

# **UM ESTUDO PARA A FORMA E A LUZ NOS PÁTIOS - TIPIIFICAÇÃO**

Tarso de Oliveira Hoffmeister, Arq.

Dissertação apresentada ao Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Arquitetura.

Orientador: Heitor da Costa Silva, Arq. Ph.D.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS  
FACULDADE DE ARQUITETURA  
DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA  
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA - PROPAR  
2020**

#### CIP - Catalogação na Publicação

Hoffmeister, Tarso de Oliveira  
Um Estudo para a Forma e a Luz nos Pátios -  
Tipificação / Tarso de Oliveira Hoffmeister. -- 2021.  
80 f.  
Orientador: Heitor da Costa Silva.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Faculdade de Arquitetura, Programa  
de Pós-Graduação em Arquitetura, Porto Alegre, BR-RS,  
2021.

1. Pátio. 2. Radiação Solar. 3. Superfícies  
refletoras. 4. Geometria solar. 5. Tipificação. I.  
Silva, Heitor da Costa, orient. II. Título.

# AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Heitor da Costa Silva pela generosidade em compartilhar o conhecimento, mas também por me mostrar o valor do rigor e da clareza na escrita acadêmica;

Ao professor Arno Krenzinger, pela recepção, conversas e fundamental auxílio durante a execução de experimentações no LABSOL da UFRGS;

Ao Humberto Alejandro Rolon Ortiz, pelo indispensável apoio técnico durante as experimentações no LABSOL ;

À Rosita Borges dos Santos, pelo profissionalismo, presteza e apoio no decorrer da jornada;

Aos meus colegas e amigos, por ensinamentos e suporte, em conversas rápidas ou demoradas, ao longo desta pesquisa;

Ao Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade de estudar a Arquitetura;

À Roberta, pelo apoio, pela ajuda e pela paciência;

Aos meus pais, por tudo.

# RESUMO

O pátio, ou a sua caracterização, resulta de norma de confronto, avaliação e escolha. A arquitetura elege um conceito, por tipificação, para o planejamento e o projeto dos espaços construídos para as atividades humanas, segundo um programa de necessidades e uma intenção de solução artística, técnica e da materialidade das superfícies refletoras da luz do Sol. Assim, esse trabalho toma por ímpeto experimental a investigação da caracterização física e da luz em decurso da radiação solar sobre as superfícies refletoras, que envolvem os lugares chamados pátios. Para tanto, estudos paramétricos são apresentados por modelos com sistemas analíticos de radiação. Os cenários investigados são representados por modelos físico e digital, onde medições são feitas com critérios limitados de experimentação para o confronto de resultados, com vistas ao entendimento numérico do comportamento de alterações na orientação e geometria das diferentes superfícies envolventes dos pátios. Os resultados apresentados denotam peculiaridades que permitem concluir que os edifícios com pátios têm recursos de iluminação e sombreamento, cujas variantes de desenho oferecem alternativas de condicionamento para as superfícies envolventes de um pátio. Entretanto, essas alternativas estão diretamente atreladas às peculiaridades materiais, de ordem do programa de necessidades, e, fundamentalmente da geometria solar, ou do percurso do sol no hemisfério celeste.

**Palavras-chave:** pátio, tipificação, radiação solar, superfícies refletoras, geometria solar

## ABSTRACT

The courtyard, or its characterization, results from the norm of confrontation, evaluation and choice. Architecture chooses a concept, by typification, for the planning and design of spaces built for human activities, according to a program of needs and an intention for an artistic, technical and material solution of the reflecting surfaces of sunlight. Thus, this work takes as an experimental impetus the investigation of the physical characterization and the light in the course of solar radiation on the reflecting surfaces, which involve the places called courtyard. For that, parametric studies are presented by models with radiation analytical systems. The investigated scenarios are represented by physical and computer models, where measurements are made with limited experimentation criteria for the comparison of results, with a view to the numerical understanding of the behavior of changes in the orientation and geometry of the different surrounding surfaces of the yards. The results presented show peculiarities that allow us to conclude that the buildings with courtyards have lighting and shading resources, whose design variants offer conditioning alternatives for the surrounding surfaces of a courtyard. However, these alternatives are directly linked to material peculiarities, in the order of the needs program, and, fundamentally, to the solar geometry, or the path of the sun over the celestial cap.

**Keywords:** courtyard, typification, solar radiation, reflecting surfaces, solar geometry

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Tipo pátio.....	18
<b>Figura 2</b> - Variantes para o “ <i>tipo pátio</i> ” .....	19
<b>Figura 3</b> - Tipificação do pátio.....	21
<b>Figura 4</b> - Radiação solar sobre superfícies. Casa de Cultura Mário Quintana, Porto Alegre, 1916-33.....	22
<b>Figura 5</b> - Espectro da radiação solar.....	22
<b>Figura 6</b> - Irradiância global diária em função da orientação na condição de céu claro (latitude 42°N).....	24
<b>Figura 7</b> - Irradiância sobre superfícies verticais em 21 de dezembro e 21 de junho (latitude 32°S).....	24
<b>Figura 8</b> - Céu visível a partir de uma superfície vertical livre de obstruções na latitude 30°S.....	26
<b>Figura 9</b> - Céu visível a partir de uma superfície vertical sob influência de obstruções na latitude 30°S.....	27
<b>Figura 10</b> - Radiação solar global: (a) céu claro; (b) céu encoberto.....	28
<b>Figura 11</b> - Dia típico para projeto térmico de edificação em Porto Alegre.....	29
<b>Figura 12</b> - Superfícies refletoras em pátio na biblioteca de Las Vegas.....	30
<b>Figura 13</b> - Obstrução parcial do céu e reflexão da radiação de uma superfície sobre outra.....	31
<b>Figura 14</b> - Carta solar de Porto Alegre: latitude 30°S.....	32
<b>Figura 15</b> - Efetividade das decisões ao longo das etapas de projeto e operação de um edifício.....	33
<b>Figura 16</b> - Geometria e identificação das faces do prisma reproduzido pelos modelos.....	35
<b>Figura 17</b> - Diagramas da insolação sobre as faces do prisma em orientações opostas, em um mesmo horário do dia: (a) seção transversal; (b) seção longitudinal.....	36
<b>Figura 18</b> - Modelo digital.....	37
<b>Figura 19</b> - Simulação da insolação no modelo: regiões em sombra e expostas à radiação	

direta.....	37
<b>Figura 20</b> - Fotografias de uma sala real e de um modelo da mesma sala capturadas no mesmo instante: (a) Sala real; (b) Modelo da sala.....	38
<b>Figura 21</b> - Modelo físico.....	39
<b>Figura 22</b> - Modelo físico sobreposto ao piranômetro.....	40
<b>Figura 23</b> - interior do modelo físico: sensor do piranômetro nivelado e centralizado na face H <sub>2</sub> .....	40
<b>Figura 24</b> - Base plana em MDF para apoio e nivelamento do conjunto.....	41
<b>Figura 25</b> - Orientações avaliadas e posição relativa das faces.....	44
<b>Figura 26</b> - Dados de entrada (a) e de saída (b) do software Luz do Sol.....	50
<b>Figura 27</b> - Percentual de céu visível a partir de um ponto sobre uma face do modelo.....	51
<b>Figura 28</b> - FVC (%) para pontos distribuídos em cada face do modelo e FVC médio (%) de cada face.....	52
<b>Figura 29</b> - Modelo posicionado sobre plataforma giratória suspensa.....	53
<b>Figura 30</b> - Piranômetro MS-80 Eko.....	54
<b>Figura 31</b> - Irradiância sobre a face V <sub>2</sub> nos cenários A <sub>I</sub> , A <sub>II</sub> , A <sub>III</sub> .....	62
<b>Figura 32</b> - Insolação sobre faces verticais quando normais ao azimute solar (9h): (a) V <sub>2</sub> em A <sub>III</sub> ; (b) V <sub>3</sub> em A <sub>I</sub> .....	64
<b>Figura 33</b> - Insolação sobre faces V <sub>2</sub> e V <sub>3</sub> quando oblíquas ao azimute solar (9h), no cenário A <sub>II</sub> .....	65
<b>Figura 34</b> - Insolação sobre as faces do modelo às 12h: (a) cenário B <sub>I</sub> ; (b) cenário B <sub>II</sub> ; (c) cenário B <sub>III</sub> .....	68

# LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Matriz de parâmetros.....	43
<b>Tabela 2</b> - Azimute da face em função do cenário.....	45
<b>Tabela 3</b> - Irradiação horária sobre as faces verticais.....	45
<b>Tabela 4</b> - Passagem meridiana do sol em Porto Alegre para o dia 21, em 2019, em hora legal.....	46
<b>Tabela 5</b> - Cenários e faces investigados por meio do modelo digital.....	47
<b>Tabela 6</b> - Cenários e faces investigados por meio do modelo físico.....	47
<b>Tabela 7</b> - Irradiação horária sobre as faces verticais (Wh/m <sup>2</sup> ).....	57
<b>Tabela 8</b> - Irradiação horária sobre a face H <sub>2</sub> (Wh/m <sup>2</sup> ) do modelo digital.....	58
<b>Tabela 9</b> - Irradiação horária sobre a face H <sub>1</sub> (Wh/m <sup>2</sup> ) do modelo digital.....	58
<b>Tabela 10</b> - Irradiação diária sobre as faces verticais (Wh/m <sup>2</sup> ).....	59
<b>Tabela 11</b> - Irradiação diária sobre a face H <sub>2</sub> (Wh/m <sup>2</sup> ) do modelo digital.....	59
<b>Tabela 12</b> - Irradiação diária sobre a face H <sub>1</sub> (Wh/m <sup>2</sup> ) do modelo digital.....	59
<b>Tabela 13</b> - Quantidade de radiação direta e difusa sobre a face H <sub>1</sub> (plano da abertura) e sobre o conjunto das faces V <sub>(1, 2, 3, 4)</sub> e H <sub>2</sub> (Wh).....	60
<b>Tabela 14</b> - Irradiação horária sobre a face horizontal (H <sub>2</sub> ) (Wh/m <sup>2</sup> ) do modelo físico.....	61
<b>Tabela 15</b> - Irradiação horária sobre a face H <sub>1</sub> (Wh/m <sup>2</sup> ) do modelo físico.....	61
<b>Tabela 16</b> - Irradiação diária sobre a face horizontal (H <sub>2</sub> ) (Wh/m <sup>2</sup> ) do modelo físico.....	61
<b>Tabela 17</b> - Irradiação diária sobre a face horizontal (H <sub>1</sub> ) (Wh/m <sup>2</sup> ) do modelo físico.....	61

# SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	11
MARCO TEÓRICO.....	14
HIPÓTESE DE TRABALHO .....	15
OBJETIVO .....	15
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	15
1 CONTEXTO .....	17
1.1 PÁTIO .....	18
1.2 TIPIFICAÇÃO .....	20
1.3 RADIAÇÃO SOLAR.....	22
1.4 SUPERFÍCIES REFLETORAS.....	30
1.5 GEOMETRIA SOLAR .....	32
1.6 MODELOS .....	33
1.6.1 MODELO DIGITAL – TEÓRICO .....	36
1.6.2 MODELO FÍSICO – EXPERIMENTAL.....	38
2 METODOLOGIA.....	42
2.1 CENÁRIOS .....	43
2.2 MODELO DIGITAL .....	46
2.3 MODELO FÍSICO .....	47
2.4 EXPERIMENTAÇÕES .....	48
2.4.1 MODELO DIGITAL.....	48
2.4.2 MODELO FÍSICO .....	52
3 RESULTADOS .....	56
3.1 MODELO DIGITAL .....	56

3.2 MODELO FÍSICO .....	60
4 DISCUSSÃO .....	62
4.1 MODELO DIGITAL .....	62
4.2 MODELO FÍSICO .....	67
CONCLUSÃO.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	73
APÊNDICES.....	76
<b>APÊNDICE I</b> .....	77
<b>APÊNDICE II</b> .....	79
<b>APÊNDICE III</b> .....	80

# INTRODUÇÃO

O controle de variáveis climáticas por meios da própria arquitetura sempre foi o principal recurso para o condicionamento ambiental nos espaços construídos. Este controle ocorre por meio de mecanismos que modificam ou conservam essas variáveis afetando as condições ambientais, sem o uso de equipamentos consumidores de energia (EVANS, 2007). Ao mesmo tempo, a possibilidade de condicionamento e iluminação artificiais leva, em muitos casos, à desconsideração das variáveis climáticas locais e, assim, as soluções para o condicionamento ambiental são deslocadas para o domínio da engenharia, tornando os edifícios mais dependentes de equipamentos mecânicos e aumentando o consumo de energia (YANNAS, 1989).

A qualidade ambiental e o uso racional de energia dependem e podem ser alcançados por meio de decisões inerentes ao domínio dos arquitetos. Estes, ao projetarem o condicionamento ambiental visando o controle de variáveis climáticas, o fazem em busca da percepção dos ocupantes com o lugar, evitando a vivência espacial com o uso de aparelhos consumidores de energia, principalmente eletricidade (YANNAS, 1989).

A potencialização da ambientação e habitabilidade dos lugares em arquitetura por meio do controle das variáveis climáticas é primordial. Além disso, o aprimoramento das condições ambientais é fundamental para a redução do consumo energético e eficiência dos sistemas mecânicos de condicionamento (KONIS, 2016).

A radiação solar está entre as variáveis climáticas mais importantes para o condicionamento ambiental de uma edificação, promovendo a iluminação natural e o aquecimento. Alguns espaços de transição<sup>1</sup>, tais como varandas, galerias, átrios e pátios, operam como mecanismos de controle da radiação solar (MARAGNO, 2010). Neste contexto, os pátios promovem o acesso de luz natural e afetam o comportamento termo-energético de espaços adjacentes e do próprio lugar que o define (YANNAS 1989, 2015).

<sup>1</sup>Alguns espaços que não podem ser classificados como interior ou exterior e que não possuem uma utilidade precisa e concreta são denominados espaços de transição (COCH, 2003 apud MARAGNO, 2010).

O objeto dessa dissertação é o pátio. O pátio neste trabalho é considerado como expressão de lugar no projeto de arquitetura. Os pátios obedecem papel dinâmico de interação de ambientes, o interior e o exterior imediatos para um programa de necessidades. Este caráter dinâmico dá suporte e ajuda a identificação, o papel da tipologia pátio adotada para a definição conceitual das edificações.

O pátio é um espaço exterior, encerrado lateralmente pelas paredes de um ou de vários edifícios, aberto ao exterior no topo e, em alguns casos, lateralmente (BAKER, 1993). De modo geral, pátios admitem a radiação proveniente do céu e do disco solar por uma abertura localizada no limite superior do espaço. Esta particularidade geométrica pode restringir as interferências do entorno natural ou edificado sobre a radiação admitida. Edifícios, montanhas ou vegetação do entorno podem atuar como obstruções afetando a radiação sobre os paramentos de uma edificação (YANNAS, 2001). Nos pátios, as superfícies envolventes oferecem um recinto particular que atua sobre a radiação de modo preponderante ou exclusivo permitindo o controle desta energia.

A radiação que ingressa nesses espaços e atinge as superfícies circundantes é resultante do auto-sombreamento e da reflexão. As sombras<sup>2</sup> sobre as paredes e sobre o piso decorrem do bloqueio parcial da radiação direta pelo invólucro mural que configura o próprio espaço (KOENIGSBERGER, 1977). O sombreamento mútuo das superfícies reduz a exposição de paredes e piso à radiação solar direta, minimizando ganhos de calor. Além disso, esse invólucro mural reduz a “visão” do hemisfério celeste a partir das próprias superfícies afetando também a quantidade de radiação proveniente do céu.

As superfícies circundantes em pátios refletem a radiação solar, conduzindo a luz para zonas do edifício separadas do exterior (BAKER, 1993). Desse modo permitem a iluminação natural de espaços adjacentes que se comunicam com o vazio interno através de aberturas. Também pode ser desejável a iluminação do próprio espaço aberto definido pelas paredes do pátio, especialmente na altura do piso, que pode ser usado para atividades, circulação, e pode conter vegetação (LAM, 1986).

A vocação para a distribuição da luz natural e para a redução de ganhos solares revela o potencial dos pátios como estratégia para a melhoria das condições ambientais e

<sup>2</sup>Sombras no âmbito da arquitetura são regiões de uma superfície escurecidas por um objeto que se interpõe a uma fonte de luz (MARAGNO, 2010).

economia de energia nas edificações (KONIS, 2016). A exploração e desenvolvimento desse potencial requer o entendimento da radiação solar incidente nestes lugares.

Diversos são os parâmetros que afetam a radiação incidente sobre as superfícies que conformam os pátios. Entre os parâmetros mais importantes estão a geometria, dada pelos parâmetros largura, altura e comprimento da forma; a orientação da forma; e a geometria do movimento solar no hemisfério celeste, vinculada à latitude do lugar (AL-HAFITH, 2017). Na literatura podem ser encontrados alguns estudos da radiação incidente em pátios como variável dependente de parâmetros geométricos e orientação. Também podem ser encontrados diversos estudos que avaliam o sombreamento como variável dependente de geometria e orientação. Os estudos referidos a seguir foram realizados para a latitude 30° ou similar, latitude utilizada como parâmetro de investigação neste trabalho.

De acordo com Mohsen (1979) tanto a geometria como a orientação afetam a quantidade de radiação sobre as paredes. O autor utilizou um modelo matemático para avaliar o efeito de diferentes orientações e proporções geométricas na radiação sobre superfícies circundantes em pátios de planta ortogonal, para a latitude 30°N (Cidade do Cairo). O estudo mostra que o efeito da orientação é menor em pátios de planta quadrada e maior naqueles com planta alongada. Além disso, o estudo identificou outra tendência: no verão, a irradiação sobre as paredes é menor nos pátios mais altos, com plantas quadradas; no inverno a irradiação sobre as paredes é maior nos pátios mais baixos, com plantas mais alongadas.

Segundo Raydan (2006), proporções geométricas distintas proporcionam o ajuste do pátio a diferentes trajetórias solares, e assim, a climas quentes e climas frios. Geometrias com menores alturas permitem a incidência de radiação sobre as paredes do pátio quando as trajetórias solares são baixas, o que é crucial em climas frios. Geometrias com maiores alturas reduzem a incidência de radiação direta no piso mesmo quando as trajetórias solares são as mais altas, o que é importante nos climas quentes. Assim, a adequação aos climas frios é determinada por menores taxas altura/largura do que nos climas quentes. Esse estudo foi realizado para as latitudes 31°N e 60°N.

Al-hafith (2017) determinou o impacto relativo de parâmetros geométricos e da orientação na insolação no interior do pátio. Segundo o autor, a área exposta à insolação diminui com a redução da largura e com o aumento da altura. O parâmetro que mais afeta a

insolação é a altura do pátio e o que menos afeta é a orientação. O estudo avaliou 50 geometrias distintas e três orientações e foi realizado para a latitude 33°N (Cidade de Bagdá).

A presente investigação é orientada pelas principais limitações observadas nos estudos encontrados na literatura. O estudo de Mohsen (1979) desconsidera tanto a radiação difusa proveniente do céu, como a reflexão pelas superfícies envolventes, e não inclui o piso do pátio nos principais resultados. Além disso, o estudo utiliza como dado de radiação solar as médias diárias sazonais, do verão e do inverno. Raydan (2006) realizou simulações para um único dia do ano (21 de junho), durante o verão no hemisfério norte, medindo a densidade do sombreamento unicamente para o piso do pátio. Al-hafith (2017), ao avaliar o percentual da superfície envolvente que permanece exposto ao sol ao fim de cada dia, desconsidera as distintas condições de insolação em diferentes momentos do dia. Além disso, o estudo não avalia as distintas condições de insolação nas diferentes faces do recinto.

O presente estudo surge do entendimento de que o clima é um condicionante fundamental da forma arquitetônica. De acordo com Lamberts (2014), a forma modifica as variáveis climáticas afetando as condições ambientais nos espaços construídos. Para o arquiteto Hassan Fathy, a forma tem sentido somente no próprio contexto ambiental (Fathy, 1986). Essa afirmação sugere que formas inadequadas ao clima são carentes de significado. Por essas razões, entende-se que as características climáticas locais devem orientar a gênese da forma em arquitetura. Assim, a forma do pátio enquanto dispositivo de controle da radiação solar, deve ser orientada por esta variável climática. Além disso e mais especificamente, esta investigação advém do interesse em estabelecer estratégias de desenho para o controle da luz e do calor no projeto de espaços arquitetônicos durante as etapas iniciais de planejamento, quando as decisões tem maior efetividade.

## **MARCO TEÓRICO**

A geometria de um paralelepípedo de base retangular, para uma determinada altura, representando uma forma genérica de pátio, que tem o acesso da luz solar vinda pelo plano

horizontal superior, aberto ao hemisfério celeste e permite o cômputo de intensidade de luz variável nas superfícies, sendo dependente, do movimento aparente do sol<sup>3</sup>.

