portanto, essa pesquisa é justificada devido à necessidade de buscar o equilíbrio entre o aproveitamento da luz e a conservação dos bens culturais, por meio da integração da luz natural e artificial nos museus. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2021, os edifícios comerciais, de serviços e públicos representaram, em 2020, 29,5% do consumo de eletricidade do Brasil (EPE, 2021). Depois dos sistemas de condicionamento de ar, a iluminação artificial é o segundo sistema que mais consome energia nas edificações, sendo que os dois juntos são responsáveis por 70% do consumo energético nas edificações públicas. (PROCEL, 2021). Nesse contexto, a integração da iluminação natural e artificial pode contribuir para a sustentabilidade dos museus, reduzindo os custos de operação e aumentando a eficácia da iluminação.

A luz artificial por ser mais estática, com fluxo luminoso constante e, é mais fácil de ser controlada e direcionada de acordo com a sensibilidade das coleções. Ela também pode ser trabalhada para criar uma narrativa das histórias, por meio de iluminação cênica e de destaque. Já a luz natural difusa é um importante instrumento para garantir a qualidade da luz e o conforto visual, colaborando na redução do uso da iluminação artificial nesses ambientes. Ela deve ser bem aproveitada principalmente nos espaços preambulares — circulação e entrada, segundo Mier e Scarazzato (2014) — mas inclusive em alguns espaços expositivos, levando-se em conta não só o potencial de redução no consumo de energia, mas também a adequação e filtragem dessa luz de acordo da natureza dos materiais expostos, para a sua conservação preventiva. Além disso, a luz natural é uma fonte

de espectro total, que possibilita melhor reprodução de cores, se tornando ainda mais importante nos museus que abrigam coleções em que a cor é fator essencial.

1.3. Estrutura do trabalho

Esta dissertação divide-se em seis capítulos, contando-se a introdução e considerações finais. Após este capítulo introdutório, o capítulo 2 traz uma revisão da literatura técnica acerca da problemática da iluminação em edificações de museus e exposições. São apresentadas as temáticas da iluminação para o conforto luminoso e orientação humana, bem como para a conservação preventiva das coleções e as principais normas nacionais e internacionais que dispõem parâmetros para a iluminação em museus, acompanhadas de uma análise crítica.

O capítulo 3 faz uma caracterização do estudo de caso no Museu Abílio Barreto, em Belo Horizonte, tratando da sua localização e entorno na cidade, o histórico das edificações, características construtivas e as principais estratégias de iluminação natural e artificial utilizadas no museu.

O quarto capítulo especifica a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho, e explicitando as fases do desenvolvimento: os materiais e métodos utilizados para a coleta de dados no local, a forma de seleção da amostra estudada, os dados utilizados para a construção dos modelos de simulação computacional e os dados de saída analisados. Vale acrescentar que este trabalho foi desenvolvido durante a pandemia de COVID-19, que acabou moldando a metodologia do trabalho, uma vez que o Museu Abílio Barreto ficou fechado por vários meses, e algumas visitas tiveram que ser agendadas em horários que poderiam não ser os ideais para medição de luz natural.

O capítulo 5 analisa e discute os resultados obtidos e propõe um zoneamento das salas estudadas, considerando os requisitos de conservação preventiva de coleções.

Por fim, são apresentadas as considerações finais do trabalho, procurando enfatizar as principais contribuições para o estudo do tema, as limitações encontradas e as oportunidades para estudos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

De acordo com William Lam (1977) o homem não enxerga tudo o que está a sua volta. Nosso cérebro é seletivo, faz captações voluntárias e involuntárias de tudo o que está em nosso campo visual. Assim, a visão é um processo ativo, que acontece em dois passos subsequentes: a captação da informação luminosa, e a interpretação dela pelo cérebro. As captações voluntárias dizem respeito ao que nós identificamos como interessantes ou necessárias a alguma atividade que desempenhamos. Já as captações involuntárias acontecem por necessidades biológicas e fisiológicas, para que o corpo identifique o local e horário do dia, por exemplo.

De acordo com Vianna (2009, p.33) o tema da iluminação em espaços expositivos é discutido cientificamente desde o século XX. Entretanto, é possível encontrar diferentes posicionamentos acerca do projeto luminotécnico, de acordo com as experiências visuais e sensoriais buscadas, bem como dos materiais expostos. Mier e Scarazzato (2014) trataram desse assunto mostrando que, enquanto alguns acreditam que a iluminação nos museus deve ser neutra e homogênea, outros profissionais acreditam numa iluminação cênica, adaptada às dimensões dos objetos, cores e significados. Baker, Fanchiotti e Steemers (2013, p.11-12) argumenta que para muitas coleções mais suscetíveis à foto deterioração a luz artificial é preferencial, uma vez que ela é praticamente estática e mais fácil de ser controlada. Já em Fathy *et al.* (2020, p. 673) promove-se a integração da luz natural com a luz artificial, argumentando que a maioria das obras foram criadas sob a luz natural e que a luz artificial pode comprometer a experiência visual do visitante. O intervalo de sete anos entre os artigos poderia indicar uma mudança da visão sobre a iluminação de museus ao longo do tempo, aparentemente trata-se de diferentes perspectivas sobre o tema.

A luz natural tem variações de intensidade e direcionamento de acordo com os horários do dia, a época do ano, com as condições do céu, das obstruções do entorno e com o posicionamento e tamanho das aberturas. Devido a tantas variáveis condicionantes, a luz natural não pode ser a única responsável pela iluminação dos museus, principalmente nos espaços expositivos, mesmo se for filtrada (MIER;

SCARAZZATO, 2014). Entretanto, ela pode ser a principal fonte de iluminação geral, desde que observadas as condicionantes de conservação preventiva das coleções e de conforto humano. No caso da iluminação artificial, diferentes cores, feixes de tamanhos variados, e os diversos designs e arranjos da luz criam os ambientes de iluminação adequados para cada tipo de exposição (LICHT, 2000).

Lamberts, Dutra e Pereira (2014) também discutem que a luz, além de necessária para a visão, nos afeta de formas diretas e indiretas, podendo contribuir para a saúde fisiológica e psicológica, e explicam que para haver conforto visual, as condicionantes do ambiente devem permitir que o ser humano execute suas tarefas de forma precisa e com esforço mínimo. A partir do século XX os estudos de iluminação passaram a incorporar fatores psicológicos da luz, além dos já conhecidos fatores físicos e fisiológicos. Por conta disso, além de trazer os níveis de iluminância, os projetos de iluminação nos espaços de exposição passaram a levar em consideração também o observador, fazendo uma conexão entre este e a obra de arte. Mier e Scarazzato (2014, p. 4) ressaltaram essa ideia na seguinte passagem:

“Essa tarefa não deve, porém, resultar de um trabalho isolado, mas antes da simbiose entre três personagens representativas de um triângulo que correlaciona obra de arte, obra arquitetônica e desenho de luz. Ou seja, a “colaboração estreita” entre o curador do museu, o arquiteto e o especialista de iluminação é inevitável para o sucesso do resultado final” (MIER E SCARAZZATO, 2014, p. 4).

A definição da iluminação adequada para a conservação também é determinada pela natureza da exposição: permanente, temporária ou itinerante. A problemática da iluminação acontece de maneiras diferentes em cada uma delas, visto que as exposições também estarão sujeitas a outros tipos de danos (DOUMAS, 2013).

A seguir são abordados os parâmetros óticos, físicos e técnicos de iluminação para conforto luminoso e visual, assim como o tratamento da iluminação para narrativa de histórias e iluminação cênica nos museus e os parâmetros para a conservação preventiva das coleções.

2.1. Luminotecnia e fenômenos ópticos

A luminotecnia estuda a aplicação e utilização das fontes de luz, englobando os parâmetros físicos dos materiais, que vão caracterizar as fontes de luz e podem ser medidos quantitativamente.

De acordo com Lechner (2015), o projeto da luz precisa começar com um entendimento das suas propriedades, de visualização e percepção. A luz é definida como a parte do espectro eletromagnético a que nossos olhos são sensíveis (LECHNER, 2015, p. 366). Johnson (1999) explica que a luz possui um espectro eletromagnético de radiações em diferentes comprimentos de onda: infravermelha (IV), luz visível e ultravioleta (UV). Em geral, arquitetos consideram somente a parcela visível da radiação para o projeto das edificações. Contudo, para a conservação preventiva é necessário considerar também a radiação UV e IV.

O estudo da iluminação nos museus compreende como essas radiações influenciam no risco e no potencial de deterioração dos objetos, e trabalha diferentes formas de bloqueio, filtragem e também de dose de exposição anual dos objetos, para evitar e controlar a foto deterioração. Quanto ao espectro eletromagnético, a radiação infravermelha é caracterizada por um comprimento de onda longo que é convertido, principalmente, em calor. Em seguida, tem-se o espectro de luz visível, correspondente à luz percebida pelos nossos olhos. Já os raios ultravioletas são aqueles com comprimentos de onda curtos, e energia muito elevada (JOHNSON, 1999). A Figura 1 mostra as faixas do espectro relevantes para a iluminação em museus.

Figura 1 - Faixas do espectro eletromagnético relevantes para a iluminação de museus



Fonte: Adaptado de MICHALSKI, 2009.

Danos aos objetos expostos são causados principalmente pelos comprimentos de onda não visíveis, particularmente na faixa ultravioleta (UV), de maior frequência e

mais energética. Por esse motivo, as fontes de luz que não emitem UV em geral são mais adequadas obras de arte mais delicadas. A maior parte da energia está concentrada na radiação ultravioleta (UV), considerada a mais prejudicial para os acervos museológicos. As fontes de luz, tanto naturais quanto artificiais, emitem diferentes doses de radiação UV (Tabela 1), que podem ser bloqueadas de diversas maneiras (MICHALSKI, 2009). A eficiência luminosa das fontes de luz também é variável (Tabela 1).

Tabela 1 - IRC, eficiência luminosa, vida média e emissão UV por fonte luminosa

FORTE LUMINOSA	IRC (%)	EFICIÊNCIA LUMINOSA (lm/W)	VIDA MÉDIA (horas)	EMIÇÃO UV ($\mu\text{W}/\text{lm}$)
Luz do dia	100	90 - 145	~	400 - 1500
Incandescente	100	10 - 15	750 - 1.000	70 - 80
Halógena	100	15 - 35	1.500 - 2.000	40 - 170
Fluorescente	80 - 85	40 - 100	6.000 - 24.000	30 - 100
Vapor de mercúrio	40 - 55	45 - 58	9.000 - 15.000	30 - 150
Vapor metálico	65 - 85	65 - 90	8.000 - 12.000	160 - 700
LED	80 - 95	100 - 130	25.000 - 100.000	0 - 5
LED tubular	80 - 95	100 - 130	50.000	0 - 5

Fonte: SANTOS; FELICI; SANTOS, 2020; KALACHE *et al.*, 2019; FURUYAMA, 2019; CIE 157, 2004; PESSOA; GHISI; LAMBERTS, 2013.

Considerando o espectro eletromagnético, o LED (*Light Emitting Diode*) é um semicondutor eletrônico que emite luz com a passagem de uma corrente elétrica. O comprimento de onda da radiação varia de acordo com o material semicondutor. Sobre o espectro eletromagnético, hoje em dia a maior parte dos LEDs emitem apenas radiação visível, sem emissão de UV ou IV (HURLBERT; CUTTLE, 2020). Furuyama (2019) discute a eficiência luminosa de lâmpadas LED, atentando para o fato de que, apesar do LED ser a tecnologia mais eficiente do mercado, suas normas de fabricação datam de 2012, enquanto a certificação do INMETRO entrou em vigor apenas em 2016.

A partir da emissão da radiação pelas fontes luminosas, acontecem os chamados fenômenos ópticos: possíveis eventos que acontecem pela interação da luz com a matéria, incluindo a maneira como o olho humano os percebe. As propriedades óticas dos materiais variam com a frequência da radiação incidente, motivo pelo qual são chamadas de espectrais. Dentre elas podemos destacar, como relevantes para

a iluminação de museus, a absorvência e refletência das superfícies, bem como a transmitência luminosa dos materiais, que permite classificá-los em opacos ou translúcidos.

A reflexão é um fenômeno óptico que diz respeito à radiação refletida por uma superfície para cada frequência de radiação incidente, podendo acontecer de forma regular ou difusa (LECHNER, 2015). A reflexão regular acontece em superfícies metálicas e polidas, onde a maior parte da energia conforma um ângulo sólido de incidência simétrico ao ângulo sólido de reflexão. A reflexão difusa ocorre devido à rugosidade das superfícies, fazendo com que os raios incidentes sejam refletidos em várias direções (LECHNER, 2015). A maioria das superfícies reflete a luz das duas maneiras, sendo a intensidade de luz refletida menor que a incidente, configurando o fenômeno da absorção (SOUSA; DUARTE, 2017).

Segundo Lechner,

A cor de uma superfície não depende apenas de suas características de refletência, mas também da composição espectral da luz. Uma superfície pintada em cor vermelha totalmente saturada (pura), iluminada por uma luz vermelha monocromática (pura) vai parecer na cor vermelho brilhante porque a maior parte da luz será refletida. No entanto, se essa mesma tinta for iluminada com luz azul monocromática, a superfície parecerá preta, porque a cor vermelha absorve todas as cores, exceto o vermelho. (LECHNER, 2015, p. 371, tradução nossa)¹

A iluminância é, em geral, o primeiro parâmetro analisado nos projetos de iluminação em museus, porque determina, junto com o tempo de exposição, a dose de energia que incide sobre os objetos, e o potencial dano ao acervo (JOHNSON, 1999). Para o conforto luminoso, é importante garantir níveis adequados de iluminância nas três modalidades de iluminação: natural, artificial ou híbrida.

Para a conservação preventiva das coleções, é necessário considerar a tipologia material dos bens culturais expostos e as doses máximas de exposição que eles

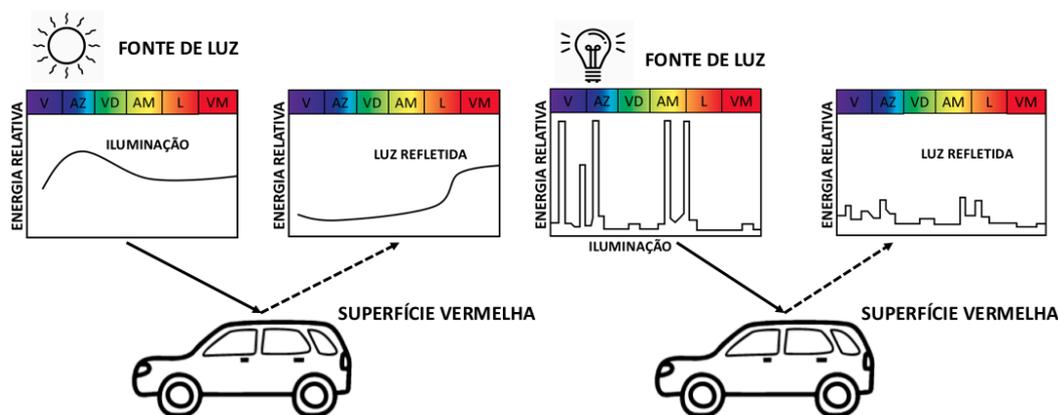
¹ "The color of a surface is due not only to its spectrally selective reflectance characteristics but also to the spectral composition of the illumination. A completely saturated (pure) red paint that is illuminated by monochromatic (pure) red light will appear bright red because most of the light is reflected. However, if this same red paint is illuminated with monochromatic blue light, it will appear black because the color red absorbs all colors except red. Unless the red paint is illuminated with light that contains red, it will not appear red." (LECHNER, 2015 P. 371)

podem receber (ZURITA, 2014). A dose de exposição é o produto da iluminância pelo tempo (medido em horas), geralmente pelo período de um ano, sendo então medida em lux x horas x ano (MICHALSKI, 2009).

Adotando esse parâmetro é possível utilizar um conceito de reciprocidade para a conservação preventiva de coleções, em que se pode concluir que “50 lx durante 100 horas causam o mesmo efeito de degradação que 5000 lx durante 1 hora” (CAMACHO, 2007, p.98). Assim, é necessário monitorar e controlar não só a iluminância instantânea, mas também a dose de exposição cumulativa anual, para prevenir a degradação dos bens expostos (VIANNA, 2009).

A composição espectral da fonte de luz incidente determina a cor refletida pelos objetos (Figura 2). O Índice de Reprodução de Cor (IRC) é outro parâmetro luminotécnico, que também tem influência psicológica e fisiológica, além de ajudar a expor fielmente as obras em um museu (VIANNA, 2009), devendo ser elaborado em consonância com o tema da exposição. Nos museus, o IRC é um parâmetro luminotécnico muito importante, o projeto da luz é crítico, e deve selecionar as fontes adequadas para permitir uma boa percepção das cores das obras (AJMAT *et al.*, 2011). A sensação gerada pelas cores é responsável por guiar o comportamento do observador no espaço, principalmente no caso de exposições de arte, as cores das obras são de extrema importância e qualquer alteração em sua natureza devido à iluminação inadequada compromete sua apreciação (ZURITA, 2014, p.10). Fontes luminosas com alto IRC (>90) proporcionam melhor qualidade da luz para apreciação das obras (VIANNA, 2009).

Figura 2 - Cor refletida pelos objetos conforme propriedades espectrais da fonte de luz



Fonte: Adaptado de LECHNER, 2015.

O parâmetro temperatura de cor, assim como o IRC, também determina a cor percebida (LECHNER, 2015). Lechner (2015) e Szokolay (2014) explicam que quando são aquecidos, os materiais emitem radiação, cuja composição espectral depende da sua temperatura, medida em *kelvin*. Corpos negros aquecidos a 1500K emitem cor alaranjada, a 3000K emitem cor amarelada, a 4500K cor branca, semelhante à emissão solar, e acima de dessa temperatura são cores azuladas. Assim, a luz emitida por uma fonte pode ser caracterizada como quente (até 3500k), neutra (3500k a 4500k) ou fria (acima de 4500k), em associação às cores emitidas pelos objetos aquecidos. Ajmat *et al.* (2011) reiteraram a importância de estudar os parâmetros luminotécnicos e a escolha de fontes de luz, que devem ser controladas para proteger os bens em exposição, e fornecer condições de exposição confortáveis para os visitantes. Algumas tecnologias permitem ainda o controle da temperatura de cor luz, para que possa ser ajustada para cada tipo de exposição (ZUMTOBEL, 2021).

2.2. Conforto luminoso e conforto visual

A iluminação natural e artificial nos museus, além de se adequar à conservação dos bens culturais, deve também atender ao conforto visual dos visitantes, minimizando a ocorrência de efeitos prejudiciais, como o ofuscamento. A seguir, serão apresentados alguns parâmetros de conforto luminoso e normas técnicas que auxiliam o projeto da luz em museus, bem como estudos que mostram como alcançar o conforto luminoso e visual para luz natural e artificial.

2.2.1. Parâmetros de conforto luminoso

O conforto luminoso está associado a níveis adequados de iluminância e à qualidade da luz, que quando bem distribuída, evita ofuscamento. Para a iluminação de ambientes, o controle do índice de ofuscamento é um requisito fundamental para o conforto visual. O ofuscamento é causado pela visão direta de lâmpadas ou do sol dentro do campo visual. O Índice de Ofuscamento Unificado (*Unified Glare Rate*, UGR, em inglês) determina o grau de desconforto causado pelo ofuscamento, levando em conta fatores do ambiente, das fontes de luz e do campo de visão do observador (ABNT, 2013).

O ofuscamento pode ser devidamente controlado observando-se os materiais expostos, sua transparência e o tipo de reflexão. Segundo Vianna (2009), uma estratégia para evitar o ofuscamento da luz natural em museus é preferir aberturas zenitais à laterais, utilizando também rebatedores e difusores para controlar a luz nas superfícies iluminantes. Já no caso da luz artificial, o conforto luminoso está associado também às especificações das lâmpadas e luminárias para o controle do ofuscamento, além de buscar utilizar luz indireta e posicionar as luminárias com a angulação correta em relação às superfícies que serão iluminadas.

Alguns parâmetros são estabelecidos como requisitos técnicos em normas nacionais e internacionais para obtenção de conforto luminoso nos ambientes. De acordo com a CIE (2021), “embora seja necessário fornecer iluminação suficiente para a tarefa, em muitos casos a visibilidade depende da maneira como a luz é aplicada, das características de cor da fonte de luz e das superfícies, juntamente com a quantidade de brilho que o sistema oferece”, motivo pelo qual foram selecionadas as variáveis de iluminância, ofuscamento, e reprodução de cor para buscar uma iluminação “segura, saudável e eficiente” por meio de “soluções práticas de eficiência energética”² (CIE, 2021, tradução nossa).

Tradução da norma europeia de mesmo nome, a NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013) estabelece como requisitos para o planejamento da iluminação os seguintes parâmetros: níveis mínimos de iluminância (E_m), limites de ofuscamento (UGR_L), e índice de reprodução de cor mínimo (R_a). Essa norma apresenta para ambientes escolares e hospitalares, recomendações específicas para cada tipo de ambiente dentro dessas tipologias, enquanto, para os museus, os índices são generalizados. A Tabela 2 mostra os níveis recomendados para o planejamento da iluminação em locais de entretenimento. Nos museus, as áreas de recepção, circulação, exposição, e reserva técnica têm funções distintas e específicas de iluminação para guiar,

² “While the provision of sufficient illuminance on the task is necessary, in many instances the visibility depends on the way in which the light is applied, the colour characteristics of the light source and surfaces together with the amount of glare the system gives. In this standard opportunity was taken to specify for various work places and task types not just the illuminance but also the limiting discomfort glare and minimum colour rendering index of the source. Parameters to create comfortable visual conditions are proposed in the body of this standard. The recommended values are considered to represent a reasonable balance, having regard to the requirements for safe, healthy and efficient work performance.”

orientar, exibir e preservar as coleções e, conseqüentemente, precisam de um planejamento customizado da sua iluminação.

A antiga NBR 5413 (ABNT, 1992) separava os ambientes do museu entre as categorias geral, quadros e esculturas e objetos, com três níveis de iluminância: inferior, médio e superior, como mostra a Tabela 3. Porém ela não estabelecia requisitos de ofuscamento ou reprodução de cor.

Tabela 2 - Recomendações de iluminação da NBR ISO/CIE 8995-1

Tipo de ambiente, tarefa ou atividade	\bar{E}_m lux	UGR_L	R_a	Observações
25. Locais de entretenimento				
Teatros e salas de concerto	200	22	80	
Salas com multiuso	300	22	80	
Salas de ensaio, camarins	300	22	80	É necessário que a iluminação do espelho seja isenta de ofuscamento para a maquiagem.
Museus (em geral)	300	19	80	Iluminação adequada para atender aos requisitos de exibição, proteção contra os efeitos de radiação.

Fonte: ABNT, 2013.

Tabela 3 - Recomendações de iluminação da NBR 5413 para museus

5.3.61 Museus

- geral	75 - 100 - 150
- quadro (iluminação suplementar)	150 - 200 - 300
- esculturas e outros objetos	300 - 500 - 750

Fonte: ABNT, 1992, p. 11.

A norma mais recente, ISO/CIE 8995-1, adotou o limite inferior da NBR 5413 para esculturas e outros objetos. Porém, quadros podem ser mais sensíveis que esculturas, o que não foi levado em conta pelas novas recomendações.

Ainda que as recomendações técnicas indiquem níveis instantâneos e doses máximas de iluminância, deve-se considerar que a luz natural é variável ao longo do tempo, fazendo com que a iluminância esteja condicionada aos horários do dia, estações do ano e condições do céu. Assim, ainda que os níveis recomendados sejam atingidos, a mesma iluminância será percebida visualmente de maneira diferente em cada museu, devido à influência da localização geográfica, das

características climáticas, e do entorno. Por isso, métricas de desempenho baseadas em condições climáticas locais, tal como o *Daylight Autonomy (DA)*, ou Autonomia de Luz Natural apresentam uma ideia mais precisa sobre o desempenho da luz do dia ao longo de um período pré-definido.

A partir da revisão de literatura, verificou-se que a iluminação para o desempenho luminoso nos museus, principalmente nas áreas expositivas, que são foco deste trabalho, é regulamentada por diferentes normas técnicas, embora muitas vezes elas não considerem variáveis ligadas ao conforto visual, tal como a uniformidade da distribuição da luz. Elas partem de alguns pontos fundamentais: uso da iluminação natural difusa de maneira controlada, conferindo uma iluminação homogênea, associada à iluminação artificial específica para cada tipo de material exposto, considerando possíveis elementos protetores, tais como vitrines de vidro, verticais ou horizontais.

2.2.2. Conforto luminoso e luz natural

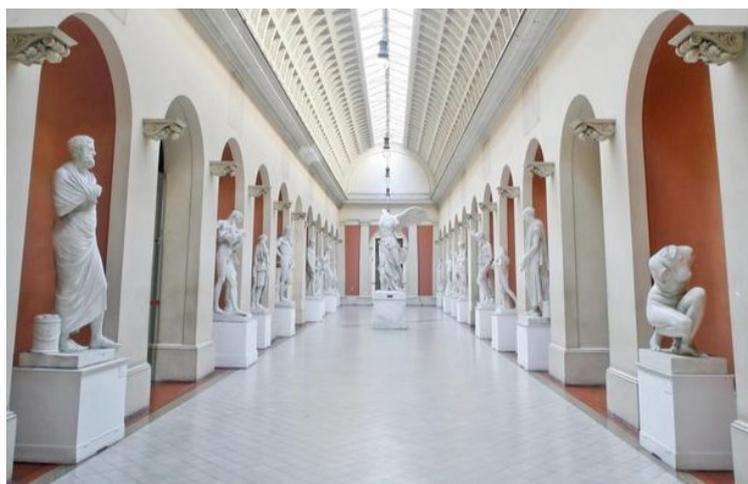
Frente à variabilidade da luz natural, um conceito pouco tratado nas normas e recomendações técnicas é a uniformidade da luz. Para o conforto visual, o Ministério da Saúde apenas indica que a “iluminação geral deve ser uniformemente distribuída e difusa”, enquanto VIANNA (2009) debate que essa uniformidade pode ser discutida, uma vez que em museus as condições de iluminação também são determinadas pela sensibilidade do acervo exposto.

Cada museu e cada local apresenta um desempenho da iluminação diferente, de acordo com o ambiente externo, as características climáticas da região, a arquitetura da edificação — que permite a entrada de mais ou menos luz natural, dependendo da orientação solar, da obstrução solar causada pelo entorno, dos tipos e materiais das aberturas, dentre outros fatores — e também dos tipos de exposição. Além disso, os materiais têm suscetibilidades diferentes à foto deterioração, o que deve ser levado em consideração ao elaborar o projeto luminotécnico (LICHT,2000; MICHALSKI, 2009; VIANNA, 2009; DANG; LIU; LUO, 2020).

A uniformidade na distribuição da luz depende das intenções do projeto de iluminação desenvolvido, visto que em alguns ambientes busca-se uma luz difusa e

uniforme, para valorizar o ambiente como um todo, sem destacar pontos específicos. No caso do Museu Nacional de Belas Artes, no Rio de Janeiro, foi utilizada iluminação zenital proveniente de claraboias envidraçadas (Figura 3), para permitir entrada de luz difusa na galeria de esculturas de gesso: são peças de reprodução produzidas entre 1860 e 1875, moldadas sobre as originais (MnBA, 2020).

Figura 3 - Iluminação zenital no Museu Nacional de Belas Artes do Rio de Janeiro



Fonte: MnBA, 2020.

De acordo com Michalski (2009), espaços de exposição são os que oferecem maior conflito para o *lighting design*, pela necessidade de proporcionar visibilidade e, ao mesmo tempo, manter as melhores condições possíveis para a preservação dos objetos mais vulneráveis à luz. De acordo com o autor, a integração da luz natural e artificial é uma forma de alcançar esse equilíbrio, desde que ela possa ser regulada por dispositivos de controle, criando um sistema de gradação (MICHALSKI, 2009).

Um exemplo dessa busca pela integração acontece no museu Guggenheim, em Nova York, onde o arquiteto Frank Lloyd Wright (1867 – 1959) elaborou um átrio central com claraboias de vidros semi-translúcidos, para uma iluminação zenital difusa e uniforme. A geometria interna tem um percurso em rampas helicoidais, que se desencontram devido à ampliação do raio espiral do museu, aumentando em direção à cobertura. As paredes são e as obras de arte são expostas nas extremidades das paredes, fazendo com que não recebam a luz direta proveniente do átrio central (KOHLMAN, 2021), como mostrado na Figura 4. As claraboias são uma das estratégias mais utilizadas em museus, para trazer uma iluminação difusa para o ambiente, criando uma atmosfera serena, causada pelas sombras suaves. A

luz natural confere aos objetos expostos uma aparência sóbria, em comparação à iluminação de realce, mas rica em contrastes (ERCO, 2012). Há, no entanto, que ressaltar-se que o uso de claraboias deve, em países latitude de mais baixa, ser acompanhado de sistemas de proteção solar, pois o sol passa mais próximo ao zênite, podendo trazer sobrecarga térmica e ofuscamento por incidência direta.

Figura 4 - Claraboias no Museu Guggenheim de Nova York



Fonte: GHINITOIU *apud* CHATTEL, 2016.

2.2.3. Conforto luminoso e luz artificial

A iluminação artificial é mais estática e controlável, podendo ser direcionada de acordo com o tipo e material da coleção (VIANNA, 2009). A iluminação nos ambientes de exposição é feita pela luz difusa e pela luz direcional. A quantidade relativa de cada uma e a mistura resultante dos dois tipos de luz determina, além da dureza das sombras projetadas por quadros e o impacto tridimensional de esculturas e objetos espaciais, mas também a dosagem de luz recebida pelos objetos (LICHT, 2000).

A iluminação cênica atribui efeitos e dinâmica ao espaço, enfatizando obras e objetos específicos, como é o caso do Museu do Estado do Pará em que se buscou destacar as obras em preto e branco por meio da exposição em paredes coloridas. Cada obra recebeu iluminação de destaque, por meio de *spots* com fechos direcionados (Figura 5). A iluminação difusa tem a vantagem de ser mais uniforme e cômoda para a adaptação visual, e a desvantagem de trazer poucas surpresas ao

olhar do observador. Por outro lado, a iluminação de efeito beneficia as sensações e a criação da história da exposição, mas pode se tornar cansativa visualmente, forçando o olho humano a se adaptar diversas vezes para acompanhar diferentes luminosidades (VIANNA, 2009).

Figura 5 - Iluminação cênica de destaque no Museu do estado do Pará



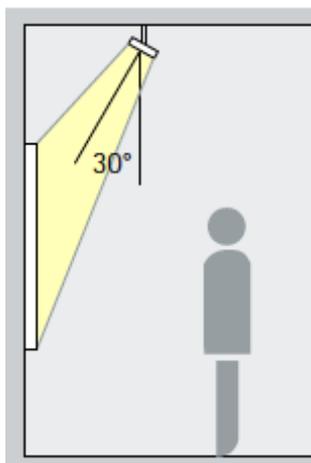
Fonte: BRAGA, 2020).

Para a iluminação artificial o manual de iluminação da Zumtobel (2018, p.60) apresenta algumas formas de garantir o conforto visual, ao mesmo tempo em que valoriza as obras de arte no percurso dos museus. O guia explica a importância do ajuste de cores de acordo com o contexto histórico das obras de arte (considerando, por exemplo, se foram produzidas à luz de velas, luz do dia, ou luz artificial). Indica que a composição espectral da luz também pode ser pensada de acordo com as expectativas dos visitantes e com o contexto arquitetônico e que cortinas e persianas podem ser utilizadas para controlar a entrada de luz solar. O guia ainda alerta sobre a utilização de iluminação de emergência integrada ao sistema principal de iluminação artificial, para garantir conforto visual mínimo em situações de emergência.

O ângulo de incidência da luz artificial é um fator muito relevante para o conforto luminoso nos ambientes. Sabe-se, por exemplo, que o ângulo ótimo de incidência da luz para iluminação de um quadro exposto numa parede vertical é de 30° (ERCO, 2012), como mostrado na Figura 6. Ângulos maiores são sinal de que a fonte de luz está muito distante do objeto, fazendo com que o observador projete uma sombra sobre ele. Por outro lado, se o ângulo de incidência for mais agudo, o resultado é uma luz leve projetada com sombras largas sobre o objeto. No caso da iluminação

de esculturas, o ângulo de 30° também se mostra eficiente, porque a luz dirigida sobre um elemento tridimensional cria sombras bem demarcadas, contribuindo para modelar a escultura e causar maior impacto (ERCO, 2012).

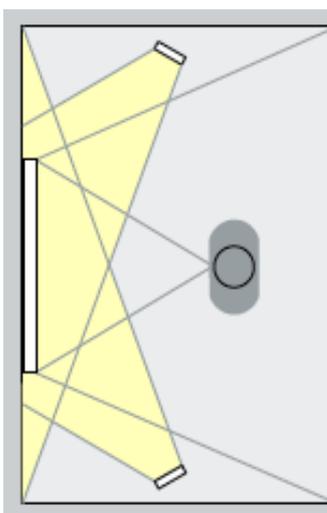
Figura 6 - Ângulo ótimo entre fonte de luz e quadro exposto



Fonte: ERCO, 2012, p.7.

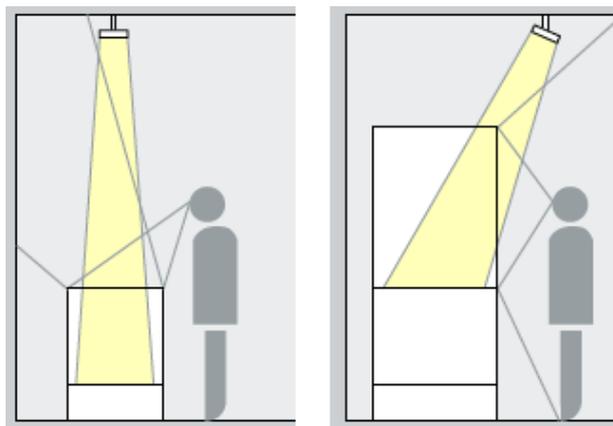
A fonte de luz também pode estar posicionada nas laterais, como em paredes adjacentes às obras, caso elas tenham um vidro de proteção. Assim o vidro não causará brilho ou reflexo sobre os objetos expostos, contribuindo para maior conforto visual (Figura 7). Na Figura 8 mostra-se como utilizar projetores para iluminação de vitrines de vidro centrais, para evitar a reflexão das superfícies e o ofuscamento dos visitantes. Também é possível utilizar vidros anti-reflexo nas molduras e vitrines.

