

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO**

DILANE TOLEDO MENDONÇA DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO LUMINOSO DE ABERTURAS ZENITAIS
EM LAJE NERVURADA PRÉ-MOLDADA**

MACEIÓ

2013

DILANE TOLEDO MENDONÇA DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO LUMINOSO DE ABERTURAS ZENITAIS
EM LAJE NERVURADA PRÉ-MOLDADA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas como requisito final para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carvalho Cabús

Maceió

2013

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Fabiana Camargo dos Santos

A447a Almeida, Dilane Toledo Mendonça.
Avaliação do desempenho luminoso de aberturas zenitais em laje nervurada pré-moldada / Dilane Toledo Mendonça Almeida. – 2013.
150 f. : il., color.

Orientador: Ricardo Carvalho Cabús.
Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo : Dinâmicas do Espaço Habitado) – Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Maceió, 2013.

Bibliografia: f. 111-117.
Glossário: f. 118-119.
Apêndices: f. 120-138.
Anexos: f. 139-150.

1. Iluminação zenital. 2. Iluminância útil. 3. Conforto luminoso. 4. Edificações – Iluminação natural. I. Título.

CDU: 721

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Dilane Toledo Mendonça de Almeida

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO LUMINOSO DE ABERTURAS ZENITAIS
EM LAJE NERVURADA PRÉ-MOLDADA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Fau/Ufal, área de concentração em Dinâmicas do Espaço Habitado, como requisito final para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

APROVADA em 26 / 11 / 2012.

BANCA EXAMINADORA



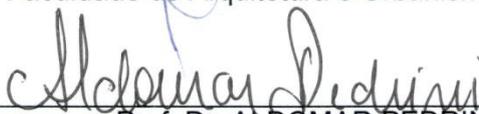
Prof. Dr. RICARDO CARVALHO CABUS
Centro de Tecnologia – UFAL



Prof. Dra. ALINE DA SILVA RAMOS BARBOZA
Faculdade de Engenharia Civil – UFAL



Prof. Dr. AUGUSTO ARAGÃO DE ALBUQUERQUE
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL



Prof. Dr. ALDOMAR PEDRINI
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - UFRN

Dedico essa dissertação a uma pessoa muito especial que sempre torceu por mim, mas que partiu antes dessa minha vitória, minha tia, madrinha, comadre e conselheira de todas as horas, Esmeralda (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas oportunidades da vida.

Ao professor Ricardo Cabús pela confiança depositada no meu trabalho e pela competência na orientação.

A meus pais, Nelson e Laura, pelo amor e apoio incondicional, nesta etapa e em todas as outras da minha vida.

Ao meu amado esposo Arlei, companheiro presente, pela paciência e compreensão, e que muitas vezes teve que segurar a barra em casa para eu poder me dedicar aos estudos.

Aos meus três lindos filhos, Lucas, Layane e Arthur, pelo carinho e paciência com minha presença ausente em tantos momentos durante esse mestrado.

A minha querida sogra, Maria, que reservou com tanto carinho um cantinho em sua casa para eu estudar.

A todos os professores que participaram do processo, pelo conhecimento transmitido com tanta dedicação.

Aos professores membros da banca examinadora: Aline Barboza, Augusto Aragão e Aldomar Pedrini pelas contribuições na avaliação para aprimoramento desta pesquisa.

À minha ex-aluna e colega Lívia Martins pelo carinho, disponibilidade e pelas “dicas” nos gráficos do trabalho.

Aos bolsistas do GRILU, Rafael e Pedro pela atenção e prontidão quando eu precisei de assistência com o TropLux.

A todos os funcionários e colegas, sempre prestativos e com um sorriso no rosto, pela agradável convivência.

E a todos que torceram para eu concluir com êxito este desafio.

Muito obrigada.