A forma estudada é composta por superfícies comparáveis àquelas que circundam e definem um pátio, sendo diversamente inclinadas e diversamente orientadas. A quantidade de radiação sobre superfícies inclinadas depende do ângulo de inclinação vertical e horizontal. A radiação incidente corresponde à soma de fluxos de radiação provenientes de diferentes fontes - Sol, céu e outras superfícies - e pode ser tanto medida, quanto estimada matematicamente. (DUFFIE, 2013).

## **HIPÓTESE DE TRABALHO**

Se um pátio pode ser um lugar de transição entre os demais espaços de um elenco de atividades num programa de necessidades, então as superfícies envolventes dos pátios, sejam opacas ou transparentes, servem como filtro da radiação solar para os ambientes adjacentes. Assim, uma verificação expedita em etapas iniciais de projeto, permite uma escolha de materialidade dessas superfícies, bem como ajuda escolher e posicionar os lugares adjacentes ao pátio com vistas ao condicionamento e aproveitamento das radiações com relação às diferentes orientações solares nos diferentes períodos do ano.

## **OBJETIVO**

O objetivo desta dissertação é escrutinar a geometria de modelos de pátio pela medição de radiação solar em diferentes cenários induzidos por orientação e percursos solares.

## **ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O trabalho presente está subdividido em quatro partes; I) Introdução e Contextualização, II) Metodologia e Simulações, III) Resultados e Discussão, e IV) Conclusão, Bibliografia e Anexo.

<sup>3</sup>Série sucessiva dos percursos diários do sol no hemisfério celeste (FROTA, 2004).

A Introdução apresenta as hipóteses do trabalho investigativo, que se resume no estudo paramétrico de modelos para entendimento dos efeitos de sombreamento das superfícies do envoltório de um pátio em função das orientações e exposições ao sol durante o ano. Este estudo ocorre numa condição de premissa do lugar como zona intermediária na edificação e para efeitos de projeto, nas etapas iniciais de planejamento dos lugares de uma composição de espaços programáticos é a motivação da investigação já que o pátio conceitualmente pode ser ocupado para diversas atividades mas que, por forma e posicionamento no edifício o torna num lugar distinto.

Após a introdução, ainda na primeira parte do trabalho é apresentado o contexto do estudo dentro de uma limitação metodológica para a identificação do conjunto de conceitos estabelecidos como marco teórico da investigação. São elencados conceitos como balizados pelo estudo. A segunda parte refere-se a Metodologia, seguida por simulações gráficas, bem como de valores obtidos por medições em modelo em condições análogas às simulações computacionais. A terceira parte do trabalho traz os resultados. Os valores obtidos nas experimentações são apresentados de maneira que uma discussão qualitativa levando em consideração o efeito de acesso solar ao recinto e condições de conexão material e visual com os fechamentos dos lugares circundantes e quantitativa, por meio de valores que permitam identificar o potencial energético relativo entre as áreas refletivas das radiações solares para que possam estabelecer conclusões para referência em projetos de pátios. A conclusão, como parte final do trabalho tem por principal função apresentar recomendações para trabalhos futuros que tenham como tema o pátio, principalmente com relação ao acesso de radiação solar por meio de abertura, no interior de uma edificação com proporções de largura, comprimento e altura comparáveis em tamanho com espaços interiores a edificação.

# 1 CONTEXTO

O contexto do trabalho é um pátio, sua tipificação, relacionada à forma de acesso da radiação solar sobre as superfícies que o circunscrevem no âmbito climático da região de Porto Alegre, RS, na Latitude 30°S. Variáveis climáticas são de difícil interpretação, por arquitetos, em momentos de lançamento de idéias de projeto, quando a geometrização, a contemporização de conceitos estéticos com a materialidade e o atendimento a funcionalidade das atividades a serem desenvolvidas nos diversos lugares projetados para uma edificação, apresentam um leque de alternativas compositivas de primeira ordem e importância. Decorre dessa complexidade que a escolha de “*implantação*” de uma edificação é dependente do movimento aparente do sol no hemisfério celeste para o condicionamento de acesso solar ao edifício. Conseqüentemente, o edifício e o sítio de “*implantação*” são consequência direta das possibilidades de orientação dos espaços organizados com vistas ao acesso de radiação solar. Sendo essa orientação da composição uma escolha de orientação solar, acarreta interdependência da forma com o movimento do sol no hemisfério celeste. Toda a edificação é condicionada a essa decisão de projeto.

O clima e a sua característica termo energética, em Porto Alegre, informa por meio das estatísticas de monitoramentos diversos, influências dos ângulos de altura e azimute solar<sup>4</sup> sobre as faces edificadas que revelam comportamentos de desempenho variáveis com relação à materialidade e controle ao sol. Durante o dia, a trajetória solar<sup>5</sup> expõe orientações de diversas faces para o hemisfério norte, variando em altura, sendo mais alta no período quente e mais baixa no período frio, bem como o arco descrito pelo movimento é, no nascente atingindo o norte no ponto mais alto do dia e a partir daí, continuando o movimento descendente até o poente.

A intensidade da radiação solar sobre uma superfície é função do movimento do sol e de parâmetros da própria superfície, bem como da forma da qual esta é parte. A radiação sobre as superfícies envolventes de um pátio dependem, assim, de variáveis climáticas locais e das propriedades da forma e superfícies componentes. O entendimento do fenômeno da radiação sobre as superfícies envolventes do pátio, requer uma investigação em diferentes

<sup>4</sup>Ângulo, no plano horizontal, entre a projeção do meridiano local e da normal da superfície (MACAGNAN, 2010).

<sup>5</sup>Percurso do sol no hemisfério celeste entre o nascer e o pôr-do-sol.

momentos do dia e em períodos distintos do ano. Além disso, é necessário considerar a relação entre as diferentes trajetórias solares e os parâmetros da forma estudada.

Os parâmetros da forma, tais como os geométricos e a própria orientação, são comumente ajustados durante etapas iniciais de projeto, quando as definições de uma arquitetura ainda são genéricas e esquemáticas. Assim, esta investigação é direcionada ao planejamento inicial de uma edificação que inclua o tipo pátio como estratégia para o controle da luz e do calor.

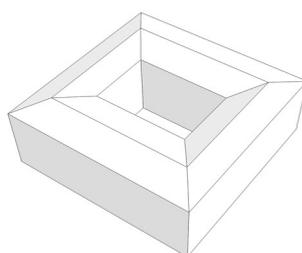
## 1.1 PÁTIO

O pátio é um conceito tipológico. O conceito de tipo em arquitetura é impreciso, indeterminado e imaterial. Um tipo não pode ser descrito detalhadamente, uma vez que é uma representação vaga e reduzida de diversos objetos análogos, enquanto o modelo é único, específico e claramente determinado (MAHFUZ, 1984). Assim, o conceito de pátio é amplo e impreciso, compreendendo um grande número de variantes.

O conceito pátio remete à ideia de área externa, onde a função dessa área é organizar áreas adjacentes ao perímetro do pátio e confere ao ambiente construído um caráter genérico, onde as divisas circundantes podem ser de mesma característica programática, ou lugares diversos.

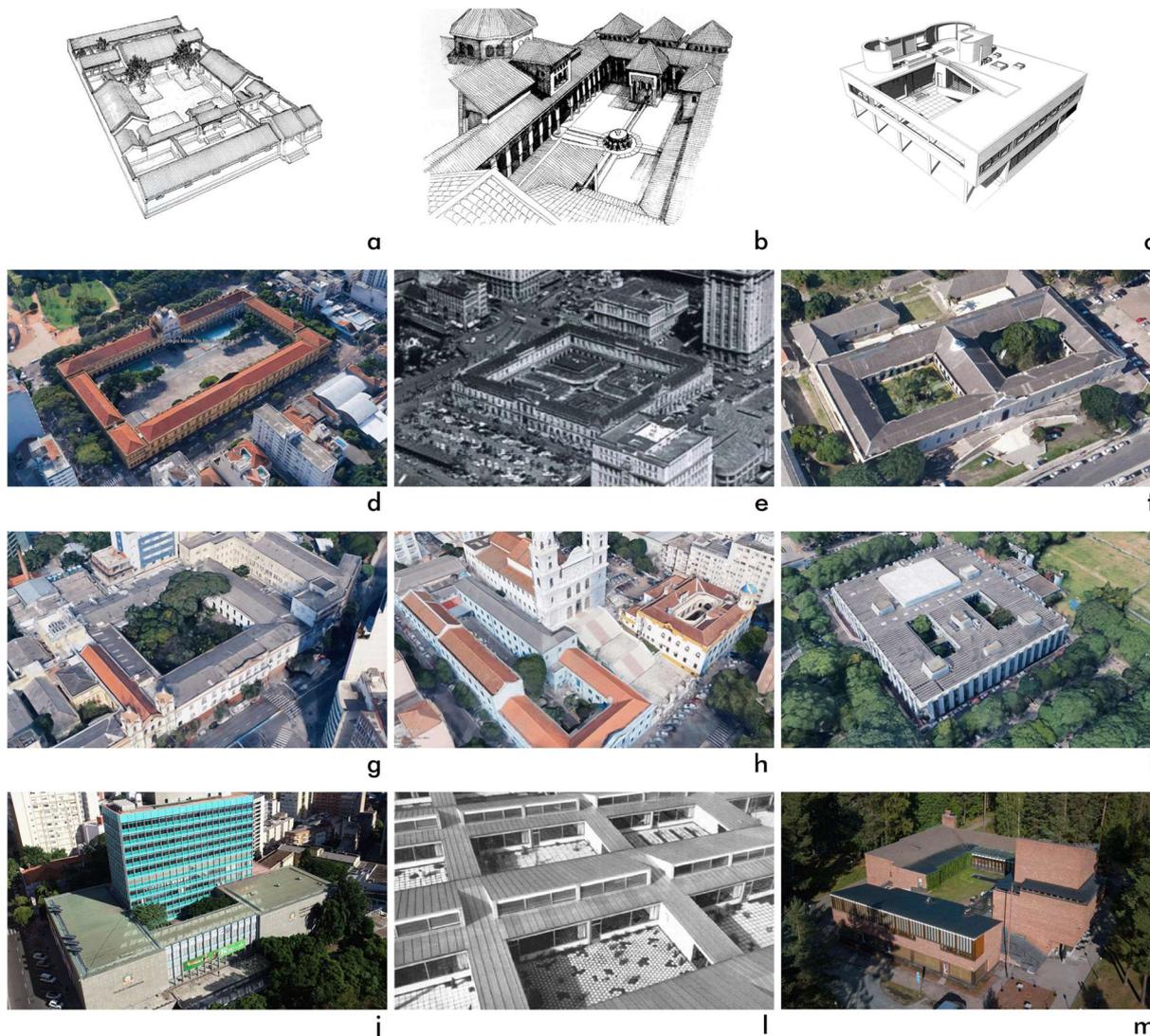
O pátio foi empregado com diversas configurações, dimensões e funções, em diferentes contextos climáticos e períodos históricos (CAPITEL, 2005). Apesar da profusão deste elemento e das particularidades de cada exemplar, há entre estes uma evidente analogia formal: o pátio é, essencialmente, um espaço descoberto, envolvido por paredes ou muros pertencentes a uma ou várias edificações (REIS-ALVES, 2005) (Figura 1). É este o princípio formal que caracteriza o pátio como um tipo e rege a criação de infinitos modelos.

**Figura 1** - Tipo pátio.



O ambiente construído, definido pelo pátio, muitas vezes, é o caráter do próprio edifício, por exemplo, casa-pátio, diferente de pátio de um conjunto habitacional, onde para a casa é uma área privativa, enquanto no conjunto habitacional é uma área coletiva. Outros exemplos são também interessantes como soluções de espacialidade dos lugares que dão ao pátio algum protagonismo. A Figura 2 apresenta possíveis variantes para o “tipo pátio”.

Figura 2 - Variantes para o “tipo pátio”.



a. Casas pátio Siheyuan, China. b. Pátio dos Leões, Alhambra, Granada. c. Villa Savoye, Poissy, França. d. Colégio Militar, Porto Alegre, Brasil. e. Mercado Público, Porto Alegre, Brasil. f. Asilo Pe. Cacique, Porto Alegre, Brasil. g. Santa Casa de Misericórdia, Porto Alegre, Brasil. h. Comando Militar do Sul, Porto Alegre, Brasil. i. Câmara Municipal, Porto Alegre, Brasil. j. Assembleia Legislativa do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. l. Escola Munkegaard, Gentofte, Dinamarca. m. Câmara Municipal, Säynätsalo, Finlândia.

Para efeitos de tipificação neste trabalho, foram observados critérios como: geometria em planta (2a, b), relação altura dos paramentos verticais com a área circundada (2b, c, d), área a céu aberto (todas as imagens), materialidade das superfícies refletoras (2i, m). Estes aspectos variam em função de questões programáticas, do sítio, estrutura formal da edificação, etc. São comuns as plantas ortogonais, encontradas em diversas proporções, sendo que são frequentes as quadradas e também as retangulares com proporções próximas de 1 para 2 (Figuras 2d, b, i, j, l) proporção adotada para estudo nesta investigação. A abertura normalmente corresponde a um plano imaginário com dimensões similares às do piso e paralelo a este. Esta característica remete à ideia adotada neste estudo de que a abertura é um plano horizontal com a mesma geometria do piso, localizado no topo da forma.

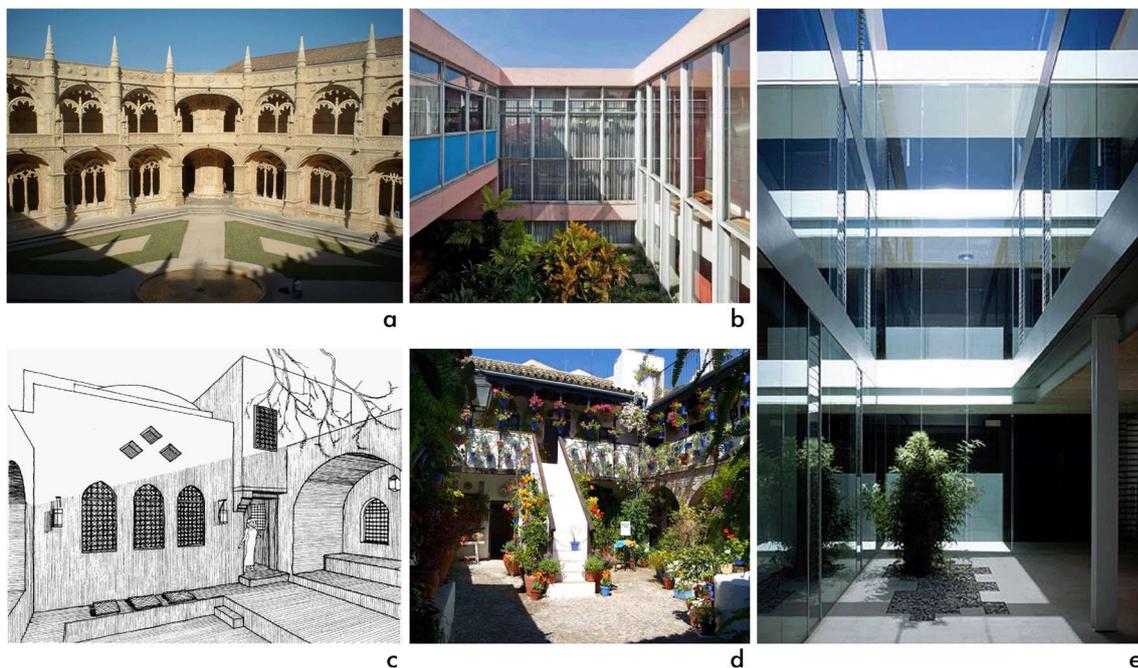
## **1.2 TIPIFICAÇÃO**

A composição arquitetônica é procedimento com aportes da estética, da forma construída e padrões de beleza. Com isso, elementos compositivos e critérios de composição devem ser definidos como axiomas - premissas consideradas necessárias, evidentes, verdadeiras - são fundamentos racionalistas de princípios inatos da consciência de generalizações da observação empírica. Uma manifestação desse tipo de indicativo de composição e qualidade do ambiente construído pode ser expressa por tipificação que no presente trabalho diz respeito às variações possíveis entre forma e luz solar, geometria dos espaços associados à materialidade das superfícies envolventes dos pátios, com o movimento aparente do sol no hemisfério celeste e o caráter dinâmico do movimento da luz solar ao longo do dia e do ano.

Para efeitos de tipificação, o pátio é entendido como um lugar acessível, que abriga qualquer função. Este lugar é envolvido por superfícies planas contíguas, diversamente orientadas e diversamente inclinadas, as quais correspondem às fachadas internas e ao piso de um pátio. As fachadas são vistas como superfícies verticais ortogonais entre si, e o piso, como uma superfície horizontal, de planta retangular. O espaço encerrado por estas superfícies comunica-se com o exterior por uma única abertura, plana e horizontal, com perímetro retangular, localizada no topo da forma, por onde é admitida a radiação solar. As

superfícies que encerram o espaço recebem e refletem a radiação solar ao mesmo tempo em que produzem um sombreamento mútuo (Figura 3).

**Figura 3** - Tipificação do pátio.



a. Mosteiro dos Jerônimos, Lisboa, Portugal. b. Casa Taques Bittencourt, São Paulo, Brasil. c. Casa Handy, Cairo, Egito. d. Pátio em Córdoba, Espanha. e. Casa de la Juventud, Alicante, Espanha.

A fotografia apresentada na Figura 4 ilustra a radiação incidente sobre as superfícies de um espaço localizado na latitude 30°S, em determinado instante do dia. O espaço é conformado por quatro paredes e por um piso, sendo aberto ao céu no topo. Esse espaço abriga atividades e circulação no piso, e está vinculado a diversos espaços adjacentes por aberturas e recessos. A radiação que ingressa pela abertura superior é afetada pelos componentes do recinto (forma da abertura superior, planos opacos, janelas, elementos das fachadas, etc.). A condição de céu claro e a conseqüente presença da radiação direta resulta em regiões expostas à insolação e regiões sombreadas. No instante da foto, a radiação proveniente do disco solar atinge parte de duas paredes, enquanto a maior parte do envelope recebe apenas radiação proveniente do céu e da reflexão pelas superfícies opacas. A forma do lugar permite que o observador veja apenas uma pequena parcela do céu, indicando que a radiação difusa que chega ao piso é reduzida. O recinto é iluminado pela radiação que chega às superfícies circundantes, como pela reflexão desta radiação pelas

mesmas superfícies. O mesmo ocorre com os espaços adjacentes que recebem a radiação através das aberturas.

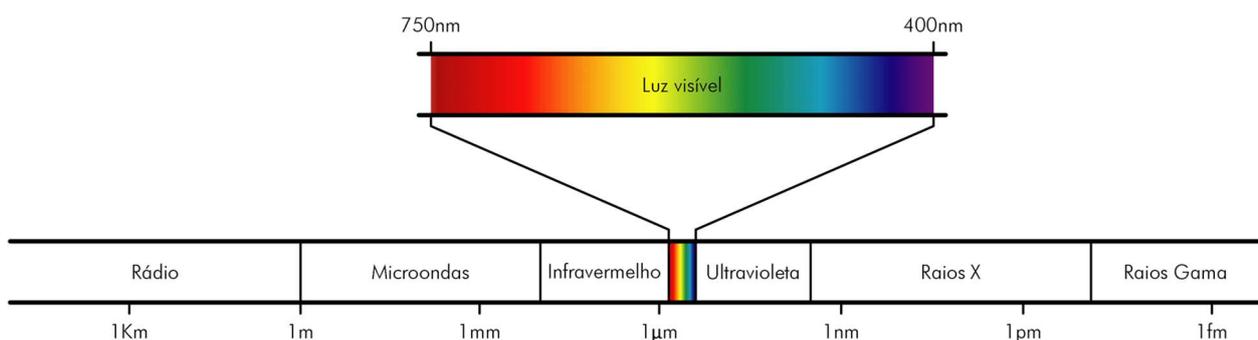
**Figura 4** - Radiação solar sobre superfícies. Casa de Cultura Mário Quintana, Porto Alegre, 1916-33



### 1.3 RADIAÇÃO SOLAR

O sol é a maior fonte natural de luz e calor. O espectro solar é constituído por radiações com diversos comprimentos de onda (Figura 5). A maior parte desta energia corresponde ao espectro infravermelho e à luz visível. Ao nível da superfície terrestre, cerca de 48% desta energia é luz visível e, cerca de 47%, radiação infravermelha, promotoras da iluminação natural e do aquecimento em edificações (LECHNER, 2008).

**Figura 5** - Espectro da radiação solar.



A natureza da radiação solar é a constante mudança, tanto qualitativa, como quantitativa (MILLET, 1996). Essa mudança é percebida nas edificações pela reflexão da luz visível por uma superfície e também em razão do aquecimento da mesma. São as diferentes intensidades do fluxo de radiação sobre superfícies edificadas que acarretam maior ou menor luminosidade e ganho térmico nos espaços construídos (SZOKOLAY, 2014). Assim, para evitar ou fazer uso da radiação solar é essencial compreender os fluxos de energia provenientes do sol em função das trajetórias solares (SZKOLAY, 2014). Além disso, a compreensão do fenômeno da radiação incidente requer o entendimento da distribuição temporal e espacial da radiação (CORBELLA, 2009). O controle deste aporte energético permite modular a luz e o calor nos edifícios.