Figura 7 - Fonte de luz lateral para objeto vertical



Fonte: ERCO, 2012, p.7

Figura 8 - Projetores de luz para vitrines de vidro centrais



Fonte: ERCO, 2012, p.7.

Entre os principais sistemas de iluminação artificial empregados em salas de exposição podemos enumerar: tetos iluminados — que buscam reproduzir a luz do dia com vidro opaco para iluminação difusa, luminárias indiretas para iluminação difusa, *wall wash* (direcional ou difusa) e luminárias direcionais do tipo *spot* (LICHT, 2000).

Uma estratégia utilizada tanto para iluminação natural quanto artificial de áreas expositivas é de “*wall wash*”, ou banho de luz na parede, em tradução livre. Trata-se de distribuir a luz homogeneamente pelas paredes, com objetivo de criar um fundo neutro para as exposições e uma sensação de amplitude do espaço, com luminosidade confortável para o olho humano (ERCO, 2012; LICHT, 2000;).

A iluminação natural, artificial, ou mista é determinante não só para o conforto visual e otimização da visualização dos objetos expostos, mas também para ajudar a contar uma história, para o tratamento dos espaços e valorização da arquitetura da edificação, como será tratado a seguir.

2.2.4. A luz como recurso arquitetônico, compositivo e narrativo em exposições

O código de Ética do Conselho Internacional de Museus (ICOM, 2004) especifica as principais funções de um museu: a exposição e a conservação, em que o projeto de iluminação se torna imprescindível para propiciar a comunicação do conhecimento, ao mesmo tempo em que preserva as coleções, sem afetar a sua qualidade. A essa medida as formas arquitetônicas dos museus também estão associadas às

diferentes abordagens da herança cultural. Poulios (2014) aborda três diferentes estratégias de preservação da herança cultural: uma baseada no material, considerada convencional, porque parte da manutenção e conservação extrema das características do patrimônio cultural, a segunda baseada nos valores, e nesse caso esbarra nas diferentes formas de atribuição de valor do patrimônio trabalhada por Riegl (1966), e a terceira conceitua a herança viva, em que o patrimônio cultural tem o propósito original de promover a conexão entre a herança cultural e a comunidade.

A iluminação nos museus é projetada de forma a criar uma narrativa, ou seja, uma história ao longo dos percursos, que compõem os diversos espaços internos, indo além de uma representação meramente funcional. Nas livrarias e cafeterias a iluminação deve criar uma atmosfera acolhedora e convidativa. Nos espaços de transição e circulação a iluminação contribui para a orientação dos visitantes, identificando os elementos importantes. Já nas salas de exposição, que são foco deste trabalho, a iluminação pode ser utilizada de maneira hierárquica, por meio de iluminação de realce, que desliga do contexto espacial as peças centrais de exposição, dando a elas uma importância especial e uma dramaticidade à exposição das peças (ERCO, 2012).

Balocco, Cecchi e Volante (2019) discorrem sobre a relação entre iluminação, arquitetura e preservação do patrimônio cultural. Segundo os autores, quando a solução de *retrofit* ou renovação de um sistema de iluminação não é capaz de lembrar o “clima luminoso” concernente à história do edifício, isso prejudica a correta leitura histórica do espaço, não transmite conteúdos e informações, pode-se alterar a percepção visual de um edifício histórico tornando-o, inclusive, irreconhecível.

No caso de tantos museus existentes em edificações históricas que foram adaptados para esse uso, a adaptação do patrimônio edificado, por meio de um projeto luminotécnico inteligente pode alcançar a valorização da edificação e a conservação das coleções, tema que será tratado a seguir.

2.3. Parâmetros luminotécnicos para conservação preventiva das coleções

A conservação dos bens culturais é um dos maiores desafios dos museus, e precisa de atenção especial para a proteção dos objetos, afinal o museu não só os exhibe,

mas também é um local de pesquisa histórica e cultural. Em 2020, o IBRAM publicou o Guia para Projetos de Arquitetura de Museus (IBRAM, 2020), com recomendações para que os profissionais envolvidos nos projetos considerem as interconexões da luz nos espaços internos e externos dos museus. Para proteger os objetos expostos é preciso evitar, dentro do possível, os espectros de luz danosos, contidos tanto na luz artificial quanto na natural. A publicação diz que:

“Deve ser prevista a utilização de métodos variados de iluminação, como iluminação pontual, iluminação geral e iluminação de detalhes, além de sistemas de iluminação embutida e de trilhos eletrificados, de acordo com as características dos forros de cada ambiente e com os efeitos pretendidos. O baixo consumo, reprodução de cor, não emissão de raios UV (ultravioleta) e IV (infravermelho) e a eficiência energética devem ser preocupações nesse projeto”. (IBRAM, 2020, p.34)

Esse é um documento importante porque sintetiza as recomendações do IBRAM. Entretanto, considerando a complexidade do tema da iluminação em museus, visando a conservação preventiva das coleções, a publicação brasileira pode ser considerada genérica, por não aprofundar nas técnicas para a iluminação das coleções, levando em conta que para os bens expostos a luz pode provocar uma série de danos, tais como escurecimento, desbotamento, fragilização e outras deteriorações, dependendo das características físicas e químicas dos objetos (CASSARES; PETRELLA, 2003; FERREIRA, 2014).

Nos ambientes de um museu a qualidade do ar, a temperatura, a umidade e a luminosidade são os principais fatores físicos que causam deterioração dos bens culturais. Os três primeiros podem ser ajustados de acordo com as melhores condições para a preservação das coleções, por meios técnicos como aquecimento, ventilação, condicionamento artificial do ar (CIE 157, 2004). Já a iluminação é mais difícil de ser controlada, pois iluminâncias semelhantes podem conter diferentes quantidades de radiação UV, dependendo da fonte luminosa utilizada (HOYO-MELENDEZ; MECKLENBURG E DOMÉNECH, 2011), como tratado no item 2.1.

De acordo com Homem (2006), a alta concentração de energia da radiação UV pode alcançar a energia de ativação de vários mecanismos de deterioração fotoquímica. Já a radiação IV é determinante para processos de deterioração envolvendo trocas de calor radiante, aumenta a temperatura dos objetos e acelera reações químicas

provocando diferentes fenômenos de deterioração. Muitas publicações trazem diretrizes de exposição a partir do espectro visível da luz. Em geral, as recomendações técnicas internacionais do ICOM, IES e IESNA propõem um limite de iluminância de 50 lx para materiais mais suscetíveis ao dano pela incidência da luz, e 200 a 300 lx para materiais mais resistentes.

Não obstante, os efeitos da luz são cumulativos, e muitas vezes irreversíveis, fazendo-se necessário que sejam considerados não só os níveis de iluminância, mas também a taxa de deterioração, de acordo com a dose de exposição, motivo pelo qual essas normas estabelecem uma dose anual de iluminância (MIER; SCARAZZATO, 2014). Assim, apesar de a norma brasileira não limitar a dose anual de exposição, os museus estão adotando essa política, determinando os níveis de iluminância e o tempo de exposição, baseando-se na natureza e grau de deterioração dos bens.

No exterior, existem as recomendações da IESNA (Illuminating Engineering Society of North America), válida na América do Norte, do ICOM (International Council of Museums) e da IES (Illuminating Engineering Society) válidas na União Europeia, e do CCI (Canadian Conservation Institute), válida no Canadá. Destaca-se que as normas internacionais também apresentam recomendações para o tempo de exposição anual, visando a conservação preventiva.

A publicação CIE 157:2004 é um relatório técnico que trata de iluminação para controle dos danos da radiação nos museus, que foi utilizado como base para as demais normas citadas acima. Nela são descritos dois processos que ocorrem com a incidência da luz sobre os objetos: a ação fotoquímica e o efeito de calor radiante. O primeiro tem como consequência principal as alterações cromáticas das superfícies, causando também outros danos químicos aos materiais, principalmente os orgânicos, como por exemplo, a fragilização das fibras em materiais têxteis. A extensão dos danos é função das características da radiação incidente, como dose de exposição, e composição espectral (CIE, 2004).

O Quadro 1 relaciona os tipos de materiais, a suscetibilidade à fotodeterioração, colocando os níveis de iluminância e de UV recomendados pela CIE 157:2004, utilizada como parâmetro de comparação neste estudo.

Quadro 1 - Níveis de iluminância, dose de exposição e UV recomendados pela CIE de acordo com a sensibilidade dos materiais

TIPO DE MATERIAL	SUSCETIBILIDADE À FOTODETERIORAÇÃO	LIMITE DE ILUMINÂNCIA (lx)	LIMITE DE DOSE DE EXPOSIÇÃO (lx.h.a)	LIMITE DE U.V (μW/m ²)
Cerâmicas, vidros metais e pedras	não suscetível	sem limite	sem limite	sem limite
Pintura a óleo/têmpera, couro não pintado, laca, osso, madeira, marfim, corno, fotografia a preto e branco	Baixa	200	600.000	≤75
Aquarela, guache, manuscritos, corantes, desenhos, têxteis, fotografia a cores, couro pintado, materiais de história natural, tais como pelos, penas, insetos e plantas	Média	50	150.000	≤30
Têxteis como seda, corantes de alto risco de desbotamento, tinta manuscrita anterior ao século XX	Alta	50	15.000	≤30

Fonte: FATHY *et al.*, 2020; HOYO-MELÉNDEZ; MECKLENBURG; DOMÉNECH, 2011.

Já o efeito de calor radiante está associado aos comprimentos de onda infravermelhos e é causado quando as superfícies são aquecidas. Esse efeito é diretamente proporcional ao aumento da irradiância, mas independente da capacidade térmica e da densidade do material (CIE, 2004). “Os efeitos visíveis desse processo são o endurecimento da superfície, descoloração e rachaduras, que podem ser difíceis de distinguir dos efeitos da ação fotoquímica” (CIE, 2004). Danos causados por esse processo podem incluir impactos físico-mecânicos aos objetos expostos, principalmente em microclimas enclausurados, tais como vitrines, uma vez que flutuações na temperatura das superfícies e do ar causam flutuações de umidade relativa no interior do mobiliário. Por esse mesmo motivo que é fundamental minimizar ou excluir a possibilidade de ocorrência de efeito estufa no mobiliário expositivo dos museus.

É possível diminuir o potencial dano às obras, expondo-as por períodos menores e utilizando comprimentos de onda menos agressivos. A utilização de iluminação dimerizável auxilia no controle da intensidade da luz de acordo com a obra exposta, e sensores de presença podem ser instalados para que a iluminação artificial aconteça nos períodos em que há visitantes no ambiente. Além disso, os horários para acendimento podem ser especificados para períodos específicos do dia (ZUMTOBEL, 2018).

O Conservation Center for Art and Historical Artefacts (CCAHA), considera que materiais com alta sensibilidade devem ser exibidos no máximo por 3 meses a cada 5 anos. Os materiais de média sensibilidade poderiam ser expostos por 3 meses a

cada 2 anos, enquanto os de baixa sensibilidade poderiam ser expostos permanentemente (CCAHA, 2020).

Hoyo-Meléndez, Mecklenburg e Doménech (2011) salientam, por exemplo, que a dose de exposição determinada pela IES é de 50.000 lx.hora.ano para os materiais mais sensíveis, baseado em uma exposição de 8h por dia, por 125 dias por ano. Já a CCI (Canadian Conservation Institute) considera que a exposição dura 250 dias no ano, determinando uma dose de exposição de 100.000 lx.hora.ano (CCI, 2020). Dessa maneira, uma política de conservação preventiva efetiva precisa determinar a sensibilidade à luz da coleção antes de definir os níveis de luz adequados e organizar o *layout* dos bens no espaço (HOYO-MELÉNDEZ, MECKLENBURG E DOMÉNECH, 2011).

O ICCROM (*International Centre for the study of the Preservation and Restoration of Cultural Property*) lançou um livro intitulado “*Museum Lighting: a Guide for Conservators and Curators*”, um guia para descrever os fenômenos de deterioração e ajudar a identificar quais objetos são mais vulneráveis, além de sugerir técnicas para minimizar os danos enquanto as coleções estão expostas (GCI, 2021).

A luz é uma das variáveis microclimáticas que mais influenciam na conservação preventiva, porque pode ser destrutiva para os materiais, especialmente os coloridos natural e artificialmente. A radiação Ultravioleta (UV) é o tipo de radiação do espectro com maior potencial de dano, por isso, o ideal é excluí-la totalmente nas salas expositivas (MICHALSKI, 2009). Uma distribuição desigual da luz, associada à alta dose de radiação UV, altas temperaturas e umidade relativa do ar são fatores que, quando combinados, provocaram uma alta taxa de deterioração nos bens culturais (FATHY *et al.*, 2020).

De acordo com Homem (2006) e Michalski (2009) o limite de radiação UV adotado pela comunidade museológica é de 75 $\mu\text{W}/\text{lm}$, sendo que acima desse limite recomenda-se a utilização de filtros UV nas janelas, luminárias ou vitrines. Para materiais orgânicos e de alta sensibilidade à luz Michalski (2009) recomenda ainda um limite de 10 $\mu\text{W}/\text{lm}$ de UV, visando a conservação preventiva dos objetos.

Para a maioria dos materiais o efeito mais recorrente da foto deterioração é o desbotamento, caracterizado principalmente pela perda de saturação de cor. Por

isso, o sistema ISO *Blue Wool* (ISO, 1995), foi incorporado pelo relatório CIE 157:2004. Esse sistema é baseado em um grupo de amostras de tecido que classifica os materiais de acordo com sua resistência à luz, baseado em 8 categorias, sendo 1 a categoria menos resistente e 8 a mais resistente. A cada categoria o material é em torno de duas vezes mais resistente do que a categoria anterior (MICHALSKI, 2009).

“Para prever a taxa de desvanecimento de um objeto, coloca-se um cartão do BWS no local onde se pretende expor o objeto, anotando a data do início da exposição. De tempos a tempos (cada duas semanas, por ex.), deverão verificar-se os primeiros sinais de desvanecimento do padrão. Uma vez que as primeiras amostras do cartão correspondem a materiais sensíveis, como documentos e têxteis, os resultados darão uma ideia geral do dano que se pode vir a prever se tais materiais forem expostos durante o mesmo período de tempo, naquele mesmo local e sujeitos àquele mesmo nível de iluminação. Poderá ser muito útil para sustentar decisões tomadas quanto à iluminação a que se pretende expor os objetos, demonstrando precocemente o seu efeito” (HOMEM, 2006, p. 234).

A Tabela 4 sumariza o tempo levado para se notar uma deterioração dos materiais de acordo com as categorias Blue Wool, considerando a exposição com e sem raios UV.

Tabela 4 - tempo para deterioração dos materiais segundo a ISO Blue wool, com e sem UV

SENSIBILIDADE DO MATERIAL	ISO BLUE WOOL	ANOS PARA PERCEPÇÃO DA DETERIORAÇÃO (a 50lx *3000h)		DOSE DE ENERGIA NECESSÁRIA PARA CAUSAR DETERIORAÇÃO PERCEPTÍVEL (Mix.h) (CIE 157,2004 p. 20)	
		COM UV	SEM UV	COM UV	SEM UV
Muito Sensível	1	1,5	2	0,22	0,3
	2	4	7	0,6	1
	3	10	21	1,5	3
Moderadamente sensível	4	24	68	3,5	10
	5	55	205	8	30
	6	137	685	20	100
Pouco sensível	7	342	2055	50	300
	8	822	6849	120	1000

Fonte: CCAHA, 2020; MICHALSKI, 2009; CIE 157, 2004.

A Tabela 5 mostra o tempo estimado para a descoloração dos materiais de acordo com a sensibilidade à luz e ao nível de iluminância da exposição, baseada em Michalski (2009). As unidades de tempo utilizadas na tabela foram mantidas conforme a publicação original, destacando-se a grande variabilidade do tempo de alteração, de duas semanas até 20.000 anos, a depender da sensibilidade e níveis de iluminância.

Tabela 5 - Tempo para descoloração dos materiais segundo sensibilidade dos materiais e nível de iluminância

SENSIBILIDADE		TEMPO PARA DESCOLORAÇÃO EM ANOS			
		Pouco Sensível	Moderadamente sensível	Muito sensível	
CATEGORIA ISO BLUE WOOL		7 e 8	4, 5 e 6	1, 2 e 3	
ILUMINÂNCIA	50 lux	Perceptível	300 - 7000	20 - 700	1,5 - 20
		Quase total	10.000 - 20.000	700 - 20.000	50 - 600
	150 lux	Perceptível	100 - 2.000	7 - 200	6 meses - 7 anos
		Quase total	3.000 - 70.000	200 - 7.000	15 - 200
	500 lux	Perceptível	30 - 700	2 - 70	2 meses - 2 anos
		Quase total	1.000 - 20.000	70 - 2.000	5 - 60
	5000 lux	Perceptível	3 - 70	2 meses - 7 anos	5 dias - 2 meses
		Quase total	100 - 2.000	7 - 200	6 meses - 6 anos
	30.000lux (luz do dia)	Perceptível	6 meses - 10 anos	2 semanas - 1 ano	1 dia - 2 semanas
		Quase total	20 - 300	1 a 30 anos	1 mês - 1 ano
Considera-se que um dia de exposição tem 8 horas e que o ano tem 3.000 horas de exposição.					
A descoloração quase total é uma estimativa de 30 vezes a descoloração perceptível					

Fonte: Michalski, 2009.

2.4. Estudos sobre iluminação para conforto luminoso e conservação preventiva em museus

Oliveira e Steemers (2008) desenvolveram trabalho no qual identificaram a satisfação dos usuários em dois museus, de acordo com a hipótese de que os visitantes têm uma experiência mais agradável e confortável em locais com maiores variações de iluminância. São descritos os benefícios psicológicos e fisiológicos da luz natural para o ser humano, que tem maiores sensações de bem estar com a luz do dia, e podem se sentir frustrados quando não tem acesso a ela. Segundo o estudo, os espaços internos devem garantir níveis suficientes de luz, mas também conforto visual, evitando ofuscamento. Os autores colocam que a memória de experiências passadas faz com que o homem crie expectativas para as próximas experiências físicas e sociais nos ambientes. Assim, o comportamento humano nos museus é previsível: envolve um período de concentração inicial de até 45 minutos, e depois a atenção se dissipa, porque as pessoas se sentem cansadas (fadiga museal). De acordo com os autores, essa fadiga é minimizada quando a exposição é heterogênea, ao invés de exibir muitas peças semelhantes próximas umas das outras.

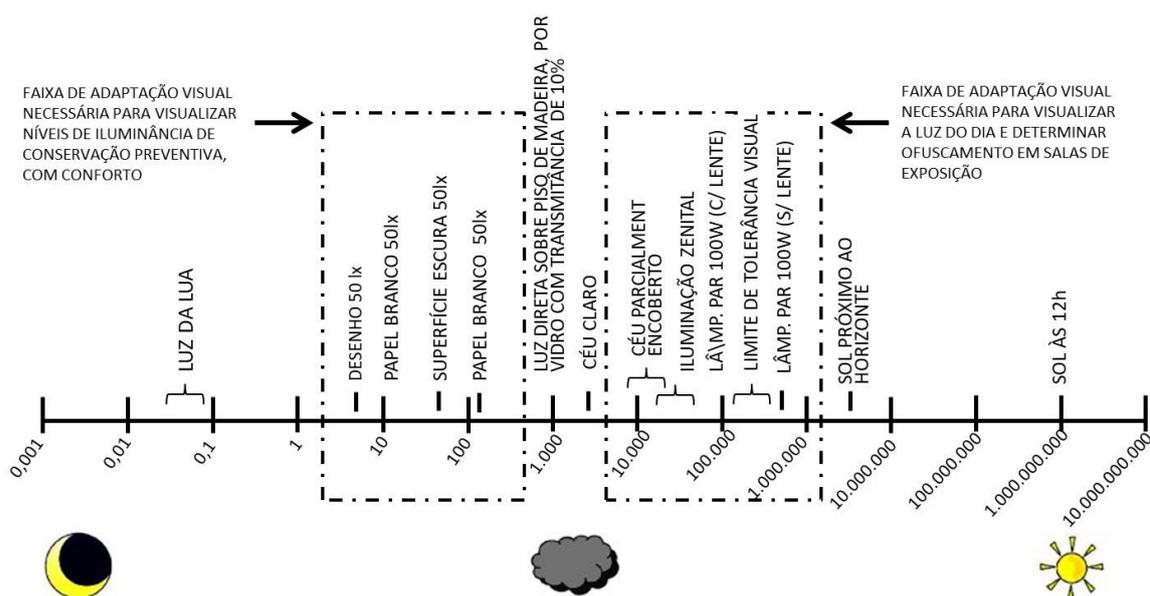
A metodologia utilizada pelos autores foi dividida em duas partes: a primeira de medição *in loco*, e a segunda de aplicação de questionários com os visitantes. Na primeira, foram medidas iluminâncias no inverno e no verão de 2007, em quatro

salas de dois museus de arte em Lisboa, Portugal. As medições foram realizadas com um luxímetro portátil em uma malha horizontal, e também na vertical, paralelo às vitrines e na altura dos olhos. Foram apresentados gráficos com as médias das iluminâncias nas salas. Na segunda fase, Oliveira e Steemers (2008) aplicaram questionários a 30 visitantes em cada sala selecionada, para medir o grau de satisfação com a qualidade da luz, por meio de uma escala de satisfação e de fadiga. As medições e respostas dos questionários foram comparados e os autores chegaram ao resultado que o ambiente iluminado apenas com iluminação artificial teve o menor índice de satisfação, além de chegarem à conclusão que os visitantes tendem a passar mais tempo, aproveitar melhor e retornar para uma próxima visita em ambientes com maior variabilidade de luz natural e artificial.

Hefferan (2008) tratou sobre o mecanismo de adaptação visual, por meio do qual somos capazes de enxergar doze ordens de magnitude, desde situações muito escuras como noites sem luar, até situações potencialmente ofuscantes, como o sol do meio-dia. No entanto, de acordo com o autor, um observador só pode visualizar confortavelmente em um momento, as iluminâncias dentro de uma faixa adaptada de duas a três ordens de magnitude. Assim, o olho pode se adaptar a qualquer faixa, mas não ao mesmo tempo. O sistema visual irá automaticamente mudar para a faixa adaptada de iluminâncias mais altas no campo de visão. A

Figura 9 ilustra, em uma escala logarítmica, a ampla gama de iluminâncias que ocorrem naturalmente e são percebidas pelo olho humano. Nota-se a disparidade entre o nível de iluminância para objetos iluminados nos níveis de iluminação de conservação e as iluminâncias encontradas quando a luz do dia controlada é permitida em salas de exposições. Como consequência, os objetos podem parecer mais escuros ao olho humano quando competem com as iluminâncias da luz do dia. Além disso, as mudanças constantes entre faixas de iluminância causam fadiga visual ao visitante.

Figura 9 - Faixa de iluminâncias percebidas pelo homem, em escala logarítmica (lx)



Fonte: adaptado de HEFFERAN, 2008.

Em seguida Hefferan (2008) explica como as formas arquitetônicas dos museus são influenciadas pelos critérios de iluminação. De acordo com o autor, apesar das diferenças entre a forma arquitetônica, o entorno da edificação, e das características climáticas, os tipos de abertura para iluminação natural têm impactos semelhantes na distribuição das iluminâncias internas. De acordo com o autor, as janelas são o tipo de abertura mais problemático, porque provocam níveis de iluminância muito altos, e mesmo quando controlados dificultam a adaptação visual. As claraboias também permitem a entrada direta de luz solar, e por isso são mais utilizadas em átrios e pátios internos. Já os tetos translúcidos são geralmente localizados abaixo de uma claraboia e muitas vezes conseguem algum controle dos níveis de iluminância. Porém, Hefferan (2008) articula que o ganho térmico pela envoltória pode ser alto, e o teto pode gerar muitas reflexões, causando ofuscamento. O estudo conclui que os outros tipos de iluminação zenital, tais como *sheds* e poços de luz são mais adequados para salas de exposição em museus, porque permitem controlar a entrada de luz solar, bloqueando a visão direta céu.

Mier e Scarazzato (2014) fizeram estudo direcionado para os espaços de entrada e circulação dos museus (chamados pelos autores de áreas preambulares), evidenciando as diferentes possibilidades de trabalho com a luz artificial e natural, uma vez que esses espaços geralmente não têm coleções expostas. Dessa forma,

há maior liberdade para o projeto da luz. De acordo com os autores, os níveis de iluminância num dia de céu limpo podem variar de 10.000 a 100.000 lx na área externa, enquanto a recepção interna terá de 50 a 500 lx. O contrário acontece durante a noite, em que o interior pode estar até 100 vezes mais iluminado do que o meio externo. Dessa forma, as áreas de entrada e circulação funcionam como espaços de adaptação visual, sendo importantes para que o olho humano possa se acostumar a diferentes iluminâncias. Assim como Hefferan (2008), os autores também afirmam que por mais que o homem consiga enxergar uma ampla faixa de iluminâncias — desde 1 lx da luz da lua até 100.000 lx da luz solar direta, é preciso haver uma transição entre duas faixas, proporcionando o tempo necessário alcançar conforto visual. Os autores buscaram no artigo levantar bibliografia alertando sobre a importância do projeto de iluminação nos museus, tanto para conservação das coleções, quanto para a estruturação do espaço interno. Nota-se nos estudos levantados a importância da adaptação visual para permitir um percurso confortável, com gradação das iluminâncias, de forma a proteger e conservar o acervo exposto.

Hurlbert e Cuttle (2020) tratam sobre o desafio dos museus se manterem atualizados com as tecnologias de iluminação, que apresentam desenvolvimento e obsolescência rápidos. Nesse contexto a iluminação LED motiva a substituição de lâmpadas mais antigas por conta de sua alta eficiência energética e redução de custos. Segundo os autores, a principal particularidade das lâmpadas LED que precisa ser observada nos museus é a sua reprodução de cores, inclusive para melhorar a experiência dos visitantes. No estudo, foi realizada uma revisão de trabalhos dos últimos sete anos sobre iluminação inteligente, que pode modular o espectro da luz de LED em tempo real, de acordo com os horários do dia, com o espaço e com a atividade realizada neles, buscando melhorar a reprodução de cores dos objetos em exposição e reduzindo o risco de foto deterioração. Os autores concluíram que o questionamento entre a iluminação incandescente, fluorescente ou LED foi transposto, e o atual desafio é a otimização do controle da luz, envolvendo a investigação soluções para integração com a luz natural, para alcançar as temperaturas de cor e níveis de iluminação ideais, evitando a deterioração por conta da exposição em excesso.

O Quadro 2 resume as principais informações dos estudos levantados sobre iluminação em museus.

Quadro 2 - Resumo dos estudos levantados sobre iluminação em museus

AUTORES	INFORMAÇÕES	METODOLOGIA	RESULTADOS
Oliveira e Steemers (2008)	Tema: Satisfação de visitantes em museus	Medição de iluminâncias nos museus, com luxímetro portátil	Ambiente iluminado apenas com iluminação artificial teve o menor índice de satisfação
	Local: Lisboa Portugal, em dois museus de arte Objetivo: Investigar o papel da iluminação natural e artificial para a satisfação dos visitantes	Aplicação de questionários com 30 visitantes do museu sobre satisfação com a iluminação	Luz artificial e natural integradas com variabilidade deixam os usuários mais satisfeitos
Hefferan (2008)	Tema: uso da luz natural em museus	Explicação das principais métricas para conforto luminoso e conservação preventiva.	Melhor tipo de abertura para iluminação natural são as zenitais do tipo shed e poços de luz
	Local: Colorado, EUA Objetivo: Investigar formas de utilizar a luz natural em museus, para conforto luminoso e conservação das obras	Levantou tipos de abertura para iluminação natural Passo-a-passo para elaborar o projeto de arquitetura de museus, pensando na iluminação natural	Para utilizar a luz natural em museus deve-se controlar a entrada de luz direta, por meio do bloqueio da visão direta do céu
Mier e Scarazzato (2014)	Tema: Iluminação em áreas preambulares de museus (circulação e entrada)	Revisão bibliográfica sobre o projeto da iluminação em museus, em projetos de arquitetos renomados.	Alerta sobre importância do projeto de iluminação nos museus para permitir adaptação visual.
	Local: São Paulo, Brasil Objetivo: Investigar como arquitetos e conservadores desenvolvem projetos de iluminação em museus		Iluminação em museus deve aliar estética, composição espacial, tecnologias e conservação preventiva
Hurlbert e Cuttle (2020)	Tema: Iluminação de museus para pessoas e pinturas	Revisão bibliográfica sobre os avanços das tecnologias de iluminação em museus nos últimos 7 anos	Iluminação em LED é um caminho certo
	Local: Londres, Inglaterra Objetivo: Investigar estágio de desenvolvimento das tecnologias para a iluminação de museus		Deve-se buscar otimizar o controle da luz Os desafios estão em utilizar a iluminação inteligente para proteger o acervo e criar percursos emocionantes para os visitantes

Fonte: elaboração própria com base em OLIVEIRA; STEEMERS, 2008; HEFFERAN, 2008; MIER; SCARAZZATO, 2014; HURLBERT; CUTTLE, 2020.

2.5. Estado da arte da simulação de iluminação

Este tópico traz a revisão da literatura sobre simulação de iluminação, apresentando as principais métricas e programas utilizados, bem como faz um levantamento de estudos que utilizaram da simulação computacional para avaliação da iluminação em museus.

2.5.1. Métricas da iluminação

As métricas para avaliar a iluminação natural podem ser estáticas ou dinâmicas. Para as simulações computacionais estáticas, considera-se um ano, dia e horário específicos para a simulação, e a métrica mais utilizada para a avaliação é o nível de iluminância, proposto pela NBR 15.215-4 (ANBT, 2005).

Segundo a ABNT (2005), a métrica mais comum para avaliação da iluminação natural era o Fator de Luz Diurna (FLD), definido como a relação entre a iluminância interna de um ponto no interior do ambiente e a iluminância horizontal externa desobstruída sob o céu nublado padrão CIE. E, entretanto, por se tratar de uma métrica estática e com o avanço dos programas computacionais, esta métrica tem caído em desuso em detrimento de métricas baseadas no clima.

A avaliação do desempenho de edificações é uma tarefa complexa, em que os modelos computacionais auxiliam na avaliação frente a diversas variáveis. Através de programas de simulação computacional é possível representar e comparar diferentes cenários, permitindo a análise de alternativas distintas. Atualmente a tendência nas áreas de conforto luminoso e termo energético é avaliar-se o comportamento de uma edificação ao longo de um ano e, para tal, é necessário dispor de informações climáticas disponíveis nos arquivos de dados climáticos horários (8.760 horas do ano), que são utilizados para representar as condições externas à edificação (DIDONÉ; PEREIRA, 2010).

As simulações de iluminação natural que utilizam dados climáticos horários de radiação solar são chamadas de *Climate-Based Daylight Modelling* (CBDM) ou simulação anual de iluminação natural dinâmica e têm ganhado destaque na discussão sobre métodos para a avaliação da iluminação natural em edifícios. As avaliações dinâmicas de iluminação natural de edifícios geram uma série temporal horária de predições por ponto de estudo (CAVALERI; CUNHA; GONÇALVES, 2018).

Entre os principais parâmetros para avaliações dinâmicas de iluminação natural, destacam-se o *Daylight Autonomy* (DA), o *Spatial Daylight Autonomy* (sDA), o *Annual Sunlight Exposure* (ASE) (CAVALERI; CUNHA; GONÇALVES, 2018).

O conceito de *Daylight Autonomy* (Autonomia de Luz Natural) foi proposto em 1989 pela *Association Suisse des Electriciens* e redefinido Christoph Reinhart para *Annual Daylight Autonomy* (DA) ou Autonomia Anual de Luz Natural. O DA é um procedimento de cálculo que quantifica a saturação anual de luz natural em um ambiente, representando a frequência que um determinado valor de iluminância é alcançado no plano de trabalho (IES, 2012).

Um valor mínimo de iluminância a ser atingido no ambiente para conforto luminoso é estabelecido (por exemplo, 300 lx ou 500 lx), através de uma malha de pontos com sensores em um plano de trabalho horizontal, tem-se a porcentagem de horas do ano em que o ambiente dispõe de, no mínimo, esse valor pré-determinado (CAVALERI; CUNHA; GONÇALVES, 2018).

O *Spatial Daylight Autonomy* (sDA) ou Autonomia Espacial da Luz do Dia e o *Annual Sunlight Exposure*, (ASE) ou Exposição Anual da Luz do Dia, foram propostos em 2012 pela LM-83 da *Illuminating Engineering Society* (IES, 2012). O sDA é referente ao desempenho da iluminação natural, já o ASE é relativo ao conforto visual dos ocupantes.

O sDA estabelece uma porcentagem de área do ambiente que deve apresentar um valor mínimo de iluminância – 300lux, por uma fração de tempo – ao menos 50% das horas ocupadas, representado pela sigla: sDA 300/50%. Já o ASE considera a exposição da luz do sol nos ambientes para 250 horas do ano. Para valores superiores a 1000 lx em um ambiente, acima desse período de horas, significa que há ofuscamento pela luz do sol (IES, 2012). O ASE também é uma métrica espacial: há desconforto visual quando seu valor é superior a 10%.

2.5.2. Programa de simulação de iluminação: *Climate Studio*

Entre os *códigos* de simulação de iluminação, foi selecionado o plug-in *Climate Studio* para a realização das simulações computacionais deste trabalho. Trata-se de um plug-in de análise de desempenho térmico e lumínico para o *Rhinoceros 3D*, um programa de modelagem NURBS (Non Uniform Rational Basis Spline). Desenvolvido e distribuído por Robert McNeel & Associates (SOLEMMMA, 2021), o *Climate Studio*

substituiu o antigo DIVA (Design Iterate Validate Adapt), desenvolvido por Reinhart, que foi descontinuado (REINHART *et al.*, 2011b).

Além das análises de iluminação natural como o acesso à luz do dia e conforto visual, o *Climate Studio* também avalia o desempenho da iluminação elétrica, realizando simulações termo-energéticas, análises de conforto térmico e simulação de ventilação natural. Neste estudo o *Climate Studio* foi utilizado para as simulações de luz natural.

As métricas e métodos de simulação vêm contribuir para a avaliação dos projetos nas etapas anteriores à construção, visando uma maior eficiência energética, através da integração entre a iluminação natural e artificial, além da valorização da edificação e conservação das coleções, no caso das edificações museológicas. Alguns estudos que utilizaram as simulações para garantir uma melhor qualidade de espaços de exposição serão apresentados a seguir.

2.5.3. Estudos de simulação de iluminação em museus

Em Wilson (2006) o programa Radiance foi utilizado para simular as condições de iluminação natural e artificial em sete museus do Reino Unido, em um projeto intitulado MUSEUMS. Os principais problemas encontrados foram relativos à incidência solar direta e ao ofuscamento, que acontecia principalmente quando haviam aberturas laterais muito verticais. Na iluminação artificial o objetivo foi a substituição das lâmpadas fluorescentes que tinham uma luz difusa e opaca por fontes de luz focalizadas de alto rendimento, ainda fluorescentes. As simulações permitiram prever os níveis de iluminância e a distribuição da luz nos espaços de exposição, experimentando diferentes dispositivos de proteção e controle solar, tais como prateleiras de luz, vidros duplos com transmitâncias controladas e persianas.

Kim e Seo (2012) buscaram encontrar uma maneira em que simulações de luz natural pudessem ser combinadas com o processo arquitetônico. Foi utilizado o programa Radiance que possibilitou o processamento de dados para realização de simulações gráficas e analíticas de simulação, para avaliar o desempenho da luz natural no Museu de Arte de Seul na Coreia de Sul (SeMA). O objeto de estudo de Kim e Seo foi uma sala onde havia sido instalada uma claraboia em forma de

pirâmide na cobertura para entrada de luz natural (Figura 10). No entanto, verificou-se que, apesar dos projetos terem sido feitos para a melhor utilização de luz natural, a iluminação solar no ambiente acontecia de forma excessiva, danificando as obras que se encontram no local e gerando problemas de brilho excessivo para os visitantes.

Figura 10 - Claraboia do museu SeMA interna e externamente



Fonte: KIM; SEO, 2012

Para que o ambiente tivesse uma iluminação favorável seria necessário manter um nível uniforme de luminosidade em toda área de exposição, e a fim de se obter medições confiáveis, utilizaram-se especificações da *Illuminating Engineering Society of North America* (IESNA, 2012) com níveis de iluminação de 50 lx para materiais de alta sensibilidade, 200 lx para materiais de média sensibilidade e 500 lx para materiais pouco sensíveis. Foram criados modelos na escala 1/20 e modelos de simulação feitos em AutoCad, que foram desenvolvidos de forma a obter representações da edificação. As medições foram realizadas por cinco dias com céu em condições moderadas e com poucas nuvens.

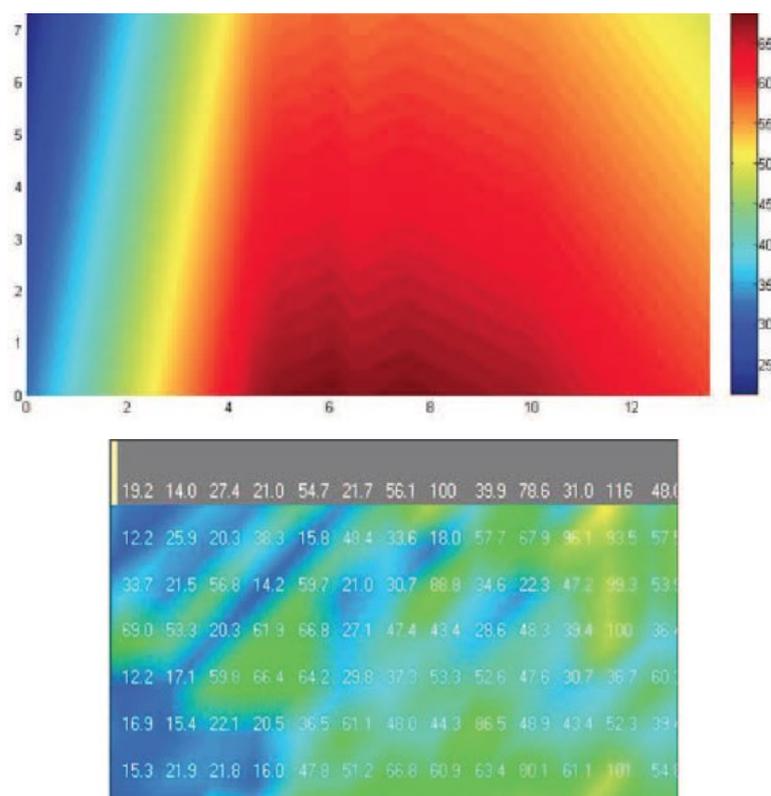
O estudo demonstrou que os erros relativos entre os resultados do teste do modelo de escala e a simulação no *Radiance* foram de 35% a 45% em média. Então, foram feitas correções matemáticas através de um fator de correção, encontrado por meio da comparação dos resultados obtidos com simulação e resultados obtidos com um modelo físico em escala, fazendo com que as diferenças fossem reduzidas para uma faixa de 3% a 9%. O fator de correção permitiu a utilização dos resultados da

simulação pelo *Radiance* e com isto propor soluções para os problemas de iluminação natural da clarabóia, modificando as dimensões da claraboia e alterando a transmitância de luz dos vidros. Assim, foi possível obter uma claraboia com melhor desempenho no fornecimento de luz natural, adequada para o ambiente.

Balocco, Paganini e Marmonti (2016) realizaram simulação da iluminação natural e artificial com o objetivo de propor uma nova iluminação do Salão dos Quinhentos, localizado no *Palazzo Vecchio* em Florença, que exhibe grandes afrescos de artistas como Michelangelo, Vasari e Leonardo da Vinci. O objetivo foi recuperar a memória histórica por meio das possibilidades oferecidas pelas tecnologias de simulação, e propor um projeto de iluminação que estivesse de acordo com a norma italiana para conservação preventiva e materiais altamente sensíveis à luz, que estabelece um nível máximo de iluminância de 150 lx e dose anual de exposição menor que 500 lx.hora.ano. Foi feito um modelo 3D e a simulação do clima luminoso pelo programa *DIALux*. Para isso, foram realizadas medições de luminância e iluminância *in loco*, tanto nas superfícies horizontais quanto verticais, utilizando uma malha de pontos pré-determinados. As medições aconteceram tanto no verão quanto no inverno nas condições de iluminação exclusivamente natural, iluminação mista, e iluminação exclusivamente artificial. Como resultado, foram produzidas isocurvas de iluminância (Figura 11). Houveram limitações nas medições devido ao alcance máximo dos luxímetros e tripés utilizados, em relação às medidas muito extensas dos afrescos.

Os níveis de iluminância e a dose anual de exposição ficaram acima dos limites estabelecidos pela norma nas simulações de consideravam a iluminação mista, situação que acontece na maior parte do tempo que o museu fica aberto ao público. O estudo não cita quantas simulações foram feitas ou quais modificações foram testadas até chegar ao novo projeto escolhido, onde foi proposta uma solução de iluminação com lâmpadas de LED, com temperatura de cor entre 2800K e 4000K, e projetores de luz com controle de dimerização (Figura 12). O projeto proposto atendeu a todos os limites das normas técnicas para conservação preventiva (BALOCCO; PAGANINI; MARMONTI, 2016).

Figura 11 - Distribuição de iluminâncias produzida por medição no Salão dos Quinhentos



Fonte: BALOCCO; PAGANINI; MARMONTI, 2016, p. 4.

Figura 12 - Iluminação mista no verão - existente à esquerda e simulada à direita



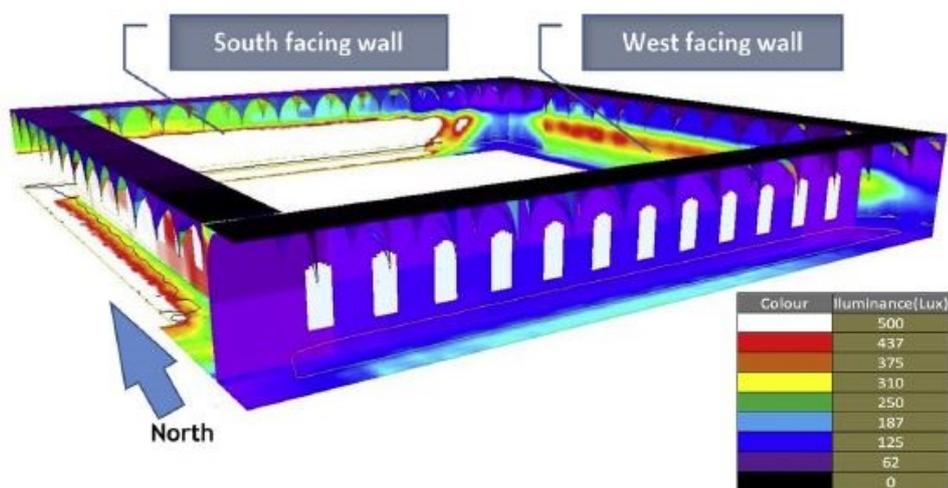
Fonte: BALOCCO; PAGANINI; MARMONTI, 2016, p.6

Pinilla *et al.* (2016) estudaram os riscos da iluminação natural comparada à artificial para quantificar o nível dos danos causados à exibição de quadros permanentes do Mosteiro de Santa Maria de el Paular, em Madrid. O objetivo foi medir o nível de radiação e a sua distribuição espectral no espaço ao longo do tempo de exposição, para calcular um fator de risco global. Os autores explicam que muitas obras já haviam sido restauradas anteriormente ao estudo, devido aos danos causados pela

radiação. Após essa restauração a luz natural passou a ser controlada por meio de películas instaladas nas janelas, com remoção da radiação UV, então o trabalho de Pinilla *et al.* (2016) considerou apenas a radiação de 400 a 780nm, comprimentos considerados como radiação visível pela CIE. Para caracterização das transmitâncias do vidro os autores utilizaram um espectrofotômetro.

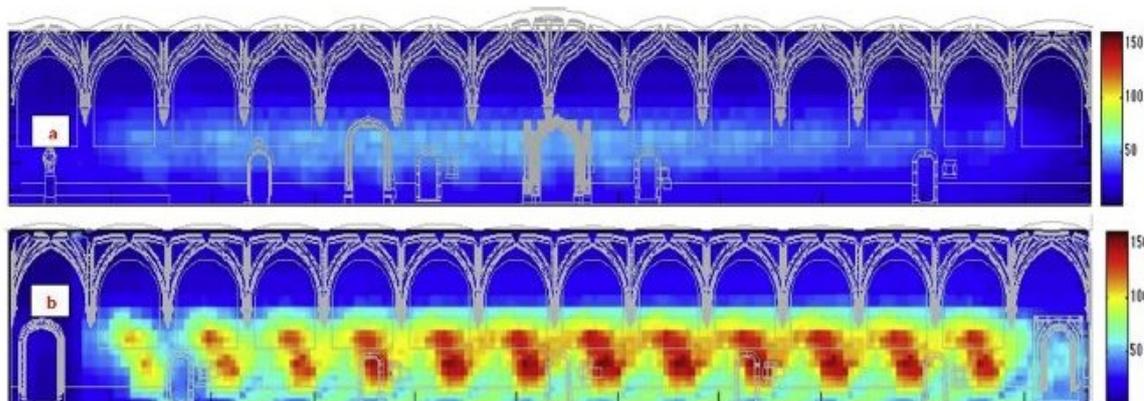
A metodologia incluiu a medição de iluminâncias *in loco* nas superfícies verticais de paredes de exposição. Foi desenvolvido um modelo 3D num programa CAD, para uma simulação dinâmica anual da sala de exposição, no programa DIALux. As simulações consideraram três tipos de céu: claro, parcialmente coberto, e encoberto. Foram considerados os procedimentos da CIE 157:2004 para cálculo dos danos causados pela radiação aos quadros a óleo. Os resultados permitiram a visualização da distribuição espectral das iluminâncias, como mostra a Figura 13, e o cálculo do fator de risco global para as exposições dos quadros nas paredes, como mostrado na Figura 14. Os autores chegaram à conclusão de que o projeto de iluminação pode explorar a luz do dia, controlando-a junto à iluminação artificial, desde que haja um equilíbrio entre dose de exposição e o dano causado (PINILLA *et al.*, 2016).

Figura 13 - Distribuição das iluminâncias no Mosteiro de Santa Maria de el Paular



Fonte: PINILLA *et al.*, 2016, p. 1367.

Figura 14 - Fator de risco global (GRF_a) para as paredes de exposição dos quadros à óleo



Fonte: PINILLA *et al.*, 2016, p. 1369.

Balocco, Cecchi e Volante (2019) apresentaram uma abordagem integrada de iluminação sustentável focada na conservação preventiva, na economia de energia e na aplicação de novas tecnologias para otimizar o aproveitamento da iluminação natural conjugada com o uso eficiente da iluminação artificial em uma igreja histórica convertida em biblioteca (Biblioteca Santa Marta) da Universidade de Florença. Apesar de não se tratar de um museu, a biblioteca também se configura como um espaço de exposição de acervo, levando em conta a foto sensibilidade dos livros. Segundo o estudo, o nível de iluminação sugerido para materiais mais sensíveis como tecidos e papéis, é de 50 lx. Para materiais com menos sensibilidade, tais como pedras, o nível de iluminação sugerido é de até 300 lx ou 150 lx para madeira e materiais orgânicos.

A pesquisa teve como objetivo criar uma abordagem metodológica para avaliar e aplicar soluções sustentáveis de iluminação, maximizando o uso e controle da iluminação natural, complementando-a com a iluminação artificial. A metodologia envolveu a medição das iluminâncias *in loco*, o levantamento e caracterização das lâmpadas e circuitos de iluminação artificial e a simulação computacional pelo software DIALux, comparando as condições existentes com um novo projeto. Para alcançar os objetivos, a nova proposta de iluminação para o ambiente estudado utilizou lâmpadas LED de alto desempenho. As autoras concluíram que a metodologia utilizada pode ser usada como ferramenta para soluções de iluminação e sustentabilidade, orientadas para o usuário, garantindo os efeitos positivos da luz

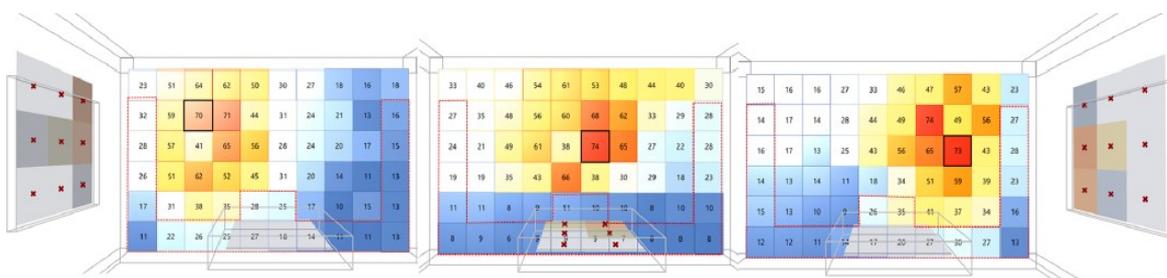
para a saúde humana e bem-estar, mas também a proteção e conservação preventiva do patrimônio cultural, no curto e longo prazo, com redução do consumo energético e aumento de sustentabilidade (BALOCCO; CECCHI; VOLANTE, 2019).

Al-Sallal, Abouelhamd e Dalmouk (2020) investigaram o desempenho da luz do dia em diversos museus dos Emirados Árabes, usando medições *in loco* de iluminâncias e refletâncias externas e internas, além de levantamento de dados sobre a estrutura arquitetônica dos museus, tais como dimensões e geometria das aberturas. Foi desenvolvido, então, um modelo 3D de um museu típico dos Emirados Arabes, para simulação computacional por meio do plug-in Daysim, para calcular a iluminação hora a hora. O modelo considerou o layout disposto, os tipos de materiais expostos, e suas sensibilidades à luz. Os resultados mostraram que o DA nos museus era menor para os materiais pouco sensíveis, e maior para os materiais mais sensíveis à luz. De acordo com os autores, no entanto, quanto menor o *Daylight Autonomy* (DA), melhor o desempenho da iluminação para preservação das coleções. Os autores recomendaram então que a porcentagem de horas que ultrapassa os níveis de iluminância recomendados (sendo que foi usado o padrão do IESNA) deveria ser minimizada para proteger os objetos. A partir do estudo realizado foi possível propor estratégias para a redução do DA e proteção dos artefatos mais frágeis, tal como a separação dos mesmos em salas com iluminação artificial e pouca luz natural, e instalação de sistemas de proteção solar nas janelas para ajudar a controlar melhor a entrada da luz.

Fathy *et al.* (2020) realizaram um estudo com objetivo de gerar fluxo de trabalho simplificado para guiar o projeto de fachadas de museus, incorporando a luz natural observando tanto os padrões normativos para a conservação preventiva das coleções, quanto os aspectos qualitativos para fornecer um ambiente mais interessante para os visitantes. Os autores utilizaram, para o conforto luminoso, a métrica de *Spatial Contrast*, explicando que os ambientes de exposição com maior contraste de iluminação causam mais entusiasmo, e tem avaliações mais positivas.

O método proposto consiste em dividir a fachada em uma malha de pontos, encontrando as áreas que tem maior potencial de iluminação, fazendo com que seja possível combinar o tamanho das aberturas com a distribuição da luz desejada para contraste visual e preservação do acervo (Figura 15).

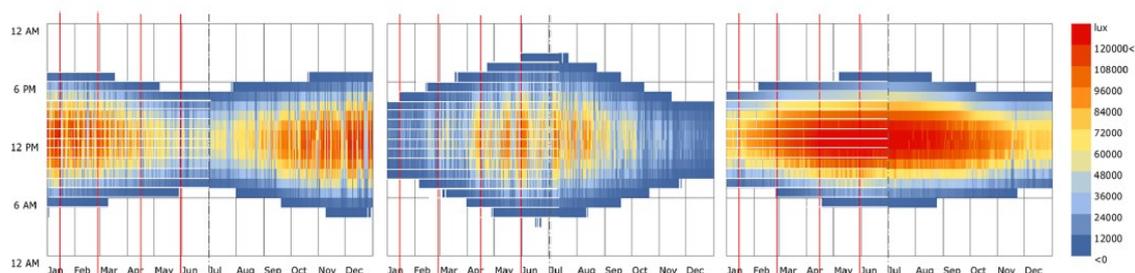
Figura 15 - Fachada genérica pixelada em grid para medição das iluminâncias



Fonte: FATHY *et al.*, 2020, p. 678.

Para testar essa metodologia os autores fizeram modelos genéricos de três salas de exposição, em três localidades diferentes: Sydney, Berlim e Cairo (Figura 16). Como resultado, foi proposto um fluxo conceitual de trabalho, indicando as etapas para auxiliar o projeto de fachadas mais interessantes: com aberturas de tamanhos variados para alcançar os objetivos de preservação e conforto luminoso.

Figura 16 - Mapa de iluminâncias para fachadas em Sydney (esquerda), Berlim e Cairo (direita)



Fonte: FATHY *et al.*, 2020, p. 678.

O Quadro 3 resume os estudos levantados sobre simulações em museus.

Quadro 3 - Resumo dos estudos levantados sobre simulação de iluminação em museus

AUTORES	INFORMAÇÕES	METODOLOGIA	RESULTADOS
Wilson (2006)	Tema: Soluções para integração da luz natural em museus	Simulações pelo software Radiance para luz natural e artificial. Foram testados diferentes cenários com proposições de proteções solares	A troca das lampadas propiciou maior eficiência da iluminação artificial.
	Local: Europa (projeto MUSEUMS em 7 museus)		O uso da luz natural, de forma controlada (seja por dispositivos de proteção solar ou filtros e películas) contribuem para melhorar a qualidade da luz e conforto luminoso nos museus
Kim e Seo (2012)	Tema: Estudo de caso sobre uso de iluminação natural zenital em museu	Desenvolvimento de modelo 3D em AutoCad e Simulações pelo software Radiance	Adequação das dimensões da claraboia e troca dos vidros por outros com menor transmitância para atingir níveis recomendados pelo IESNA
	Local: Coreia do Sul Objetivo: Resolver problema da iluminação direta proveniente de claraboia no museu	Comparação com modelos físicos na escala 1/20 onde foram realizadas medições durante 5 dias	

Belocco <i>et al.</i> (2016)	Tema: Estudo de caso sobre iluminação natural e artificial em museu	Medição de iluminâncias e luminâncias <i>in loco</i> , na horizontal e vertical, utilizando malha de pontos, no verão e inverno	Resultados dispostos em isocurvas de iluminância
	Local: Florença, Itália		Testes realizados para proposição de novo projeto de iluminação com lâmpadas LED de temperatura entre 2700 e 4000k
Pinilla <i>et al.</i> (2016)	Tema: Estudo de caso sobre iluminação natural em museu	Medição de iluminâncias <i>in loco</i> nas superfícies verticais de exposição	Isocurvas e mapa de iluminâncias no salão
	Local: Madrid, Espanha	Simulação dinâmica anual pelo software DIALux	Foi possível utilizar iluminação natural na sala, desde que controlada junto à iluminação artificial para limitar as doses máximas de exposição e proteger o acervo
Ballocco <i>et al.</i> (2019)	Tema: Estudo de caso sobre iluminação artificial em biblioteca	Medição de iluminâncias <i>in loco</i>	Curvas de iluminância e luminância da sala na condição preexistente e projetada
	Local: Florença, Itália	Levantamento das características técnicas das lâmpadas e circuitos de luz artificial existentes e proposição de novo projeto	Lâmpadas de LED e novo projeto propiciaram melhores condições de iluminação visando a conservação do acervo, considerando a norma italiana
Al-Sallal <i>et al.</i> (2020)	Tema: Iluminação Natural em Museus	Visitas <i>in loco</i> e levantamento documental para criação de modelo 3D de um museu típico nos Emirados Árabes	Quanto maior o DA, menor a adequação aos requisitos de preservação do IESNA
	Local: Emirados Árabes	Medição de refletâncias internas e externas <i>in loco</i>	Propuseram separação das coleções mais frágeis em salas com menores níveis de iluminância
Fathy <i>et al.</i> (2020)	Tema: Projeto de fachadas de museus para aproveitamento da luz natural	Criação de 3 modelos genéricos de sala de exposição e fachadas para Berlim, Cairo e Sydney	Criaram 3 fachadas baseadas em malha de pontos em que cada pixel tem um valor de iluminância, possibilitando flexibilidade das proporções
	Local: Austrália /Egito	Simulação dinâmica anual pelo software Daysim. Análise da métrica DA (Daylight Autonomy)	Criaram um fluxo de trabalho em forma de quadro conceitual para guiar o projeto de fachadas em museus, para aproveitamento da luz natural e proteção das coleções
	Objetivo: Integração da iluminação natural e artificial na biblioteca para sustentabilidade	Simulação dinâmica anual pelo software DIALux considerando condições existentes e novo projeto	
	Objetivo: Investigar o desempenho da luz natural em museus dos emirados árabes visando a conservação das coleções		Propuseram sistemas de proteção nas janelas para controle da luz solar
	Objetivo: Criação de fluxo de trabalho para projeto de fachadas mais interessantes em museus	Simulação dinâmica no Daysim e análise das métricas CDA (<i>Continuous Daylight Autonomy</i>) e <i>Spatial Contrast</i>	

Fonte: elaboração própria com base em WILSON, 2006; KIM; SEO, 2012; BALOCCO; PAGANINI; MARMONTI, 2016; PINILLA *et al.*, 2016; BALOCCO; CECCHI; VOLANTE, 2019; AL-SALLAL; ABOUELHAMD; DALMOUK, 2020; FATHY *et al.*, 2020.

2.6. Disponibilidade de luz natural

O desempenho de iluminação natural uma edificação está diretamente ligado às variáveis climáticas externas, que são influenciadas pela localização geográfica. A duração do dia e da noite é semelhante nas cidades localizadas em menores

latitudes, enquanto as cidades localizadas em altas latitudes têm dias mais longos no verão, e mais curtos no inverno. Além das coordenadas geográficas da cidade, a orientação solar das aberturas, nebulosidade do céu, radiação global e o intervalo horário analisado são variáveis que precisam ser consideradas para maior precisão de simulações (LECHNER, 2015).

A iluminação natural é definida como a luz proveniente do sol de forma direta, luz difundida pela atmosfera celeste e luz refletida pelos elementos do entorno, admitida no interior edificado (ABNT, 2005). No caso das edificações em áreas densamente urbanizadas, a disponibilidade de luz natural nos ambientes internos sofre interferência de uma série de fatores, tais como: modelo e dimensão das aberturas, dispositivos de proteção solar (internos e/ou externos), orientação solar, e características do entorno, como a declividade do terreno, posição e altura das edificações vizinhas, dentre outros fatores (MORAES E SCARAZZATO, 2003). No caso da luz artificial, a média das iluminâncias é uma métrica significativa e amplamente utilizada, diferentemente do caso da iluminação natural, por sua alta variabilidade (IES LM-83, 2012).

A NBR 15215-2 (ABNT, 2005) estabelece três tipos de caracterização do céu, de acordo com a porcentagem estimada de cobertura por nuvens: céu claro, com 0 a 35% de cobertura, céu parcialmente encoberto, com 35% a 70% de cobertura, e céu encoberto, com 70% a 100% de cobertura. O céu totalmente encoberto é o que oferece menores variações de iluminância em interiores, uma vez que a distribuição azimutal da iluminância é a mesma, independente da altura do sol. Já no caso de céu claro ou parcialmente encoberto os maiores valores de iluminância acontecem quanto maior for a altura solar.

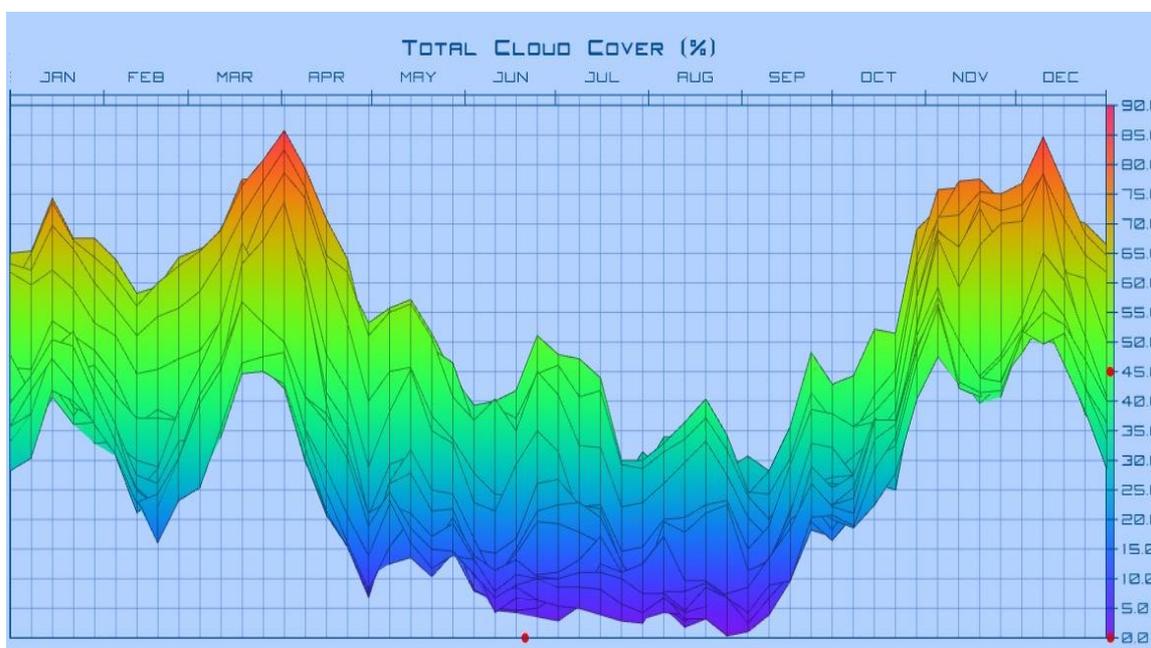
Pelo fato de as características geográficas e climáticas influenciarem diretamente na disponibilidade de luz natural em ambientes internos, para estudos de simulação computacional são utilizados arquivos climáticos. No Brasil são disponibilizados diferentes tipos de arquivos climáticos, dependendo da localidade, tais como: *Test Reference Year (TRY)*, *Test Meteorological Year (TMY)*, *Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)*, *International Weather for Energy Calculations (IWECC)* e *INMET* (SCHELLER et al., 2015).

Para este estudo foi utilizado o arquivo do tipo TMYx, derivado do TMY (*Test Meteorological Year*), onde os dados são referentes aos anos de 2004 a 2018, sem considerar extremos de temperatura. No Brasil estão disponíveis 475 arquivos TMY, sendo que 201 são dos anos 2004 a 2018 (TMYx). No estudo de caso aqui apresentado foi utilizado o arquivo TMYx disponibilizado para a estação Carlos Prates (SPBR), que foi selecionada por ser a mais próxima da edificação do Museu Abílio Barreto.

Pelo programa Weather Data, desenvolvido por Andrew Marsh, é possível analisar cada uma das variáveis climatológicas disponibilizadas em um arquivo climático. No Gráfico 1 é possível notar que a nebulosidade do céu é maior em Belo Horizonte no verão, enquanto os meses do inverno apresentam céus mais claros.

Da mesma forma, os níveis de radiação solar são maiores no inverno, quando acontecem mais dias com céu claro, conforme mostrado no Gráfico 2. Essa condição determinou a escolha do período de inverno para a simulação dinâmica efetivada nesta pesquisa, visando investigar uma condição máxima de entrada de luz natural no estudo de caso.

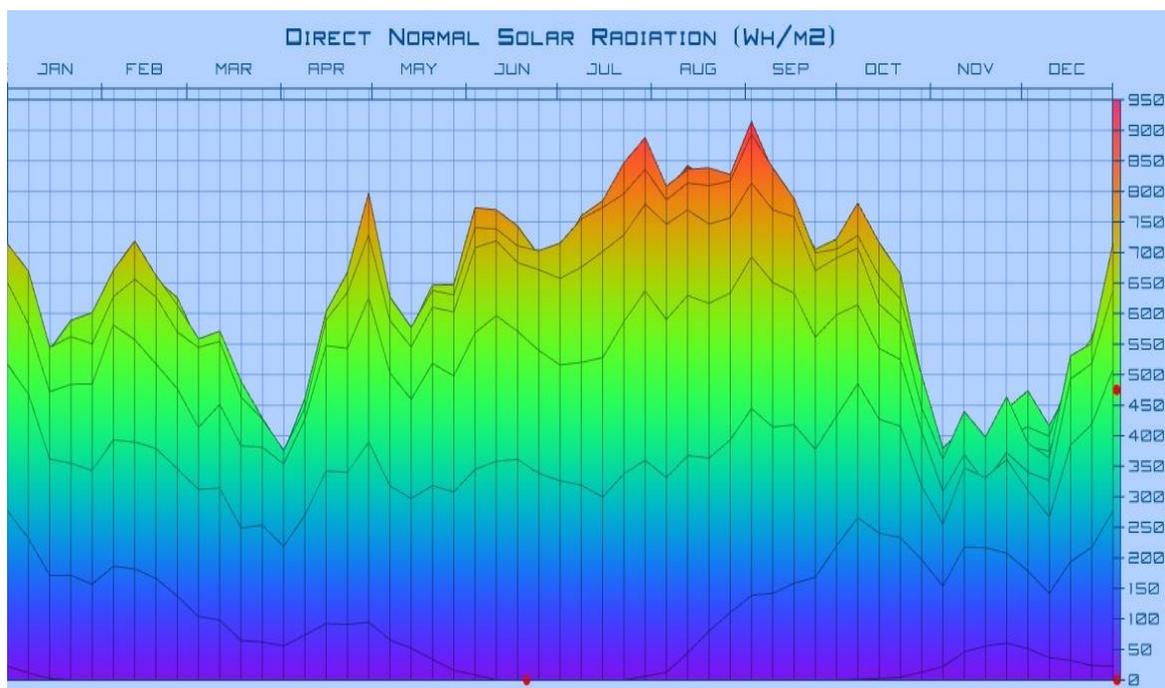
Gráfico 1 - Porcentagem de cobertura do céu por nuvens ao longo do ano, de acordo com arquivo climático TMYx da estação Carlos Prates



Fonte: Weather Data, 2022.

Nota: gráfico elaborado no programa Weather Data utilizando a base de dados do Arquivo climático TMYx (2004-2018) da estação meteorológica Carlos Prates, em Belo Horizonte.

Gráfico 2 - Radiação normal direta ao longo do ano, de acordo com arquivo climático TMYx da estação Carlos Prates



Fonte: Weather Data, 2022.

Nota: gráfico elaborado no programa Weather Data utilizando a base de dados do Arquivo climático TMYx (2004-2018) da estação meteorológica Carlos Prates, em Belo Horizonte.

3. CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Neste capítulo serão apresentadas as principais características referentes à edificação selecionada para estudo de caso, o Museu Histórico Abílio Barreto (MhAB). O capítulo trás informações sobre a localização da edificação, seu histórico, estilo arquitetônico, informações construtivas, tipos de acervo expostos e sistemas de iluminação utilizados.