De acordo com Szokolay (2014), a quantidade de radiação solar sobre uma superfície pode ser mensurada de duas maneiras:

- Irradiância ( $W/m^2$ ). É a quantidade instantânea de energia por unidade de área e por unidade de tempo;
- Irradiação ( $Wh/m^2$ ). É a quantidade de energia entregue por unidade de área se o fluxo de radiação<sup>6</sup> solar for mantido durante determinado período (hora, dia, mês ou ano).

O fluxo de radiação solar sobre uma superfície depende de três fatores principais (SZOKOLAY, 2014):

- ângulo de incidência dos raios solares;
- dissipação atmosférica;
- duração da luz do dia.

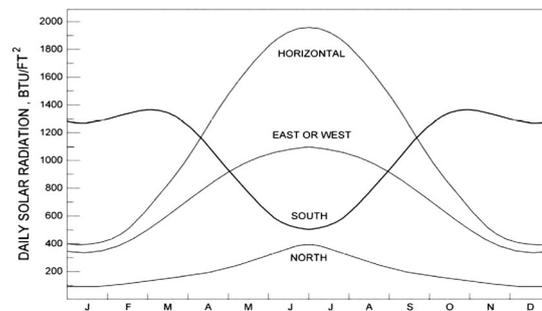
Portanto, o fluxo de radiação varia em função de fatores inerentes à superfície atingida, que são a orientação e a inclinação; e em função de fatores externos, tais como latitude, período do dia e do ano, nebulosidade e poluição do ar, e altitude<sup>7</sup> (FROTA e

<sup>6</sup>Fluxo de radiação é a quantidade de energia por unidade de área e unidade de tempo, proveniente de todas as direções, que atravessa um plano imaginário (DUFFIE, 2013).

<sup>7</sup>Outros fatores, irrelevantes para propósitos na área da arquitetura, também afetam o fluxo de radiação solar incidente. Esses fatores são as variações na emissão solar e na distância entre o sol e a terra que levam a oscilações no fluxo da radiação solar extraterrestre de cerca de apenas 1,5% e 3,3%, respectivamente (DUFFIE, 2013).

SCHIFFER, 2001). A Figura 6 apresenta a irradiação global sobre superfícies verticais com diferentes orientações e sobre uma superfície horizontal, para a latitude 42°N, na condição de céu claro, para o período de um ano.

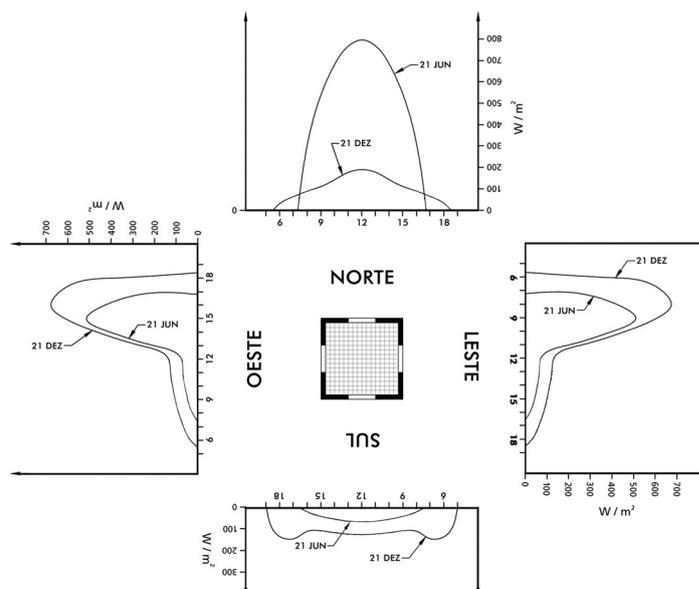
**Figura 6** - Irradiação global diária em função da orientação na condição de céu claro (latitude 42°N).



Fonte: LECHNER, 2015.

A Figura 7 apresenta a irradiação sobre superfícies verticais na latitude 32°S para o período de um dia, nos dias 21 de dezembro e 21 de junho. Em 21 de dezembro, superfícies orientadas a leste ou oeste, por exemplo, recebem uma quantidade de energia significativamente maior do que uma orientada a norte.

**Figura 7** - Irradiância sobre superfícies verticais em 21 de dezembro e 21 de junho (latitude 32°S).



Fonte: LECHNER, 2015.

A radiação solar que atinge uma superfície é constituída por dois componentes principais: a componente direta ( $I_b$ ), proveniente do disco solar; e a componente difusa ( $I_d$ ), propagada pela atmosfera terrestre. É possível também que a radiação sobre uma superfície apresente um terceiro componente: a componente refletida ( $I_r$ ), oriunda de superfícies do entorno (SZOKOLAY, 2014). A soma desses componentes é chamada de radiação solar global, sendo normalmente medida sobre uma superfície horizontal, e expressa da seguinte forma:

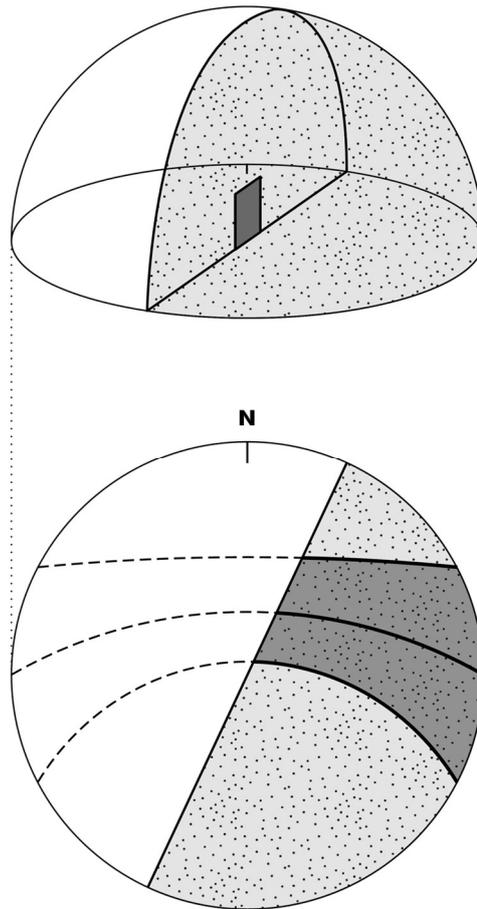
$$I_b = I_b + I_d (+I_r)$$

As quantidades das componentes direta e difusa da radiação sobre uma superfície dependem de fatores distintos. O fluxo de radiação direta depende do ângulo de incidência sobre a superfície atingida já que a radiação proveniente do disco solar é vetorial (SZOKOLAY, 2014). Em consequência disso, a orientação de uma forma determina a quantidade de radiação que incide em diferentes lados, em diferentes momentos (OLGYAY, 1998). O fluxo de radiação difusa depende da porção do hemisfério celeste "visível" a partir da superfície atingida. Desse modo, a obstrução parcial do céu reduz a quantidade de radiação difusa sobre uma superfície e pode reduzir o período de exposição da mesma à radiação direta ao obstruir também a trajetória aparente do sol.

Assim, a radiação incidente sobre uma superfície depende também da obstrução do sol e do céu. Superfícies horizontais, quando livres de quaisquer obstruções, recebem radiação difusa de todo o hemisfério celeste e radiação direta a partir de todas as posições que o sol ocupa no céu. As superfícies verticais, se livres de obstruções, recebem radiação difusa oriunda de metade do hemisfério celeste e direta das posições que o sol ocupa nesta metade, conforme a orientação solar da superfície (FROTA, 2004). Em superfícies livres de obstruções, são visíveis a mesma porção de céu e as mesmas posições do sol a partir de qualquer ponto. A Figura 8 apresenta a máscara de sombra<sup>8</sup> e perspectiva correspondente para uma superfície vertical livre de obstruções. O desenho ilustra a porção de céu visível a partir de um ponto qualquer sobre a superfície na latitude 30°S. Sem a influência das obstruções, metade do hemisfério celeste é visível, bem como as trajetórias solares naquela região do céu.

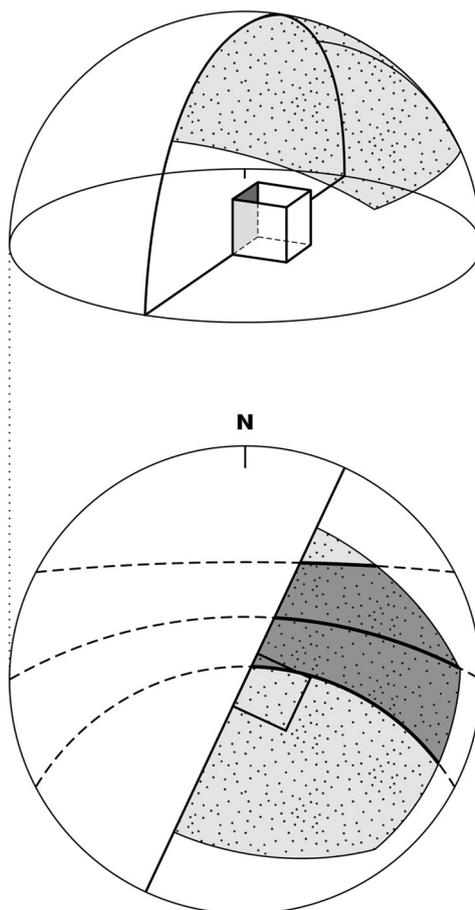
<sup>8</sup>"A máscara de sombra é a representação gráfica, nas cartas solares, dos obstáculos que impedem a visão da abóbada celeste por parte de um observador localizado em um local qualquer." (BITTENCOURT, 1996, p. 45).

**Figura 8** - Céu visível a partir de uma superfície vertical livre de obstruções na latitude 30°S.



No caso dos pátios a visão do céu e das trajetórias aparentes do sol a partir das superfícies verticais e da horizontal é reduzida devido à natureza geométrica da forma. As superfícies verticais dos pátios atuam como obstruções do hemisfério celeste impedindo em maior ou menor grau que a radiação difusa disponível atinja as faces. Além disso, as faces verticais bloqueiam por um período maior ou menor a radiação solar direta disponível. A Figura 9 apresenta a máscara de sombra e perspectiva correspondente para uma superfície vertical sob influência de obstruções, neste exemplo, causada por outras faces verticais, tal como ocorre em um pátio. O desenho ilustra a porção de céu visível a partir do centro da superfície na latitude 30°S. Com a interferência de obstruções, uma parcela menor do hemisfério celeste e das trajetórias solares é visível. Nota-se também na figura que a parcela do percurso solar obstruído é diferente para cada trajetória solar. Nesse exemplo, a trajetória mais curta do ano foi a mais afetada pelas obstruções em razão das baixas alturas solares.

**Figura 9** - Céu visível a partir de uma superfície vertical sob influência de obstruções na latitude 30°S.

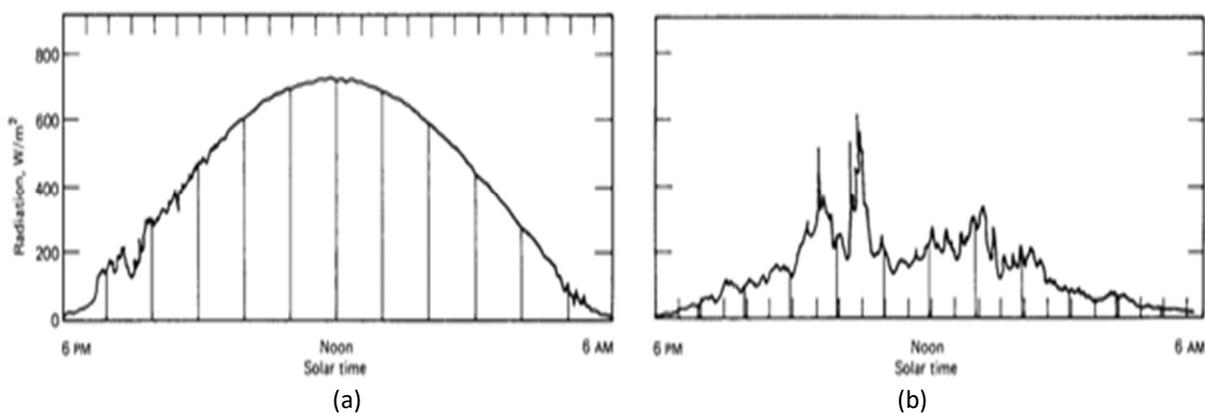


Superfícies sob a influência de obstruções apresentam diferentes condições de exposição à radiação em cada ponto da superfície, pois a partir de diferentes pontos são visíveis diferentes porções de céu. Também são visíveis, a partir de cada ponto, diferentes segmentos de trajetórias aparentes do sol. Assim, diferentes pontos sobre uma superfície envolvente em um pátio acessam diferentes quantidades de radiação difusa e direta.

Como visto, a radiação sobre as superfícies depende da orientação e inclinação destas, bem como de possíveis obstruções. Além disso, a radiação incidente depende das condições de transparência da atmosfera, a qual diminui com a poluição e com a nebulosidade (SZOKOLAY, 2014). A transparência da atmosfera muda continuamente e pode oscilar entre duas condições extremas: a de céu claro e a de céu encoberto. Em céu claro, o disco solar permanece aparente, havendo insolação ao longo do dia. Isto não ocorre em céus encobertos, nos quais o sol permanece obstruído pela nebulosidade, havendo apenas radiação difusa (FROTA, 2004).

As parcelas das componentes direta ( $I_D$ ) e difusa ( $I_d$ ) variam conforme a transparência da atmosfera. A radiação solar global é sempre maior em céu claro do que em céu encoberto (Figura 10), pois a componente direta, ausente em céu encoberto, representa uma parcela significativamente maior do que a componente difusa. Segundo Lamberts (2014), “Além de ser a principal influente nos ganhos térmicos em uma edificação, a radiação solar direta é a fonte de luz mais intensa”. Assim, a condição de céu, entre claro e encoberto, determina a proporção entre as componentes difusa e direta, o que afeta a radiação global sobre as superfícies.

**Figura 10** - Radiação solar global: (a) céu claro; (b) céu encoberto.

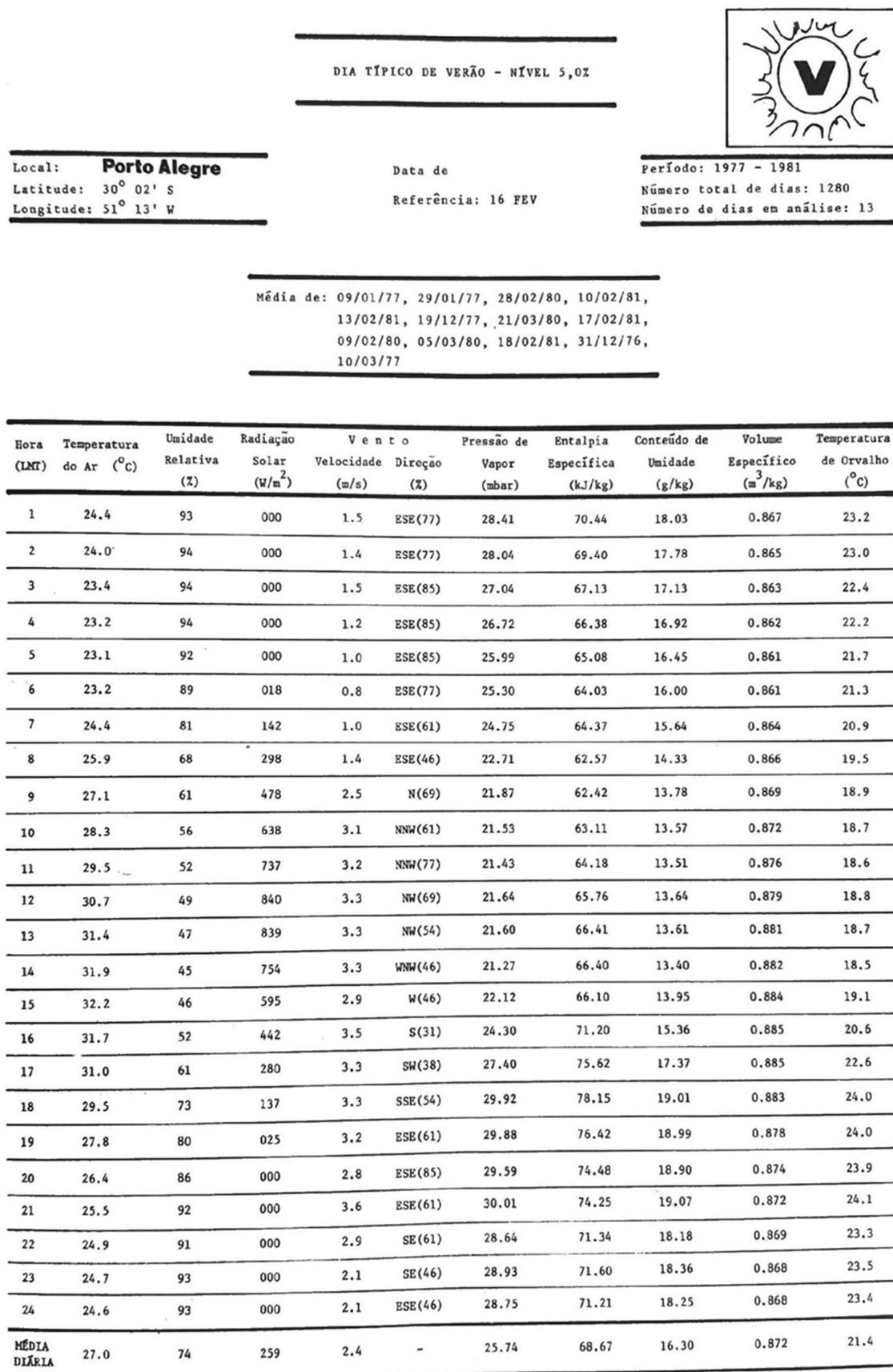


Fonte: DUFFIE, 2013.

Os dados de radiação utilizados para as simulações gráficas, neste trabalho, foram retirados de uma tabela para pré-dimensionamento de aberturas, adiante detalhado no Capítulo 2, Metodologia.

A Figura 11 mostra, como exemplo, uma tabela horária de dados climáticos, onde se pode observar, na quarta coluna, os referentes à radiação solar expressos em  $W/m^2$ . Os dados correspondem a dias típicos, definidos por Sattler (1989), com base em dados meteorológicos coletados em período de cinco anos. O autor considerou a probabilidade de ocorrência de conjuntos de condições climáticas para a definição dos dias típicos, representativos do clima de Porto Alegre.

Figura 11 - Dia típico para projeto térmico de edificação em Porto Alegre.



Fonte: SATTler, 1989.

Concomitantemente, com os demais valores de outras variáveis climáticas para o mesmo horário, mais ainda a tabela é para projeto térmico, condicionamento mecânico.

A precisão de dados como esses pressupõe a aplicação em projetos de arquitetura concluídos, com a tipificação do pátio já determinada com vistas ao acesso de radiação solar. Assim sendo, é necessário um argumento de projeto, com uma tipificação expedita, para atenuar os efeitos adversos de valores de radiação, no nível do desenvolvimento.

## 1.4 SUPERFÍCIES REFLETORAS

As superfícies são as partes visíveis de uma estrutura construída. Estas podem receber e refletir radiações provenientes do sol, do céu, e de outras superfícies do entorno. A reflexão das superfícies está associada às propriedades físicas dos materiais, tais como a cor, a rugosidade, a transparência ou opacidade, bem como do ângulo de incidência das radiações. As superfícies refletoras em um pátio são representadas por planos materiais que definem geometricamente o lugar; o piso e o envoltório murado que é usado para cercar, delimitar a divisa entre espaços abertos e fechados em uma edificação (Figura 12). Desta maneira, as superfícies refletoras são relações geométricas da constituição material e de uma intenção construtiva do propósito espacial do lugar.

**Figura 12** - Superfícies refletoras em pátio na biblioteca de Las Vegas.

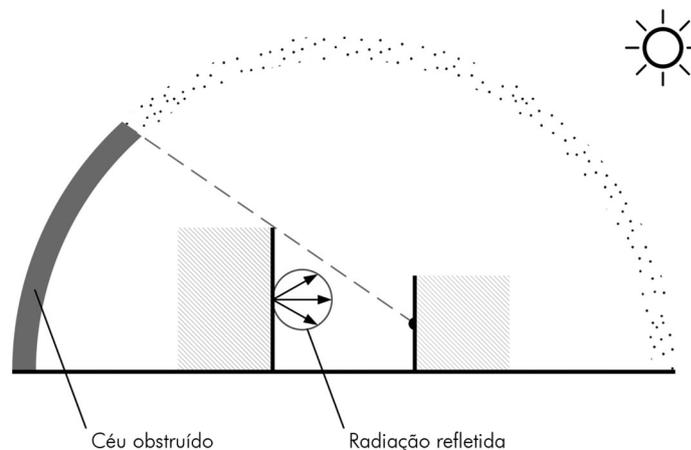


Fonte: MILLET, 1996.

O fenômeno da radiação sobre superfícies é dinâmico e, por isso, as condições sobre as superfícies que conformam os pátios variam ao longo do dia e nos diferentes dias do ano. A quantidade de radiação sobre uma superfície qualquer varia a cada instante, em função da posição do sol no céu e das condições de transparência da atmosfera. Essa energia, ao atingir as superfícies edificadas, opacas ou transparentes, resulta em ganhos térmicos e na iluminação natural dos espaços edificados.

Em um pátio, as superfícies envolventes tem um efeito duplo sobre a radiação incidente: por um lado, reduzem a radiação do céu sobre as próprias superfícies e excluem a insolação por algum período; por outro lado, estas superfícies podem refletir a radiação proveniente de outras regiões do céu e também do sol (MAJOROS, 1998). Deste modo, é possível aumentar a quantidade de radiação sobre uma superfície com radiação refletida por outras (DUFFIE, 2013). A Figura 13 ilustra os efeitos simultâneos de redução do céu visível e reflexão da radiação causados por uma superfície sobre outra.

**Figura 13** - Obstrução parcial do céu e reflexão da radiação de uma superfície sobre outra.



A radiação sobre as superfícies em um pátio também é função da orientação da forma, a qual determina o azimute das superfícies verticais e, assim, a região de céu visível a partir de cada superfície.

Considerando a etapa de projeto arquitetônico, na implantação, a tipificação de um pátio, para efeito das simulações são adotadas superfícies refletoras planas, opacas e brancas. Com isso os valores obtidos das superfícies examinadas podem ser comparados entre si, simultaneamente.

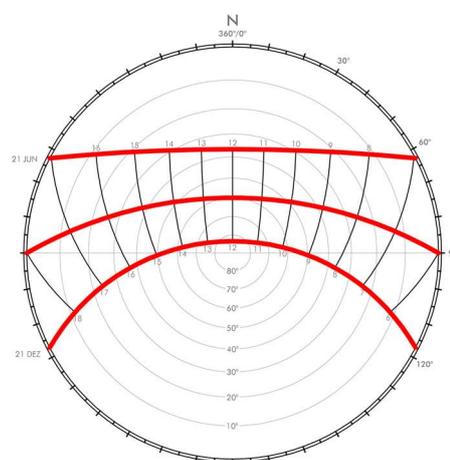
## 1.5 GEOMETRIA SOLAR

O movimento aparente do sol no hemisfério celeste é responsável pelo equilíbrio térmico da Terra. A fina espessura da atmosfera, cerca de 20 km, funciona como um filtro das radiações emitidas pelo sol que atingem a superfície do globo terrestre. A radiação solar incidente é uma variável dependente da trajetória solar. Dessa maneira, o condicionamento ambiental em um ponto específico pode ser examinado pelos ângulos de altura e azimute do sol, naquele horário e naquele dia. A melhor maneira de representar essa condição de análise é por uma carta solar, posicionando o sol no espaço em função do dia do ano e hora. A carta solar assim descrita, pelas alturas e azimutes em um dia do ano, é uma potente ferramenta de projeto e planejamento para entender os fatores decorrentes da radiação solar nas fases iniciais no processo de alocação e desenho dos lugares em uma edificação.

Os arcos percorridos pelo sol no hemisfério celeste resultam em distintas intensidades de radiação sobre uma superfície a cada instante. No caso de um pátio, as posições do sol determinam também o sombreamento mútuo das superfícies circundantes.

A região de Porto Alegre, situada à latitude 30°S, caracteriza-se por uma trajetória solar alta em 21 de dezembro, quando a altura solar chega a quase 85° ao meio-dia; e por uma trajetória solar baixa em 21 de junho, quando a altura solar ao meio dia é de cerca de 35° (Figura 14). Interessa investigar os modelos de análise considerando a trajetória mais alta e a mais baixa do ano. Essas duas etapas extremas do movimento aparente do sol, que correspondem aos dias de maior e menor duração no ano, proporcionam a máxima e a mínima exposição à radiação direta para as superfícies envolventes de um pátio.

**Figura 14** - Carta solar de Porto Alegre: latitude 30°S.

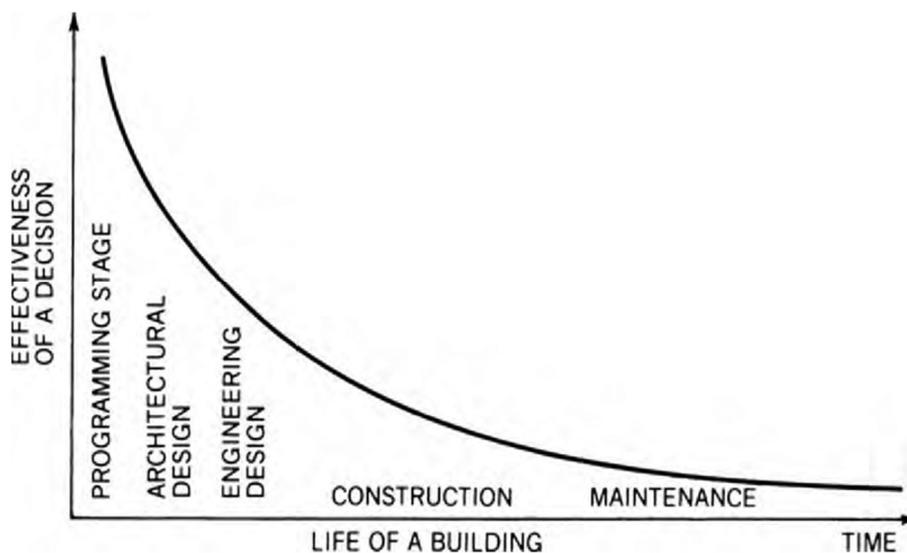


## 1.6 MODELOS

As etapas iniciais de projeto são fundamentais para o condicionamento do ambiente. Em etapas iniciais, as decisões de projeto têm maior influência nas condições ambientais dos futuros edifícios (LECHNER, 2015). Modelos permitem a experimentação e a avaliação dos resultados de parâmetros diversos (SERRA, 2006). Os modelos neste trabalho são limitados à investigação de parâmetros concernentes a etapas iniciais de projeto, que no presente estudo são a orientação da forma e a altura da trajetória solar.

Os modelos são referenciais, oferecendo condições de análise delimitadas pelos parâmetros investigados. A figura abaixo reforça a ideia da investigação de parâmetros por meio de modelos referenciais (Figura 15). Estes modelos permitem a avaliar decisões que tendem a ser mais efetivas no processo de projeto ou ciclo de existência de uma edificação.

**Figura 15** - Efetividade das decisões ao longo das etapas de projeto e operação de um edifício.



Fonte: LECHNER, 2015.

Modelos podem ser empregados para descrever um fenômeno ou sistema<sup>9</sup> observado no mundo natural. Daí que modelos computacionais ou maquetes em escala podem reproduzir questões de sombra<sup>10</sup> e luz, além de permitir a análise de outros

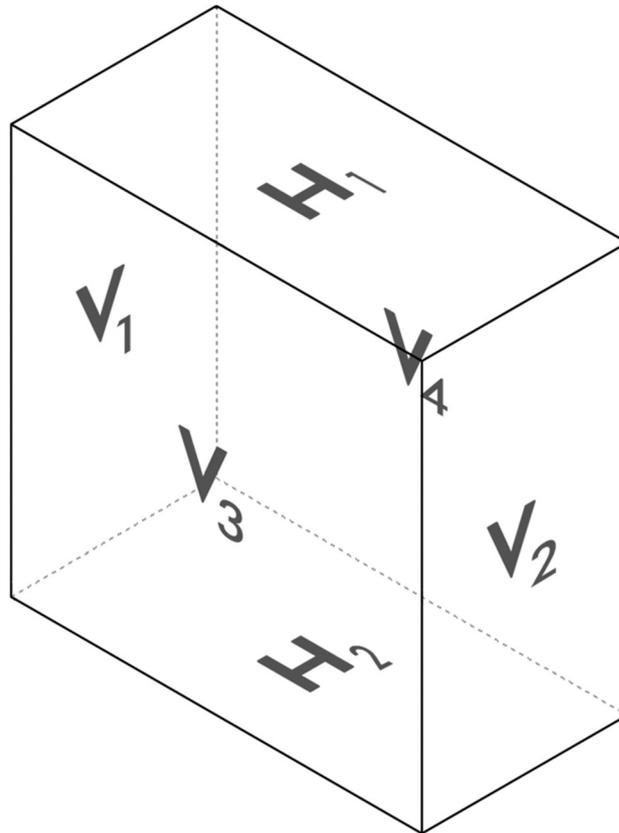
<sup>9</sup>Um sistema é um conjunto de objetos que assume diferentes estados ao longo do tempo em consequência da interação dos componentes (SERRA, 2006).

<sup>10</sup>Sombras são regiões de uma superfície escuras por um objeto que se interpõe a uma fonte de luz (MARAGNO, 2010).

aspectos, tais como a geometria do pátio e o movimento aparente do sol, e a escolha da materialidade das superfícies envolventes. Modelos são ferramentas para a análise do comportamento de um sistema sob condições especificadas por um experimentador e devem ser concebidos para responder perguntas ao invés de procurar copiar o sistema real (SHANNON, 1998). Assim, os modelos neste estudo constituem, em conjunto com a radiação solar, um sistema, cujas interações entre os componentes são comparáveis àquelas que ocorrem entre as superfícies envolventes e a radiação solar em um pátio. Essas interações decorrem do sombreamento mútuo e da reflexão da radiação, e as interações do sistema com o exterior se dão por abertura, através da qual a radiação solar ingressa. Os limites desse sistema são dados pelas próprias superfícies que constituem os modelos, conforme detalhado na metodologia. A função dos modelos é demonstrar os diferentes estados deste sistema ao longo do tempo, considerando os parâmetros avaliados e a variável estudada, a radiação solar.

Um modelo, diferentemente de um tipo, é um objeto com características particulares específicas, passíveis de uma descrição precisa, e que pode ser copiado (MAHFUZ, 1984). Nesse estudo, os modelos são elaborados com base em características tipológicas dos pátios. Esses modelos reproduzem uma geometria pré-determinada, comparável a um lugar existente ou que existirá, determinado por uma arquitetura. A geometria reproduzida é a de um paralelepípedo reto, cujas faces constituintes são comparáveis às superfícies que envolvem o espaço interno em um pátio. As faces horizontais inferior e superior deste paralelepípedo são comparáveis, respectivamente, ao piso e à abertura de um pátio. As faces verticais são comparáveis às paredes ou muros envolventes. Deste modo, os modelos são constituídos por seis faces planas — quatro verticais e duas horizontais — cada qual formando ângulos retos com as adjacentes, de modo que as faces opostas são paralelas. A Figura 16 apresenta a geometria e identifica as faces do prisma reproduzido pelos modelos.

**Figura 16** - Geometria e identificação das faces do prisma reproduzido pelos modelos.

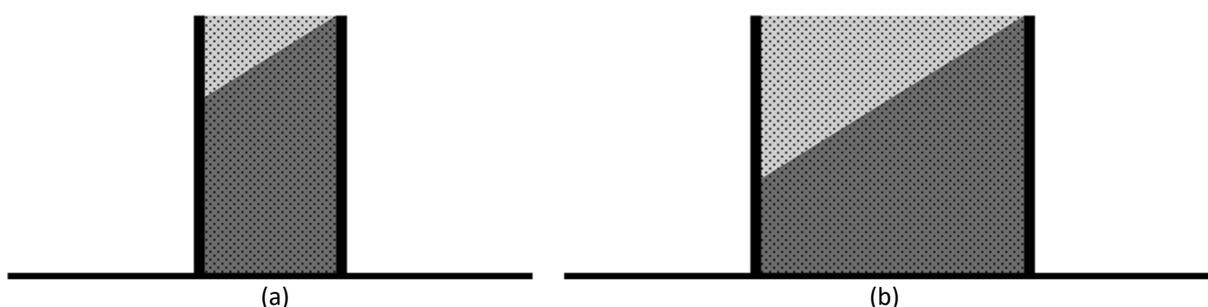


A forma geométrica dos modelos é composta por três categorias de faces: faces verticais, face horizontal inferior e face horizontal superior. A face horizontal superior ( $H_1$ ) é comparável a uma abertura, por onde ingressa a radiação solar, não sendo uma superfície refletora. A face horizontal inferior ( $H_2$ ) é comparável a um piso, enquanto as faces verticais ( $V_{1,2,3,4}$ ) são comparáveis a paramentos verticais. A face horizontal superior ( $H_1$ ) é entendida como um plano imaginário, que, de modo análogo ao que ocorre em um pátio, permite a passagem da radiação. As demais faces são entendidas como anteparos que interceptam a radiação solar e a refletem para o vazio comum, de modo que os modelos, juntamente com a radiação solar, convertem-se em sistema de superfícies que afetam umas às outras.

A proporção do prisma avaliado é de 1x2x2 (largura, comprimento e altura), sendo a forma do prisma análoga à forma de um pátio retangular. Assim, as faces horizontais são retangulares e, entre as verticais, duas são retangulares e outras duas são quadradas. Deste modo as condições de insolação sobre as faces em um mesmo horário do dia resultam diferentes em orientações opostas, como mostram os diagramas na Figura 17. Na Figura

17b, a orientação do modelo expõe ao sol maior área da face visível. Um prisma de base quadrada não oferece resultados assimétricos em diferentes orientações.

**Figura 17** - Diagramas da insolação sobre as faces do prisma em orientações opostas, em um mesmo horário do dia: (a) seção transversal; (b) seção longitudinal.



Além disso, a forma investigada neste estudo apresenta proporção em planta similar à observada em pátios de planta retangular encontrados na cidade de Porto Alegre, conforme pode ser visto nas figuras 2 (d, h, i, j) e 4.

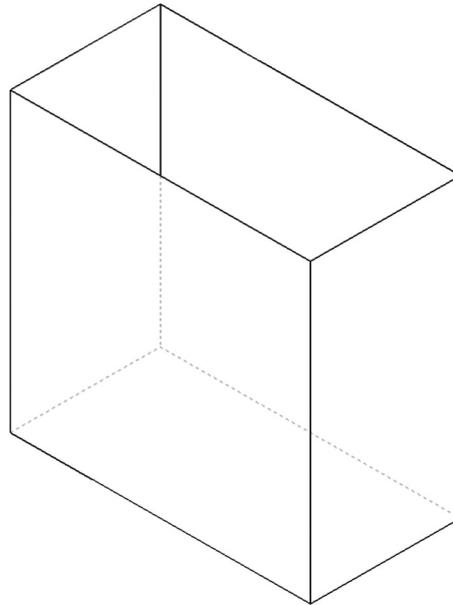
O prisma descrito acima é reproduzido digital e fisicamente para estimativas e medições da radiação incidente sobre as superfícies. Essas reproduções foram denominadas modelo digital e modelo físico.

### 1.6.1 MODELO DIGITAL – TEÓRICO

Um modelo teórico auxilia a compreensão do problema de investigação, o acesso de radiação solar, por meio de uma geometria idealizada, que guarda uma relação de proporções conhecidas, bem como estabelece uma padronização dos parâmetros a serem escrutinados.

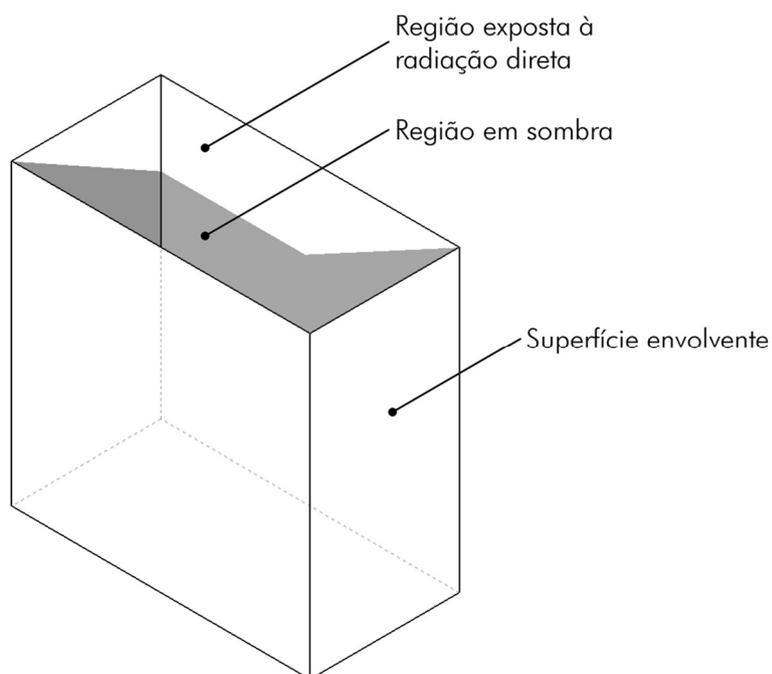
O modelo digital é uma representação computacional da geometria estudada conforme a Figura 18. A finalidade do modelo digital é oferecer estimativas da radiação incidente, bem como propiciar a observação de áreas em sombra e áreas expostas à radiação direta.

**Figura 18** - Modelo digital.



Esse modelo geométrico foi descrito, com o Software Sketchup 2016, com vistas a projeção de luz (Figura 19), simulando o movimento aparente do sol, mais adiante detalhado, na metodologia. O modelo permite avaliar os parâmetros estudados considerando-se qualquer sítio, qualquer dia do ano, ou condições de céu.

**Figura 19** - Simulação da insolação no modelo: regiões em sombra e expostas à radiação direta.



O modelo digital é imaterial, o que implica em superfícies desprovidas de propriedades físicas, não existindo reflexão no sistema. Desse modo, os dados de radiação oferecidos pelo modelo excluem a componente refletida, permitindo a análise das componentes direta e difusa isoladamente.

### 1.6.2 MODELO FÍSICO – EXPERIMENTAL

Um modelo experimental auxilia a compreensão do problema de investigação, o acesso de radiação solar, por meio de um modelo em escala que guarda uma relação de proporções conhecidas, e utilizadas para o modelo geométrico de simulações, bem como estabelece uma padronização dos parâmetros a serem escrutinados com dados obtidos por medição, cujos valores correspondem a um fato real, variável mas real.

Modelos físicos em escala permitem prever desfechos qualitativos e quantitativos da radiação solar incidente sobre as superfícies. O comportamento da radiação solar independe da escala do modelo estudado, assim, com o uso de réplicas em escala é possível medir a radiação com precisão, além de reproduzir e observar efeitos como brilho, contraste e reflexão (LECHNER, 2015). Em decorrência disso, fotografias de um modelo em escala ilustram padrões de iluminação natural idênticos aos do espaço real replicado (Figura 20). No entanto, a aferição da radiação solar com modelos físicos sob um céu real depende das condições climáticas, sobre as quais não se tem controle. Além disso, medições para diferentes períodos do ano requerem maior tempo para a realização das experimentações.

**Figura 20** - Fotografias de uma sala real e de um modelo da mesma sala capturadas no mesmo instante: (a) Sala real; (b) Modelo da sala.



(a)



(b)

Fonte: LECHNER, 2015.

A finalidade do modelo físico neste estudo é a medição da radiação incidente, bem como revelar áreas em sombra e áreas expostas à radiação direta sobre as superfícies (Figura 21).

**Figura 21** - Modelo físico.



O modelo físico é a representação material da geometria estudada, o que implica em superfícies dotadas de propriedades físicas que afetam a radiação no sistema. Desse modo, os dados de radiação oferecidos pelo modelo incluem as componentes direta e difusa provenientes do sol e do céu, e também a componente refletida, resultante da reflexão pelas faces.

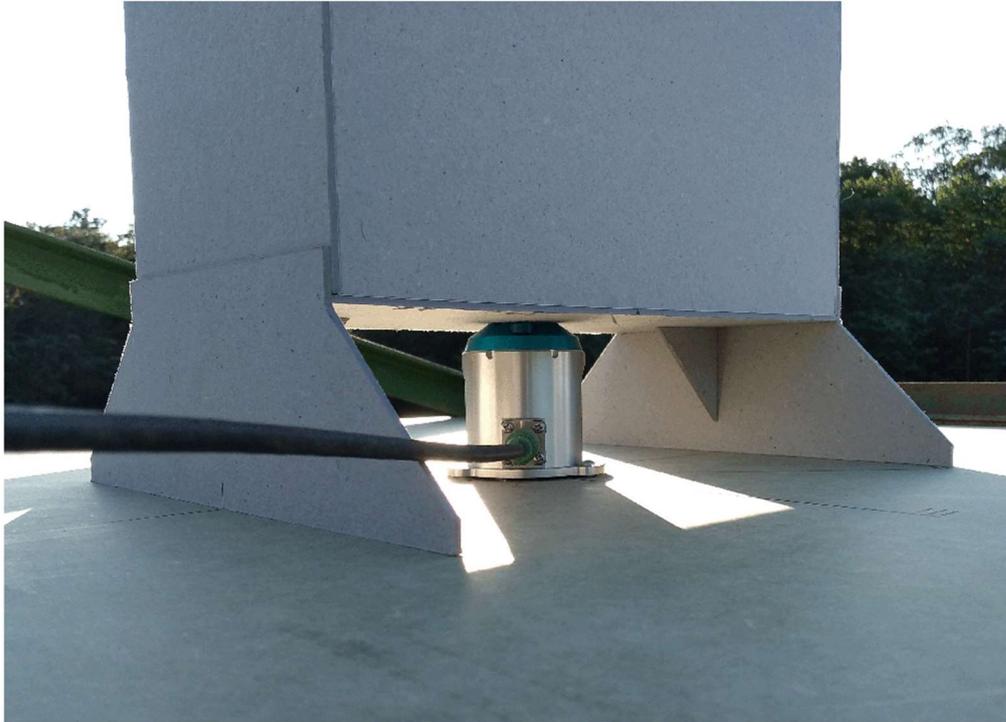
As faces internas do modelo são revestidas com o mesmo material, de modo a serem dotadas de iguais propriedades físicas. O papel casca de ovo que reveste as faces apresenta uma superfície rugosa que produz reflexões difusas e a cor do material - branca - reflete a maior quantidade de radiação.