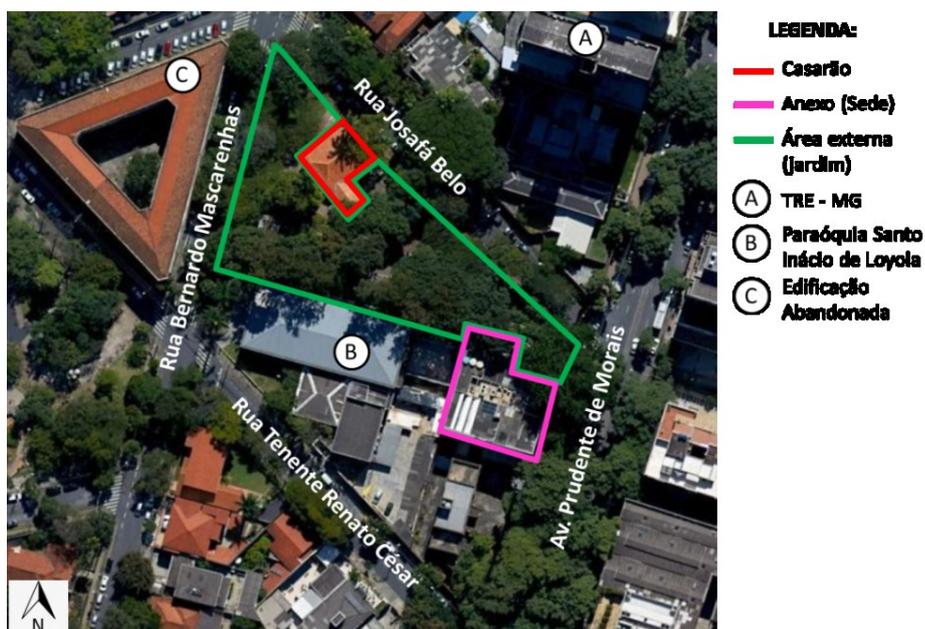
3.1. Localização e entorno

O Museu Histórico Abílio Barreto (MhAB) está localizado no bairro Cidade Jardim na antiga Fazenda do Leitão, cujo nome deve-se ao antigo proprietário, Domingos Gomes Leitão. A fazenda era pertencente ao Curral del Rei, como era chamada a cidade antes do plano de urbanização que fez com que Belo Horizonte se tornasse a nova capital de Minas Gerais. Por estar localizado além dos limites da Avenida do Contorno, o bairro ficou fora do plano de urbanização chefiado por Aarão Reis, que resultou na fundação de BH em 1897. Por esse motivo, a sede da Fazenda do Leitão não foi demolida, e o casarão permaneceu abandonado até que, em 1942, o então presidente Juscelino Kubitschek decide ampliar os limites da cidade, trazendo a urbanização para o bairro Cidade Jardim (MhAB, 2003a).

Hoje o MhAB (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) é constituído pelo casarão histórico (Figura 18), uma edificação anexa inaugurada em 1998, que abriga a sede administrativa, a reserva técnica do museu (

Figura 19), uma área externa ajardinada e arborizada, onde há uma exposição permanente sobre meios de transporte e um palco ao ar livre. Esse espaço também recebe feiras e eventos culturais e educativos.

Figura 17 - Mapa de Localização do Museu Histórico Abílio Barreto



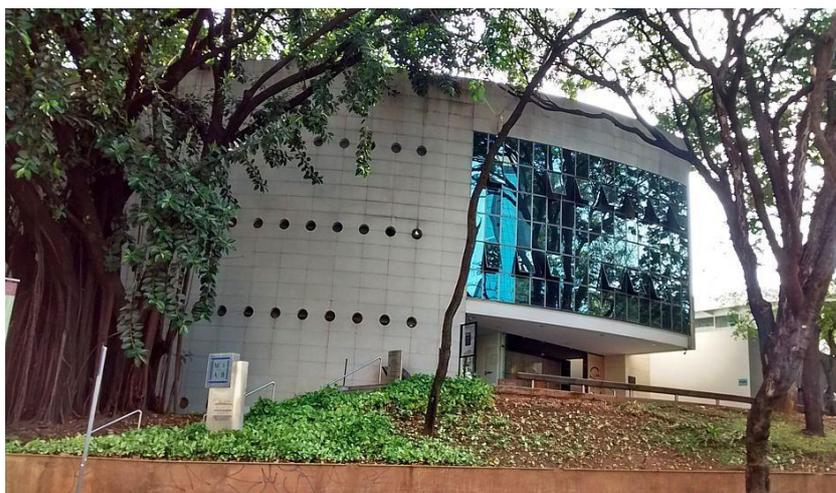
Fonte: Captura de tela do Google Maps, editado pela autora.

Figura 18 - Casarão do Museu Histórico Abílio Barreto atualmente



Fonte: RENNE, [20--].

Figura 19 - Edifício Anexo (sede) do Museu Histórico Abílio Barreto



Fonte: BELO HORIZONTE OCCASIONAL PHOTO [20-?].

No entorno imediato do museu estão a Av. Prudente de Moraes e as ruas Josafá Belo, Tenente Renato César e Bernardo Mascarenhas. A Av. Prudente de Moraes está situada num vale que esconde o Córrego do Leitão, curso d'água que abastecia e deu nome à antiga fazenda onde hoje se localiza o MhAB. Na avenida estão localizadas edificações comerciais e residenciais de múltiplos pavimentos, em que se destaca o edifício que abriga o TRE (Tribunal Regional Eleitoral) de doze pavimentos, cuja fachada sul é revestida em pele de vidro reflexivo azul. Já nas ruas adjacentes ao museu, as edificações são predominantemente residenciais, de um ou dois pavimentos, exceto pela Paróquia Santo Inácio de Loyola – edificação modernista de um pavimento com pé-direito duplo – e pela edificação abandonada de propriedade da Polícia Federal, com quatro pavimentos.

3.2. Histórico

Construído por Cândido Lúcio da Silveira, em 1883, para ser moradia familiar, o casarão é um sobrado de dois pavimentos (

Figura 20) – que inicialmente não se comunicavam. No pavimento inferior estavam localizadas as acomodações dos empregados e escravos, depósitos de equipamentos e cômodos para as atividades da fazenda. O pavimento superior tinha ocupação residencial, possuindo uma varanda que ocupa toda a fachada frontal, além dos dormitórios, sala e cozinha (MHaB, 2003a).

Figura 20 - Casarão na antiga Fazenda do Leitão



Fonte: Arquivo Nacional do Brasil, 2020.

A antiga Fazenda do Leitão permaneceu como área de exploração agrícola no período entre 1896 e 1939, e o casarão abrigou diversas iniciativas públicas, tais como um centro de pesquisas agronômicas e um posto veterinário (

Figura 21).

Em 1935, o escritor e historiador Abílio Barreto foi convidado a gerir o Arquivo Geral da Cidade, e começou a reunir o acervo relativo ao Curral del Rei e também à nova capital. Em 1939, a Prefeitura de Belo Horizonte adquiriu o terreno para a construção do bairro Cidade Jardim e, em 1941, o casarão foi restaurado para se tornar o Museu da Cidade (MhAB, 2003a). Em 1943, durante o mandato do então prefeito Juscelino Kubitscheck, o Museu Histórico de Belo Horizonte foi inaugurado, com intenção de recolher, preservar, pesquisar e divulgar a história da cidade. Contudo, somente em 1967 recebeu o nome de Museu Histórico Abílio Barreto, em homenagem ao seu idealizador. O casarão é considerado a mais emblemática peça do acervo do museu, e em 1951 foi tombado pelo IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional) (MhAB, 2003a).

Figura 21 - Casarão na Fazenda do Leitão entre 1935 e 1939



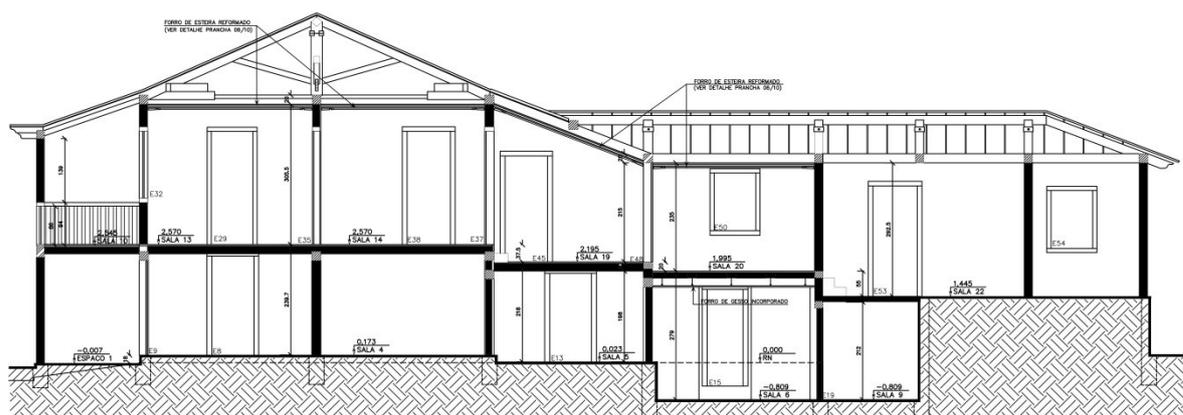
Fonte: MhAB, 2021.

Com o crescimento do acervo, o casarão se tornou insuficiente para abrigar e proteger adequadamente toda sua coleção. Somaram-se a essa, outras demandas para uma atualização do Museu, para que ele tivesse uma participação cultural ativa na cidade. Então, em 1993 iniciou-se um Projeto de Revitalização do Museu, que buscava a restauração do casarão, a construção de uma nova sede e a transformação do museu em um espaço que tivesse diálogo com a cidade contemporânea, passando a desenvolver funções educativas, pedagógicas, de entretenimento e expressão cultural. As últimas obras desse projeto ocorreram no final de 2002, e incluíram um novo projeto elétrico e luminotécnico para atender às novas demandas do museu (MhAB, 2003b).

3.3. Arquitetura e técnicas construtivas

O casarão do MhAB tem tipologia arquitetônica típica das fazendas mineiras do século XVIII e XIX. Foi construído em forma de um sobrado de dois pavimentos, para se destacar em relação às outras construções de fazendas próximas, demonstrando a nobreza da família. Além disso, a elevação em relação ao solo permitiu melhor aproveitamento do terreno inclinado e úmido, de uma região pantanosa próxima ao Córrego do Leitão. As Figuras 24, 25 e 26 mostram as plantas dos dois pavimentos e um corte do casarão, considerando a disposição atual dos ambientes.

Figura 24 - Corte AA do casarão



Fonte: MhAB, 2021.

A casa foi construída em estrutura autônoma de madeira e paredes de pau-a-pique (Figura 25). A estrutura de madeira era uma das partes mais danificadas da casa e, na restauração de 1984, foi reforçada com concreto (MhAB, 2003a).

Figura 25 - Janela de prospecção mostrando vedação original do casarão em pau a pique



Fonte: da autora.

A cobertura é feita por telhado cerâmico típico da época colonial, com estrutura em madeira maciça, beirais em cachorrada e telhas de barro tipo capa e canal. Internamente, o forro é de palha trançada, atualmente pintada na cor branca. No pavimento superior o piso é original da casa em tabuado corrido (soalho). Já no pavimento inferior o piso original era de terra batida, mas sofreu alterações nas intervenções de restauração e revitalização, e hoje apresenta piso revestido em pedra (Figura 26). Originalmente os dois pavimentos do sobrado eram totalmente

independentes, mas durante a restauração de 1941 foi construída a escada que integra os dois pavimentos (MhAB, 2003a).

Figura 26 - Pisos atuais do pavimento superior (à esquerda) e inferior (à direita) do casarão



Fonte: da autora.

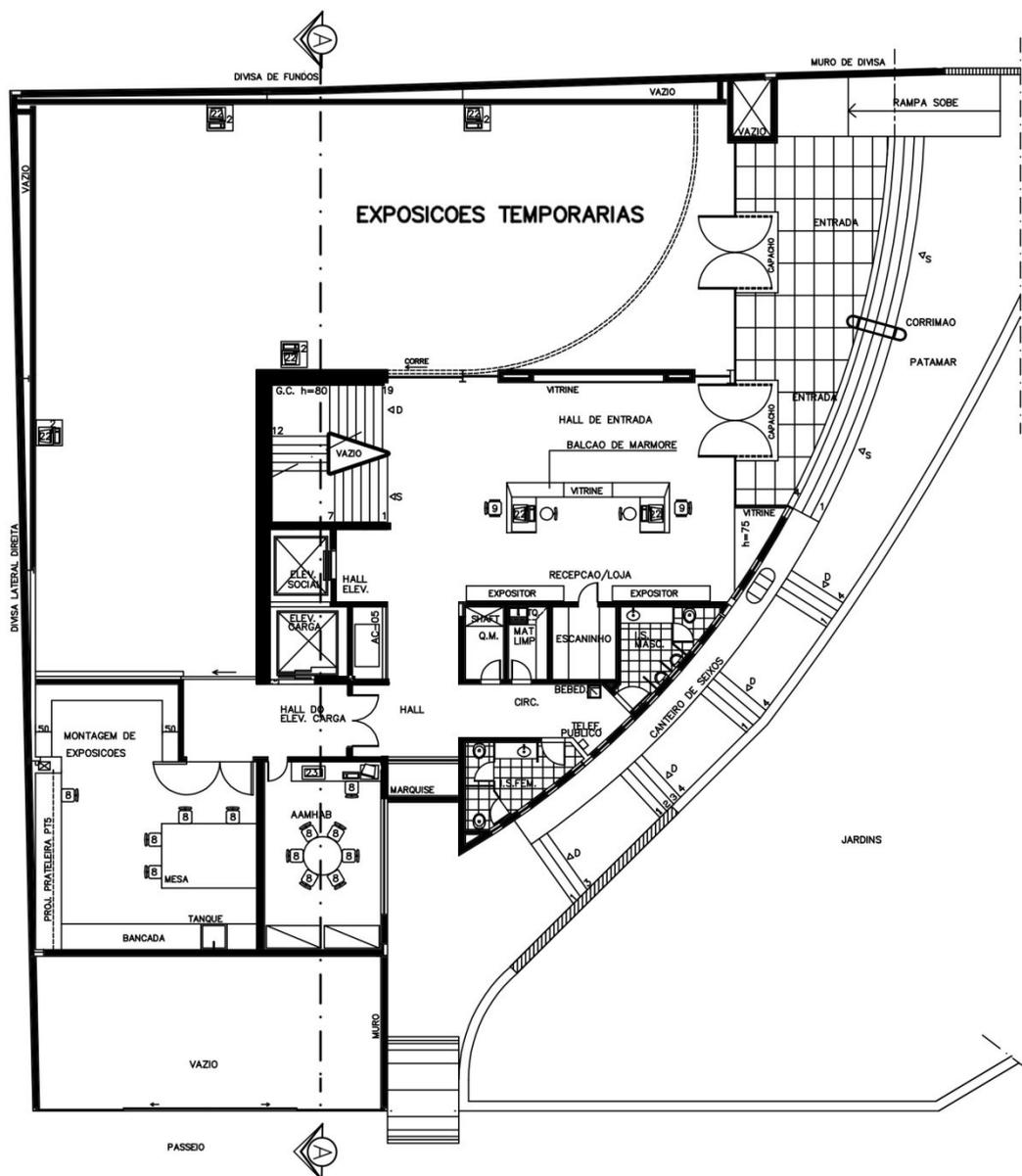
Construído para ser um contraponto estético e arquitetônico ao casarão, o Anexo do museu é uma edificação de arquitetura contemporânea, projetada por Álvaro Hardy (Veveco) e Marisa Machado Coelho. Foi o primeiro espaço originalmente concebido para abrigar um museu em Belo Horizonte, podendo ser considerado um marco arquitetônico da cidade.

“Situada ao lado do casarão secular, mas de frente para a Avenida Prudente de Moraes, importante corredor da cidade em expansão, a Sede inaugurada inseriu e contextualizou o MhAB no circuito dinâmico da cidade, assegurando, ainda, a visão em perspectiva do conjunto edificado. Assim, o projeto respeitou o marco histórico da cidade e a escala do bairro Cidade Jardim, resultando em uma arquitetura serena e sem excessos” (MHAB, 2003b, p. 28)

O edifício Anexo é atualmente a sede administrativa do MhAB, e onde se localiza a reserva técnica do museu, além de abrigar salas técnicas e administrativas, auditório, biblioteca, restaurante e uma grande sala de exposições temporárias, que tem conexão direta com a exposição externa. A edificação, de quatro pavimentos, conjuga estrutura metálica, lajes de concreto e vedação de alvenaria. Há ainda uma grande fachada curva envidraçada, ocupando os três pavimentos superiores, voltada para o jardim. A cobertura é parte em laje plana impermeabilizada, com parte em *shed* de concreto voltado para a grande sala de exposições (LARSEN, MAFRA e

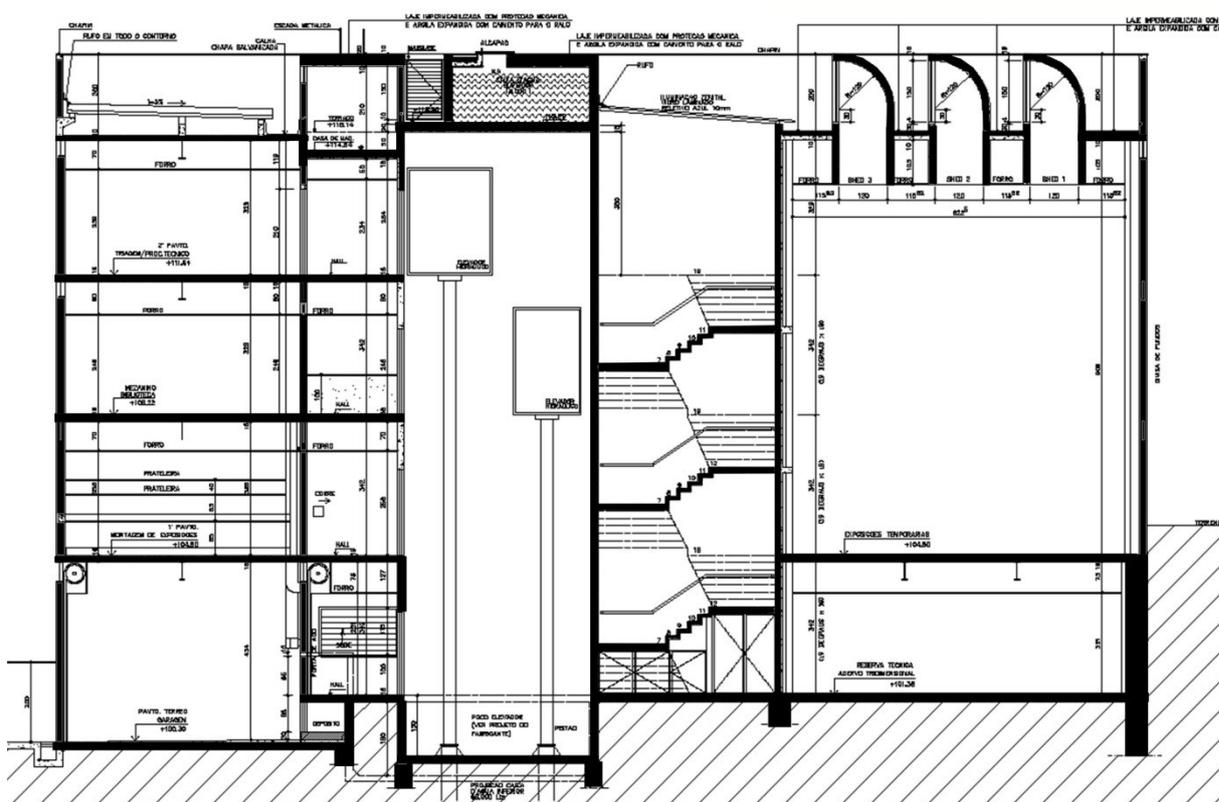
SANTOS, 2012). As Figuras 29 e 30 mostram a planta do primeiro pavimento da sede, onde está localizada a sala de exposições, e um corte da edificação, mostrando os *sheds* para iluminação natural.

Figura 27 - Planta do primeiro pavimento do Anexo do MhAB



Fonte: MhAB, 2021.

Figura 28 - Corte AA do Anexo do MhAB

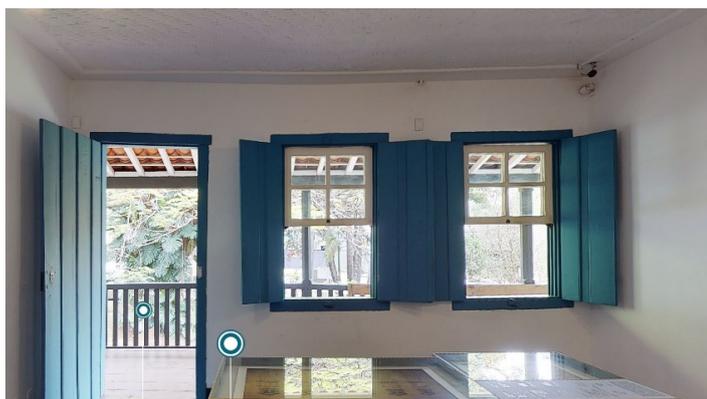


Fonte: MhAB, 2021.

3.4. Sistema de Iluminação natural e artificial

No casarão a iluminação natural acontece por meio de aberturas laterais. As janelas são típicas das casas de fazenda mineiras do séc. XIX, com duas bandeiras de giro em madeira maciça e duas folhas guilhotina envidraçadas com vidro simples (Figura 29). As portas são de giro, em madeira maciça, pintadas na cor azul royal. No casarão as janelas são abertas diariamente, promovendo iluminação e ventilação naturais das salas, e evitando a proliferação de microrganismos, considerando a impossibilidade de instalação de climatização artificial, devido aos requisitos de tombamento da edificação (GUERRA, 2021). Já a iluminação artificial é feita por trilhos e canaletas fixados no forro, com spots para iluminação direcionável (Figura 30).

Figura 29 - Aberturas para iluminação natural no casarão



Fonte: PORTAL BELO HORIZONTE, [20-?].

Figura 30 - Trilhos e spots para iluminação artificial



Fonte: da autora.

Pelo fato do anexo do museu ser um edifício contemporâneo, planejado para essa função, houve projeto de iluminação natural e artificial visando o conforto visual e a conservação do acervo (PIMENTEL, 2004). A iluminação natural da sala de exposições temporárias do anexo acontece pela porta de entrada em vidro incolor (Figura 31), que ocupa toda a extensão frontal da sala. Os arquitetos também utilizaram a estratégia de iluminação zenital por *sheds*, fechados com vidros fixos incolor, em um espaço com pé direito triplo (MhAB, 2003b). Entretanto, segundo a equipe de coordenação do museu, os sheds permitem entrada de luz direta, motivo pelo qual permanecem fechados com lona plástica branca há anos (Figura 32). A sala de exposições do edifício sede possui ainda um mezanino envidraçado – onde se localiza o restaurante do museu, no segundo pavimento – que permite a entrada de iluminação natural difusa (Figura 33).

Figura 31 - Foto da entrada envidraçada da sala de exposições do Anexo



Fonte: da autora.

Figura 32 - Sheds para Iluminação zenital e iluminação artificial com trilhos e *spots*



Fonte: da autora.

Figura 33 - Mezanino envidraçado na sala de exposições do anexo



Fonte: da autora.

A iluminação artificial foi planejada para abrigar exposições temporárias de curto e médio prazo, utilizando trilhos e canaletas suspensas, *spots* e projetores direcionáveis (Figuras 18 e 19), além de iluminação indireta. Para alguns acervos há possibilidade de utilizar sensores de presença, evitando que as luzes fiquem acesas sem que haja visitantes no espaço (PIMENTEL, 2004). Na porção frontal da sala de exposições, próxima à entrada, foi feito rebaixamento de forro de gesso, onde a iluminação artificial é trabalhada com *spots* embutidos (Figura 34).

3.5. Acervo, coleções e exposições atuais

Quando da fundação do Museu de Belo Horizonte, o acervo compreendia itens artísticos e históricos da capital ou do Curral del Rei:

“Assim, na época da inauguração do Museu, já havia um acervo institucional bastante expressivo, organizado em três seções: Objetos originários do Arraial, até a data da inauguração da capital; Preciosidades históricas e artísticas da capital, a partir da inauguração; Objetos históricos, artísticos, arqueológicos e etnográficos de Minas Gerais, especialmente de Ouro preto, antiga capital do Estado e do Brasil.” (MhAB, 2003b, p. 15)

Hoje, o acervo inclui peças e informações suplementares sobre a evolução e memória de Belo Horizonte, incluindo peças de mobiliários, fotografias, cartas, instrumentos, equipamentos, maquetes, pinturas, dentre outros. O acervo tridimensional de pequeno, médio e grande porte, inclui, por exemplo, um Altar do Sagrado Coração de Jesus e um lavabo em pedra sabão, remanescentes da antiga Matriz da Boa Viagem do Curral del Rei. Há também acervos documentais em papel, fotográficos e iconográficos. No acervo fotográfico se destacam as fotografias de edificações de Belo Horizonte feitas pelo pintor e projetista Romeo de Paoli, entre os anos 1930 e 1940, durante o processo de verticalização da capital mineira. Já no acervo iconográfico há o Arquivo Privado Clóvis Salgado, doado pela família (MhAB, 3002b). Na área externa há uma exposição permanente de exemplares originais de meios de transporte, tais como bonde elétrico (último modelo que circulou em Belo Horizonte) (Figura 34), carro-de-boi, coche e elevador.

Atualmente, o casarão abriga exposições de longa duração, enquanto no anexo acontecem exposições temporárias, com duração de até dois anos. Em 2021, além da exposição permanente na área externa do museu, estão em curso duas

exposições temporárias: a Complexa Cidade, no casarão, e a Gráfico Grafia, no anexo. A primeira, de longa duração (dezembro de 2019 a dezembro de 2023) tem objetivo de articular as dimensões privada e pública da cidade: a casa e a rua. Estão expostos objetos, vestígios arqueológicos, mapas, fotografias, pinturas, representações literárias, e exposições audiovisuais, que sugerem uma reflexão sobre as variadas maneiras de se morar e ocupar a cidade (PBH, 2021a).

Figura 34 - Bonde elétrico, exposição permanente do MhAB



Fonte: GUERDÁN *et al.* 2003.

As peças da coleção estão expostas em vitrines horizontais e verticais, cavaletes com quadros e fotografias, e algumas fotografias estão plotadas diretamente sobre as paredes. A

Figura 35 mostra algumas peças da exposição Complexa Cidade na sala de entrada do casarão, no segundo pavimento: plantas arquitetônicas na vitrine horizontal, e fotografias no cavalete vertical.

Figura 35 - Complexa Cidade - peças em exposição no casarão



Fonte: da autora.

Visando a conservação do acervo original do museu, todos os documentos textuais e fotografias expostas no casarão são reproduções (GUERRA, 2021), uma vez que, nessa exposição, as janelas do casarão permanecem abertas durante todo o horário de visitação – exceto as janelas das salas com exposições audiovisuais e aquelas cujas bandeiras encobrem peças expostas nas paredes – que compreende de quarta-feira a domingo, das 11h às 18h. A equipe de curadoria e conservação do museu é responsável por avaliar os objetos a serem expostos ponderando materialidade, idade e relevância dos mesmos, bem como sensibilidade à luz e outros agentes de deterioração, tais como temperatura e umidade, que também são relevantes para a conservação preventiva das coleções.

Na exposição Complexa Cidade as peças originais do acervo são objetos com sensibilidade de baixa a moderada à luz, tais como esculturas de terracota policromadas, relógio de ponto, gramofone, fichas de ônibus de material plástico, entre outros. Já no pavimento inferior estão expostas fotografias e um quadro, ambos originais, em uma sala com iluminação exclusivamente artificial (informação verbal, GUERRA, 2021). Nesse pavimento, a sala com iluminação natural e artificial expõe uma maquete da antiga Fazenda do Leitão (

Figura 36).

Figura 36 - Maquete exposta no pavimento inferior do Casarão



Fonte: da autora.

Na sala de exposições do anexo, a exposição Gráfico Grafia foi inaugurada em dezembro de 2020, com previsão de duração até dezembro de 2021. Trata-se de uma exposição do Museu de Arte da Pampulha (MAP), que se encontra em reforma, e foi abrigada pelo MhAB. A exposição, inclui acervo documental original do MhAB e produções de artistas convidados, “irradia grafismos compostos com recursos das artes visuais e do design, e propõe uma reflexão acerca das linguagens e manifestações gráficas contemporâneas e suas influências no tecido urbano e social de Belo Horizonte” (PBH, 2021b). O acervo exposto conta com acervo original e reproduções, em diferentes formas de grafias, tais como mapas, fotografias, vídeos, pinturas, livros e cadernos de poesias, que ilustram e relembram o tecido urbano da cidade.

4. METODOLOGIA

Esta dissertação pretendeu, por meio de um estudo de caso, investigar metodologias de avaliação da qualidade luminosa de espaços museológicos, com foco na conservação preventiva de coleções.

De acordo com as etapas traçadas, para a análise dos requisitos da CIE 157:2004 foram estudados níveis de iluminância em salas selecionadas do Museu Histórico Abílio Barreto, obtidos de duas diferentes maneiras: pelo método de medição de iluminâncias em ambientes reais, especificado na NBR 15.215-4 (ABNT, 2005); e por simulação computacional, utilizando o programa *Climate Studio*, para a simulação de iluminação natural estática e dinâmica. Tais procedimentos tiveram como objetivo desenvolver metodologia de análise de ambientes construídos para elaboração de guia para localização de obras em função da distribuição espacial da luz.

A pesquisa envolveu as seguintes etapas:

- a) Estudo de referenciais teóricos sobre iluminação de museus e a sua influência na conservação dos bens e no conforto luminoso;
- b) Seleção e caracterização do objeto de estudo - Museu Histórico Abílio Barreto
- c) Levantamento documental e *in loco* do projeto arquitetônico do Museu e caracterização das estratégias de iluminação natural artificial e sistemas utilizados;
- d) Seleção dos ambientes de estudo
- e) Estruturação das campanhas de medição;
- f) Testagem e aferição dos sensores de medição;
- g) Medição das iluminâncias e radiação UV *in loco*;
- h) Simulações de iluminação natural das salas selecionadas, utilizando o programa *Climate Studio*;
- i) Análise e discussão dos resultados, comparando a adequação das estratégias utilizadas frente aos requisitos do relatório técnico CIE 157:2004;

- j) Proposição de zoneamento nas salas selecionadas, considerando a distribuição de iluminância e radiação UV, e proposição do tipo de acervo a ser exposto em cada zona.

4.1. Testagem e aferição dos equipamentos

Para as medições de iluminância *in loco* foram disponibilizados três luxímetros pelo LACICOR (Laboratório de Ciência da Conservação da Escola de Belas Artes da UFMG). São aparelhos da marca Instrutemp, modelo ITLD-300 com visor de LCD e registrador (Figura 37). O luxímetro de referência utilizado para a aferição dos sensores foi disponibilizado pelo LABCON (Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética no Ambiente Construído da UFMG) — marca Instrutherm, modelo LDR-225 (Figura 37). Ambos os aparelhos ITLD-300 quanto o LDR-225 são instrumentos digitais de precisão, com resposta espectral fotópica CIE com precisão espectral $f_1 \leq 6\%$, escala de medição de 0,01 a 999900 lx. A precisão de leitura também é a mesma: de $\pm 3\%$ da leitura ± 5 dígitos, e são calibrados pelo fabricante com lâmpada incandescentes padrão na temperatura de cor 2856k, com correção de cosseno para incidência angular de luz (resposta $f_2 \leq 2\%$) (INSTRUTHERM, 2014, p. 2; INSTRUTEMP, 2013, p. 2).

Figura 37 - Foto dos luxímetros ITLD-300 (à direita) e luxímetro de referência LDR 225 (à esquerda)



Fonte: da autora.

O procedimento de aferição dos luxímetros foi realizado utilizando uma caixa de papelão medindo 38cm de comprimento, 23cm de largura e 25cm de altura. Para

minimizar as refletâncias internas, a caixa foi totalmente pintada de preto internamente. Foi marcada com um X a posição padrão para a fotocélula (Figura 38). Com objetivo de utilizar uma fonte de luz com fluxo luminoso o mais constante possível, foi utilizada a lanterna de um telefone celular, modelo Iphone XR. Para isso, no topo da caixa foi recortado um quadrado de lado 0,5cm, para encaixar a fonte de luz. Primeiramente foi feita a medição com o sensor de referência, por um período de 2,5 minutos, medindo dez vezes, em intervalos de 15 segundos. Em sequência foram feitas as medições individuais dos sensores ITLD-300, pelo mesmo período e intervalo praticados para o sensor de referência (Figura 39).

Figura 38 - Foto da caixa de papelão, pintada de preto



Fonte: da autora.

Figura 39 - Foto durante a medição de aferição



Fonte: da autora.

Foram então calculados os desvios absolutos médios de cada sensor, em relação ao sensor de referência, compilados na Tabela 6. Os desvios médios de cada sensor foram aplicados como fatores de correção nas medições realizadas *in loco*.

Tabela 6 - Desvios médios absolutos e percentuais do procedimento de aferição

SENSORES	MÉDIA (lx)	DESVIOS MÉDIOS	
		ABSOLUTOS (lx)	PERCENTUAIS
LDR-225 (referência)	319,7	-	-
ITLD-300 - 01	318,0	-1,7	-0,5%
ITLD-300 - 02	319,6	-0,1	0,0%
ITLD-300 - 03	318,0	-1,7	-0,5%

Fonte: da autora.

O LACONPRE (Laboratório de Conservação Preventiva) disponibilizou um sensor ELSEC 765, que foi utilizado *in loco* para medição da proporção de UV na radiação visível em $\mu\text{W}/\text{lumen}$. O aparelho possui sensor de fotodiodo de silício conectado a um microprocessador e mede radiação UV na faixa de 0 a 10,000 mW/lumen, com precisão de $\pm 15\%$ da leitura ± 1 dígito, e correção de cosseno para incidência angular de luz, tanto para luz visível quanto UV. O aparelho foi calibrado com rastreamento a RBC em 2 Pontos próximos de 700 e 1700 uW/cm^2 na faixa de UVA pelo método comparativo.