Utilizando-se um piranômetro<sup>11</sup>, a geometria do modelo em escala acima (1:20), foi ensaiada, com vistas a projeção de luz, medindo-se a radiação no momento da projeção, procedimento detalhado mais adiante, na metodologia. Uma malha regular impressa sobre

<sup>11</sup>Instrumento para a medição da radiação solar hemisférica total (difusa e direta), normalmente em uma superfície horizontal (DUFFIE, 2013).

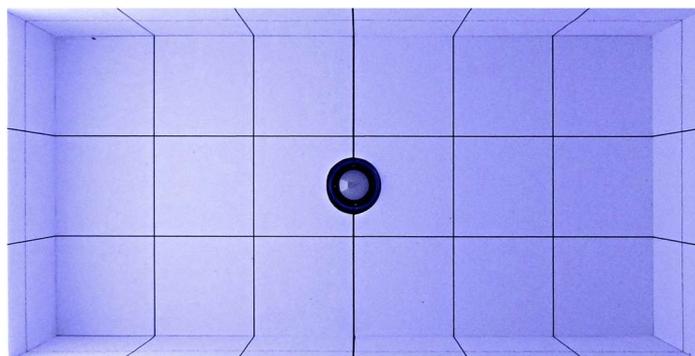
cada face serve como referência para a observação das áreas atingidas por radiação solar direta (Figura 22).

**Figura 22** - Modelo físico sobreposto ao piranômetro



Neste modelo, existem alguns elementos complementares à geometria base que viabilizam a coleta de dados com o piranômetro. Pedestais e um orifício incorporados à forma permitem que apenas o sensor do piranômetro penetre o interior do modelo, evitando assim interferências do corpo do instrumento nas medições (Figura 21). O orifício possui um diâmetro de 27mm, similar ao do sensor do piranômetro, e está posicionado no centro da face  $H_2$  (Figura 23).

**Figura 23** - interior do modelo físico: sensor do piranômetro nivelado e centralizado na face  $H_2$ .



O conjunto formado por modelo e piranômetro apoia-se sobre uma base plana quadrada, confeccionada em MDF, que permite a fixação do piranômetro, garantindo o nivelamento das partes, além de possibilitar a experimentação do modelo em qualquer orientação (Figura 24).

**Figura 24** - Base plana em MDF para apoio e nivelamento do conjunto.



## 2 METODOLOGIA

O estudo paramétrico é um complexo processo analítico de combinação de variáveis que propõe o cruzamento de resultados para estabelecimento de uma tipificação experimental, seja ela por simulação ou medição direta. Neste estudo, o cruzamento de experimentação foi dividido inicialmente em duas condições de modelagem:

- Cenários produzidos por modelo, aqui chamado “físico”; modelo em escala, representado por um paralelepípedo, aberto em uma das superfícies de fechamento — correspondente à porção de área da superfície aberta ao céu, com área igual e paralela a superfície correspondente ao piso do modelo — representando a geometria de um pátio de planta retangular, a uma determinada proporção (1X2x2);
- Cenários produzidos por modelo, aqui chamado “digital”, representado por um prisma semelhante ao “físico”, porém definido graficamente, com a mesma geometria (1X2X2).

Os modelos examinados reproduziram as condições de insolação do pátio em diferentes orientações, e em períodos de sol alto e baixo. Dois percursos do sol no hemisfério celeste determinaram um parâmetro, chamado aqui de Trajetória solar. A rotação do prisma em planta determinou o outro parâmetro, chamado Orientação, que permitiu a investigação de três diferentes orientações da forma. Avaliações horárias foram realizadas para as superfícies de piso e laterais.

Tais condições de cenários, como estudo de forma e luz, permitem uma matriz de combinação de parâmetros a seguir detalhada (Tabela 1). A tabela serve como uma matriz para a simulação e a medição, onde nas colunas estão; trajetória solar, alta correspondente ao dia de sol de verão e baixa correspondente a trajetória de sol baixo inverno. Foram alternadas as orientações das faces dos modelos, para efeitos de medição e simulação em três orientações que assim originaram três cenários para sol de trajetória alta (A<sub>I</sub>, A<sub>II</sub> e A<sub>III</sub>) e três cenários para sol de trajetória baixa (B<sub>I</sub>, B<sub>II</sub> e B<sub>III</sub>). A combinação desses dois parâmetros resultou em seis cenários de investigação, indicados na terceira coluna da tabela. Esses cenários foram designados por dois caracteres, cada qual correspondendo a um parâmetro.

Os algarismos romanos designam as orientações, sendo I correspondente à orientação N-S, II correspondente à orientação NE-SO, e III, à L-O.

**Tabela 1** - Matriz de parâmetros.

Trajectoria solar	Orientação	Cenário
Alta	N-S	<b>A<sub>I</sub></b>
	NE-SO	<b>A<sub>II</sub></b>
	L-O	<b>A<sub>III</sub></b>
Baixa	N-S	<b>B<sub>I</sub></b>
	NE-SO	<b>B<sub>II</sub></b>
	L-O	<b>B<sub>III</sub></b>

## 2.1 CENÁRIOS

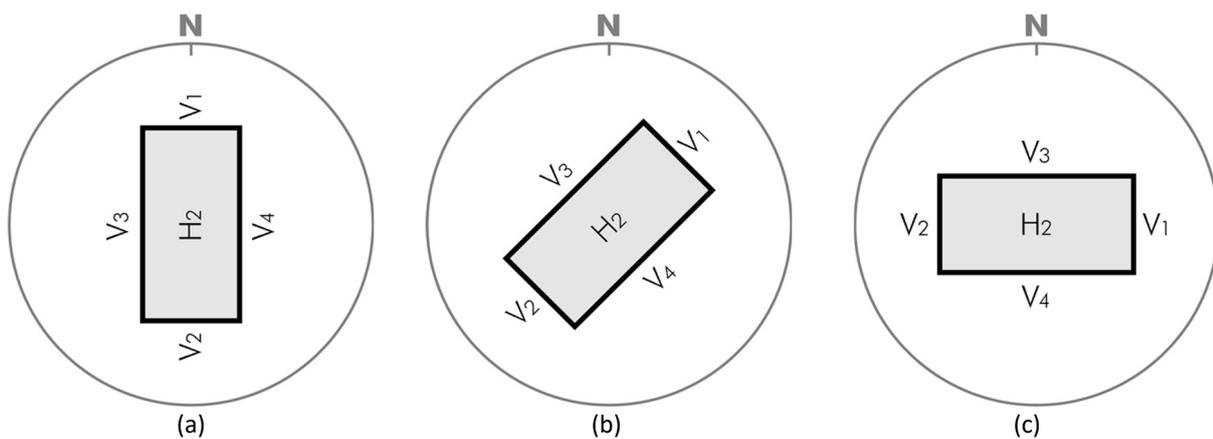
Os modelos investigados reproduzem cenários induzidos por dois parâmetros para a investigação da radiação solar sobre as faces componentes. O parâmetro, denominado Trajetória solar, refere-se ao percurso do sol no hemisfério celeste entre o nascer e o pôr-do-sol em data específica. O segundo parâmetro refere-se à orientação da forma estudada.

As duas posições do parâmetro trajetória solar correspondem, uma à trajetória solar mais alta do ano, e a outra, à trajetória mais baixa, as quais ocorrem, respectivamente, durante os dias 21 de dezembro e 21 de junho (Figura 14). Desse modo, os cenários são caracterizados, pelas posições solares que ocorrem durante o dia mais longo do ano e pelas posições solares que ocorrem durante o dia mais curto. Os cenários A<sub>I</sub>, A<sub>II</sub> e A<sub>III</sub> permitem a análise da radiação incidente durante o dia 21 de dezembro, oportunizando a avaliação dos modelos quando o sombreamento sobre as superfícies é o menor do ano. Os cenários reproduzidos para o dia mais curto oportunizam a avaliação dos modelos quando o sombreamento sobre as superfícies é o maior do ano.

As trajetórias que compõem os cenários foram determinadas pela geometria solar na região de Porto Alegre, cidade situada à Latitude 30°S. Os modelos foram vinculados a esta Latitude, reproduzindo os ângulos de azimute e altura solar próprios do céu da região.

O outro parâmetro que compõe os cenários, chamado Orientação, determina o azimute das faces verticais componentes do prisma, nomeadas  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$  (Figura 16). Cada face é exposta a diferentes regiões do céu nas diferentes orientações avaliadas. Desta maneira, cada face é exposta a diferentes posições solares e, conseqüentemente, a diferentes fluxos de radiação e a diferentes condições de sombreamento. A orientação do prisma é referenciada pela direção do eixo longitudinal da base. O parâmetro orientação abrangeu três posições para os eixos: Norte-Sul, Nordeste-Sudoeste e Leste-Oeste. Os diagramas na Figura 25 apresentam, em planta esquemática, o prisma nas diferentes orientações avaliadas e a posição relativa das faces componentes em cada orientação, com referência ao norte.

**Figura 25** - Orientações avaliadas e posição relativa das faces.



Na Figura 25; (a) o eixo longitudinal do prisma está alinhado com a direção N-S, (b), o eixo está alinhado com a direção NE-SO e (c), com a direção L-O.

A Tabela 2 apresenta o azimute assumido por cada face em cada cenário. Essa tabela serve para a avaliação comparativa entre as faces V (1, 2, 3 e 4) em um modelo, submetido aos diversos cenários em cada simulação ou medição. A primeira coluna apresenta os cenários, agrupados por orientação. As demais colunas apresentam o azimute das faces.

**Tabela 2** - Azimute da face em função do cenário.

Cenário	Azimute da face			
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>
<b>A<sub>I</sub> e B<sub>I</sub></b>	180°	0°	90°	270°
<b>A<sub>II</sub> e B<sub>II</sub></b>	225°	45°	135°	315°
<b>A<sub>III</sub> e B<sub>III</sub></b>	270°	90°	180°	0°

Os cenários foram investigados, hora a hora, no período em que o sol está acima da linha do horizonte no dia 21 de Dezembro na latitude 30°S, correspondendo ao período entre 6h e 18h. Assim, 13 horas foram avaliadas em cada cenário em dezembro e igualmente em junho, para a padronização dos resultados.

A tabela abaixo mostra a matriz para a apresentação de resultados obtidos para cada hora nos ensaios. Esta serve como referência comparativa das faces dos modelos ao longo do dia. Na primeira coluna é exibida a condição de modelagem, podendo ser modelo digital ou físico. Na segunda coluna é discriminado o cenário de avaliação, indicando a altura da trajetória solar e a orientação avaliada. Na terceira coluna são exibidas as faces que compõem o modelo. A quarta coluna apresenta a irradiação horária sobre cada face provocada pelos parâmetros indicados na segunda coluna.

**Tabela 3** - Irradiação horária sobre as faces verticais.

Modelo	Cenário	Face	Horas avaliadas
Digital	A <sub>I</sub>	V <sub>1</sub>	Irradiação solar
		V <sub>2</sub>	
		V <sub>3</sub>	
		V <sub>4</sub>	
		H <sub>2</sub>	

As horas ensaiadas foram dadas em hora solar verdadeira<sup>12</sup> para a correta correspondência entre horário e posição do Sol no céu. A conversão de hora legal para hora solar verdadeira foi feita com referência na passagem meridiana<sup>13</sup>. A tabela abaixo

<sup>12</sup> Horário baseado na trajetória aparente do sol, tendo como meio dia o momento de maior altura solar (DUFFIE, 2013).

<sup>13</sup> Passagem meridiana é o momento em que o sol cruza o meridiano local, equivalendo ao meio-dia solar (FROTA, 2004).

apresenta, em hora legal, o momento de maior altura solar, correspondente ao meio-dia local verdadeiro.

**Tabela 4** - Passagem meridiana do sol em Porto Alegre para o dia 21 de cada mês, em hora legal.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
12h36	12h38	12h32	12h23	12h21	12h26	12h31	12h28	12h17	12h09	12h10	12h22

Fonte: ANUÁRIO OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2019.

Os cenários são caracterizados pela presença de radiação direta para a reprodução da insolação sobre as faces e avaliação da radiação global na intensidade máxima disponível nos períodos avaliados. Por essa razão, todos os cenários reproduzem a condição de céu claro.

A radiação sobre o plano imaginário da abertura de cada modelo, denominado face  $H_1$  (Figura 16), também foi medida e estimada. A radiação sobre este plano não é afetada pela reflexão das faces em razão da posição relativa no modelo, compreendendo apenas as componentes direta e difusa da radiação em ambos os modelos. Assim, os dados obtidos para essa face são referenciais e servem como parâmetro de comparação entre modelos.

## 2.2 MODELO DIGITAL

Os dados oferecidos pelo modelo digital permitiram a análise das componentes direta e difusa isoladamente, já que esta condição de modelagem exclui a componente refletida. Este modelo permite a obtenção de dados estimativos para variadas condições, especificadas por um experimentador, por meio do ajuste de configurações computacionais. Assim, permite o controle das condições de experimentação e a investigação expedita para qualquer condição de céu, geometria solar, orientação da forma, em qualquer período do ano. Além disso, permite a investigação de qualquer face.

O modelo digital foi usado para a avaliação de todas as superfícies componentes da forma, verticais e horizontal, análogas tanto às paredes, quanto ao piso de um pátio, em todos os cenários de investigação, conforme resume a tabela abaixo:

**Tabela 5** - Cenários e faces investigados por meio do modelo digital.

Cenário	Face				
<b>A</b> , II, III	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>
<b>B</b> , II, III					

## 2.3 MODELO FÍSICO

O modelo físico, dotado de propriedades materiais, permitiu a avaliação das três componentes da radiação incidente: direta, difusa e refletida, esta última proveniente das superfícies envolventes. Os dados obtidos por meio deste modelo são medições da radiação sob as condições de um céu real. Assim, esses dados de radiação correspondem à interação entre forma, superfícies refletoras, geometria solar, e também condição de céu em um dia específico do ano.

A medição sob essas condições oferece dados da realidade, mas depende de períodos programados e de condições climáticas favoráveis para a realização das experimentações, fatores sobre os quais não se tem controle.

Além disso, a medição pontual, requer uma face em sombra durante todo o dia para resultados mais precisos, já que a radiação direta, só pode ser detectada no ponto de medição, no centro da face, negligenciando a presença desta componente nas outras regiões da mesma face. Outra limitação deste modelo é a restrição da medição instantânea de múltiplas faces, em razão do uso de um único piranômetro.

Assim, o modelo físico foi experimentado em um único dia, permitindo a avaliação de três dos seis cenários, aqueles induzidos pela trajetória solar baixa. Uma única superfície refletora foi avaliada com esse modelo para três cenários, conforme mostra a tabela abaixo:

**Tabela 6** - Cenários e faces investigados por meio do modelo físico.

Cenário	Face
<b>B</b> , II, III	H <sub>2</sub>

## 2.4 EXPERIMENTAÇÕES

As experimentações realizadas com os modelos de análise provocaram distintos estados no sistema de faces, análogo às superfícies refletoras que envolvem um pátio. O registro desses estados foi feito por meio da coleta de dados de radiação e de imagens das faces dos modelos em cada cenário avaliado.

A seguir serão descritos os procedimentos adotados nas experimentações com cada modelo. Os dados coletados em cada experimento foram organizados em planilhas criadas com o software Excel 2007, que também foi utilizado para automatizar os cálculos da radiação incidente sobre as faces dos modelos explicados a seguir.

### 2.4.1 MODELO DIGITAL

O experimento com o modelo digital consistiu em uma simulação computacional para a obtenção de estimativas da radiação incidente sobre as faces do modelo. Nessa simulação foram utilizados dados do software Luz do Sol<sup>14</sup> e o ambiente do software SketchUP. O SketchUP foi utilizado para determinar as áreas atingidas por radiação direta e para estimar a porção de céu visível a partir de cada face do modelo. O Luz do Sol forneceu os dados de radiação solar sobre superfícies com diferentes azimutes e inclinações. Dimensões foram atribuídas ao modelo para permitir o cômputo da área das superfícies nos experimentos. A dimensão de 3m foi adotada para a largura, resultando em uma forma com 6m de altura e 6m de comprimento.

Assim, a radiação incidente sobre as faces do modelo foi estimada a partir dos seguintes dados obtidos nesse experimento:

1. Irradiação direta sobre o plano vertical para oito azimutes e sobre plano horizontal ( $Wh/m^2$ );
2. Irradiação difusa sobre os planos vertical e horizontal ( $Wh/m^2$ );
3. Áreas atingidas por radiação direta em cada face do modelo ( $m^2$ );

<sup>14</sup>O *software* oferece estimativas da irradiância global para o plano horizontal e para planos verticais com qualquer azimute, para qualquer latitude e para todas as horas de qualquer dia do ano (RORIZ, 1995).

4. Fator de visão do céu médio<sup>15</sup> para cada face do modelo (%);

O cálculo da radiação direta sobre as faces do modelo consistiu no produto entre a irradiação direta (Wh/m<sup>2</sup>) e a área atingida por radiação direta (m<sup>2</sup>). A radiação difusa incidente foi determinada em função da porção de hemisfério celeste visível a partir de cada face (MACGNAN, 2010). O cálculo da componente difusa consistiu no produto entre a área total da face (m<sup>2</sup>), a irradiação difusa (Wh/m<sup>2</sup>), e o fator de visão do céu (FVC) médio da face. A quantidade de radiação global sobre cada face foi obtida pela soma das componentes direta e difusa exclusivamente, já que neste modelo a componente refletida é desconsiderada. A consideração de múltiplas reflexões entre as superfícies acrescenta um grau de complexidade que se pretendeu evitar, sendo a desconsideração da componente refletida uma limitação do modelo digital.

A equação abaixo descreve o cômputo da radiação solar global incidente sobre cada face do modelo a cada hora:

$$Q = A_{DR} \cdot I_{DR} + A_{FACE} \cdot I_{DF} \cdot V$$

Q            Quantidade de radiação global incidente (Wh)

A<sub>DR</sub>        Área exposta à radiação direta (m<sup>2</sup>)

A<sub>FACE</sub>      Área total da face (m<sup>2</sup>)

I<sub>DR</sub>        Irradiação direta (Wh/m<sup>2</sup>)

I<sub>DF</sub>        Irradiação difusa (Wh/m<sup>2</sup>)

V            Fator de visão do céu médio da face

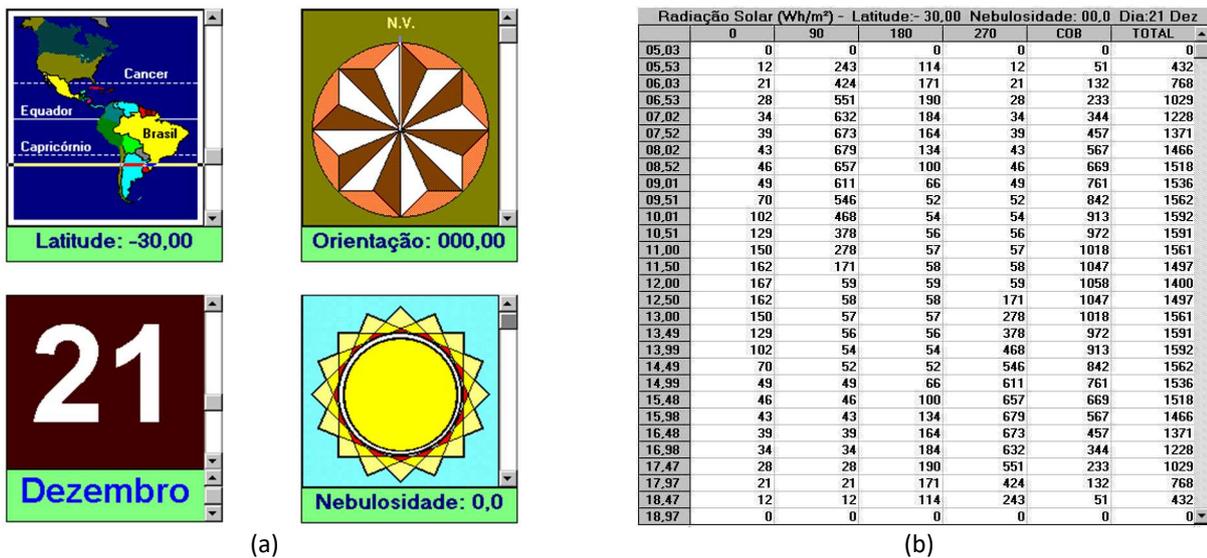
A irradiação resultante sobre cada face (Wh/m<sup>2</sup>) foi obtida pela divisão da quantidade de radiação (Wh) pela área da face (m<sup>2</sup>).

Os dados de irradiação solar estimados com o *software* Luz do Sol foram colhidos considerando-se as duas datas investigadas, a latitude 30°S, e a ausência de nebulosidade.

<sup>15</sup>Fator de visão do céu é um parâmetro que representa a fração de céu visível a partir de um ponto. O valor do FVC varia entre 0 e 1, sendo que 1 correspondente a uma área sem qualquer obstáculo interposto entre o ponto escolhido e o céu.

Desta forma foram obtidos os valores teóricos de irradiação global sobre planos verticais para oito azimutes e também sobre plano horizontal, na condição de céu claro, para dois dias do ano, na região de Porto Alegre. A Figura 26 apresenta os dados de entrada e de saída do software.

Figura 26 - Dados de entrada (a) e de saída (b) do software Luz do Sol.



Os dados de saída do software informam a irradiância solar em intervalos de 30 minutos entre o nascer e o pôr-do-sol (Figura 26b). Foram adotados neste estudo valores em intervalos de uma hora. A irradiação global estimada pelo software foi decomposta em componente direta e componente difusa. Para isso foram utilizados como referência valores de radiação difusa informados para planos sem insolação. Esses valores foram subtraídos dos valores de radiação global, resultando nos valores de radiação direta.

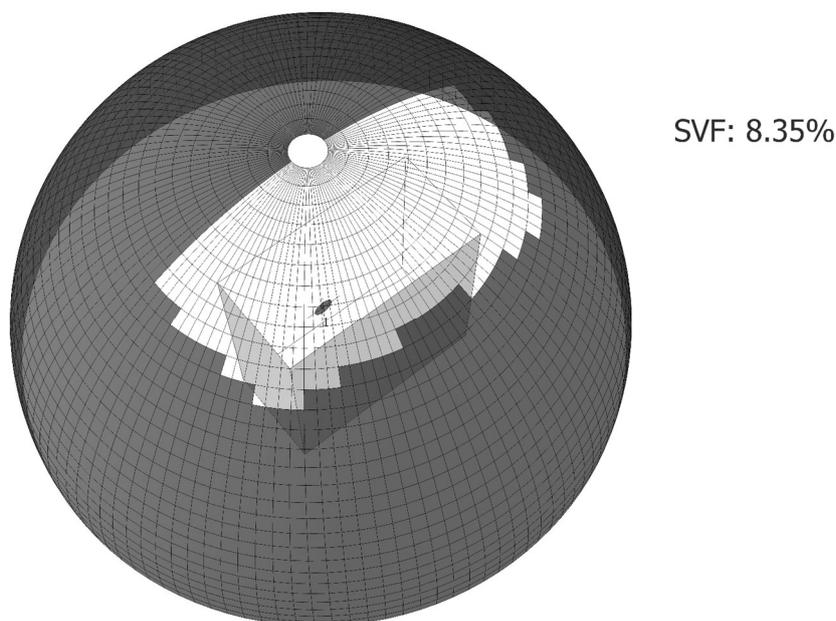
A área atingida por radiação direta em cada face foi conhecida por meio da simulação da insolação sobre as faces do modelo. Para a simulação das trajetórias aparentes do sol correspondentes à região de Porto Alegre, o modelo computacional foi georreferenciado, sendo vinculado à latitude 30°S. A área exposta à radiação direta sobre cada face foi registrada com o desenho de um polígono sobre os limites da região atingida a cada hora. O processo foi repetido para as 13 horas do dia examinadas.

Para o cálculo da radiação difusa sobre cada face considerou-se o modelo de céu isotrópico. Desta maneira, a irradiação difusa pode ser estimada em função da parcela de

céu visível a partir da superfície atingida, ou fator de visão do céu (FVC ou SVF, do inglês, *Sky View Factor*)(MACAGNAN, 2010). O modelo de céu isotrópico<sup>16</sup> foi utilizado para simplificar a investigação da radiação incidente ao mesmo tempo que não afeta significativamente os resultados, considerando que, na condição de céu claro, a radiação difusa tem a menor influência no cômputo da radiação global.

O fator de visão do céu médio para cada face do modelo foi estimado com o plugin para SketchUP Chronolux 1.2. O plugin apresenta resultados numéricos e gráficos de FVC para qualquer ponto em um modelo. A Figura 27 mostra o FVC obtido com o plugin para um ponto sobre uma face do modelo. Na figura, o modelo aparece sob uma semi-esfera que representa o hemisfério celeste. A região em cinza indica a porção de céu obstruída enquanto que a região em branco indica a porção de céu visível. Os dados numéricos são fornecidos em percentual.

**Figura 27** - Percentual de céu visível a partir de um ponto sobre uma face do modelo.

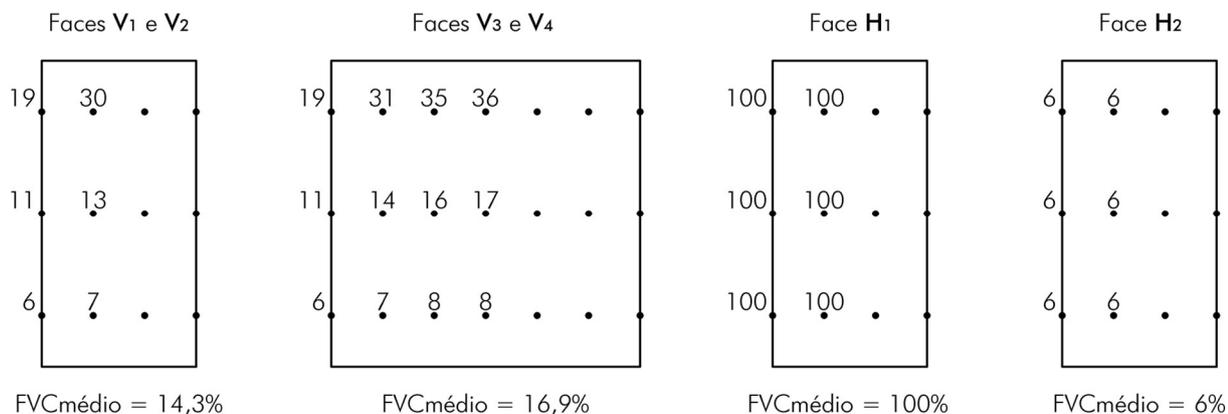


O FVC médio foi calculado considerando o percentual de céu visível a partir de pontos distribuídos sobre cada face. A Figura 28 exibe a malha de pontos de medição do FVC

<sup>16</sup>Neste modelo de céu a quantidade de radiação difusa sobre uma superfície independe da orientação. É um modelo de fácil compreensão que simplifica o cálculo da radiação sobre superfícies inclinadas, porém tende a subestimar a quantidade de radiação difusa incidente (DUFFIE, 2013).

sobre cada face componente do modelo. Sobre cada ponto está indicado o FVC correspondente e, sob cada face, o valor médio encontrado.

**Figura 28** - FVC (%) para pontos distribuídos em cada face do modelo e FVC médio (%) de cada face.



O modelo digital foi ensaiado para a trajetória solar mais alta e para a mais baixa do ano em três orientações. Assim, os ensaios compreendem os cenários A<sub>I, II, III</sub>; e B<sub>I, II, III</sub>. Estimativas para todas as faces do modelo foram obtidas conforme a Tabela 5.

## 2.4.2 MODELO FÍSICO

O experimento foi realizado em Porto Alegre, nas dependências do LABSOL<sup>17</sup>, cujas coordenadas geográficas são 30°04'29"S 51°07'33"W. Para a condução do experimento, o modelo foi instalado sobre uma plataforma giratória suspensa, previamente alinhada aos pontos cardeais. A plataforma suspensa permitiu a elevação do modelo a 4m do solo com a finalidade de reduzir possíveis interferências de objetos do entorno natural e construído na radiação incidente (Figura 29). Montanhas, árvores e edificações nas cercanias podem afetar a radiação incidente atuando como obstruções do sol e do céu (SZOKOLAY, 2014).

<sup>17</sup>Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Figura 29 - Modelo posicionado sobre plataforma giratória suspensa.



Os seguintes dados foram coletados no experimento:

1. Irradiância global sobre um plano horizontal<sup>18</sup> (W/m<sup>2</sup>);
2. Irradiância global sobre a face horizontal do modelo (W/m<sup>2</sup>);
3. Fotografia das faces do modelo e fotografias panorâmicas do céu.

A medição da radiação solar foi feita com o piranômetro MS-80 da fabricante Eko (Figura 30). O instrumento foi programado para executar medições em intervalos de quatro segundos.

<sup>18</sup>Superfície livre de obstruções com inclinação nula.

**Figura 30** - Piranômetro MS-80 Eko.



A medição foi realizada em quatro partes na seguinte ordem: primeiramente para a face  $H_1$ , depois para a face  $H_2$  no cenário  $B_I$ , no cenário  $B_{II}$  e no cenário  $B_{III}$ . Para isso a medição foi iniciada com o sensor do piranômetro livre de obstruções (Figura 24), sendo os dados coletados na primeira medição referentes à face  $H_1$ . Na segunda, terceira e quarta partes da medição o modelo esteve encaixado sobre o piranômetro (Figura 22), alterando-se a orientação do mesmo, permitindo a coleta de dados correspondentes aos cenários  $B_I$ ,  $B_{II}$ ,  $B_{III}$ . Os dados coletados nestas medições referem-se à face  $H_2$ . As medições foram intercaladas com a obstrução total do sensor por meio do tamponamento da abertura do modelo. Essa obstrução do sensor provocou interrupções nas medições e, conseqüentemente, intervalos que registram as mudanças de orientação do modelo durante o experimento, possibilitando assim a leitura dos dados coletados para cada face e cenário.

A medição para cada cenário, bem como cada obstrução do sensor do piranômetro foi mantida por um período de cerca de 25 segundos. Em cada um desses períodos, o piranômetro realizou cerca de seis coletas, sendo adotado o valor médio.

O registro fotográfico das faces do modelo e do céu foi feito imediatamente após as medições. As fotografias do modelo ilustram a exposição das faces à radiação direta, bem

como regiões com diferentes intensidades de brilho. As fotografias do céu mostram as condições de nebulosidade (Anexo II).

O modelo físico foi ensaiado unicamente para a trajetória solar mais baixa do ano, em três orientações. Assim, os ensaios compreendem os cenários B<sub>I, II, III</sub> conforme Tabela 6. Nas medições foram coletados dados para as faces H<sub>1</sub> e H<sub>2</sub>.

### 3 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos nas experimentações usando a matriz de parâmetros proposta na metodologia de investigação, capítulo anterior Metodologia, Tabela 1, onde estão presentes considerações sobre forma e luz, no âmbito deste trabalho, radiações simuladas e medidas, por meio dos dois modelos. Os resultados demonstrados nas tabelas permitem a discussão, no próximo capítulo, para a indicação de critérios de projeto, em etapas iniciais de composição dos espaços circundantes e do próprio acesso de radiação através do pátio e sua geometria e orientação solar.

Os valores obtidos, considerando-se a tipificação, correspondem às diferentes intensidades de energia sobre superfícies verticais e horizontal, as quais envolvem e definem o recinto em um pátio. Esses fluxos de energia resultam do percurso solar no hemisfério celeste, bem como da orientação e proporções geométricas da forma estudada.

Os dados exibidos nas tabelas a seguir correspondem à energia recebida pelas faces a cada hora, ou durante o período de um dia. Essas tabelas permitem a comparação dos valores de radiação ao longo do dia, identificando e tipificando o pátio com relação a forma dos modelos, em planta e altura, que produz sombreamento originado pelas superfícies verticais circundantes  $V_{(1, 2, 3, 4)}$ . Isto para as condições de sol alto ou baixo o que permite o estabelecimento de correlação entre o movimento do sol e as proporções geométricas dos modelos para a investigação da luz e da forma.

#### 3.1 MODELO DIGITAL

Os resultados abaixo são estimativas obtidas com o modelo digital para todas as faces componentes, para os seis cenários investigados. Os valores incluem as componentes direta e difusa da radiação solar, sendo a componente refletida desconsiderada nesses resultados, uma vez que o modelo digital não reproduz reflexões. Desse modo, a energia estimada sobre cada face é proveniente do sol e do céu, exclusivamente.

A Tabela 7, a seguir, apresenta os valores de radiação obtidos nos diferentes cenários, resultantes da exposição das superfícies verticais, equivalentes às paredes do

pátio. São apresentados na tabela dados de irradiação horária, que permitem a comparação das intensidades de radiação solar, por unidade de área, nas diferentes horas do dia.

**Tabela 7 - Irradiação horária sobre as faces verticais (Wh/m<sup>2</sup>).**

Modelo	Cenário	Face	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h
Digital	<b>A<sub>I</sub></b>	V <sub>1</sub>	11	21	23	12	8	8	8	8	8	12	23	21	11
		V <sub>2</sub>	3	5	6	7	31	78	116	78	31	7	6	5	3
		V <sub>3</sub>	43	134	237	336	398	219	10	10	9	8	7	6	4
		V <sub>4</sub>	4	6	7	8	9	10	10	219	398	336	237	134	43
	<b>A<sub>II</sub></b>	V <sub>1</sub>	3	5	6	7	8	8	8	77	162	182	166	119	51
		V <sub>2</sub>	13	45	96	161	229	208	78	8	8	7	6	5	3
		V <sub>3</sub>	43	122	201	259	216	90	10	10	9	8	7	6	4
		V <sub>4</sub>	4	6	7	8	9	10	83	221	283	251	167	86	23
	<b>A<sub>III</sub></b>	V <sub>1</sub>	3	5	6	7	8	8	8	207	396	556	416	211	59
		V <sub>2</sub>	59	211	416	556	396	207	8	8	8	7	6	5	3
		V <sub>3</sub>	20	40	41	18	9	10	10	10	9	18	41	40	20
		V <sub>4</sub>	4	6	7	8	45	91	118	91	45	8	7	6	4
	<b>B<sub>I</sub></b>	V <sub>1</sub>	0	0	3	4	5	6	6	6	5	4	3	0	0
		V <sub>2</sub>	0	0	18	63	151	316	481	316	151	63	18	0	0
		V <sub>3</sub>	0	0	38	90	114	75	7	7	6	5	3	0	0
		V <sub>4</sub>	0	0	3	5	6	7	7	75	114	90	38	0	0
	<b>B<sub>II</sub></b>	V <sub>1</sub>	0	0	3	4	5	6	6	6	5	4	6	0	0
		V <sub>2</sub>	0	0	73	230	280	215	125	65	26	5	3	0	0
		V <sub>3</sub>	0	0	10	5	6	7	7	7	6	5	3	0	0
		V <sub>4</sub>	0	0	3	7	48	126	186	201	175	120	43	0	0
	<b>B<sub>III</sub></b>	V <sub>1</sub>	0	0	3	4	5	6	6	39	62	59	31	0	0
		V <sub>2</sub>	0	0	31	59	62	39	6	6	5	4	3	0	0
		V <sub>3</sub>	0	0	3	5	6	7	7	7	6	5	3	0	0
		V <sub>4</sub>	0	0	30	92	160	214	245	214	160	92	30	0	0

A Tabela 8, abaixo, exibe a irradiação horária sobre a face H<sub>2</sub>, superfície horizontal do modelo, equivalente ao piso de um pátio. A tabela permite a comparação das intensidades de energia, por unidade de área, em diferentes horas do dia.

**Tabela 8** - Irradiação horária sobre a face H<sub>2</sub> (Wh/m<sup>2</sup>) do modelo digital.

Modelo	Cenário	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h
Digital	<b>A<sub>I</sub></b>	3	5	6	7	8	420	839	420	8	7	6	5	3
	<b>A<sub>II</sub></b>	3	5	6	7	178	550	729	420	106	7	6	5	3
	<b>A<sub>III</sub></b>	3	5	6	99	347	550	734	550	347	99	6	5	3
	<b>B<sub>I</sub></b>	0	0	3	4	5	6	6	6	5	4	3	0	0
	<b>B<sub>II</sub></b>	0	0	3	4	5	6	6	6	5	4	3	0	0
	<b>B<sub>III</sub></b>	0	0	3	4	5	6	6	6	5	4	3	0	0

A Tabela 9 exibe a irradiação horária sobre a face H<sub>1</sub>, que corresponde ao plano imaginário da abertura do modelo. A energia estimada sobre esta face corresponde àquela que ingressa no recinto do pátio. A tabela mostra as diferentes intensidades de energia por unidade de área ao nível da abertura, ao longo do dia.

**Tabela 9** - Irradiação horária sobre a face H<sub>1</sub> (Wh/m<sup>2</sup>) do modelo digital.

Modelo	Cenário	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h
Digital	<b>A<sub>I, II, III</sub></b>	132	344	567	761	913	1018	1058	1018	913	761	567	344	132
	<b>B<sub>I, II, III</sub></b>	0	0	122	289	435	530	563	530	435	289	122	0	0

As tabelas a seguir apresentam valores diários de irradiação solar. Os valores correspondem à energia recebida durante o período de 13 horas. A Tabela 10 apresenta os valores estimativos para a irradiação diária sobre cada face vertical. Esta equivale à energia, por unidade de área, que chega a uma superfície vertical em um pátio no período entre o nascer e o pôr-do-sol.

**Tabela 10** - Irradiação diária sobre as faces verticais (Wh/m<sup>2</sup>).

Modelo	Cenário	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>
Digital	<b>A<sub>I</sub></b>	175	375	1.420	1.420
	<b>A<sub>II</sub></b>	800	866	985	1.158
	<b>A<sub>III</sub></b>	1.889	1.889	286	440
	<b>B<sub>I</sub></b>	42	1.575	346	346
	<b>B<sub>II</sub></b>	46	1.022	58	908
	<b>B<sub>III</sub></b>	215	215	52	1.235

A Tabela 11 apresenta a irradiação diária sobre a face H<sub>2</sub>, que equivale à energia por unidade de área que atinge a face horizontal, ou piso de um pátio, no período entre o nascer e o pôr-do-sol.

**Tabela 11** - Irradiação diária sobre a face H<sub>2</sub> (Wh/m<sup>2</sup>) do modelo digital.

Modelo	Cenário	H <sub>2</sub>
Digital	<b>A<sub>I</sub></b>	1.734
	<b>A<sub>II</sub></b>	2.024
	<b>A<sub>III</sub></b>	2.755
	<b>B<sub>I</sub></b>	42
	<b>B<sub>II</sub></b>	42
	<b>B<sub>III</sub></b>	42

A Tabela 12, abaixo, exibe a irradiação diária sobre a face H<sub>1</sub>, correspondente à energia total disponível sobre o plano da abertura, por unidade de área, entre o nascer e o pôr-do-sol.

**Tabela 12** - Irradiação diária sobre a face H<sub>1</sub> (Wh/m<sup>2</sup>) do modelo digital.

Modelo	Cenário	H <sub>1</sub>
Digital	<b>A<sub>I, II, III</sub></b>	8.528
	<b>B<sub>I, II, III</sub></b>	3.315

Na tabela 13 é apresentada a quantidade diária de radiação (Wh). Esta é a quantidade total de energia que atinge as superfícies, considerando-se a área de cada uma. São apresentados dados para a face  $H_1$ , equivalente ao plano imaginário da abertura do modelo, e também é apresentado o somatório da energia sobre as faces verticais e horizontal, análogas às paredes e ao piso de um pátio, correspondendo à toda a superfície que envolve o recinto. Os dados estão separados em componente direta e difusa e permitem a comparação entre a energia que ingressou no modelo através do plano da abertura com a energia que atingiu as demais faces.

**Tabela 13** - Quantidade de radiação direta e difusa sobre a face  $H_1$  (plano da abertura) e sobre o conjunto das faces  $V_{(1, 2, 3, 4)}$  e  $H_2$  (Wh).

	Cenário	Radiação Direta		Radiação Difusa	
		$H_1$	$V_1+V_2+V_3+V_4+H_2$	$H_1$	$V_1+V_2+V_3+V_4+H_2$
Digital	<b>A<sub>I, II, III</sub></b>	132.804	132.008	20.700	11.385
	<b>B<sub>I, II, III</sub></b>	48.762	48.793	10.908	5.999

### 3.2 MODELO FÍSICO

Os resultados abaixo foram obtidos por meio de medições sobre as faces  $H_1$  e  $H_2$  do modelo físico. As medições foram realizadas unicamente para a trajetória solar mais baixa do ano, correspondente aos cenários  $B_{I, II, III}$ .

Os valores exibidos nas tabelas abaixo incluem as três componentes da radiação solar, direta, difusa e refletida. Desse modo, a energia medida sobre a face horizontal é proveniente do sol, do céu, e da reflexão pelas demais faces.

As tabelas 14 e 15 apresentam, respectivamente, a irradiação horária sobre as faces  $H_2$  e  $H_1$ . Os dados permitem a comparação das diferentes intensidades da energia, por unidade de área, tanto sobre o piso, como sobre a abertura do pátio.