4.2. Escolha das salas para medições *in loco*

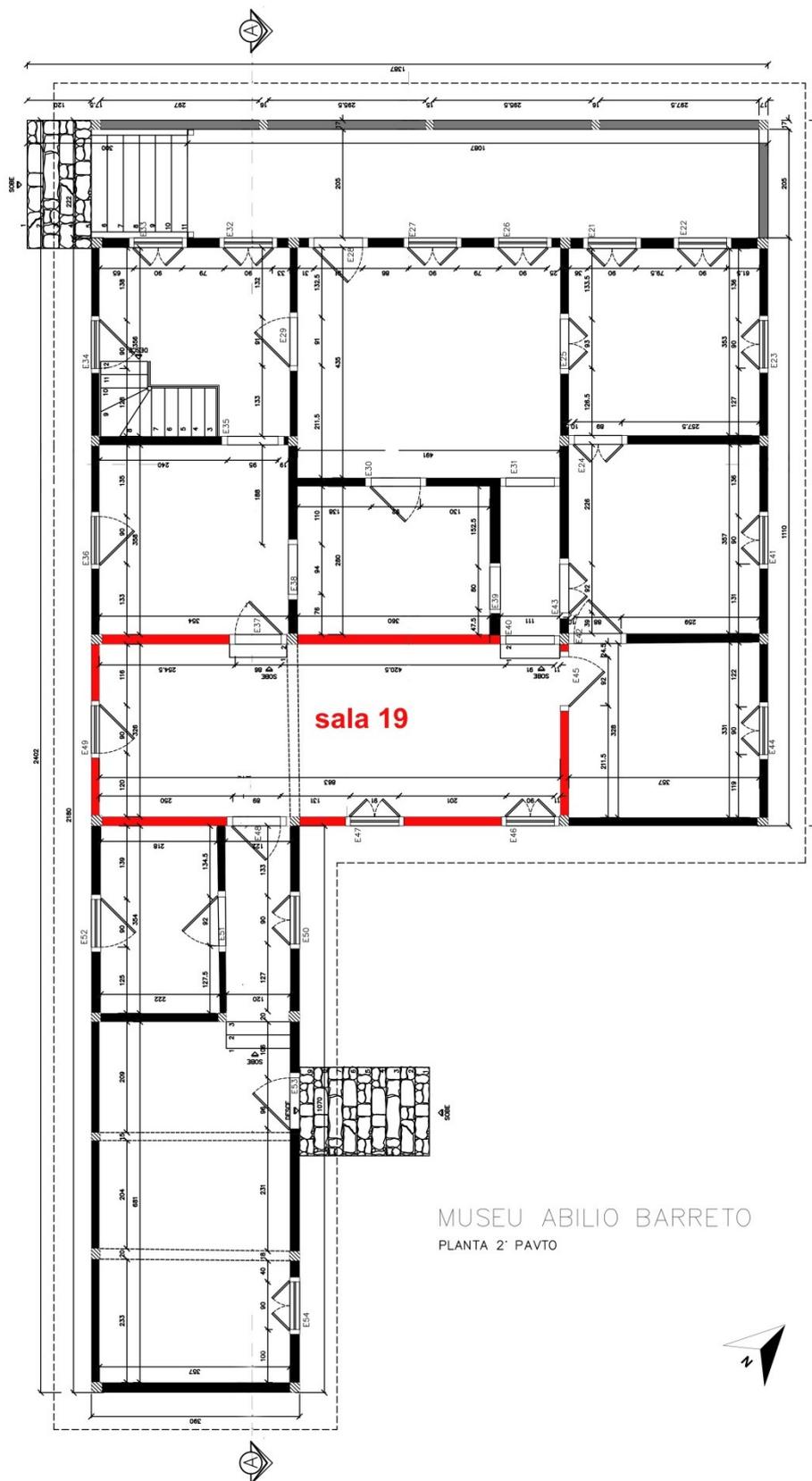
Pelo fato de o Museu ser abrigado em duas edificações distintas: o casarão, que foi adaptado para receber o museu, e o anexo, que foi edificado já com esse propósito, era de interesse que fossem comparadas as estratégias de iluminação natural e artificial nos dois locais, uma vez que o anexo contou com um projeto de iluminação. Para a realização do estudo da iluminação, foram então selecionadas duas salas, sendo uma sala de exposição localizada no casarão e a sala de exposições do anexo do museu.

No casarão, foram considerados dois fatores para a seleção da sala a ser estudada: a presença de iluminação natural e artificial, e os tipos de acervo expostos. Segundo esses critérios, foi selecionada a sala 19 do casarão, que recebe exposições diversificadas e têm suas janelas abertas diariamente (Figura 40).

O Anexo possui apenas uma sala de exposição e, portanto, foi esta a sala selecionada (Figura 41).

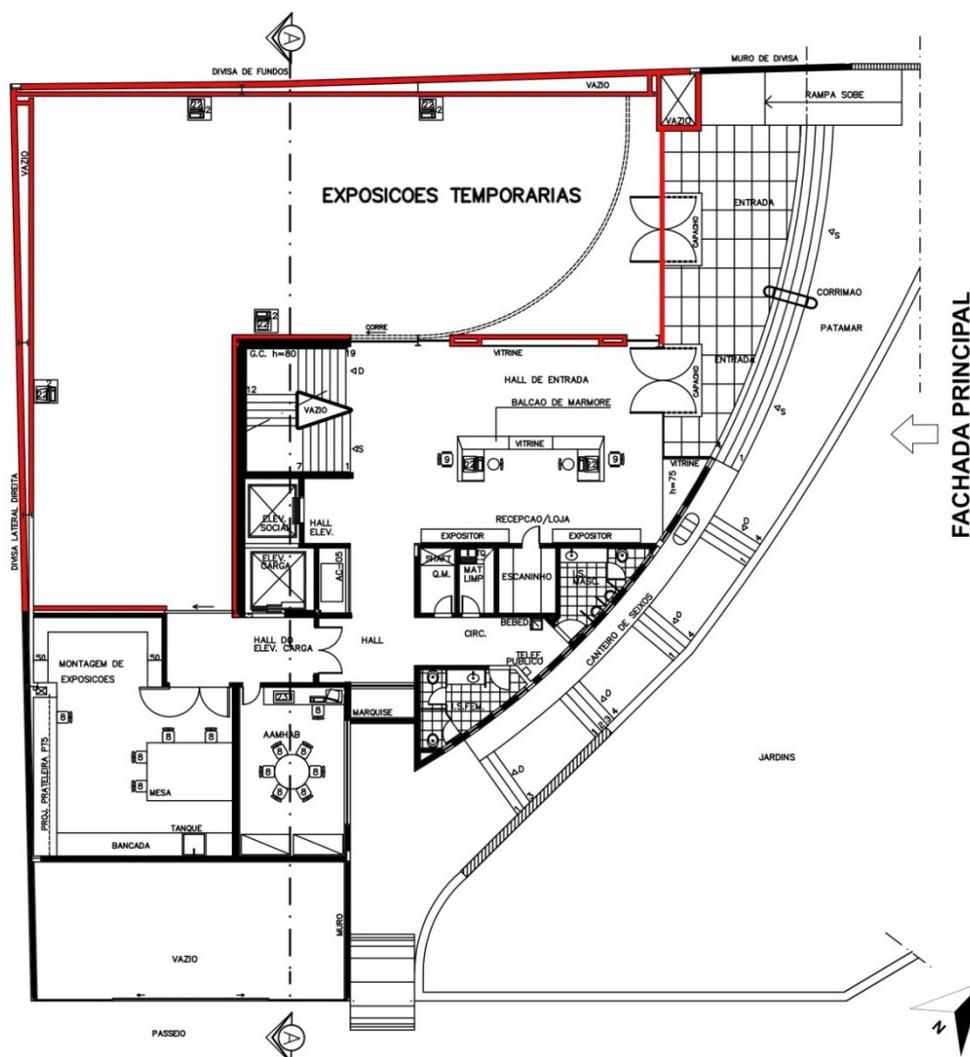
Além disso, essas salas foram selecionadas pelo fato de receberem exposições de maneira contínua.

Figura 40 - Planta do 2º Pavimento do MhAB – salas seleccionadas para medição



Fonte: adaptado de MhAB, 2021.

Figura 41 - Sala de exposições do anexo do MhAB



Fonte: adaptado de MhAB, 2021.

4.2.1. Descrição das salas selecionadas

A sala 19 tem área de 28m² e tem três aberturas laterais para iluminação natural que ficam abertas durante o horário de visitação do museu: duas voltadas para sudeste, e uma voltada para sudoeste. O modelo das janelas é padronizado em todo o casarão: possuem duas bandeiras de giro em madeira maciça e duas folhas guilhotina em metal e vidro. O marco das janelas e a bandeira são pintados na cor azul royal, e as folhas guilhotina tem esquadria metálica branca. Cada folha das janelas é dividida em quatro partes (Figura 42). O forro da sala 19 é de esteira e inclinado (como mostrado anteriormente na Figura 30). No ponto mais baixo o pé

direito é de 2,35m, e no ponto mais alto 2,43m, resultando em uma inclinação de 32%.

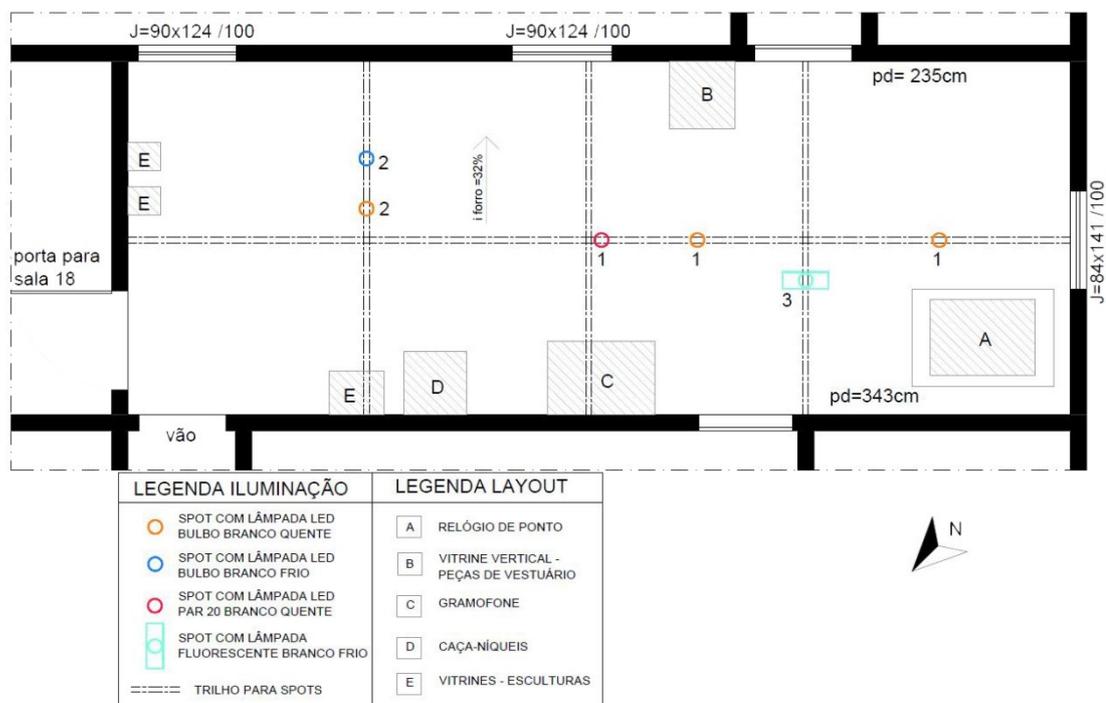
Figura 42 - Janela padrão do casarão



Fonte: da autora.

A Figura 43 mostra a planta da sala 19, destacando o tamanho das aberturas para iluminação natural (largura x altura/ peitoril) e o posicionamento dos trilhos de iluminação artificial e *spots*, com identificação do número.

Figura 43 - Planta da sala 19 - layout e iluminação artificial



Fonte: da autora.

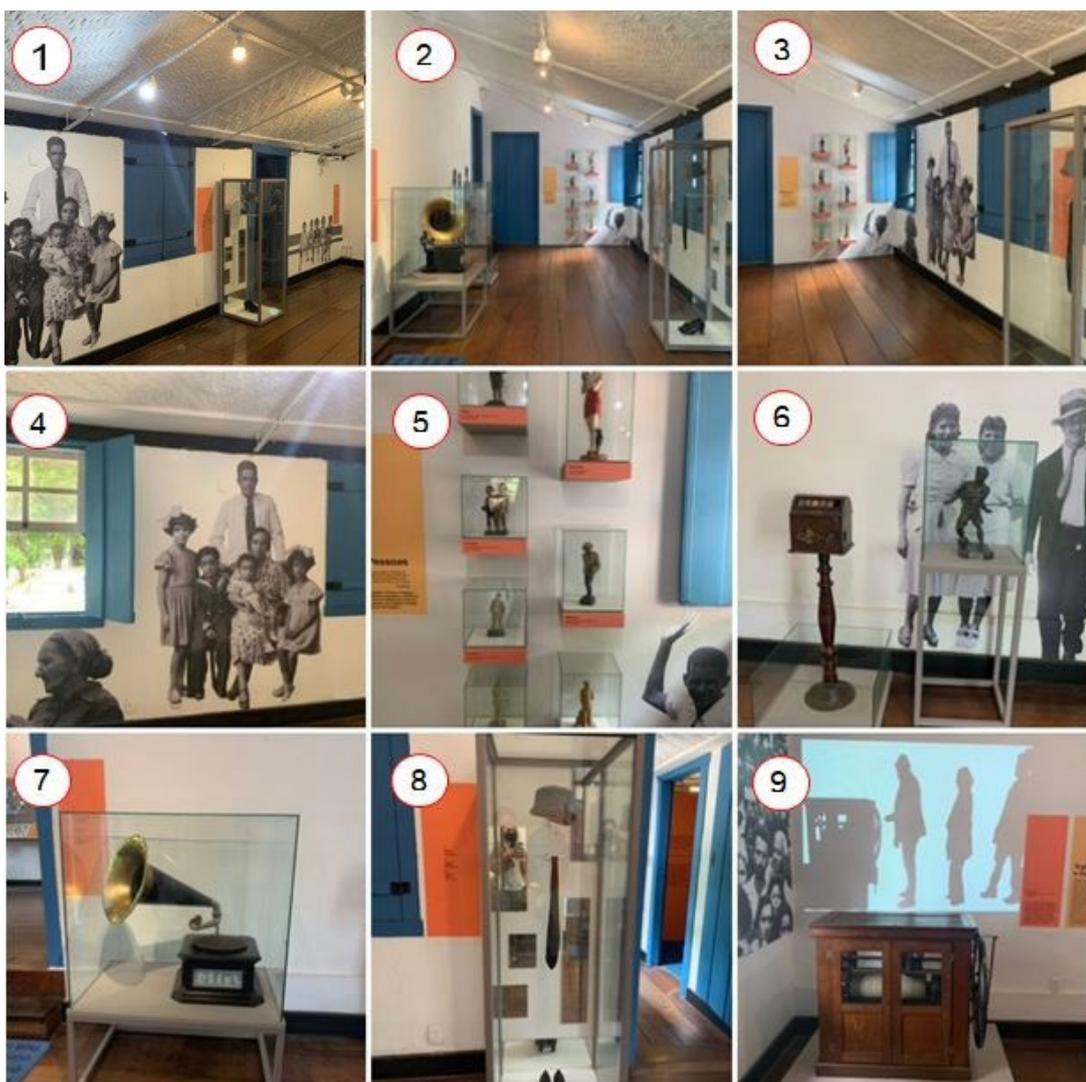
Os trilhos permitem a colocação de luminárias com fachos direcionáveis tanto para vitrines como para as paredes. Atualmente a sala apresenta seis spots direcionáveis com diferentes lâmpadas: desde uma fluorescente, lâmpadas de LED PAR 20, até lâmpadas de bulbo. As temperaturas de cor também variam: as lâmpadas de LED têm entre 2700K e 3000K, enquanto a lâmpada fluorescente tem 6000K. Todos os *spots* estão funcionando e acendem em três diferentes circuitos (numerados de 1 a 3, na planta).

O acervo exposto na sala 19 é composto por diferentes materiais, que são explicitados na

Figura 44.

Figura 44 - Sala 19

- (1) vista geral e acervo exposto
- (2) vista geral e acervo exposto
- (3) vista geral e acervo exposto
- (4) reproduções de fotografias plotadas nas paredes
- (5) esculturas policromadas
- (6) antigo caça-níqueis em madeira
- (7) gramofone
- (8) peças de vestuário
- (9) antigo relógio de ponto, em madeira e projeção em vídeo preto e branco, sem áudio, feita na parede, mostrando pessoas utilizando o relógio.

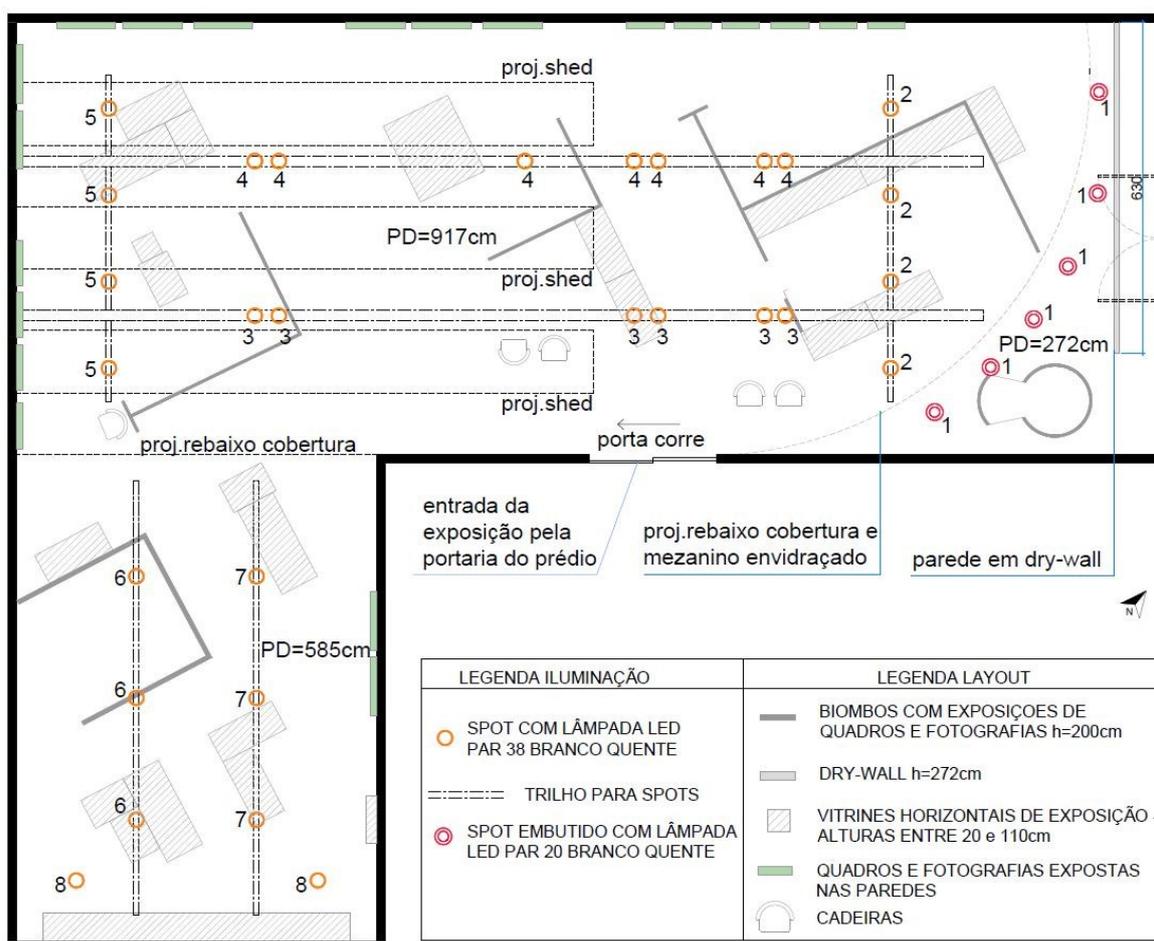


Fonte: da autora.

A sala de exposições do anexo, com área de 240m², está representada na Figura 45, que mostra o *layout* da exposição no ambiente, as projeções dos forros com as diferenças de pés direitos – eles têm três diferentes alturas: 2,72m, na entrada da sala, 9,17m na porção central, e 5,85m nos fundos – além da projeção dos *sheds* e a posição e circuitos da iluminação artificial. A cada exposição neste local, os

profissionais envolvidos podem solicitar a repintura da sala e adequação da iluminação artificial. Atualmente, as paredes da sala estão pintadas de branco, e o teto de preto; o piso da sala é em madeira natural, tipo tabuado corrido. A Figura 45 mostra também a distribuição dos circuitos de iluminação artificial (numerados na planta), que acontece por meio de trilhos de spots direcionáveis com lâmpadas de LED PAR 38, exceto pelos spots embutidos no gesso (próximo à entrada principal), que são com lâmpadas de LED PAR 20. Todas as lâmpadas têm temperatura de cor de 2700K a 3000K.

Figura 45 - Planta de layout e iluminação da sala de exposições do anexo



Fonte: da autora.

Além da lona branca bloqueando a entrada de luz natural pelos *sheds*, para a exposição atual, foi colocada uma parede em *dry-wall* a 80cm de distância da porta de entrada principal, com 6,30m de comprimento, e ocupando toda a altura do pé direito (2,72m), sendo a entrada na exposição realizada pela porta que dá para o

salão de entrada do anexo. Assim, a entrada de luz natural está parcialmente bloqueada, acontecendo pelo mezanino envidraçado, que segue a projeção da cobertura curva.

Há também uma pequena entrada de luz natural pelos corredores do segundo e terceiro pavimentos (Figura 46) que são cobertos por uma claraboia de vidro. Devido ao bloqueio da entrada principal, a entrada do público na exposição acontece pela porta de correr em madeira, que é acessada por dentro do hall de entrada (portaria) da edificação.

Figura 46 - Entrada de luz natural pelos corredores do 2° e 3° pavimentos



Fonte: da autora.

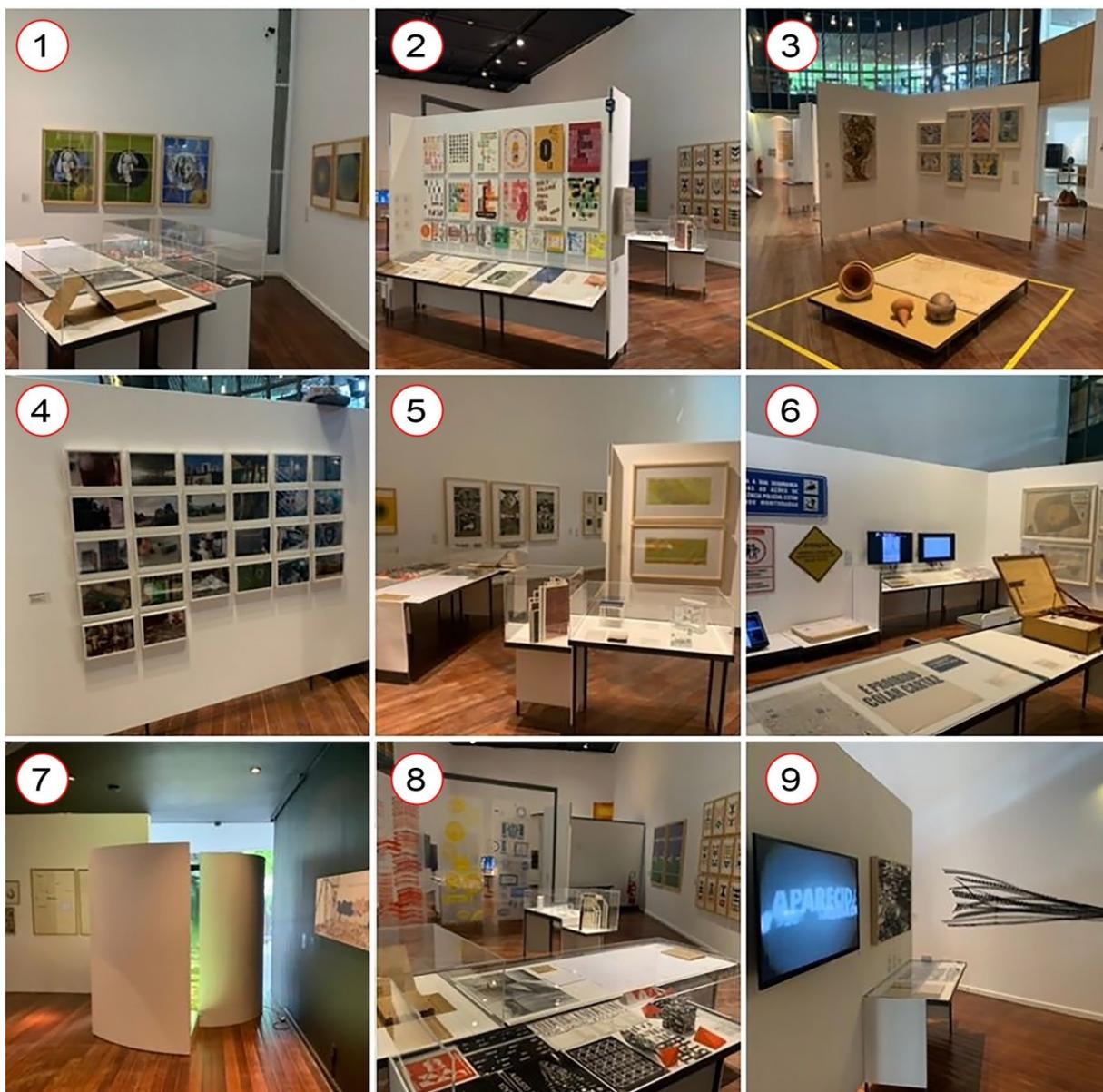
Devido ao alto pé direito do ambiente e às dificuldades burocráticas para solicitar a reposição de lâmpadas junto à Prefeitura de Belo Horizonte, segundo a coordenação do Museu, as lâmpadas raramente são substituídas, mesmo quando queimam. Segundo a coordenação do museu, foi realizada licitação em 2020 para a troca das lâmpadas, mas ainda não foi atendida.

A sala de exposições temporárias do anexo apresenta acervo misto: acervo original e reproduções, que são tanto do Museu de Arte da Pampulha (MAP) quanto do MhAB. O acervo é composto por telas, fotografias, mapas, cadernos, e peças em cerâmica, papel, acrílico e madeira. A exposição vertical acontece em biombos e nas paredes, enquanto vitrines de vidro incolor, sem película de proteção, expõem peças na horizontal. Essas vitrines têm alturas que variam entre 20cm e 110cm de altura.

Há ainda três exposições audiovisuais em televisão. Algumas das peças expostas podem ser visualizadas na Figura 47.

Figura 47 - Sala de exposições do anexo

- (1) vista geral e acervo exposto – reproduções de mapas e quadros na parede
- (2) pôsteres e colagens
- (3) cerâmicas
- (4) reproduções de fotografias
- (5) reproduções de mapas, miniaturas e quadros
- (6) recortes de jornais, revistas e cartazes
- (7) parede de *dry-wall* e cilindro de exposição
- (8) miniaturas e reproduções cartográficas
- (9) apresentação audiovisual.



Fonte: da autora.

Ao fundo da sala de exposição há um espaço fechado de exposição, em um cubo que mede 2,80m de lado, e tem somente uma lateral aberta para entrada dos visitantes. Dentro dele acontece uma exposição com gaiolas brancas e uma projeção em preto e branco. O cubo possui iluminação artificial própria e, portanto, não utiliza a iluminação geral da sala (Figura 48).

Figura 48 - Cubo com exposição ao fundo da sala de exposições do anexo



Fonte: da autora.

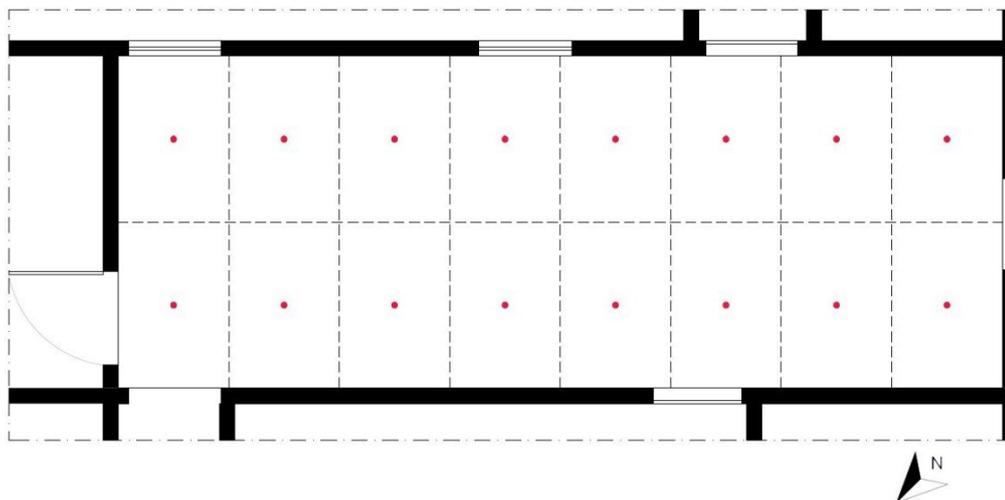
4.3. Medições *in loco*

O objetivo dessa fase foi verificar, numa condição estática real, a distribuição de iluminâncias nas salas selecionadas. Para isso, as medições *in loco* foram realizadas segundo a NBR 15.215-4 (ABNT, 2005), no dia 25 de outubro de 2021, entre as 15h e 19h, quando pode ser verificada a distribuição espacial das iluminâncias produzidas separadamente pelas componentes natural e artificial. A medição ocorreu nesses horários devido à concordância de disponibilidade da equipe do museu para receber as visitas técnicas, que foi reduzida devido às circunstâncias da pandemia de COVID-19.

Para a iluminação natural, o objetivo foi obter um parâmetro visando a validação das simulações computacionais, enquanto para a iluminação artificial, buscou-se obter a iluminância artificial média, que foi posteriormente somada às iluminâncias obtidas nas simulações da componente natural, para proposição do zoneamento das salas estudadas, com relação aos requisitos de conservação.

Segundo as recomendações da NBR 15.215-4, foi estabelecida uma malha de pontos para as medições, em cada sala selecionada, conforme mostra a Figura 49.

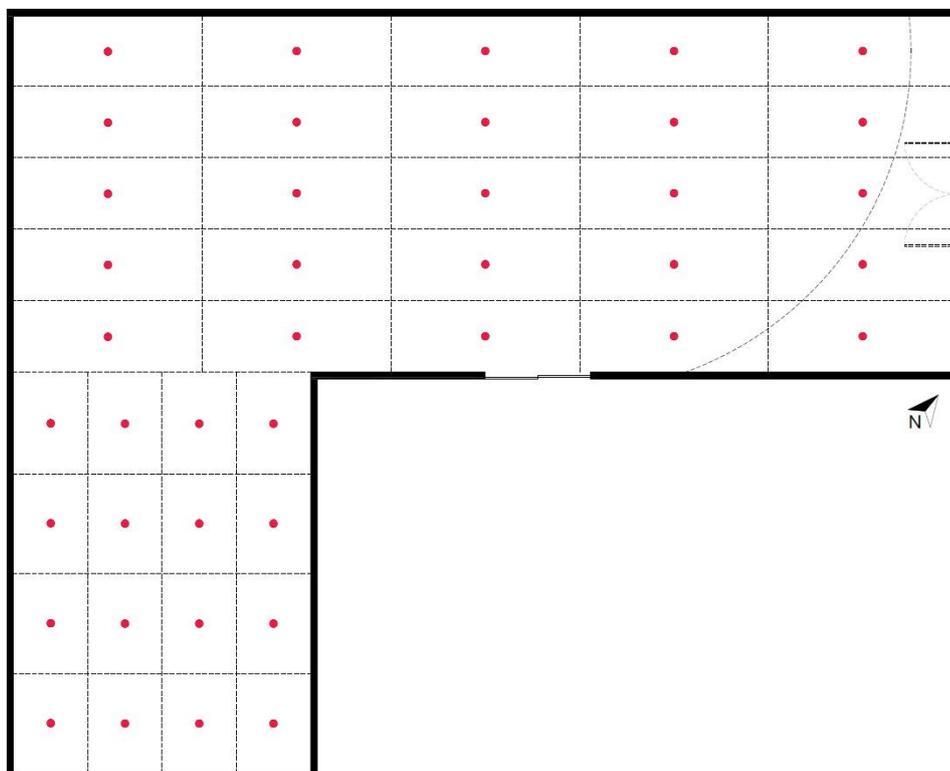
Figura 49 - Malha de pontos para medição da sala 19 do casarão



Fonte: da autora.

No anexo, como a sala de exposições tem planta em L, dividiu-se a sala em duas malhas, conforme mostra a Figura 52.

Figura 50 - Malha de pontos para medição na sala de exposições do anexo



Fonte: da autora.

Durante a medição, um dos luxímetros foi posicionado na cobertura do edifício anexo, de forma que a fotocélula estivesse em local desobstruído. No dia da medição o céu estava parcialmente encoberto (Figura 53). O sensor externo mediu das 15h às 17h, em intervalos de 15 segundos.

Figura 51 - Luxímetro posicionado na área externa, céu parcialmente encoberto



Fonte: da autora.

A medição de iluminação natural foi feita primeiramente na sala de exposições do anexo, das 15h às 16h. Posteriormente, na sala 19 do casarão, das 16h às 17h. A iluminância natural foi normalizada pela média da iluminância externa durante o período de coleta, conforme indica a NBR 15.2015-4 (ABNT, 2005). Por fim, isocurvas de distribuição das iluminâncias internas nas salas estudadas foram geradas utilizando o programa 3DField.

Em seguida, foram feitas as medições de iluminação artificial, das 17h às 19h, nas duas salas, iniciando-se pela sala do casarão e mantendo-se as bandeiras das janelas fechadas. As medições de radiação UV foram realizadas simultaneamente, tanto para luz natural quanto artificial.

4.4. Configuração dos modelos de simulação

A seguir são apresentadas as condições de contorno, as configurações e as simplificações adotadas para as simulações computacionais: modelo 3D, características do entorno, sombreamento vegetal, refletâncias das superfícies, que foram utilizados buscando aproximar tanto quanto possível o modelo da realidade.

Para a modelagem tridimensional foi utilizado o programa *Rhinoceros 3D*. Este programa utiliza a tecnologia NURBS (*Non Uniform Basis Spline*) e foi desenvolvido pela Robert MCNeel & Associates. A tecnologia NURBS é um modelo matemático que permite a representação de curvas e superfícies com maior precisão, e conferindo flexibilidade na manipulação das formas (RHINO3D, 2021).

Já para as simulações das salas foi utilizado o plug-in *Climate Studio*, lançado em 2020 pelos desenvolvedores Solemma. Com o modelo 3D pronto, foi possível realizar dois tipos de simulação: estática (*point-in-time*), e dinâmica (para cálculos anuais de autonomia de luz natural e exposição à luz solar). O programa utiliza as disposições da IES LM-83 (2012) como base de cálculo. A simulação estática considera um dia e horário pré-estabelecidos, enquanto a simulação dinâmica é realizada para as 8.760 horas de um ano típico, conforme trabalhado no item 2.5.