**Tabela 14** - Irradiação horária sobre a face horizontal ( $H_2$ ) ( $Wh/m^2$ ) do modelo físico.

Modelo	Cenário	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h
Físico	<b>B<sub>I</sub></b>	0	0	54	96	145	230	240	206	153	144	54	0	0
	<b>B<sub>II</sub></b>	0	0	57	102	161	207	200	175	141	135	55	0	0
	<b>B<sub>III</sub></b>	0	0	48	91	147	191	188	164	145	144	57	0	0

**Tabela 15** - Irradiação horária sobre a face  $H_1$  ( $Wh/m^2$ ) do modelo físico.

Modelo	Cenário	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h
Digital	<b>B<sub>I, II, III</sub></b>	0	0	136	271	463	583	547	525	457	424	164	0	0

As Tabela 16 e 17, abaixo, apresentam, respectivamente, a irradiação diária sobre a face  $H_2$  e  $H_1$ . Esta equivale à energia, por unidade de área, que chega ao piso em um pátio no período entre o nascer e o pôr-do-sol.

**Tabela 16** - Irradiação diária sobre a face horizontal ( $H_2$ ) ( $Wh/m^2$ ) do modelo físico.

Modelo	Cenário	$H_2$
Físico	<b>B<sub>I</sub></b>	1.322
	<b>B<sub>II</sub></b>	1.233
	<b>B<sub>III</sub></b>	1.175

**Tabela 17** - Irradiação diária sobre a face horizontal ( $H_1$ ) ( $Wh/m^2$ ) do modelo físico.

Modelo	Cenário	$H_1$
Físico	<b>B<sub>I, II, III</sub></b>	3.570

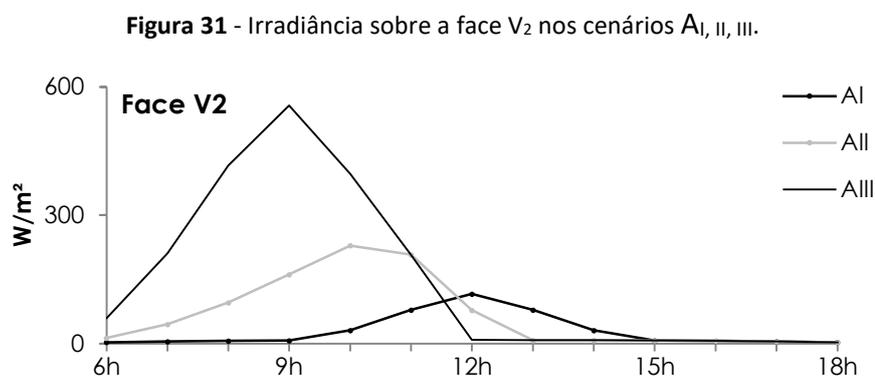
## 4 DISCUSSÃO

A seguir são feitas as discussões dos resultados obtidos, como apresentados no capítulo anterior, onde estão presentes considerações sobre forma e luz, no âmbito deste trabalho, radiações estimadas e medidas, por meio dos dois modelos. A discussão é feita com base nos parâmetros apontados na matriz de parâmetros. Essa discussão tem por objetivo evidenciar as relações que a geometria do pátio e a geometria do movimento aparente do sol guardam entre si, para a composição de um pátio com os espaços que circundam esse, diante de uma variedade de organizações possíveis.

### 4.1 MODELO DIGITAL

A irradiação sobre as faces verticais do modelo variou conforme a orientação. Tanto nos cenários A<sub>I, II, III</sub>, como nos cenários B<sub>I, II, III</sub> foram observados diferentes valores para uma mesma hora do dia (Tabela 7). Ao mesmo tempo, os valores de irradiação sobre o plano imaginário da abertura (H<sub>1</sub>) são os mesmos em B<sub>I, II, III</sub> (Tabela 9), já que se trata de uma superfície horizontal. Isto significa que as faces verticais receberam uma parcela maior ou menor daquela energia que ingressou através da abertura nos três cenários.

Além de diferentes intensidades de energia a cada hora, a orientação também afeta a distribuição temporal desta energia sobre cada face. O gráfico na Figura 31 descreve essa distribuição dos fluxos de energia tomando como exemplo a face V<sub>2</sub>, quando esta assume os azimutes 0° (A<sub>I</sub>), 45° (A<sub>II</sub>) e 90° (A<sub>III</sub>), durante a trajetória solar mais alta. Os dados no gráfico foram extraídos da Tabela 7.



Observa-se que em  $A_I$ , os fluxos de energia estão divididos igualmente entre manhã e tarde, sendo a maior intensidade observada ao meio-dia; em  $A_{II}$ , a face recebe quase toda a energia no período da manhã, com as maiores intensidades observadas entre 10h e 11h; e em  $A_{III}$ , a maior intensidade foi observada às 9h.

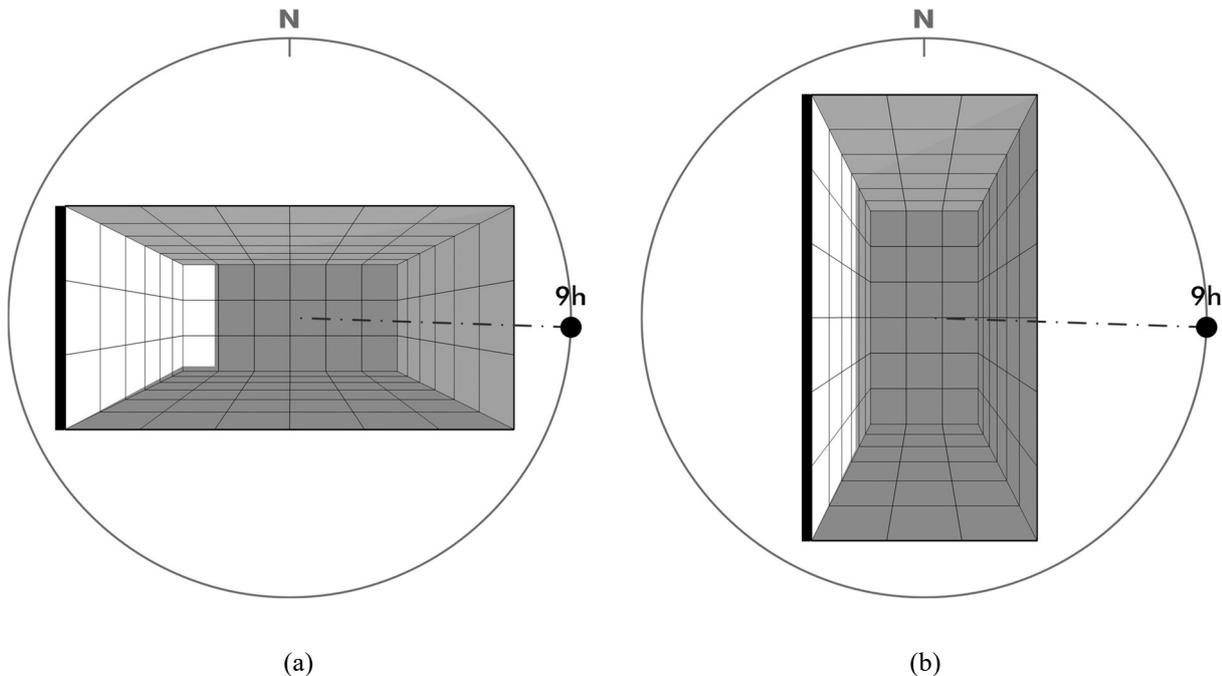
Considerando-se o período de um dia, a energia sobre a face  $V_2$  foi menor em  $A_I$ , e maior em  $B_I$  (Tabela 10). Nos cenários  $A_{III}$  e  $B_{III}$  ocorreu o inverso. Portanto, a orientação do pátio oportuniza o incremento ou a redução do calor e da luz sobre uma superfície vertical. Este incremento ou redução pode ser produzido considerando-se uma hora do dia, um período do dia ou um período do ano - manhã ou tarde, inverno ou verão. A luz e o calor sobre as superfícies, afetados pela orientação do pátio, corresponde à componente direta da radiação, proveniente do disco solar, que é vetorial (SZOKOLAY, 2014). A radiação difusa sobre as faces não é alterada pelo parâmetro orientação, considerando-se o modelo de céu isotrópico adotado nas experimentações.

Essas diferentes intensidades provocadas pela orientação da forma podem ser critério para decisões de projeto dos paramentos verticais em um pátio, considerando a quantidade de luz e calor disponível sobre cada face e a necessidade de reflexão da luz para a iluminação do próprio recinto ou de espaços adjacentes. Essas decisões podem ser de ordem formal, determinando, por exemplo, o posicionamento de aberturas ou outros elementos; de ordem programática, relativas à organização das funções adjacentes ao recinto do pátio; de ordem de materialidade, relativa às propriedades físicas das superfícies envolventes; além de outras.

As proporções geométricas do pátio e o sombreamento resultante também afetam a energia sobre os paramentos verticais. Observou-se que as faces verticais  $V_{1,2}$  receberam quantidades de energia diferentes daquelas recebidas pelas faces  $V_{3,4}$ , mesmo quando ensaiadas com igual azimute. Como exemplo, quando normal ao azimute solar,  $V_2$  recebeu maior quantidade de energia do que  $V_3$ . A irradiância sobre  $V_2$ , normal ao azimute solar, às 9h, para trajetória solar alta, foi de  $556 \text{ W/m}^2$ , enquanto sobre  $V_3$ , em igual circunstância, foi de  $336 \text{ W/m}^2$  (Tabela 7). O mesmo foi observado para a trajetória solar baixa. Neste caso, a irradiância sobre  $V_2$  foi de  $230 \text{ W/m}^2$ , enquanto que sobre  $V_3$ , foi de  $120 \text{ W/m}^2$  (Tabela 7). Isto ocorre em razão do maior afastamento entre as faces  $V_{1,2}$ , que provocou a exposição de toda a superfície ao sol (Figura 32a). O menor afastamento entre as faces  $V_{3,4}$  resultou na

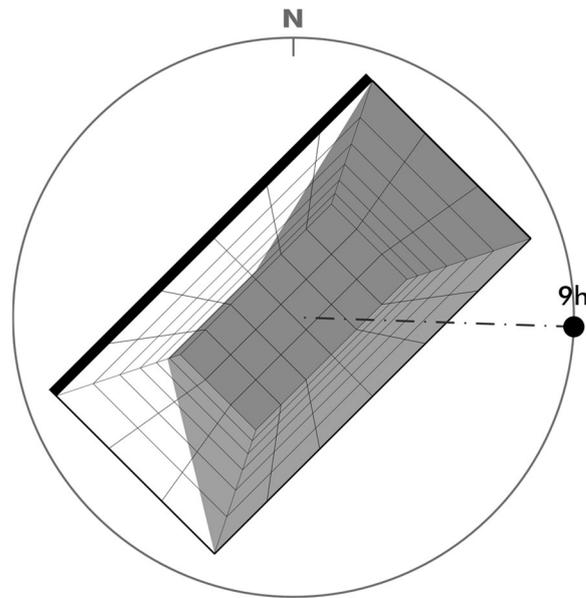
exposição de uma parcela menor da superfície ao sol, cerca de 60%, e assim, menor irradiância (Figura 32b). A Figura abaixo mostra a insolação sobre as faces  $V_2$  e também sobre  $V_3$ , quando ambas estão orientadas ao azimute solar, neste caso, às 9h, em 21 de dezembro.

**Figura 32** - Insolação sobre faces verticais quando normais ao azimute solar (9h): (a)  $V_2$  em  $A_{III}$ ; (b)  $V_3$  em  $A_I$ .



O oposto ocorreu quando o azimute solar e o azimute da face formaram ângulos próximos de  $45^\circ$ . Nessa situação, a irradiância foi maior sobre  $V_3$  que teve exposta uma parcela maior da superfície, cerca de 60%, enquanto que  $V_2$  teve apenas cerca de 40% da superfície exposta ao sol (Figura 33). Isto mostra que, além da orientação, é possível aumentar ou diminuir a irradiância sobre uma superfície vertical em determinado horário do dia por meio do controle das proporções geométricas do pátio, mais especificamente, por meio das relações entre largura e comprimento.

**Figura 33** - Insolação sobre faces  $V_2$  e  $V_3$  quando oblíquas ao azimute solar (9h), no cenário  $A_{II}$ .



A irradiação sobre a face horizontal do modelo ( $H_2$ ) também variou conforme a orientação. Nos cenários  $A_I$ ,  $A_{II}$ ,  $A_{III}$ , os fluxos de radiação sobre a face apresentam um padrão semelhante ao observado sobre o plano imaginário da abertura ( $H_1$ ), com os valores mais altos ocorrendo nos horários próximos ao meio-dia (Tabela 8). Entretanto, enquanto na face  $H_1$ , que é livre de obstruções, os valores aumentam gradualmente desde a primeira hora da manhã (Tabela 9), na face  $H_2$ , isso ocorre a partir das 10h, aproximadamente. A razão para isso é o sombreamento total ou parcial da face horizontal nas primeiras horas da manhã e nas últimas da tarde ocasionado pelas faces verticais. No cenário  $A_I$  a face foi exposta pelo menor período, e no cenário  $A_{III}$ , pelo maior período (Anexo I). Isto resultou em um incremento de cerca de 60% na energia recebida ao longo de todo o dia, variação percentual entre  $1.734 \text{ Wh/m}^2$  e  $2.755 \text{ Wh/m}^2$  (Tabela 11). Assim, para trajetórias solares altas, a orientação da forma é importante para um controle da radiação sobre o piso do pátio.

Durante a trajetória solar mais baixa do ano, não há insolação sobre a face horizontal do modelo. Em razão disso, intensidades reduzidas de energia foram observadas nos cenários  $B_I$ ,  $B_{II}$ ,  $B_{III}$  (Tabela 8). Os valores correspondem à radiação proveniente do céu, cuja visão a partir desta face é restrita. Isto se deve à geometria e proporções da forma estudada ( $1 \times 2 \times 2$ ), de altura maior que a largura, cujas faces verticais reduzem a exposição da face  $H_2$  ao céu. A contribuição da componente difusa sobre a face  $H_2$  é mínima já que cerca de apenas 6% do hemisfério celeste é visível a partir de pontos sobre a face  $H_2$  (Figura 28). Isto

sugere que, na ausência de radiação direta, a proporção da forma, principalmente a altura, é importante para a quantidade de luz chegue nas regiões mais baixas dos pátios.

A radiação estimada sobre a face  $H_1$  equivale à energia que ingressa pela abertura em um pátio. Os dados na Tabela 12 mostram que durante a trajetória solar baixa o fluxo de radiação ao nível da abertura é cerca de 60% menor do que durante a alta. Assim, no período frio, quando a demanda por luz e calor é maior nos espaços construídos, a energia admitida no recinto de um pátio é menor. Isto sugere que, para a geometria solar em Porto Alegre, ganhos energéticos favoráveis sobre as superfícies envolventes dos pátios durante todo o ano requerem o uso de estratégias ou mecanismos complementares. Essas estratégias devem oportunizar o aumento do ingresso de energia no pátio no período de trajetórias baixas e a diminuição no período de trajetórias altas. Como exemplo, na hipótese de uma abertura inclinada, a orientação do pátio afetaria, não apenas a distribuição sobre as faces como visto, mas também a quantidade de energia admitida no sistema. Assim, operações geométricas, tais como a inclinação das arestas que conformam o perímetro da abertura, possibilitam o controle da luz e do calor que ingressam em pátios.

A radiação que ingressou no sistema através do plano da abertura ( $H_1$ ) foi comparada com o somatório da radiação interceptada pelas demais faces do modelo ( $V_1+V_2+V_3+V_4+H_2$ ) (Tabela 13). Nessa comparação foi utilizada a quantidade de energia recebida em um dia (Wh). Os valores encontrados mostram um decréscimo de 45% da radiação difusa estimada sobre o conjunto de faces em relação àquela disponível sobre o plano da abertura. O decréscimo observado na radiação difusa decorre das proporções geométricas do pátio (largura, comprimento e altura), as quais determinam a porção de céu visível a partir de cada face. É importante observar que esta redução seria menor caso fossem consideradas as múltiplas reflexões pelas faces no modelo digital.

A comparação entre a energia que ingressou no sistema e a interceptada pelas faces também indica que o efeito das proporções geométricas sobre a radiação global no interior do modelo é maior ou menor em função da condição de céu. Na condição de céu claro, que caracterizou os ensaios neste estudo, o efeito das proporções sobre a radiação global incidente é mínimo, pois a componente direta representa uma parcela significativamente maior do que a difusa (LAMBERTS, 2014). Na condição de céu nublado, o efeito das proporções é máximo, pois a componente direta é ausente, sendo a radiação global igual à

difusa (MACAGNAN, 2010). Na condição experimentada, a de céu claro, mais de 90% da energia disponível sobre o plano da abertura atingiu as demais faces do modelo.

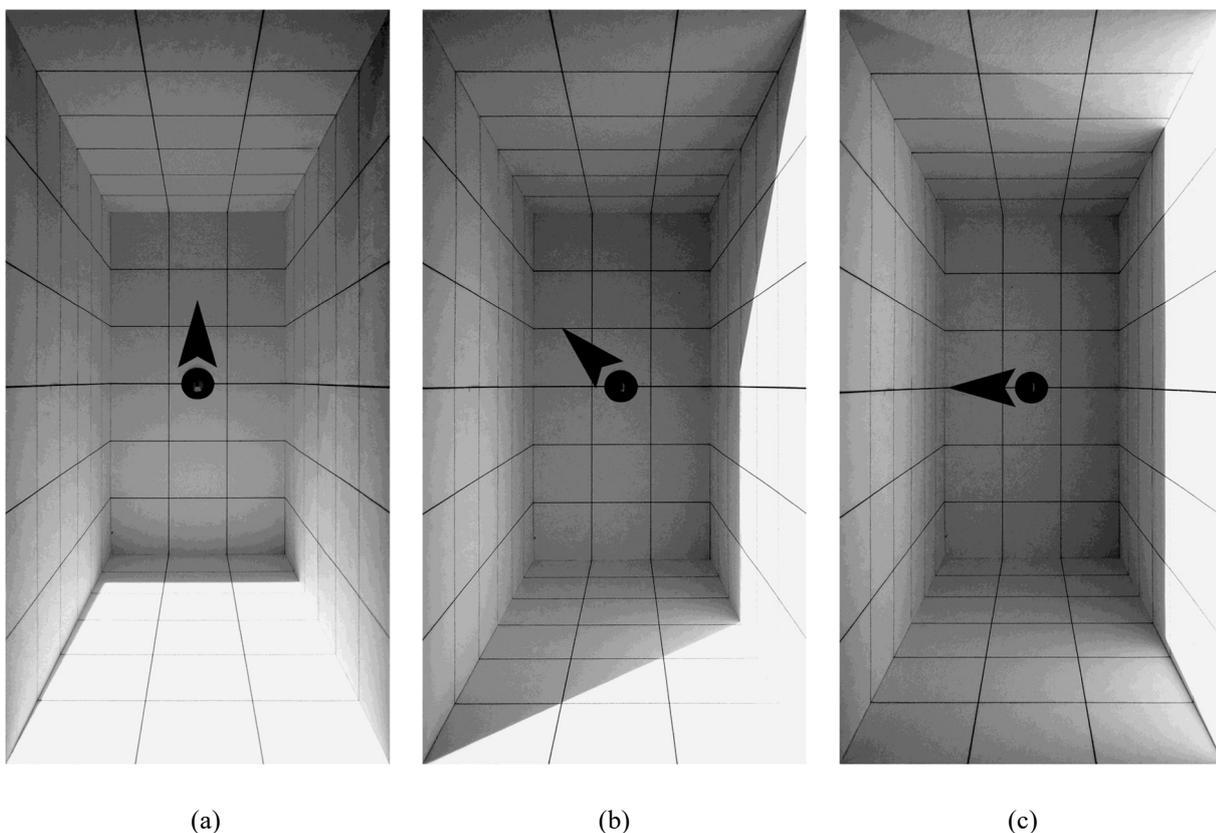
## 4.2 MODELO FÍSICO

A face  $H_2$ , equivalente ao piso de um pátio, considerando-se a tipificação, foi ensaiada com o modelo físico nos cenários  $B_I, II, III$ , caracterizados pela trajetória solar mais baixa do ano. Em razão das baixas alturas solares durante esse percurso, não houve insolação sobre esta face, que recebeu apenas radiação difusa e refletida (Anexo II). A superfície apresentou menores intensidades de energia no início da manhã e fim da tarde, e maiores intensidades nas horas próximas ao meio-dia, entre 11h e 13h (Tabela 14). O mesmo foi observado nas medições sobre a face  $H_1$  (Tabela 15), que corresponde ao plano da abertura de um pátio. Entretanto, ao nível do piso, em uma mesma hora do dia, diferentes dados foram observados em  $B_I, II, III$ . Às 9h da manhã, por exemplo, a irradiação sobre essa face foi de 96, 102, e 91  $Wh/m^2$  nos cenários  $B_I, II, III$ , respectivamente. Uma diferença maior entre os cenários é observada ao meio-dia, quando a altura solar é a maior. Essas diferenças se devem ao parâmetro orientação que atribui diferentes azimutes às faces, afetando a radiação refletida. A componente refletida sobre a face nesse dia foi maior no cenário  $B_I$  e menor no cenário  $B_{III}$  (Tabela 16). Em  $B_I$  a face recebeu 150  $Wh/m^2$  a mais do que em  $B_{III}$ . Este valor equivale à energia que a face recebe em  $B_{III}$  em 45 minutos de exposição ao fluxo de radiação mais intenso do dia (ao meio-dia). Isto mostra que a orientação em pátios retangulares permite, por meio da reflexão, a chegada de maior ou menor quantidade de energia nas regiões mais profundas. A orientação Norte-Sul permite o acesso de mais luz ao piso de um pátio retangular, enquanto que a orientação Leste-Oeste, permite menos luz ao nível do piso.

A avaliação da energia sobre a face  $H_2$ , hora a hora (Tabela 14), mostrou outra correlação entre forma, orientação, geometria solar e fluxo energético. Como exemplo, ao meio-dia, em 21 de junho, sem a presença de radiação direta, a irradiação sobre a face  $H_2$  foi maior em  $B_I$ . Neste cenário, a forma encontra-se orientada na direção Norte-Sul, o que resultou em maior quantidade de energia refletida sobre a face horizontal. Isto ocorre, pois o fluxo instantâneo de energia é maior sobre as faces verticais com maior afastamento, quando orientadas ao azimute solar, conforme resultados do modelo digital, discutidos

anteriormente. Com maior quantidade de energia incidindo, mais energia é refletida pela superfície. Assim, para refletir maior quantidade de energia para o piso de um pátio retangular em determinado horário do dia, a orientação deve proporcionar o alinhamento do eixo longitudinal do piso com o azimute solar daquele horário. Isto é ilustrado pela Figura 34, que exibe o registro fotográfico das faces do modelo ao meio-dia, nos três cenários avaliados. A imagem mostra a insolação sobre as faces verticais, bem como o efeito da reflexão. No momento do registro, ao meio-dia, 75% da face  $V_1$  está exposta ao sol (a), enquanto que apenas 40% da face  $V_4$  está exposta ao sol (c), sendo o ângulo de incidência solar igual para ambas.

**Figura 34-** Insolação sobre as faces do modelo às 12h: (a) cenário B<sub>i</sub>; (b) cenário B<sub>ii</sub>; (c) cenário B<sub>iii</sub>..



A irradiação diária sobre a face  $H_2$  (Tabela 16), equivalente ao piso, foi comparada com aquela sobre a face  $H_1$  (Tabela 17), equivalente à abertura. A comparação mostra que a energia recebida pela face  $H_2$  correspondeu a cerca de 35% da energia que chegou à face  $H_1$ . Isto indica que mais de  $\frac{1}{3}$  da energia que atravessa o plano imaginário da abertura, chega ao piso, mesmo durante trajetórias solares baixas, quando insolação fica concentrada nas

regiões mais altas das faces verticais (Anexo II) e a reflexão em direção ao piso é menor, em razão do ângulo de incidência dos raios solares. Quase toda essa energia resulta da reflexão pelas faces verticais, já que a contribuição da componente difusa sobre a face  $H_2$  é mínima, como sugerem os resultados do modelo digital. Isto mostra que, se por um lado, as faces verticais podem provocar uma significativa redução das componentes difusa e direta sobre a face horizontal, por outro lado, a radiação refletida pelas próprias faces verticais pode minimizar essa redução (Figura 13).

# CONCLUSÃO

A geometria dos modelos estudados para o tipo pátio permitiram entender a incidência de radiação vinda do sol, sobre as diversas superfícies e possibilitaram uma tipificação dessas superfícies com relação ao contexto dinâmico do movimento aparente do sol. Os resultados das medições com o modelo em escala, permitiram o estabelecimento de grandezas em relação às variantes de cenários diferentes. Da mesma forma, as grandezas produzidas pelas simulações com desenhos, dentro das limitações impostas pelo próprio método gráfico, permitiram um detalhamento maior e mais rápido dos cenários, tanto para a orientação, quanto para os períodos ensaiados.

O estudo mostrou que radiação que ingressa e atinge as superfícies é modulável por parâmetros geométricos e orientação, confirmando a premissa inicial do trabalho de que as experimentações gráficas, em fases iniciais de projeto, estabelecem critérios qualitativos para tipificar o pátio considerando a radiação incidente, condicionamento das áreas adjacentes ao pátio, bem como auxilia na escolha pela materialidade das superfícies com relação às atividades nas edificações que se utilizam de um pátio como área suporte ao programa.

A compreensão do fenômeno da radiação incidente na forma estudada, com vistas às etapas iniciais de projeto, requer o entendimento das relações entre diferentes intensidades de energia sobre as diferentes superfícies, em diferentes períodos. Por essa razão, é mais relevante a comparação de múltiplos dados de diferentes superfícies do que a precisão em quantificá-los.

A matriz paramétrica utilizada, que incluiu dois parâmetros – orientação da forma e altura da trajetória solar – permitiu a avaliação de uma variedade de intensidades possíveis sobre as superfícies que envolvem e definem o espaço em um pátio, oportunizando, tanto o exame da luz e calor sobre as superfícies que o delimitam, como inferências para efeitos de outros parâmetros, tais como proporções da forma e condição de céu. A investigação permite concluir que a qualidade do ar e a transparência da atmosfera são importantes, principalmente nos períodos de altura solar baixa, que coincidem com os períodos onde mais se faz necessário o aporte de radiação. Também conclui-se que as proporções são mais

importantes na modulação da luz sobre as superfícies envolventes de um pátio quando a transparência da atmosfera é menor. Além disso, a investigação mostrou que estratégias complementares são necessárias para aprimorar o controle da radiação considerando-se os diferentes períodos do ano, já que proporções geométricas convenientes para trajetórias solares altas podem ser inadequados para as baixas.

Por fim, a forma estudada pode ser vista como um sistema de superfícies contíguas que, por serem diversamente inclinadas e orientadas, interceptam a radiação proveniente de diferentes regiões do hemisfério celeste e refletem parte desta energia para um espaço encerrado comum. A radiação que ingressa pela abertura zenital e atinge as superfícies circundantes pode ser controlada por meio de parâmetros inerentes à forma do pátio, bem como pela orientação. Os efeitos desses parâmetros podem ser redundantes ou complementares e a influência exercida por cada um varia em função das condições de transparência da atmosfera. A similitude entre os elementos que constituem a forma investigada e as superfícies envolventes em um pátio permite a extrapolação dos dados do estudo e constitui um referencial para projetos que empreguem pátios como estratégia para o controle da luz e do calor, especialmente nas fases iniciais de desenho. Assim, o estudo orienta a gênese da forma, auxiliando em decisões de projeto que têm maior influência sobre o condicionamento ambiental e a eficiência energética em um edifício.

## **RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A metodologia aplicada é simples e acessível, porém, laboriosa e, em parte, dependente das condições climáticas. Métodos mais ágeis podem ser aplicados para avaliações de modelos específicos durante etapas iniciais de projeto, já que nessa fase são mais importantes as informações referenciais do que a precisão dos dados numéricos.

Além disso, o potencial da geometria e da orientação para o controle da radiação por meio de pátios, verificado nesse estudo, sugere a investigação de outros modelos referenciais, mais complexos, compostos por superfícies não ortogonais, e que incluam o efeito das múltiplas reflexões por estas superfícies.

Assim, trabalhos futuros podem explorar:

- A. Modelos conformados por superfícies não ortogonais e aberturas inclinadas;

- B. Modelos de predição da radiação incidente em pátios a partir da radiação incidente sobre o plano da abertura;
- C. A influência relativa dos parâmetros que afetam a radiação em pátios;
- D. Modelos computacionais referenciais que incluam materialidade e reflexão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-HAFITH, Omar et al. The Impact of Courtyard Parameters on its Shading Level: An experimental study in Baghdad, Iraq. *Energy Procedia*, v. 134, p. 99-109, 2017.

ANUÁRIO OBSERVATÓRIO NACIONAL. Rio de Janeiro: Observatório Nacional, 2019. Anual.

BAKER, N.; FANCHIOTTI, A.; STEEMERS, K. *Daylighting in Architecture: A European Reference Book*. Londres: James & James, 1993.

BITTENCOURT, Leonardo. *Uso das Cartas Solares: Diretrizes para Arquitetos*. 2a ed. Maceió: Edufal, 1996.

CAPITEL, Antón. *La Arquitectura Del Patio*. Barcelona: Gustavo Gili, 2005.

CORBELLA, O; YANNAS, S. *Em Busca de uma Arquitetura Sustentável para os Trópicos: Conforto Ambiental*. Rio de Janeiro: Revan, 2009.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: Wiley, 4a ed., 2013.

EVANS, John. M. *The Comfort Triangles: a New Tool for Bioclimatic Design*. 2007. Tese de doutorado - Universidade Técnica de Delft, Delft.

FATHY, Hassan. *Natural energy and vernacular architecture: Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates*. Chicago: The University of Chicago Press, 1986. Disponível em: <<http://archive.unu.edu/unupress/unupbooks/80a01e/80A01E00.htm#Contents>>. Acesso em: 03 de mar. de 2020.

FROTA, Anésia Barros. *Geometria da Insolação*. São Paulo: Geros, 2004.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. *Manual de Conforto Térmico*. 5a ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

KOENIGSBERGER, O. H.; INGERSOLL, T. G.; MAYHEW, Alan; SZOKOLAY, S. V. *Viviendas y Edificios en Zonas Cálidas y Tropicales*. Madrid: Paraninfo, 1977.

KONIS, Kyle; GAMAS, Alejandro; KENSEK, Karen. *Passive Performance and Building Form: An Optimization Framework for Early-stage Design Support*. *Solar Energy*, Los Angeles, 125, p. 161-179, 2016.

LAM, William M. C. Sunlighting as formgiver for architecture. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold, 1986.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. Eficiência Energética na Arquitetura. 3ª ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2014.

LECHNER, N. Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects. New Jersey: Wiley, 2015.

MACGNAN, H. M. Introdução à radiação solar. São Leopoldo, 2010.

MAHFUZ, Edson. Nada Provém do Nada: A Produção Arquitetônica Vista como Transformação do Conhecimento. Projeto, São Paulo, n. 69, pag. 89-95, nov. 1984.

MAJOROS, Andrés. Daylighting. PLEA Notes. Passive and Low Energy Architecture International em associação com University of Queensland: Department of Architecture. 1998.

MARAGNO, Gogliardo. V. Sombras Profundas: Dimensión Estética y Repercusión Ambiental del Diseño de la Varanda en la Arquitectura Brasileña. 2010. Tese de doutorado - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

MILLET, Marietta S. Light Revealing Architecture. Nova York: Nostrand Reinhold, 1996.

MOHSEN, Morad A. Solar Radiation and Courtyard House Forms II: Application of the Model. Building and Environment, v. 14, n. 3, p. 185-201, 1979.

OLGYAY, Victor. Arquitetura y Clima: Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas. Barcelona: Gustavo Gili, 1998.

RAYDAN, DANA; RATTI, CARLO; STEEMERS, KOEN. Courtyards: a bioclimatic form? In: EDWARDS, B. et al. Courtyard housing: Past, present & future. Nova Iorque: Taylor & Francis, 2006. P. 192-207.

REIS-ALVES, L. A. O que é o pátio interno?: parte 1. Arquitectos, São Paulo, ano 06, n. 063.06, set. 2005.

RORIZ, M. Luz do Sol: Calor e Iluminação Natural nas Edificações. In: Encontro Nacional Sobre Modelos de Simulação do Ambiente, 1995, São Paulo. Anais do Encontro Nacional Sobre Modelos de Simulação do Ambiente. São Paulo: FAU-USP, 1995. p. 367-373.

SATTLER, Miguel Aloysio. Dias Climáticos Típicos para o Projeto Térmico de Edificações em Porto Alegre. CIENTEC, Boletim Técnico. Porto Alegre. 1989.

SERRA, Geraldo G. Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo: guia prático para os pesquisadores em pós-graduação. São Paulo: Edusp; Mandarim, 2006.

SHANNON, Robert E. Introduction to the Art and Science of Simulation. In: Congresso de Simulação de Inverno, 1998, Washington. Anais do 30° Congresso de Simulação de Inverno. 1998. p. 7-14.

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

YANNAS, S. Physics and architecture: Issues of knowledge transfer and translation to design. Solar & Wind Technology, v. 6, n. 4, p. 301-308, 1989.

YANNAS, S. Toward More Sustainable Cities. Solar Energy, v. 70, n. 3, p. 281-294, 2001.

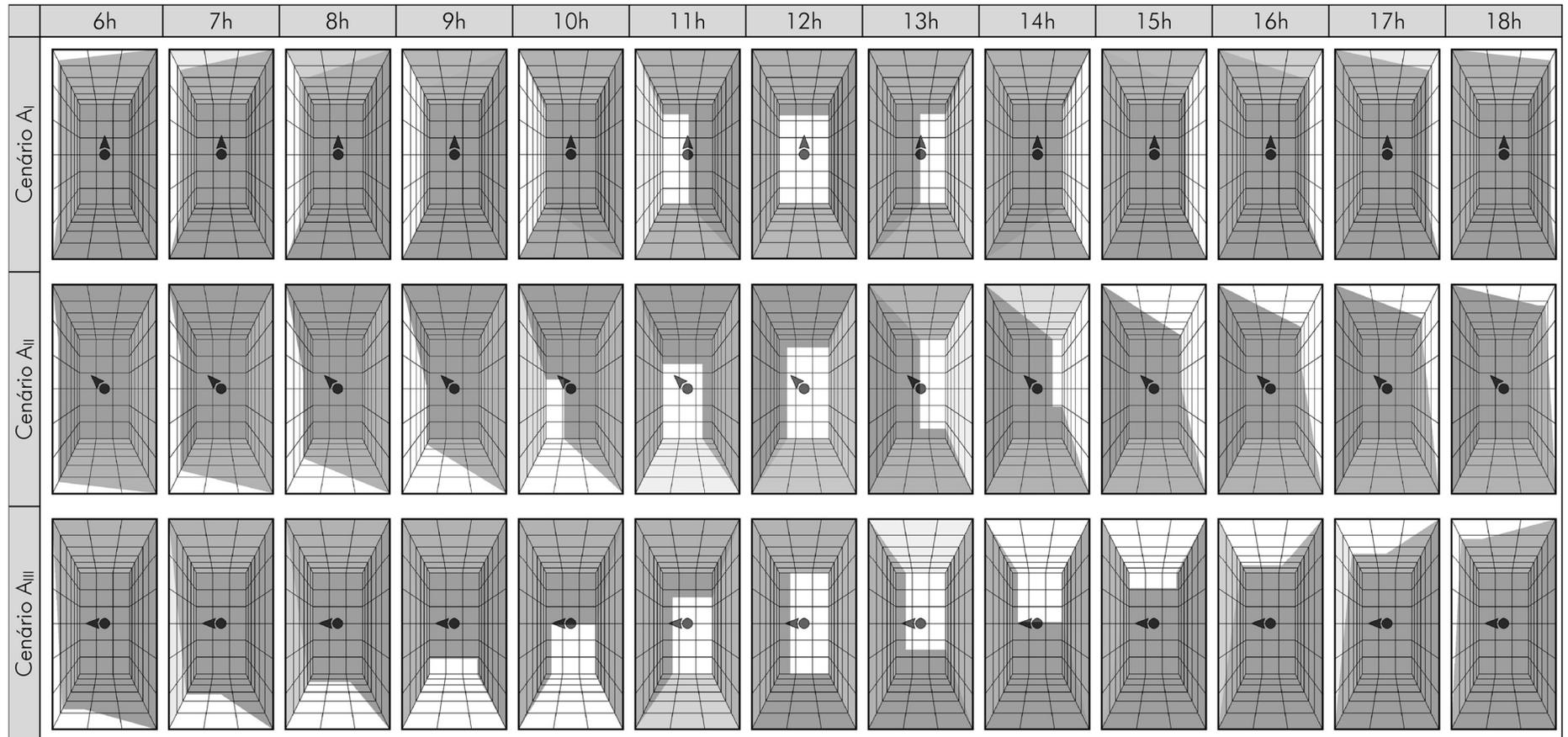
YANNAS, S.; LUMBRERA, M. Re-Activating the Courtyard Typology for Work Environments in Mediterranean Regions. In: PLEA, 2015, Bolonha. Anais do Congresso Internacional Architecture in (R)evolution.

# APÊNDICES

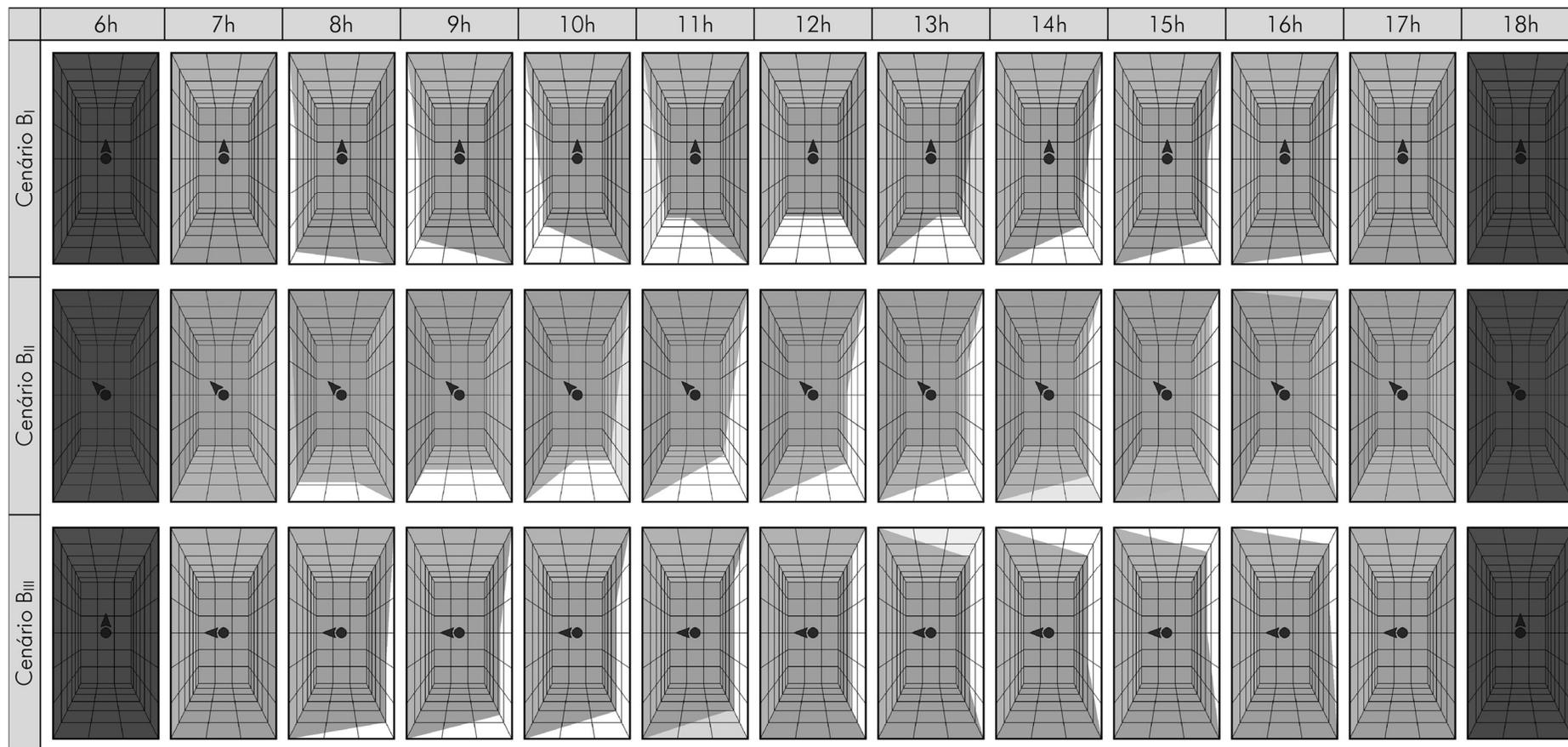
# APÊNDICE I

## Registro visual das faces do modelo digital

Insolação sobre as faces do modelo nos cenários A<sub>I</sub>, A<sub>II</sub>, A<sub>III</sub> em todas as horas avaliadas.



Insolação sobre as faces do modelo nos cenários B<sub>i</sub>, B<sub>ii</sub>, B<sub>iii</sub> em todas as horas avaliadas.



## APÊNDICE II

### Registro visual das faces do modelo físico

Insolação sobre as faces do modelo físico nos cenários B<sub>I</sub>, B<sub>II</sub>, B<sub>III</sub> em todas as horas avaliadas.

	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h
Cenário B <sub>I</sub>													
Cenário B <sub>II</sub>													
Cenário B <sub>III</sub>													

# APÊNDICE III

Registro do céu em experimentação com o modelo físico.

Fotografias panorâmicas 360° do entorno imediato e das condições de céu para cada hora avaliada com o modelo físico.