Após a elaboração do modelo 3D e da seleção do tipo de análise a ser feita pela simulação, são fornecidas as seguintes condições de contorno: localização da edificação, definição dos materiais (refletâncias e/ou opacidades), configuração da malha de pontos no espaço e realização da simulação no *Climate Studio*. A seguir serão descritas as etapas de configuração realizadas para este estudo.

4.4.1. Disponibilidade de luz em Belo Horizonte

Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, está localizada na região sudeste do Brasil, com latitude $-19^{\circ} 55'15''$ e longitude $-43^{\circ} 56'16''$. Na simulação estática foi utilizado o modelo de céu padrão CIE (ISO-CIE 15469, 2004), conforme observado no dia 25 de outubro de 2021, quando da medição *in loco*, caracterizado como parcialmente encoberto. De acordo com a IES LM-83 (2012) o azimute do modelo foi posicionado conforme o norte geográfico. Utilizou-se nesta pesquisa o arquivo climático do formato TMYx (*Test Meteorological Year*), disponibilizado pelo LABEEE (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações), da estação Carlos Prates em Belo Horizonte, considerando medições entre 2004 e 2018, conforme item 2.6.

O INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) disponibiliza os dados meteorológicos registrados diariamente por estação. No dia 25 de outubro de 2021, data das

medições *in loco*, a estação do Cercadinho, em Belo Horizonte registrou os dados conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Dados informados pelo INMET no dia 25 de outubro de 2021 – Estação Belo Horizonte (Cercadinho- código F501)

DADOS DO INMET COLETADOS NO DIA 25/10/2021 NA ESTAÇÃO DO CERCADINHO - BELO HORIZONTE					
HORA DA MEDIÇÃO	PRECIPITAÇÃO TOTAL (mm)	PRESSÃO ATMOSFÉRICA AO NÍVEL DA ESTAÇÃO(mB)	RADIAÇÃO GLOBAL(Wh/m ²)	TEMPERATURA DO AR - BULBO SECO(°C)	UMIDADE RELATIVA DO AR (%)
06:00	0,0	883,1	14,8	17,3	88,0
07:00	0,0	884,3	88,5	18,0	87,0
08:00	0,0	884,8	271,7	19,2	76,0
09:00	0,0	885,1	515,4	21,6	68,0
10:00	0,0	885,5	870,4	25,3	56,0
11:00	0,2	885,3	731,4	24,8	55,0
12:00	0,0	884,8	790,3	27,5	44,0
13:00	0,0	884,2	795,6	25,4	49,0
14:00	0,0	883,2	690,5	26,3	46,0
15:00	0,0	883,1	536,8	25,9	48,0
16:00	0,0	882,9	246,2	23,6	57,0
17:00	0,0	883,2	109,1	22,1	64,0
18:00	0,0	883,4	20,2	19,7	76,0
19:00	0,4	883,6	0,0	18,6	83,0
20:00	0,4	884,0	0,0	18,4	85,0

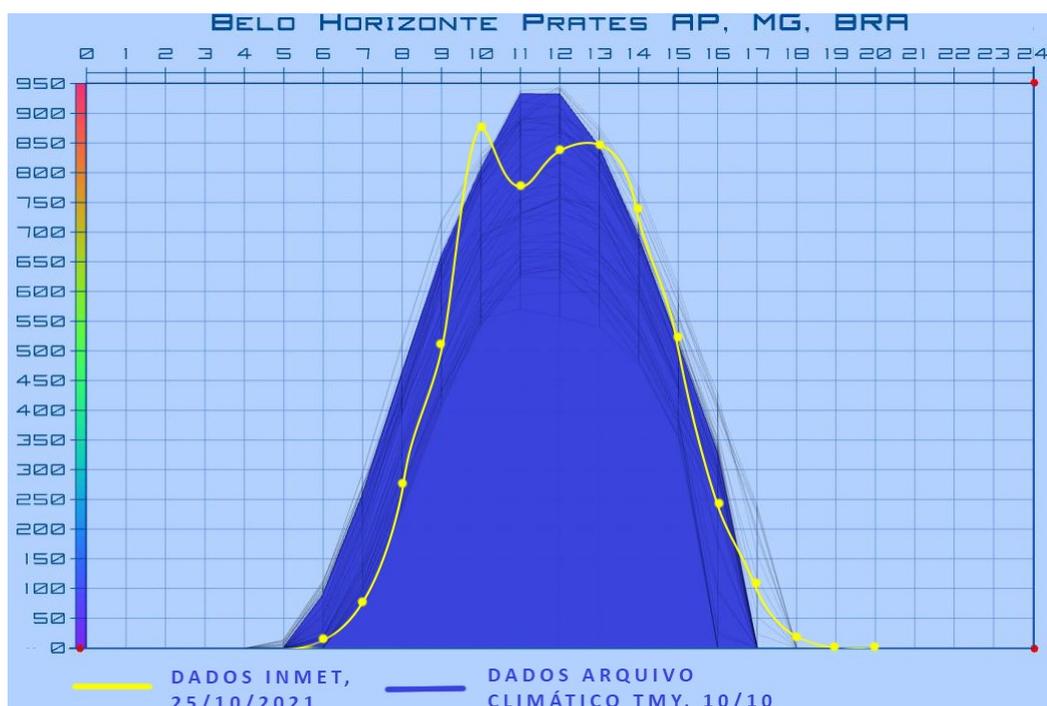
Fonte: INMET, 2021.

O INMET não disponibiliza os dados de nebulosidade diária ou horária, e o último arquivo que contém essa informação data de 2010 (INMET, 2021). Assim, para a simulação estática foi utilizado como referência o dado de radiação global, buscando-se no arquivo climático TMYx um dia próximo ao dia 25 de outubro, que tivesse radiação solar aproximada aos dados medidos pelo INMET. O arquivo climático utiliza a unidade de Wh/m² para radiação global, portanto os valores da tabela foram convertidos para comparação com o arquivo climático.

Foi utilizado o programa *Weather Data*³, do desenvolvedor Andrew Marsh, para gerar um gráfico de radiação global, verificando-se que o dia 10 de outubro no arquivo TMYx apresenta um perfil horário de radiação solar global horizontal bem próximo dos valores medidos pelo INMET em 25/10/2021, sendo então escolhida a data de 10 de outubro como referência para a simulação estática de iluminação natural (Figura 54).

³ <https://drajmarsh.bitbucket.io/weather-data.html>

Gráfico 3 - Radiação Global – dados do INMET em 25/10/2021 e dados do arquivo TMYx para 10/10



Fonte: Weather Data, 2022.

Nota: gráfico elaborado no programa Weather Data utilizando a base de dados do Arquivo climático TMYx (2004-2018) da estação meteorológica Carlos Prates, em Belo Horizonte.

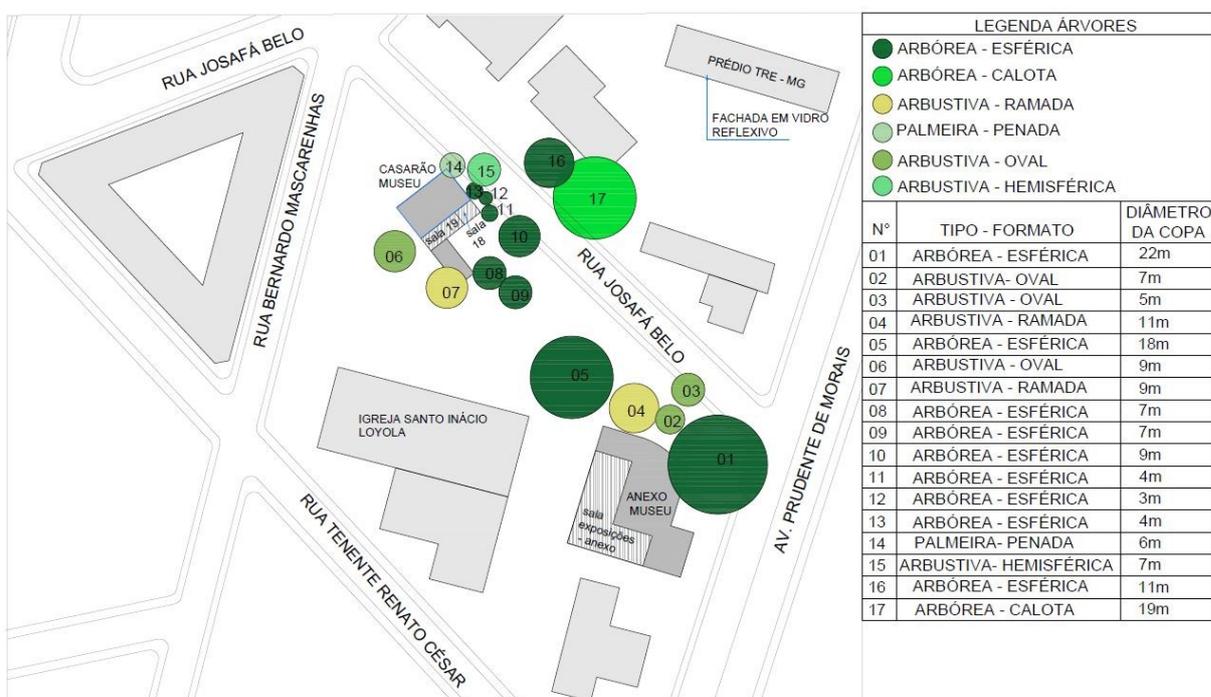
Já para a simulação dinâmica, foi considerado o período de ocupação de acordo com o período que o MhAB fica aberto ao público, das 11h às 18h. Foi realizada a simulação dinâmica, que gera valores de iluminância para cada ponto da malha, hora a hora, para 365 dias do ano. Os modelos de céu foram extraídos do arquivo climático TMYx.

Para fins de conservação do acervo, buscou-se, neste estudo, produzir um resultado da simulação dinâmica que representasse condições de máxima incidência de luz natural, a serem consideradas na proposição de zoneamento das salas estudadas. Assim, foi selecionado apenas o período do inverno (conforme item 2.6) considerando 45 dias antes e 45 dias depois do solstício (de 07 de maio a 05 de agosto). Isso porque, se considerássemos a média anual de iluminâncias em cada ponto, no período do inverno os valores serão maiores, podendo causar uma deterioração irreversível no acervo. Para gerar os mapas isolux, foi realizada uma média dos valores horários de iluminância, para cada ponto, no período do inverno.

4.4.2. Terreno e entorno

Para a modelagem do terreno, edificações do entorno e sombreamento pela vegetação foi elaborada uma planta de situação (Figura 55) identificando o posicionamento e perímetro das edificações, através de sobreposição com o mapa disponibilizado pelo Google Earth. Este mapa também foi utilizado para a modelagem da declividade do terreno, por meio da sua importação para o programa Rhino3D. Durante as visitas de campo foram identificadas as edificações do entorno imediato do museu, e suas alturas foram estimadas de acordo com o número de pavimentos.

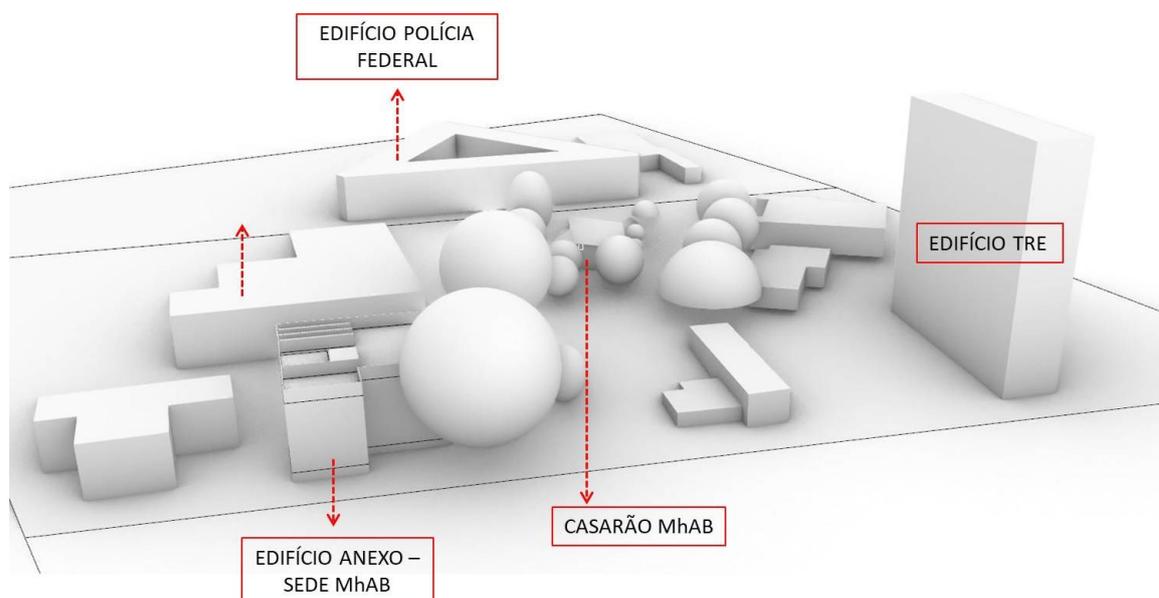
Figura 52 - Planta de situação com posicionamento das edificações e árvores do entorno



Fonte: da autora.

Por se tratar de um entorno bastante vegetado, optou-se por modelar as principais árvores próximas às aberturas das salas 18 e 19 do casarão, e da sala de exposições do anexo. A quantidade de posicionamento das árvores foi mapeada por observação durante as visitas técnicas, e a modelagem das árvores foi feita segundo o método de simplificação da geometria das árvores encontrada em Dias e Pedrini (2017), e Dias (2016), e o diâmetro das copas foi estimado pelo Google Earth (Figura 55). A Figura 56 mostra o modelo 3D desenvolvido para a pesquisa.

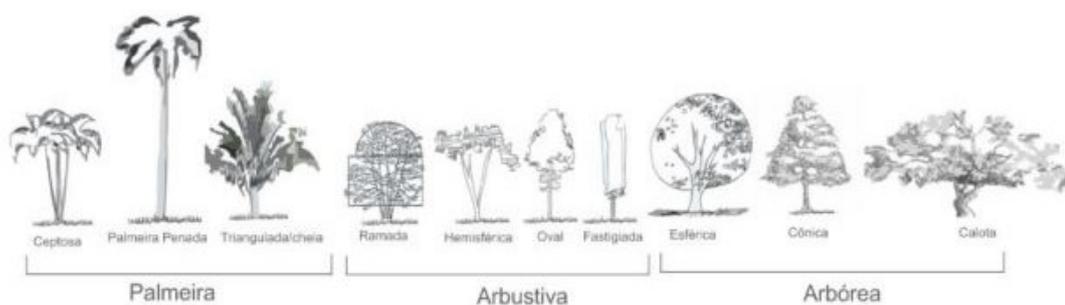
Figura 53 - Modelo 3D desenvolvido para as simulações



Fonte: da autora.

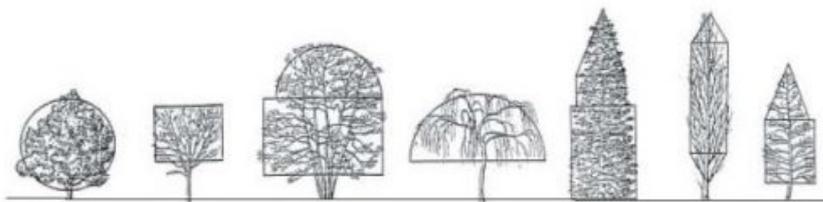
Segundo os autores, os modelos das árvores podem ser simplificados como palmeiras, arbustivos ou arbóreos (Figura 57) e para as simulações computacionais os formatos das copas podem ser abstraídos conforme mostrado na Figura 58 (DIAS E PEDRINI, 2017).

Figura 54 - Formatos de copas vegetais



Fonte: FURTADO, 1994 *apud* 2016, p. 24.

Figura 55 - Abstração de modelos de vegetação em programas de simulação



Fonte: FURTADO, 1994 *apud* DIAS, 2016, p.29.

4.4.3. Modelagem das edificações do museu e das salas selecionadas

Visando a precisão da simulação, as salas em estudo e as fachadas que interferem na iluminação natural das mesmas foram detalhadas com maior precisão. Assim, internamente às salas foram modeladas as janelas, os caixilhos, as superfícies de vidro e os marcos das janelas. Pisos, tetos e paredes também foram modelados e receberam aplicação de cores, que foram levantadas *in loco* comparativamente ao catálogo de cores da Sherwin Williams. Este catálogo fornece valores de referência de refletância, que foram considerados na configuração do modelo (Figura 59).

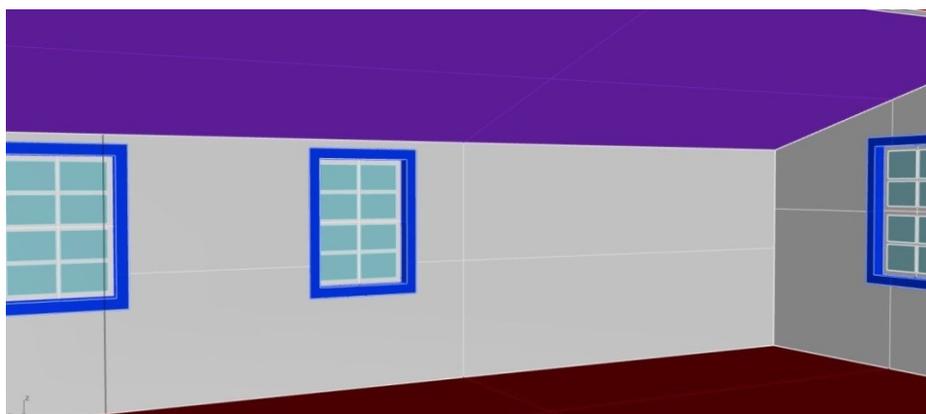
Figura 56 - Leque de cores Sherwin Williams utilizado para conferência das refletâncias



Fonte: da autora.

Da mesma forma, foram modelados recortes no teto, tais como os *sheds* da sala de exposições do anexo, e também o mezanino com parede envidraçada. No anexo foi modelada a parede dry-wall que foi montada para a exposição Gráfico Grafia, devido a obstrução da entrada de luz natural que o elemento proporciona. A Figura 60 e a Figura 61 mostram os modelos 3D internamente às salas 19 do casarão e sala de exposições do anexo, respectivamente.

Figura 57 - Modelo 3D da sala 19 do casarão



Fonte: da autora.

Figura 58 - Modelo 3D da sala de exposições do anexo externa e internamente



Fonte: da autora.

4.4.4. Refletâncias dos Materiais

Os valores das refletâncias dos materiais utilizados na configuração das condições de contorno do modelo são informados na Tabela 8. O catálogo de cores da Sherwin Williams traz a informação de refletância para cada cor do leque. Assim, todas as refletâncias internas das salas em estudo, e das fachadas externas brancas puderam ser atribuídas conforme as cores do catálogo, por comparação visual

durante as visitas *in loco*. Para o albedo médio das superfícies verticais do entorno foi considerado o valor de 30%, conforme indicado pela IES LM-83 (2012).

O *Climate Studio* (CS) possui uma biblioteca interna de materiais já cadastrados, com refletâncias e transmitâncias típicas. Sendo assim, alguns dos materiais foram configurados utilizando esse banco de dados, tais como os vidros e caixilhos das janelas. Para as superfícies dos *sheds* da sala de exposições do anexo, cobertas com lona branca, estimou-se uma transmitância de 5%.

Tabela 8 - Refletâncias e transmitâncias atribuídas às superfícies no modelo de simulação

MATERIAL	COR/MATERIAL	REFLETÂNCIA (%)	TRANSMITÂNCIA (%)	REFERÊNCIA
ENTORNO				
Árvores	verde	10,0	40,0	DIAS E PEDRINI, 2017
Gramado	verde	16,0	0,0	Biblioteca CS
Piso concretado	cinza claro	37,0	0,0	Biblioteca CS
Superfícies das edificações do entorno	variadas	30,0	0,0	LM-83
Vidro reflexivo edifício TRT	azul	36,4	14,8	Biblioteca CS
CASARÃO				
Fachadas de pedra do Casarão	pedra amarelada	15,1	0,0	Biblioteca CS
Fachadas em pintura do Casarão	branco	85,0	0,0	Catálogo Sherwin Williams
Piso das sala 19	madeira	20,0	0,0	Catálogo Sherwin Williams
Paredes da sala 19	madeira	85,0	0,0	Catálogo Sherwin Williams
Teto da sala 19	branco	85,0	0,0	Catálogo Sherwin Williams
Vidros das janelas da sala 19	incolor	8,4	87,7	Biblioteca CS
Caixilhos das janelas da sala 19	branco	82,0	0,0	Biblioteca CS
Alisares das janelas da sala 19	azul royal	19,0	0,0	Catálogo Sherwin Williams
ANEXO - SEDE DO MhAB				
Paredes das fachadas	branco	85,0	0,0	Catálogo Sherwin Williams
Cobertura da edificação (laje)	cinza claro	30,0	0,0	LM-83
Vidro dos sheds	incolor	67,0	5,0	Biblioteca CS
Paredes internas	branco	85,0	0,0	Catálogo Sherwin Williams
Forro da sala de exposições	preto	4,5	0,0	Catálogo Sherwin Williams
Piso da sala de exposições	madeira	13,0	0,0	Catálogo Sherwin Williams
Porta de entrada (interna)- painel de madeira	madeira	54,0	0,0	Catálogo Sherwin Williams
Vidro da porta de entrada (externa)	incolor	6,5	0,0	Biblioteca CS
Vidro do mezanino	verde azulado	6,5	67,4	Biblioteca CS
Caixilhos dos vidros	cinza claro	48,9	0,0	Biblioteca CS

Fonte: da autora.

As árvores foram modeladas com superfícies translúcidas e receberam índices de refletância e transmitância padronizados, considerando os valores utilizados por Dias e Pedrini (2017) para árvores com copas de opacidade média.

4.4.5. Compatibilização das malhas de pontos

Para as simulações do *Climate Studio* foram geradas uma malha de pontos a 75 cm do chão (altura que também foi utilizada nas medições *in loco*, como estabelecido pela NBR 15.215-4), com distanciamento das paredes de 30 cm e distanciamento

entre os pontos entre 30 e 60 cm, conforme estabelecido pela norma IES LM-83 (2012). Assim, o *Climate Studio* gerou uma malha com 84 pontos na sala 19 do casarão, e 632 pontos na sala de exposições do anexo.

Posteriormente, foi necessário compatibilizar a malha do *Climate Studio* com a malha utilizada na medição *in loco*, visando também simplificar a inserção dos valores no 3D Field, que acontece de forma manual. Assim, a malha do *Climate Studio* foi dividida em quadrantes, e para cada quadrante foi realizada uma média aritmética dos valores de iluminância, de forma que a malha ficasse conforme a utilizada na medição *in-loco* – com 16 pontos na sala 19 e 41 pontos na sala de exposições do anexo.

4.4.6. Métricas de conforto luminoso

Os dados de saída analisados pela simulação estática foram as iluminâncias de iluminação natural ponto a ponto da malha, de forma que pudessem ser comparados com os dados medidos no local. Já para a simulação dinâmica o *Climate Studio* fornece as métricas de sDA (*Spatial Daylight Autonomy*) e ASE (*Annual Sunlight Exposure*). Além desses, foi possível extrair a média de iluminância anual, referente à iluminação natural, ponto a ponto da malha.

4.4.7. Métricas de conservação preventiva de coleções

Os resultados da medição *in loco* foram processados utilizando o programa 3D Field, para a geração de curvas isolux das salas estudadas. As curvas foram sobrepostas à planta de layout das salas, separadamente para as componentes natural, artificial e UV.

Já as simulações computacionais geraram resultados gráficos próprios para desempenho luminoso, em forma de planta baixa com os percentuais de cada métrica analisada (sDA e ASE). A geração dos resultados para conservação preventiva (doses anuais de iluminância) foi feita a partir dos gráficos gerados no *Climate Studio*: foram desenvolvidos tabelas e quadros comparativos para análise dos resultados frente aos requisitos de níveis de iluminância e doses anuais de exposição da CIE 157:2004, trabalhados no item 2.3.

Em seguida, desenvolveu-se um zoneamento das salas em estudo, para posicionamento do acervo de acordo com a sensibilidade dos materiais à luz. Tal zoneamento foi tratado no programa Photoshop, com auxílio das isocurvas geradas no 3D Field.

4.5. Zoneamento e cálculo das doses anuais de exposição

Para a elaboração do zoneamento as simulações dinâmicas foram realizadas considerando o período do inverno, conforme explicado no subitem 4.4.1. Utilizando o programa *Photoshop*, foram marcadas sobre a planta das salas, as áreas em que são recomendáveis as exposições de cada tipo de acervo, conforme os níveis de sensibilidade delimitados pelo relatório CIE 157 (2004).

Já para o cálculo da dose anual de exposição média na sala 19 do casarão e na sala de exposições do acervo, foi utilizada a planilha de iluminâncias gerada pelo *Climate Studio*, onde se tem os níveis de iluminância horários, ponto a ponto da malha, ao longo do ano inteiro, para a luz natural.

Assim a dose anual média em cada sala foi calculada conforme a seguinte equação:

$$Ix.h.a_{\text{média}} = (E_{\text{natural média}} + E_{\text{artificial média}}) \times t$$

Em que:

$Ix.h.a_{\text{média}}$ = dose de exposição anual média

$E_{\text{natural média}}$ = média da iluminância da luz natural ao longo do ano, simulada no *Climate Studio*

$E_{\text{artificial média}}$ = média da iluminância artificial em cada sala, medida *in loco*.

t = número de horas que o museu fica aberto ao longo do ano.

5. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior. Primeiramente são apresentados os resultados para a medição *in loco*, na sala 19 do casarão e da sala de exposições do anexo. As medições foram realizadas segundo determinado pela NBR 15.215-4 (ABNT, 2005).

A seguir, são apresentados os resultados das simulações computacionais: simulações estáticas, para o dia 10 de outubro, e dinâmicas, anual. Por fim é apresentado o resultado desenvolvido para o zoneamento das salas, e as recomendações para exposição do acervo, buscando a conservação preventiva das coleções.

5.1. Resultados da medição *in loco*

Este tópico apresenta os resultados das medições nas salas em estudo no Museu Abílio Barreto, tanto para iluminação natural, quanto artificial e radiação UV. Como descrito na metodologia, as iluminâncias externas foram consideradas para a normalização das iluminâncias internas de luz natural, segundo indicado pela NBR15215-4 (ABNT, 2005). A iluminância e a proporção de radiação UV medidas foram então comparadas às recomendações do relatório técnico CIE 157: 2004 (para conservação preventiva dos acervos) e da ISO/CIE 8995-1 (2013) (para atendimento das métricas relativas à iluminância).

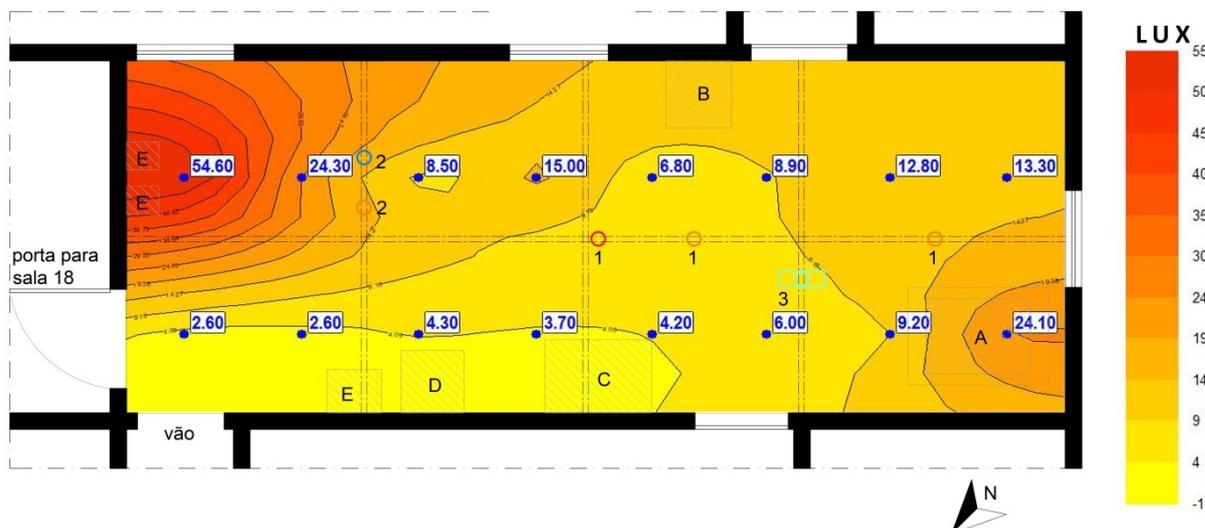
5.1.1. Iluminação natural

Os resultados da medição *in loco* de iluminação natural foram processados no programa 3D Field, gerando isocurvas de iluminância. As curvas foram sobrepostas à planta de layout de cada uma das salas.

A Figura 62 mostra a distribuição de iluminância natural medida na sala 19, onde é possível observar que os níveis são mais altos (55 lx) próximos à janela voltada para sudeste, à esquerda na figura. Como esperado, a iluminância é menor nos locais mais distantes das janelas. A variação entre o maior e o menor valor medido foi de 95%. Na sala 19 a média foi de 12,6 lx, o que poderia ser justificado pelo horário de

medição, uma vez que das 16h para às 17h há uma grande redução da disponibilidade de luz natural.

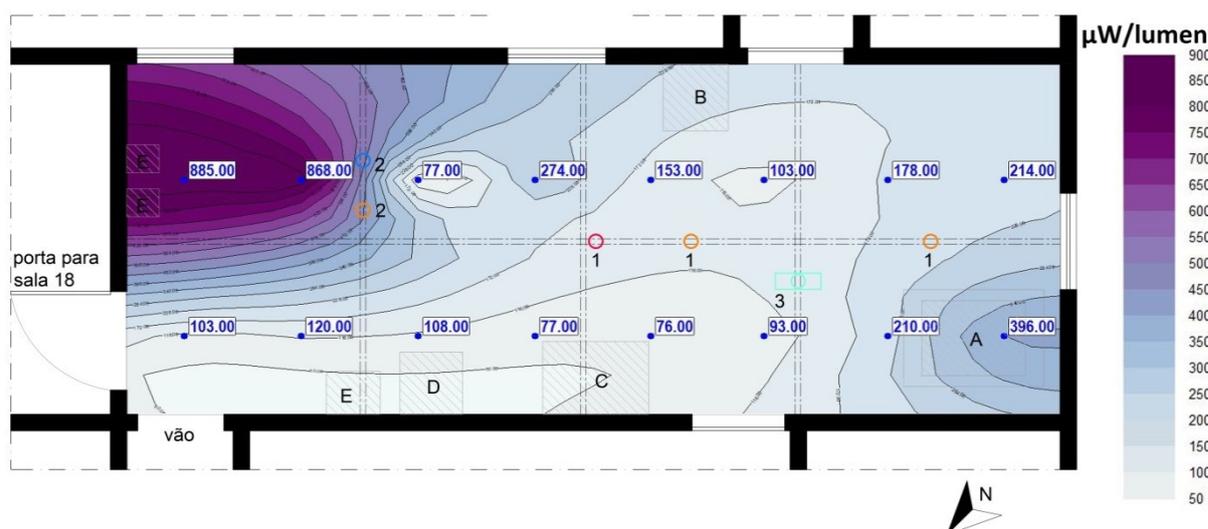
Figura 59 - Distribuição de iluminância natural normalizada, medida na sala 19 (25/10/2021, 16h -17h)



Fonte: da autora.

A Figura 63 mostra os níveis de radiação UV da luz natural, que variou entre 76 $\mu\text{W}/\text{lm}$ e 885 $\mu\text{W}/\text{lm}$, e o maior nível correspondeu ao local com maior iluminância medida, conforme esperado.

Figura 60 - Distribuição da proporção de radiação UV na luz natural visível, medida na sala 19 (25/10/2021, 16h -17h)

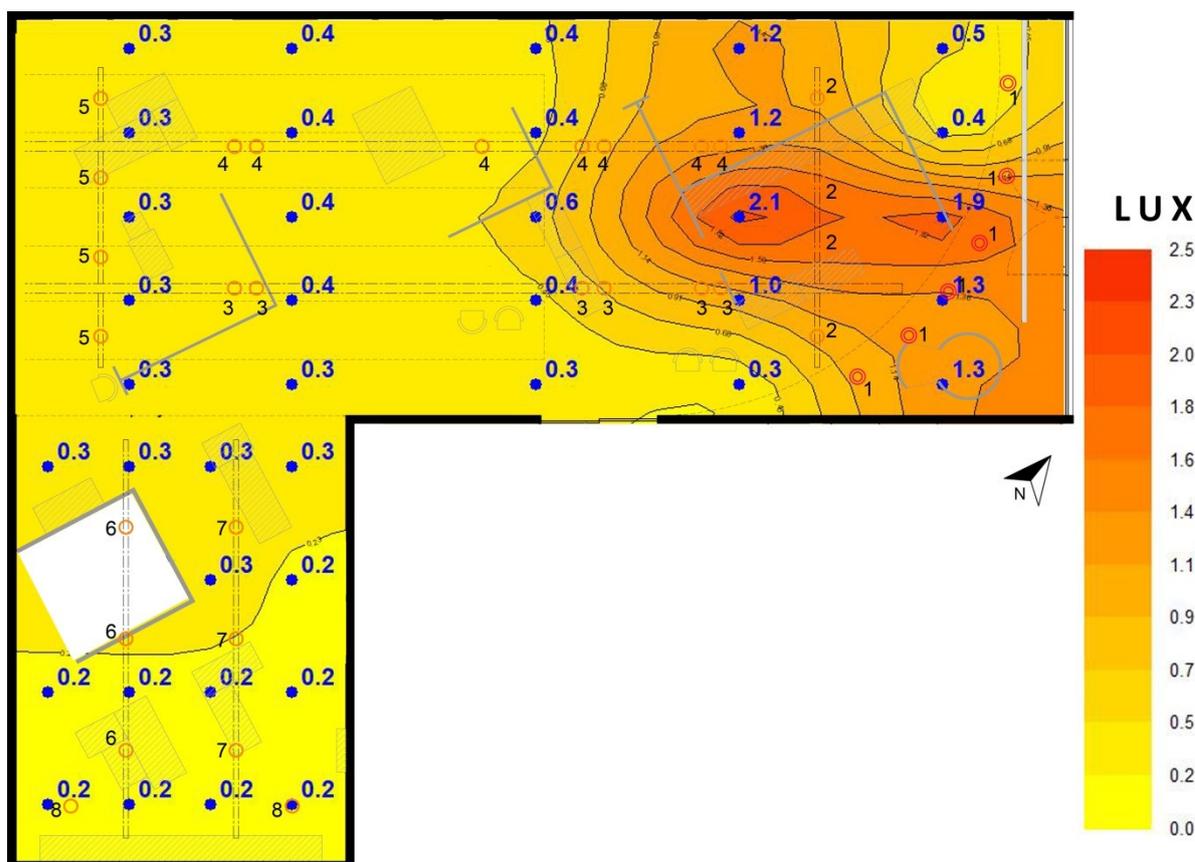


Fonte: da autora.

Já na sala de exposições do anexo a iluminação natural apresentou valores mais baixos, em comparação com a sala do casarão (Figura 64). A média das

iluminâncias foi de menos de 1lx, sendo que o maior valor registrado foi de 2lx, próximo ao mezanino envidraçado e às aberturas dos corredores do segundo e terceiro pavimentos. Os valores observados estão dentro do esperado, devido às condições de céu encoberto e horário no dia da medição, bem como devido à parede da exposição temporária que no momento bloqueia a entrada de luz natural na fachada principal, e aos *sheds* que também estão obstruídos.

Figura 61 - Distribuição de iluminância natural normalizada, medida na sala de exposições do anexo (25/10/2021, 15h - 16h)



Fonte: da autora.

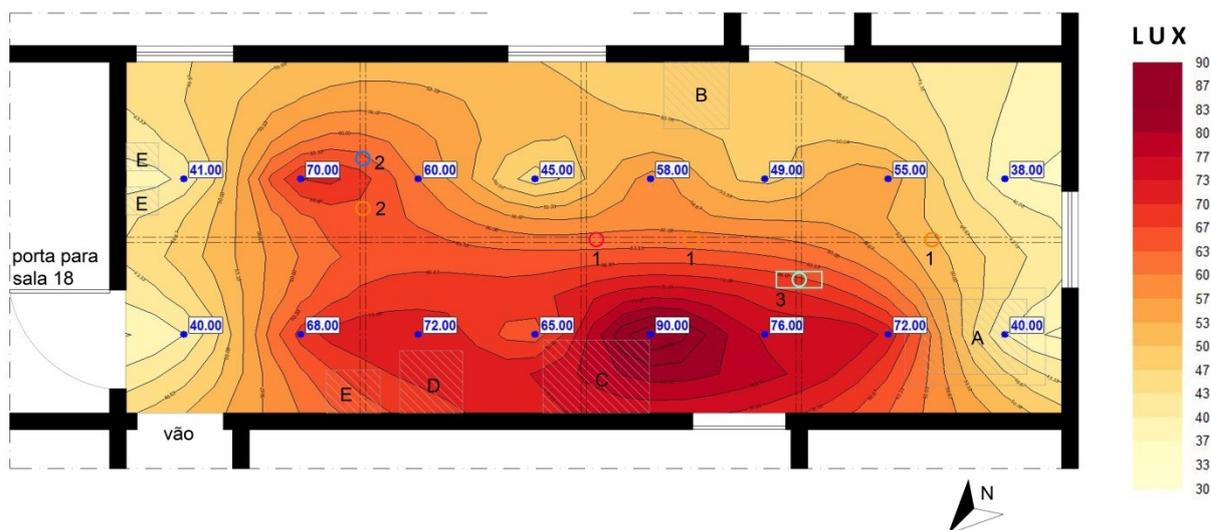
Pelo fato dos níveis de iluminância da luz natural no anexo terem sido baixos, o sensor ELSEC 765 não identificou radiação UV nesta sala de exposições. Além disso, devido à instalação do cubo de exposição (marcado em branco na figura), não foi feita a medição de luz natural em seu interior.

5.1.2. Iluminação artificial

Os níveis de iluminância da iluminação artificial foram medidos na sala 19 e na sala de exposição do anexo do museu. Na sala de exposições do anexo a radiação UV na luz artificial ficou abaixo da sensibilidade do sensor ELSEC 765, indicando que a emissão de radiação das lâmpadas naquela sala é inexistente ou insignificante.

Na sala 19 a iluminância artificial variou entre 38 e 90 lx (uma variação de 58% entre eles), como mostrado na Figura 65. Nota-se que a iluminância artificial é maior próximo dos objetos de baixa sensibilidade – o caça-níqueis, e o gramofone, que são feitos de madeira e metais, provavelmente devido à presença de iluminação feita por lâmpada fluorescente compacta próxima ao local. Além disso, a iluminação artificial teve os menores níveis registrados próximos à janela, de forma que, nesses locais, a luz natural poderia ser a única fonte utilizada durante o dia. Foi possível observar que a iluminação artificial teve uma distribuição mais homogênea do que a luz natural na sala 19. Nas superfícies verticais das esculturas policromadas da sala foi medida também a iluminância 51 lx. A média das iluminâncias da luz artificial medida na sala 19 foi de 59 lx.

Figura 62 - Distribuição da iluminância artificial medida na sala 19 (data da medição 25/10/2021)

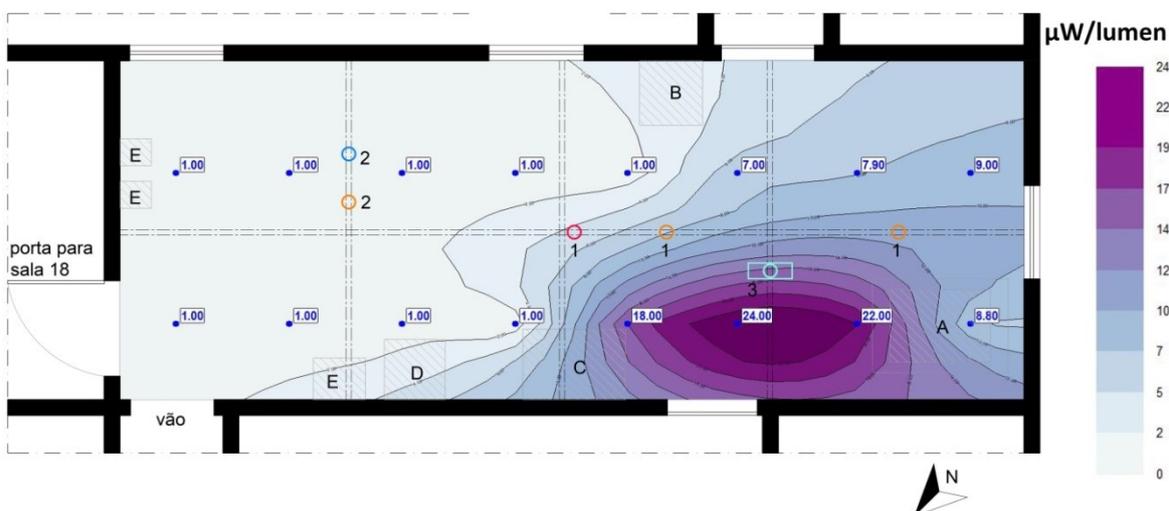


Fonte: da autora.

Observando a Figura 66, a variação da radiação UV na sala 19 foi de 1 a 24 $\mu\text{W}/\text{lm}$. Comparando os maiores níveis de radiação UV da luz natural e artificial, a artificial

foi 97% menor. Como esperado, o maior nível de radiação UV da luz artificial aconteceu sob a lâmpada fluorescente compacta (6000K).

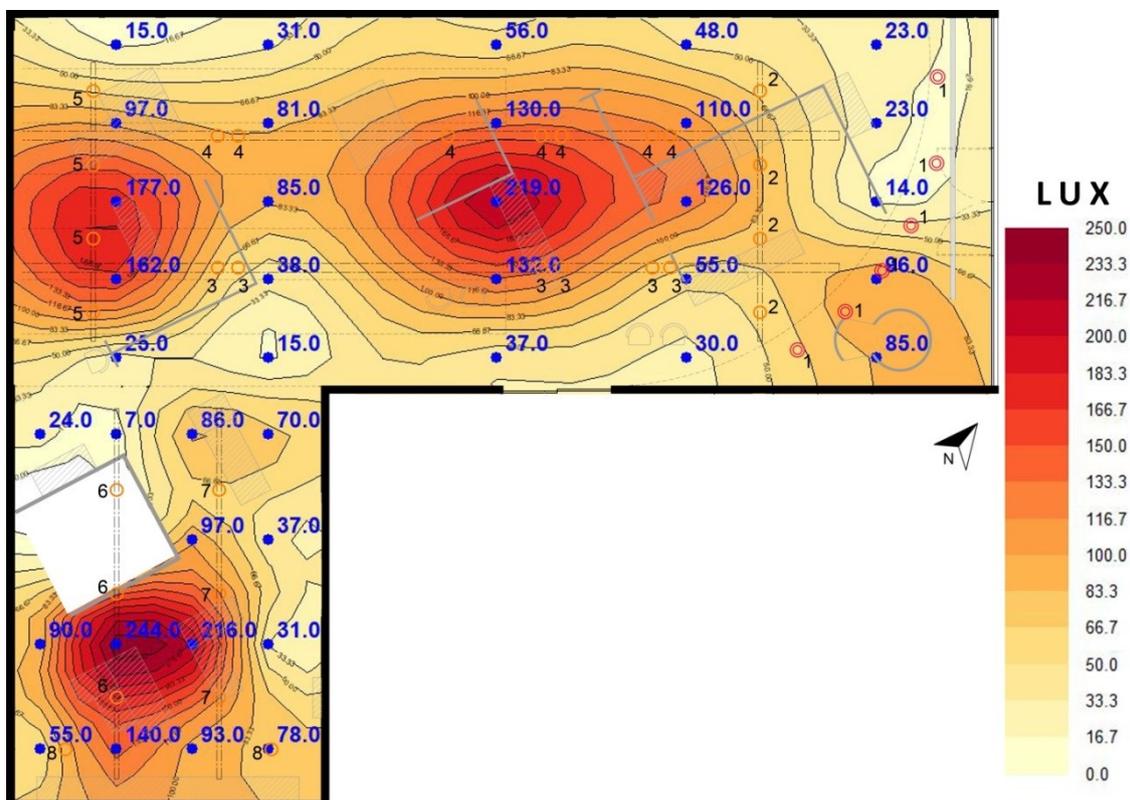
Figura 63 - Distribuição da proporção de radiação UV na luz artificial visível, medida na sala 19 (25/10/2021)



Fonte: da autora.

A distribuição da iluminância artificial no anexo pode ser observada na Figura 67.

Figura 64 - Distribuição de iluminância artificial, medida na sala de exposições do anexo (25/10/2021)



Fonte: da autora.

Desconsiderando o espaço dentro do cubo de exposição, as iluminâncias variaram de 15 a 250 lx, representando uma variação de 94%. Nota-se que a sala tem três pontos mais iluminados, correspondentes à porção central dos trilhos de iluminação no teto. A iluminância artificial média na sala do anexo, ponderada pela área dos quadrantes da malha da medição *in loco* foi de 76,8 lux.

A radiação UV na luz artificial nesta sala ficou abaixo da sensibilidade do sensor ELSEC 765.

5.2. Resultados da simulação computacional

Esse tópico apresenta os resultados das simulações no programa *Climate Studio*. Anteriormente às simulações estática e dinâmica foram realizadas análises de sensibilidade, com objetivo de verificar se o modelo de simulação estava respondendo coerentemente às alterações feitas no modelo. Em um primeiro cenário de verificação, as árvores foram retiradas do modelo, e em um segundo, as refletâncias internas das paredes das salas foram configuradas com valores 40% menores. O programa respondeu de maneira coerente aos dois cenários propostos, com o aumento das iluminâncias internas no primeiro cenário, e a diminuição no segundo.

Os resultados da simulação estática foram comparados aos da medição *in loco*, à guisa de validação. Posteriormente, por meio da simulação dinâmica, foram analisadas as métricas sDA (*Spatial Daylight Autonomy*) e ASE (*Annual Sunlight Exposure*). Para cada ponto da malha de medição *in loco* foi somada a iluminância média da luz natural (encontrada por meio da simulação dinâmica) e a iluminância média da luz artificial (medida *in loco*), possibilitando desenvolver um zoneamento das salas em estudo, de acordo com a sensibilidade do acervo a ser exposto, em concordância com os requisitos do relatório técnico CIE 157:2004.

5.2.1. Simulação estática

A simulação estática no programa *Climate Studio* teve como objetivo uma verificação da distribuição da iluminância natural simulada com os resultados da medição *in loco*. Foi selecionado o dia 10 de outubro do arquivo climático TMY, como descrito

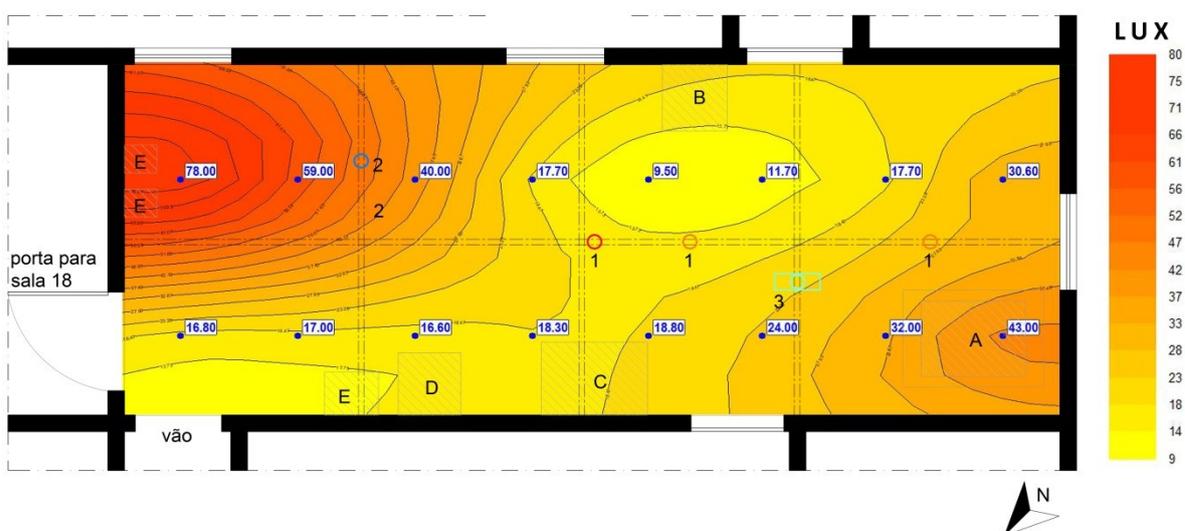
na metodologia, devido à semelhança em termos de disponibilidade de luz natural com o dia 25 de outubro de 2021, data das medições *in loco*.

Foram utilizadas no *Climate Studio* uma malha de 84 pontos para a sala 19, e outra malha de 632 pontos para a sala de exposições do anexo, baseado nas disposições da IES LM-83 (2012). Foi calculada a média das iluminâncias para compatibilização com as malhas criadas na medição *in loco*, e geração das curvas de iluminância no programa 3D Field (conforme descrito no item 4.4.5).

As Figuras 68 e 69 mostram os resultados da simulação para a sala 19 e sala de exposições do anexo, em forma de isocurvas de iluminância. A distribuição da iluminância natural na simulação estática mostrou-se compatível com os resultados da medição *in loco*, nas duas salas do estudo (Figuras 62 e 64). Na sala 19 a medição *in loco* registrou de 3 lx a 55 lx, e a simulação estática registrou de 10 lx a 78 lx. Já na sala de exposições do anexo a medição *in loco* registrou de 0,2 a 2 lx, e a simulação estática de 0,3 a 10 lx. As iluminâncias médias obtidas na simulação estática e medição *in loco* foram comparadas na

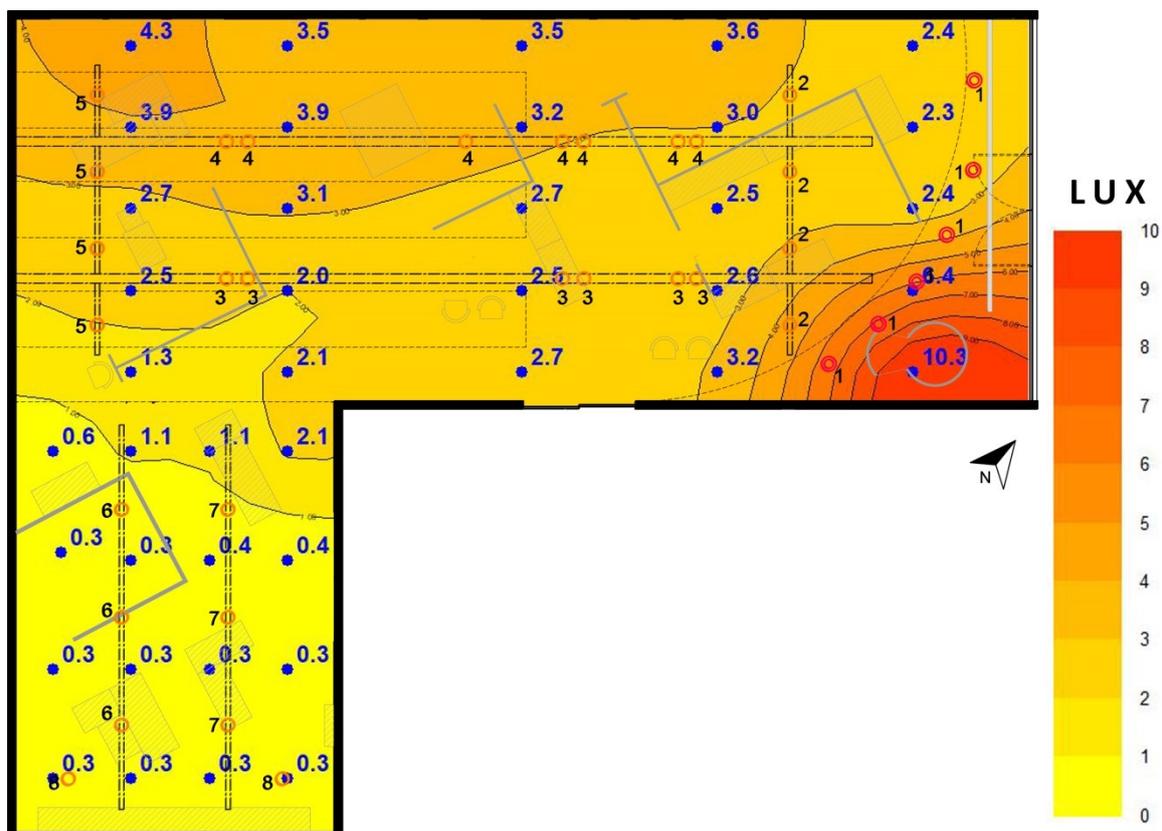
Tabela 9.

Figura 65 - Resultado da simulação estática – distribuição da iluminância natural para a sala 19 (valores médios para dia 8/10 do arquivo TMY)



Fonte: da autora.

Figura 66 - Resultado da simulação estática – distribuição da iluminância natural para a sala de exposições do anexo (valores médios para o dia 8/10 do arquivo TMY)



Fonte: da autora.

Tabela 9 - Tabela comparativa dos resultados da medição *in loco* e simulação estática

SALA	MÉDIA DA MEDIÇÃO (lux)	MÉDIA DA SIM. ESTÁTICA (lux)
SALA 18	34,8	39,5
SALA 19	12,6	24,9
ANEXO	0,5	2,5

Fonte: da autora.

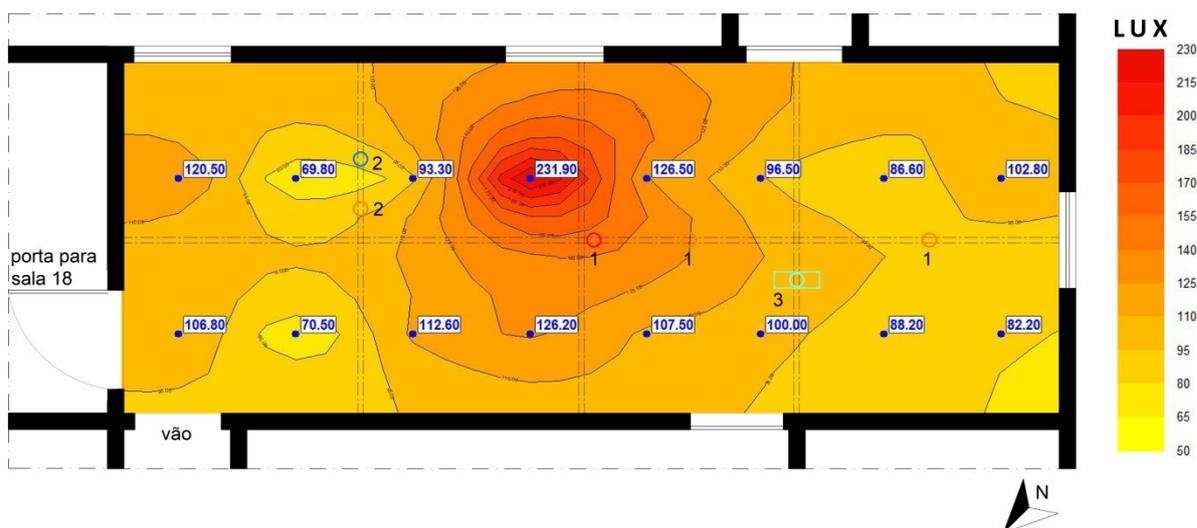
As diferenças nas médias podem estar relacionadas a aspectos da configuração e condições de contorno do modelo, como por exemplo, variações climáticas, nebulosidade do dia da medição quando comparada ao arquivo climático. As configurações de posição, tamanho e índice de transmitância das árvores também influenciam nos resultados da simulação, consideradas as simplificações adotadas no modelo, descritas no item 4.4.2. Cabe destacar que a distribuição da iluminância na simulação estática foi semelhante àquela registrada na medição *in loco*, nas três

salas estudadas, o que foi considerado adequado, para o prosseguimento do estudo.

5.2.2. Simulação dinâmica

Conforme descrito no item 4, para a realização desse estudo, foi considerado o período de ocupação de acordo com o horário de funcionamento do museu, de 11h às 18h. Conforme a média das iluminâncias no período do inverno (item 4.4.1) e os quadrantes compatibilizados com a malha de pontos da medição *in loco* (item 4.4.5), foi gerada a Figura 70, mostrando a distribuição da iluminância natural na sala 19. Os níveis foram maiores (232 lx) próximos à janela central da sala, e o nível mais baixo registrado foi de 70 lx.

Figura 67 - Distribuição da iluminância natural na sala 19, obtida por simulação dinâmica (inverno)



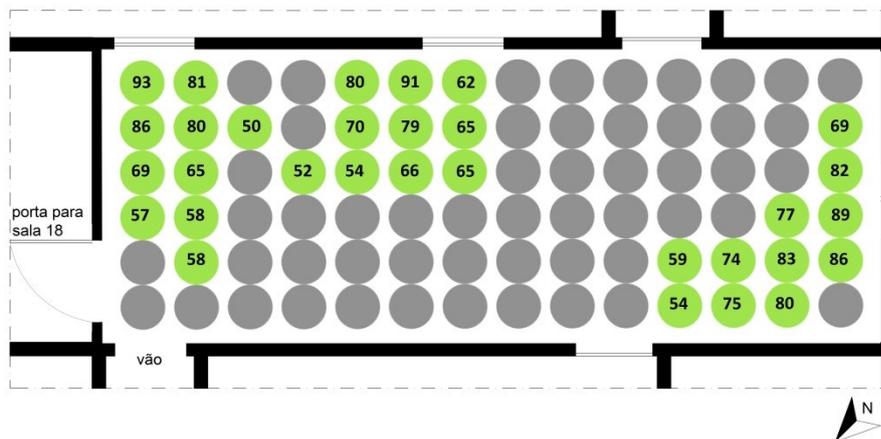
Fonte: da autora.

Em comparação ao relatório técnico CIE 157:2004, considerando apenas a componente natural, a sala estaria adequada a receber acervos de baixa a moderada sensibilidade à luz, uma vez que os níveis ficaram todos acima de 50 lx, porém, em sua maioria (93%), abaixo de 200 lx.

A Figura 71 mostra os resultados de sDA (*Spatial Daylight Autonomy*) para a sala 19, com a porcentagem de horas ao longo do ano em que a iluminância atinge 300 lx, durante o horário de ocupação.

Os resultados mostraram que 36,9% da sala apresentou sDA 300/50%, nos locais próximos às aberturas laterais. A sala apresentou ASE (*Annual Sunlight Exposure*) de 0%, ou seja, nenhum dos pontos recebeu mais de 1000lux em mais de 250h do ano.

Figura 68 - Simulação dinâmica da sala 19 - sDA



Fonte: da autora.

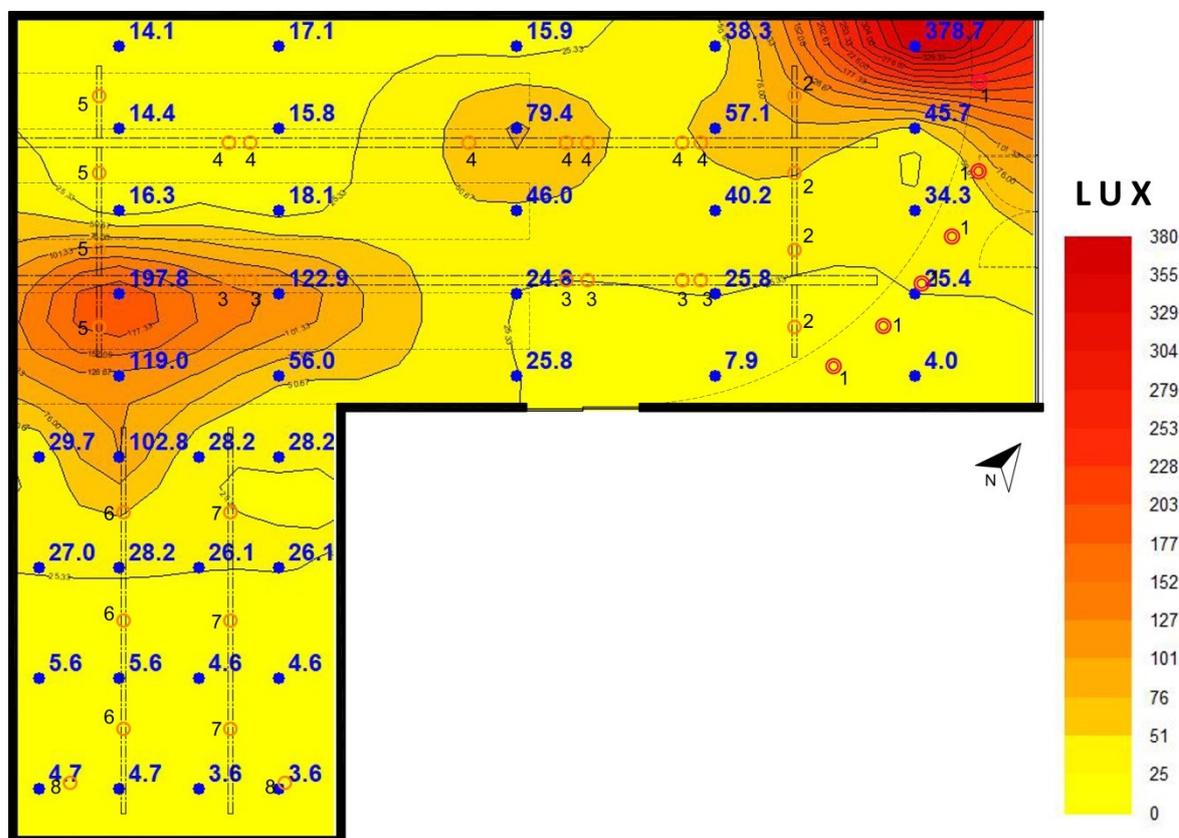
A Figura 72 mostra a distribuição da iluminância natural na sala de exposições do anexo. Para essa simulação não foi considerada no modelo a parede de gesso que bloqueia a grande porta de vidro frontal da sala, uma vez que esta faz parte da exposição Gráfico Grafia, e é temporária. As lonas brancas que bloqueiam parte da entrada de luz natural pelos sheds foram mantidas no modelo, uma vez que o objetivo era que a simulação estivesse de acordo com a realidade do museu.

A Figura 72 mostra que as zonas com maior iluminância na simulação estão próximas à porta de vidro (379 lx) e aos *sheds* (198 lx). Também foi identificado um ponto central na sala que recebeu uma média de 80 lx, próximo ao mezanino envidraçado e às entradas de luz pelos corredores do segundo e terceiro pavimentos (cobertos com claraboia translúcida). Essas zonas com níveis de iluminância acima de 200 lx poderiam receber acervos de baixa sensibilidade à luz, conforme o relatório técnico CIE 157:2005. Além disso, 80% da sala recebem menos que 50 lx de iluminação natural, podendo receber exposições dos acervos mais sensíveis (alta, média e baixa sensibilidade).

Por outro lado, o desempenho luminoso na sala ficou prejudicado, principalmente no fundo da sala de exposições, já que a sala apresentou sDA de 0% em todos os

pontos da malha. A métrica ASE também foi de 0%, significando que o risco de ofuscamento pela luz natural na sala é mínimo.

Figura 69 - Distribuição da iluminância natural na sala de exposições do anexo, obtida por simulação dinâmica (inverno)



Fonte: da autora.

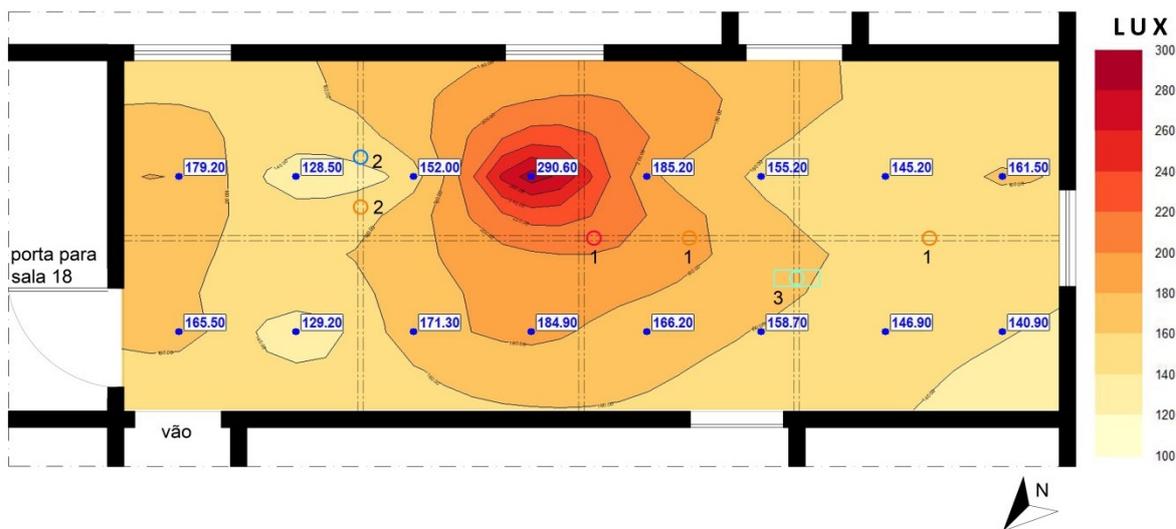
5.3. Zoneamento das salas estudadas e recomendações para exposição do acervo

As recomendações para a exposição do acervo foram feitas considerando o pior cenário, calculando-se a iluminância total, gerada pelas componentes natural e artificial – como somatório da iluminância artificial média medida *in loco* com a iluminância natural obtida por simulação dinâmica, no período do inverno, em cada ponto.

Com base na distribuição dessa iluminância total, foi proposto um zoneamento, que pode ser útil na tomada de decisão para exposição do acervo, na sala 19 do casarão, e na sala de exposições do anexo.

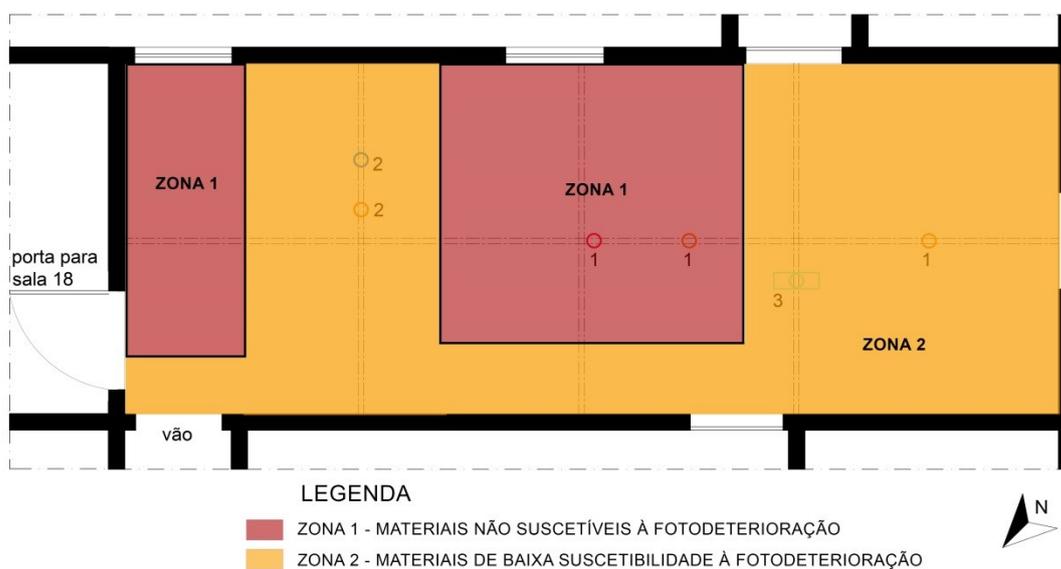
A Figura 73 mostra a distribuição das iluminâncias totais, para o período do inverno. Segundo os níveis recomendados pelo relatório técnico CIE 157:2004 é possível identificar áreas propícias para a exposição do acervo visando a conservação preventiva, de acordo com a sensibilidade dos materiais, gerando o zoneamento da Figura 74.

Figura 70 - Iluminâncias totais para o inverno para a sala 19 (componente natural simulada + média artificial medida)



Fonte: da autora.

Figura 71 - Zoneamento proposto para a sala 19, visando à conservação preventiva do acervo



Fonte: da autora.

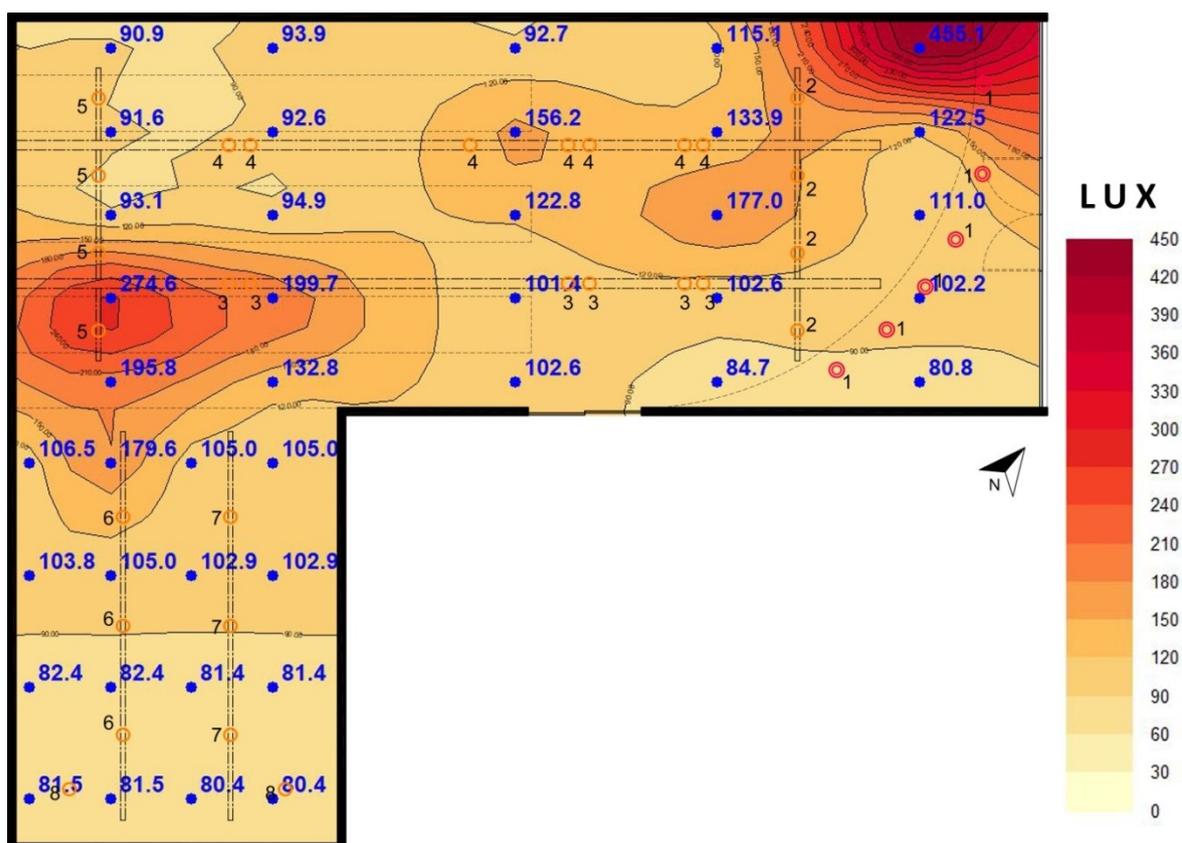
As iluminâncias na sala 19 ficaram entre 129lx e 291lx, sendo que 93% da área da sala apresenta iluminâncias até 200lx, recomendando-se, nessas áreas, a exposição

de acervos de baixa sensibilidade a luz. Nas áreas com iluminância acima de 200lx (7% da sala) é recomendada a exposição de materiais que não tem sensibilidade à luz.

Considerando o período de funcionamento do museu de quarta a domingo, das 11h às 18h, totalizam 1820h ao ano de exposição. A iluminância da luz natural média, simulada no Climate Studio, foi de 162,7 lx. E a iluminância média da luz artificial medida na sala 19 foi de 59 lx. Assim, a dose de exposição média anual na sala 19 foi calculada em 403.490 lx.h/a .

A Figura 75 mostra as iluminâncias totais obtidas para a sala de exposições do anexo, que variaram de 81 lx a 455 lx. A partir das curvas isolux geradas, foi possível propor o zoneamento da Figura 76.

Figura 72 - Iluminâncias totais para o inverno para sala de exposições do anexo

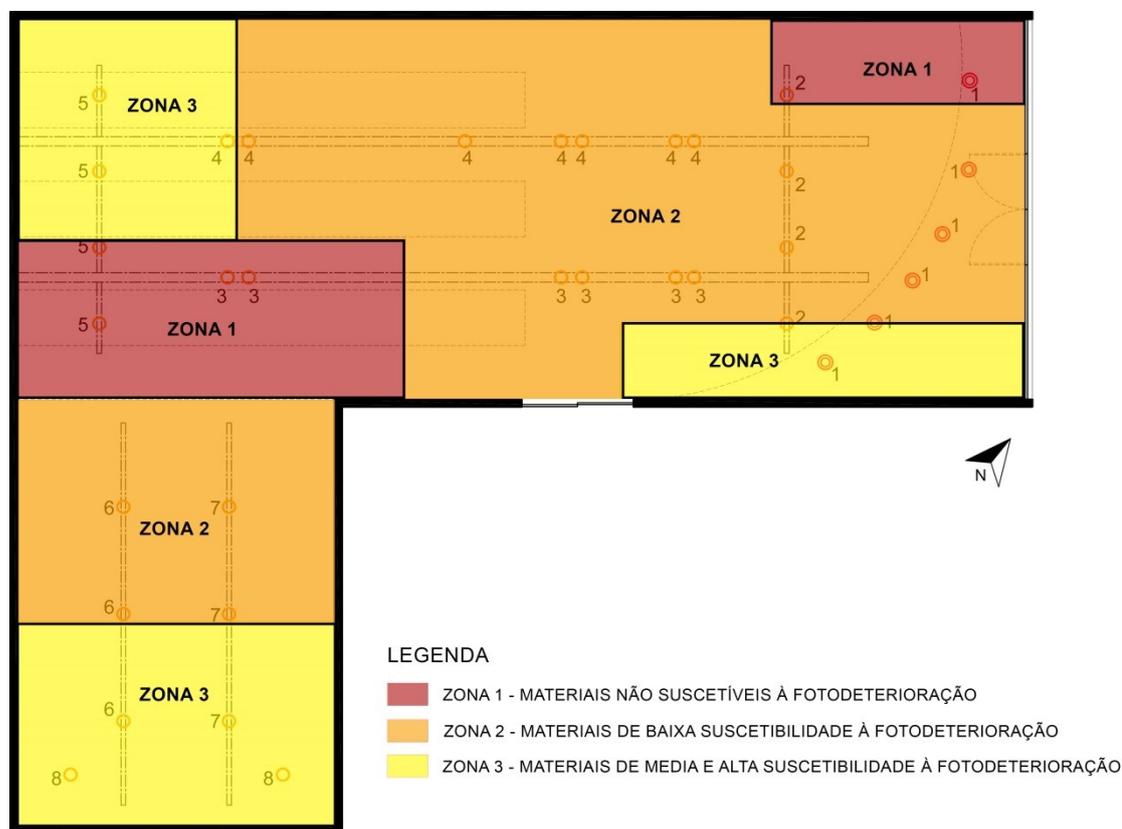


Fonte: da autora.

Segundo as recomendações do relatório CIE 157:2004, 95% da área da sala ficou abaixo dos 200lx, sendo recomendável nessas áreas a exposição de materiais de

baixa sensibilidade à luz. Os 5% restantes da área ficaram acima dos 200lx, sendo recomendados para materiais que não respondem à radiação.

Figura 73 - Zoneamento proposto para a sala de exposições do anexo, visando à conservação preventiva do acervo



Fonte: da autora.

O limite de iluminância da CIE 157:2004 para materiais de alta e média sensibilidade à luz é de 50lx, sendo portanto, ultrapassado nas salas estudadas. Foram, então, marcados no zoneamento as áreas com médias de iluminância entre 80 e 100 lux, que seriam as mais propícias para a exposição desses materiais mais sensíveis.

Entretanto, recomenda-se que os spots não sejam direcionados diretamente para tais acervos, e que este seja exposto por um período curto de tempo, evitando, assim, a sua deterioração. Para os acervos mais sensíveis é recomendada a exposição por tempo limitado, de forma que a dose anual de exposição seja controlada até 150.000lx.h/a.

A iluminância da luz natural média, simulada no Climate Studio, foi de 47,4 lx. E a iluminância média da luz artificial medida na sala do anexo foi de 76,8 lx. Assim, a dose de exposição média anual na sala de exposições do anexo foi calculada em 226.044 lx.h/a.

Segundo as doses médias de exposição, as recomendações de doses anuais de exposição da CIE 157:2004, e a sensibilidade dos materiais foi possível estimar o tempo máximo de exposição do acervo em cada sala, conforme apresentado na Tabela 10

Tabela 10 - Tempo de exposição recomendado em meses, de acordo com a dose de exposição média calculada em cada sala

SENSIBILIDADE DO MATERIAL	DOSE RECOMENDADA lx.h/a (CIE 157:2004)	TEMPO RECOMENDADO DE EXPOSIÇÃO (meses)	
		SALA 19	SALA DE EXPOSIÇÕES DO
BAIXA	200.000	6,5	11,5
MÉDIA	150.000	4,8	8,6
ALTA	15.000	0,5	1,0

Fonte: da autora.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado alertou sobre a importância da luz natural nos ambientes de exposição, tornando-os mais atrativos e dinâmicos para os visitantes, além de propiciar alta fidelidade de reprodução de cores, o que a torna adequada para a apreciação das obras. Em combinação com um sistema de iluminação artificial planejado e eficiente, o projeto de iluminação natural se torna um importante recurso de valorização da arquitetura existente. Já o estudo da luz artificial nos museus é uma área relevante para a Ciência da Conservação, e se mostrou avançado principalmente na Europa e Estados Unidos, possibilitando diversas estratégias para controle, uniformidade e direcionamento da luz, de forma a valorizar, expor e conservar as coleções. Entretanto, o tema ainda conta com poucas pesquisas publicadas no Brasil.

A partir da metodologia aplicada nesta pesquisa foi possível entender como condicionantes arquitetônicas, tais como posição, tamanho, tipo, material e orientação das aberturas, influenciam na disponibilidade de iluminação natural nas salas onde foram realizadas as medições e simulações. Além disso, foi avaliada a distribuição da iluminância natural e artificial nas salas do estudo de caso, e proposto um zoneamento das mesmas, em relação aos requisitos de conservação preventiva dos acervos, de acordo com o relatório CIE 157:2004.

Os programas de simulação computacional são ferramentas úteis para estudar o efeito combinado de diversas variáveis da iluminação, de orientação, segurança, conforto humano e conservação preventiva, para o desenvolvimento de projetos que trabalham com a integração da iluminação natural e artificial nos museus, de forma mais sustentável e eficiente. A iluminação nos espaços expositivos pode e deve ser trabalhada desde o início dos projetos de arquitetura e iluminação, para utilizar a luz natural, indireta e ou difusa, filtrada e controlada com soluções inteligentes e duráveis, complementada com luz artificial.

Foram encontradas algumas limitações na realização deste estudo. A principal limitação foram as condições de reclusão impostas pela pandemia de COVID-19, que foram obstáculo para o desenvolvimento da metodologia, já que o museu permaneceu fechado por vários meses em que a pesquisa transcorreu. O tempo e

extensão da pesquisa limitaram o estudo a duas salas do museu, bem como as simulações, que foram realizadas apenas para iluminação natural. Esse estudo foi focado nos níveis de iluminância e doses de exposição, não avaliando, por exemplo, os impactos do ofuscamento nas salas estudadas.

Além disso, deve-se observar que as características do entorno são variáveis, interferindo tanto em termos de disponibilidade de luz quanto em termos das simplificações feitas no modelo, como é o caso das obstruções vegetais. Apesar das principais árvores terem sido representadas, não é possível determinar com precisão qual é a incerteza da simulação em função das mesmas, uma vez que as transmitâncias podem variar com a sazonalidade (caso haja árvores caducifólias, por exemplo).

Durante o desenvolvimento da pesquisa, foram calculadas médias de iluminância ao longo do período do inverno, e também médias de iluminância por área (nas salas estudadas), que provocaram variações estatísticas nos níveis de iluminância encontrados e, conseqüentemente, nas doses de exposição. Ainda assim, os resultados encontrados mostraram a validade e aplicabilidade da metodologia proposta.

Com relação à conservação preventiva e conforto luminoso, a iluminância de 300 lx, requisito da norma ISO/CIE 8995-1 (2013), é um valor adequado apenas para materiais que não se mostram sensíveis à luz, conforme o relatório CIE 157:2004. Por outro lado, com iluminâncias menores que 300 lx (de 50 a 100 lx, por exemplo) o olho humano pode alcançar uma boa distinção de cores, se houver o tempo suficiente para uma adaptação.

Assim, para atender simultaneamente os requisitos de conforto luminoso e de conservação preventiva, os espaços dos museus precisam dar oportunidade ao olho humano para se ajustar níveis mais baixos de iluminância. Para isso, a expografia pode considerar um percurso em que as iluminâncias vão diminuindo gradativamente, para que o olho possa se adaptar ao longo do caminho. Mesmo nos museus em edificações adaptadas para esse uso, ou edificações tombadas, como é o caso do Museu Abílio Barreto, um novo projeto de iluminação pode ser eficiente e flexível, de forma que as instituições possam manter seu bom funcionamento em

longo prazo (BALOCCO; PAGANINI; MARMONTI, 2016). Assim, apesar de, à primeira vista, as estratégias de iluminação para conforto luminoso e para conservação preventiva das coleções parecerem opostas, elas podem ser complementares, alcançando-se os dois objetivos ao mesmo tempo, atendendo aos requisitos normativos.

Por fim, este estudo abre oportunidades para que novos estudos sejam realizados sobre a iluminação para conservação preventiva de coleções, por meio da aplicação e aprimoramento da metodologia apresentada em outros museus do Brasil. Outro tema a ser discutido em trabalhos futuros são as novas tecnologias de iluminação artificial como, por exemplo, a fibra ótica, e a aplicação de películas e filtros para melhor aproveitamento da luz natural em salas de exposição, minimizando os efeitos de deterioração da luz, e principalmente das radiações UV e IV.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15.215** – Iluminação natural –Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 5413** – Iluminância de interiores. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR ISO/CIE 8995-1** - Iluminação de ambientes de trabalho. Rio de Janeiro, 2013. ACE, Architects' Council of Europe. Leeuwarden Declaration. Leeuwarden, 2018 [não paginado]. Disponível em: <https://www.ace-cae.eu/activities/events/2018/built-heritage-conference/>. Acesso em 30: set. 2020.

AJMAT, R. *et al.* Lighting design in museums: exhibition vs. preservation. In: BREBBIA, C. A.; BINDA, L. (Ed.). **Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XXII**. Southampton: WITpress, 2011. p. 195-206.

AL-SALLAL, Khaled A; ABOUELHAMD, Amira R.; DALMOUK, Maitha Bin. Daylighting performance in UAE traditional buildings used as museums. In: **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 13, n. 2, p. 116–121, 2020.

ALVAREZ, A. C. A. Procedimentos para análise e avaliação de iluminação em ambientes escolares. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6., 1995, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 1995. p. 587 a 592.

ARQUIVO NACIONAL DO BRASIL. **Museu Histórico Abílio Barreto, Belo Horizonte (MG), sem data**. Brasília, DF, 14 ago. 2020. Flickr: arquivonacionalbrasil. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/arquivonacionalbrasil/50224421082>. Acesso em: 07 abr. 2021.

AUTODESK. **Insight**. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/insight/overview>. Acesso em: 05 abr. 2021.

BAKER, Nick V.; FANCHIOTTI, Aldo; STEEMERS, Koen. **Daylighting in architecture: a European reference book**. Abingdon: Routledge, 2013.

BALOCCO, Carla; PAGANINI, Dario; MARMONTI, Enrico. Assessment of the luminous climate inside Historical Buildings. Experimental measurements and lighting simulation of the Hall of five hundred in Florence. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING, 16., 2016, Florença. **Anais** [...]. Nova Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2016. p. 1-6.

BALOCCO, Carla; CECCHI, Martina; VOLANTE, Giulia. Natural Lighting for Sustainability of Cultural Heritage Refurbishment. **Sustainability**, v. 11, n. 18, p. 4842-4859, 2019.

BELO HORIZONTE OCCASIONAL PHOTO. [sem título]. [20-?]. Portal da internet. Disponível em: belohorizontedailyphoto.wordpress.com. Acesso em: 04 abr. 2021.

BRAGA, Luis. Retumbante natureza humanizada. Museu do Estado do Pará. 2020. Disponível em: <http://imagemfix.blogspot.com/2016/10/belem-para-retumbante-natureza.html>. Acesso em: 10 jan. 2021.

CAMACHO, Clara (Coord.). **Plano de Conservação Preventiva** – Bases orientadoras, normas e procedimentos, Temas de Museologia. Instituto dos Museus e da Conservação - IMC, Lisboa, 2007, p. 98.

CASSARES, Norma Ciafone; PETRELLA, Yara Ligia Mello Moreira. Influência da radiação de luz sobre acervos museológicos. **Anais do Museu Paulista**, São Paulo, v. 8-9, p. 177-192, 2003.

CAVALERI, M. P. M.; CUNHA, G. R. M.; GONÇALVES, J. C. S. Iluminação natural em edifícios de escritórios: avaliação dinâmica de desempenho para São Paulo. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**. Campinas, v. 9, n. 1, p. 19-34, mar. 2018.

CCAHA. Conservation Center for Art and Historical Artefacts. **Light exposure for artifacts in exhibition**. Philadelphia, Pennsylvania. 4p. 2020. Disponível em: https://ccaaha.org/sites/default/files/attachments/2020-06/2020_Light%20Exposure%20for%20Artifacts%20on%20Exhibition_HH.pdf. Acesso em: 22 abr. 2021.

CCI. Canadian Conservation Institute. **Led Lighting in Museums** – Technical Bulletin, 36. 2020. Disponível em: <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/conservation-preservation-publications/technical-bulletins/led-lighting-museums.html>. Acesso em: 15 out. 2021.

GHINITOIU, Laurian *apud* CHATTEL, Marie. Museu Guggenheim de Nova Iorque pelas lentes de Laurian Ghinitoiu. **ArchDaily**, 11 jun. 2016. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/789219/museu-guggenheim-de-nova-iorque-pelas-lentes-de-laurian-ghinitoiu?ad_medium=gallery. Acesso em: 10 out. 2020.

CIE. Commission Internationale de L'Éclairage. **CIE 157:2004**: Control of damage to museum objects by optical radiation, Austria, 2004.

CIE. Commission Internationale de L'Éclairage. **ISO/CIE 8995-1**: Lighting of Workplaces Part 1: Indoor. Disponível em: <https://cie.co.at/publications/lighting-workplaces-part-1-indoor>. Acesso em ago. 2021.

DANG, Rui; LIU, Rui; LUO, Tao. Lighting quantity indexes for lighting paintings in museums. **Building and Environment**, v. 182, p. 107142, 2020.

DIAS, Alice Rück Drummond. **Análise do impacto do sombreamento vegetal no conforto termo-luminoso em edificações no clima quente e úmido**. 2016. 280 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

DIAS, Alice Rück Drummond; PEDRINI, Aldomar. Análise de diferentes configurações de copa vegetal visando otimização da obstrução solar em ambientes de clima tropical. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., 2017, Balneário Camboriú. **Anais [...]**. Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 2017. p. 1074-1083.

- DIDONE, E. L.; PEREIRA, F. O. R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. **Ambiente construído** (Online), Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 139-154, dez. 2010
- DOUMAS, Dimitrios. The culture of exhibitions and conservation. **E-Conservation Journal**, [s.l.], v. 1, 2013, p.34-45. Disponível em: <http://e-conservation.org/issue-1/17-the-culture-of-exhibitions-and-conservation>. Acesso em: 24 out. 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2021**: ano base 2020. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: www.epe.gov.br. Acesso em: out. 2021.
- ERCO. Luz para museos: conceptos, aplicaciones, técnica. **Tune the Light**, Lüdenscheid, n. 12, 11p. 2012. Disponível em: www.erco.com. Acesso em: 10 mar. 2020.
- FATHY, Fatma *et al.* Conceptual framework for daylighting and facade design in museums and exhibition spaces. **Solar Energy**, v. 204, p. 673-682, 2020.
- FERREIRA, Norberto Tavares. Iluminando Museus de História Natural: o uso de tecnologia na iluminação e conservação de seus acervos. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL MUSEOGRAFIA E ARQUITETURA DE MUSEUS, MUSEOLOGIA E PATRIMÔNIO, 4., 2014, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Programa de Pós Graduação em arquitetura da UFRJ, 2014.
- FERREIRA, Leonardo Gonçalves. O presente e o passado no Museu histórico Abílio Barreto (Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil). **Ponto Urbe**. Revista do núcleo de antropologia urbana da USP, n. 23, 2018.
- FURTADO, Adma Elias. **Simulação e análise da utilização de vegetação como anteparo às radiações solares em uma edificação**. 1994. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994 *apud* DIAS (2016).
- FURUYAMA, C.M.S. **Eficiência em Tecnologias de Iluminação Artificial**: o LED e a tecnologia fluorescente. 252 f. 2019. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) — Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2019.
- GUIDI, Cláudia Rocha; ABRAHÃO, Karla Cristina de Freitas Jorge; VELOSO, Ana Carolina Oliveira; SOUZA Roberta Vieira Gonçalves de. Influência dos parâmetros urbanísticos e da topografia na admissão da luz natural em edifícios residenciais. **Ambiente Construído** [online]. 2018, v. 18, n. 3, p. 49-66. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000300267>. Acesso em: 26. nov. 2021.
- GUERDÁN, Marta *et al.* Abílio Barreto. **MACH Arquitetos**. Belo Horizonte, 2003. Disponível em: <https://www.mach.arq.br/2003-abilio-barreto/>. Acesso em: 05 abr. 2021.
- GUERRA, Isabela Tavares. Belo Horizonte, Minas Gerais, 9-10 abr. 2021. Entrevista concedida a Marília Tanure Caram Pereira.

HASSANIZADEH, Negar; NOORZAI, Esmatullah; MOHSENI, AbdolReza. Identification of effective criteria to improve lighting quality in existing art museums. **Journal of Facilities Management**, v. 18, n. 2, p.131-158, 2020.

HEFFERAN, Steven. Working with daylight in the museum environment. **WAAC Newsletter**. Colorado, United States. v. 30, n. 1, 2008.

HOMEM, Paula Menino. Ferramentas inovadoras para monitorização ambiental e avaliação de danos para objectos em museus, palácios, arquivos e bibliotecas: a exposição luminosa e os dosímetros LightCheck. **Revista da Faculdade de Letras da Universidade do Porto** (Ciências e Técnicas do património). Porto, v. 5, p. 225-240, 2006.

HOYO-MELÉNDEZ, Julio M. del; MECKLENBURG, Marion F.; DOMÉNECH, María Teresa Carbó. An evaluation of daylight distribution as an initial preventive conservation measure at two Smithsonian Institution Museums, Washington DC, USA. **Journal of cultural heritage**, v. 12, n. 1, p. 54-64, 2011.

HURLBERT, Anya; CUTTLE, Christopher. New museum lighting for people and paintings. **LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society**, UK. v. 16, n. 1, p. 1-5, nov. 2020.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Museus. **Museus em números**. Brasília, DF: IBRAM, 2011.

_____. Guia para projetos arquitetônicos de museus. Brasília, DF: IBRAM, 2020.

ICCROM. International Centre for the study of the Preservation and Restoration of Cultural Property. **Museum lighting: a guide for conservators and curators**. [on-line] Disponível em: <https://www.iccrom.org/fr/node/2177>. Acesso em: 07 abr. 2021.

ICOM-CC. International Council of Museums. Resolution adopted to the ICOM-CC membership. Terminology to characterise the conservation of tangible cultural heritage. In: TRIENNIAL CONFERENCE, 15., 2008, Nova Délhi. **Resolution** [...]. International Committee for Conservation, 22–26 set. 2008. Disponível em: ICOM-CC Resolution on Terminology English.pdf. Acesso em: 16 mar. 2021.

_____. **Código de ética do ICOM para museus**. 2009. Disponível em: http://icom.org.br/wp-content/themes/colorwaytheme/pdfs/codigo%20de%20etica/codigo_de_etica_lusofo_no_iii_2009.pdf. Acesso em: 02 nov. 2020.

IESNA. Illuminating Engineering Society of North America. **IES LM 83- 12: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)**. New York, 2012.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. [não paginado]. Disponível em: https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1961-1990/precipitacao_acumulada_mensal_anual. Acesso em nov. 2021.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 105-B08 – 1995. Textiles - Tests for colour fastness**. 1995.

JOHNSON, Jessica S. **NPS Museum Handbook**. Washington, DC: National Park Service, 1999. Part I. Chapter 4: Museum Collections Environment.

JUNQUEIRA, Mariana Garcia; YUNES, Gilberto Sarkis. A iluminação artificial como instrumento da expografia das cidades e dos museus. **Revista Memória em Rede**, Pelotas, v.4, n. 11, p. 1-18, 2014.

KALACHE, Nadya *et al.* Análise comparativa de sistemas de iluminação-viabilidade econômica da aplicação de LED. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 33., 2013, Salvador. **Anais [...]**. [S.]: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2013.

KEENE, Suzanne; STEVENSON, Alice; MONTI, Francesca. **Collections for people: museums' stored collections as a public resource**. UCL institute of Archeology: London, 2008.

KIM, C.; SEO, K. Integrated daylighting simulation into the architectural design process for museums. **Building Simulation**, v. 5, p. 325–336, maio 2012. Disponível em: <https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12273-012-0084-5>. Acesso em: 05 abr. 2021.

KOWALTOWSKY, D. C. C. K *et al.* Melhoria do conforto ambiental e edificações escolares na região de Campinas. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5.; ENCONTRO LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2., 1999, Fortaleza. **Anais [...]**. Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 1999.

LABEEE. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos Climáticos em Formato TRY, SWERA, CSV e BIN**, 2022. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>. Acesso em: 26 nov. 2021.

LAM, William M. C.; RIPMAN, Christopher Hugh. **Perception and lighting as formgivers for architecture**. New York: McGraw-Hill, 1977.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na Arquitetura**. 3. ed. Florianópolis: ELETROBRAS/PROCEL, 2014.

LARSON, G. W.; SHAKESPEARE, R. Rendering with Radiance. **Morga Kaufmann and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 905-913, 2006.

LARSEN, Nathália; MAFRA, Michele; SANTOS, Ramon Vieira. Desenhar a memória, comunicar a história: concepções de práticas museográficas em exposições temporárias no Museu Histórico Abílio Barreto. **Revista Arqumuseus**, 2012.

LECHNER, Norbert. Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2015. 702 p.

LICHT, Fördergemeinschaft Gutes. Good Lighting for Museums, Galleries and Exhibitions v. 18, 2000.

MhAB - Museu Histórico Abílio Barreto. **Imagens do acervo do museu**. Destinatário: Marília Tanure Caram Pereira. Belo Horizonte, 13 abr. 2021. 3 mensagens eletrônicas.

MICHALSKI, Stefan. **Luz visible, radiación Ultravioleta e Infrarroja**. Canadian Conservation Institute, Ottawa, 2009.

MIER, Rita; SCARAZZATO, Paulo. Iluminação artificial em museus: O diálogo da luz com os espaços preambulares e expositivos. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL MUSEOGRAFIA E ARQUITETURA DE MUSEUS, 4., 2014, Rio de Janeiro, Madrid, Lisboa. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Arquitetura de Museus – Grupo de Estudos, 2014.

MISTRICK, R. G. **Desktop Radiance Overview**. Pacific Gas & Electric, The Pennsylvania State University, USA, 2000.

MORAES, Odair de; SCARAZZATO, Paulo Sergio. Iluminação natural no meio urbano: estudo de caso com o método dos indicadores de altura admissíveis aplicado a Campinas, SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 2003, Curitiba. **Anais [...]**. Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2003.

MhAB. Museu Histórico Abílio Barreto. **MhAB: 60 Anos de História** – Caderno 1. Belo Horizonte. Organização Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. 2003a. 43 p.

MhAB. Museu Histórico Abílio Barreto. **MhAB: 60 Anos de História** – Caderno 2. Belo Horizonte. Organização Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. 2003b. 50 p.

MnBA. Museu Nacional de Belas Artes – Fotografia. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <https://mnba.gov.br/portal/colecoes/fotografia>. Acesso em: 22 jan. 2021.

OLIVEIRA, Fernanda; STEEMERS, Koen. 210: Daylighting Museums—a survey on the behaviour and satisfaction of visitors. In: Conference on Passive and Low Energy Architecture, 25., 2008, Genebra. **Anais [...]**. [s.l.] Passive and Low Energy Architecture. 2008.

PBH. PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE: Exposição virtual propicia ao público um passeio pela história de BH. **Portal da PBH**, Belo Horizonte, 26 jan. 2021. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/noticias/exposicao-virtual-propicia-ao-publico-um-passeio-pela-historia-de-bh>. Acesso em: 24 out. 2021.

_____. Gravura como forma de imagem é tema de aula no Pampulha Territórios e Museus. **Portal da PBH**, Belo Horizonte, 28 jun. 2021 Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/noticias/gravura-como-forma-de-imagem-e-tema-de-aula-no-pampulha-territorios-e-museus>. Acesso em: 24 out. 2021.

PESSOA, J. L. N; GHISI, E; LAMBERTS, R. Estado da arte em eficiência energética: iluminação e envoltória. **Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013. Disponível em: www.cb3e.ufsc.br. Acesso em: 21 out. 2019.

PIMENTEL, Thaís Velloso Cougo (Org.). **Reinventando o MHAB: o museu e seu novo lugar na cidade – 1993-2003**. Belo Horizonte: Museu Histórico Abílio Barreto, 2004.

PINILLA, S.M. *et al.* Advanced daylighting evaluation applied to cultural heritage buildings and museums: application to the cloister of Santa Maria El Paular. **Renewable Energy**, v. 85, p.1362–1370. 2016

PORTAL BELO HORIZONTE. [SEM TÍTULO], [20-?] Portal Belo Horizonte. Disponível em: <http://portalbelohorizonte.com.br/>. Acesso em: 04 abr. 2021.

POULIOS, Ioannis. Discussing strategy in heritage conservation: Living heritage approaches an example of strategic innovation. **Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development**, v. 4, n. 1, p. 16-34, 2014.

PROCEL Info. **Centro brasileiro de Informação de Eficiência Energética**. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID=%7B82BBD82C-FB89-48CA-98A9-620D5F9DBD04%7D>. Acesso em: 23 nov. 2021.

REINHART, C. F. **Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design**. Ottawa: Institute for research in Construction National Research Council Canada, 2006.

REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. **LEUKOS**, v. 3, n. 1, p. 7-31, 2006.

REINHART, C. F.; WIENOLD, J. The Daylighting Dashboard: a simulation-based design analysis for daylight spaces. **Building and Environment**, v. 46, n. 2, p. 386-396, 2011a.

REINHART, C.; MORRISON, M. The lightswitch wizard – reliable daylight simulations for initial design investigation. In: BUILDING SIMULATION – INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 8., 2003, Eindhoven. **Anais [...]**. [s.l]: International Building Performance Simulation Association, 2003. p. 1093-1100.

REINHART, C.F. *et al.* 2011b. DIVA for Rhino Version 2.0. Disponível em: <http://www.diva-for-rhino.com/>. Acesso em: 5 abr. 2021.

RENNE, Monique. Museu Histórico Abílio Barreto. [20--]. Portal Melhores Destinos. [não paginado]. Disponível em: <https://guia.melhoresdestinos.com.br/museu-historico-abilio-barreto-203-5725-l.html>. Acesso em: 04 mar. 2021.

RHINO3d. Features. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/features/>. Acesso em: 4 nov. 2021.

RIEGL, Alois. The modern cult of monuments: its essence and development. **Oppositions**, Nova York, n. 25, p. 20-51, 1966.

SANTOS, A. Pereira dos; FELICI, E. M.; SANTOS, V. R. dos; Proposta de diminuição do consumo de energia elétrica e redução dos impactos ambientais através da análise de viabilidade de substituição de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas led em um supermercado. **Colloquium Exactarum**, Presidente Prudente, V. 12, n. 1, p. 62-72, jun. 2020.

SHELLER, Camila. *et al.* **Análise de Arquivos Climáticos Para a Simulação do Desempenho Energético de Edificações** Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. 2015. Relatório técnico.

SOLEMMA. Climate Studio. Disponível em: <https://www.solemma.com/climatestudio>. Acesso em: 5 abr. 2021.

SOUSA, Gustavo C. P; DUARTE, Raimundo N. C. Radiação Térmica em Superfícies Seletivas. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA MECÂNICA CAMPINA GRANDE, 1., 2017, Paraíba. **Anais [...]**. Campina Grande: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFCG, 2017. p. 13-14.

STEANE, M. A. **The architecture of light**: Recent approaches to designing with natural light. Oxfordshire: Routledge, 2011.

SZOKOLAY, Steven V. **Introduction to architectural science**: the basis of sustainable design. 3 ed. Londres: Routledge, 2014.

USGBC – Unites States Green Building Council —. Disponível em: <https://new.usgbc.org>. Acesso em: 3 mar. 2021.

VIANNA, Nelson Solano. Iluminação de museus: critérios para o uso da luz natural e artificial. **Revista Lume**. n. 39, p. 32-42, ago/set, 2009.

WILSON, Mike. Lighting in museums: Lighting interventions during the European demonstration project 'Energy efficiency and sustainability in retrofitted and new museum buildings' (NNES-1999-20). **International Journal of Sustainable Energy**, v.25, n. 3-4, p.153–169, 2006.

ZUMTOBEL. **The Lighting Handbook**. 6 ed. Dornbirn: Zumtobel Lighting GmbH, 2018. 244p. Disponível em: <https://www.zumtobel.com/PDB/teaser/EN/lichthandbuch.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2021.