RESUMO

O aproveitamento da luz natural em edificações proporciona diversas vantagens para o usuário, dentre as quais se destacam a melhora na qualidade do ambiente e a redução do consumo de energia elétrica. No entanto, muitas edificações apresentam deficiências na iluminação natural, às vezes devido a alguma limitação de projeto. Este estudo visa contribuir para o desenvolvimento de projetos de edificações de pequeno e médio porte que, por meio de aberturas zenitais nas lajes nervuradas pré-moldadas, possam favorecer a iluminação natural nos ambientes. A partir de um modelo proposto de aberturas, relacionado ao tamanho da lajota a ser utilizada, foi realizada uma avaliação e comparação de algumas variáveis no desempenho luminoso do ambiente. Para a obtenção dos resultados foi considerado o comportamento dinâmico da luz natural por meio de simulação computacional, com o uso do programa TropLux. O modelo de desempenho da Iluminância Útil da Luz Natural (IULN) foi escolhido para se verificar a porcentagem de horas por ano em que a iluminação do ambiente é considerada satisfatória para as atividades dos ocupantes. Os resultados mostraram que um ambiente com aberturas equivalente a 3,6% da área do piso, com refletâncias internas para um padrão de acabamento com cores claras (teto 0,81; paredes 0,68 e piso 0,42), alcança níveis de desempenho de 88% com as aberturas sem protetor solar; e de 67% a 77% com protetor solar, a depender do tamanho utilizado e da orientação analisada. Os índices de desempenho para os modelos com protetor solar, de acordo com a IULN, ficaram no intervalo de iluminância (E) em lux caracterizado como útil, mas com necessidade de iluminação complementar ($100 \leq E \leq 500$). A distribuição da iluminância foi uniforme, os coeficientes de variação para todas as simulações com protetores solares ficaram entre 8% e 13%. Os resultados apontam para a possibilidade também de compensar, de uma forma simples com a utilização dessas aberturas zenitais, a iluminação natural de ambientes em que a iluminação lateral apresente falhas, proporcionando uma complementação nos índices, uma melhor distribuição da iluminância e consequentemente, uma melhora no conforto visual.

Palavras-chave: Iluminação zenital. Iluminância útil. Conforto luminoso.

ABSTRACT

The introduction of daylight into buildings provides several advantages, among which are the improvement in the quality of the environment and the energy consumption. However, many buildings have deficiencies in daylighting, sometimes due to some design limitations. This study aims to contribute to the development of small and medium size building projects that, through zenithal openings in precast ribbed slabs, can benefit the daylighting of the environments. From a proposed model of openings, related to the size of the tiles to be used, was made an assessment and comparison of some variables in the luminous performance of the environment. For obtaining the results was considered the dynamic behavior of daylight through computer simulation, using the TropLux program. The performance model of Useful Daylight Illuminance (UDI) was chosen to check the percentage of hours per year when the environment lighting presents a satisfactory performance to occupants' activities. The results showed that an environment with openings equivalent to 3,6% of the floor area, with internal standard for reflectances in light colors (ceiling 0,81; walls 0,68 and floor 0,42) reaches performance levels of the 88% with the openings without solar protection and of the 67% to 77% with solar protection, depending on the used size and analyzed orientation. The performance indices for models with solar protection, according to UDI, were in the range described as useful but in need of additional lighting ($100 < E < 500$). The illuminance was rather uniform, a zenithal lighting feature, the coefficients of variation for all simulations with solar protection were between 8% and 13%. The results point to the possibility of compensating, through a simple form with the use of those zenitais openings, daylighting environments in which the lateral illumination submits failures, providing a complementary indices, a better distribution of illuminance and consequently, an improved visual comfort.

Keywords: Illumination zenithal. Useful daylight. comfort light.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Exemplos de elementos pré-fabricados	22
Figura 2 - Vigas Telha W com domos.....	23
Figura 3 - Exemplos de lajes nervuradas.....	24
Figura 4 - Detalhe da seção T (nervura) de uma laje nervurada moldada “in loco”	25
Figura 5 - Detalhe da seção T equivalente numa laje nervurada pré-moldada.....	25
Figura 6 - Seção da laje com vigotas de concreto armado	27
Figura 7 - Vigotas treliçadas.....	28
Figura 8 – Exemplos de elementos de enchimento	29
Figura 9 - Armadura de distribuição (visão antes da concretagem da capa).....	30
Figura 10 - Exemplo de escoramento para laje pré-fabricada.	31
Figura 11 - Apoio das vigotas sobre cinta de amarração.....	32
Figura 12 - Grande Templo de Ammon em Karnak, Egito (1530 a.C.). (a)Detalhe das fendas na pedra para passagem de luz solar e (b)Detalhe das grelhas de pedra para suavizar a luz solar.	33
Figura 13 - Iluminação zenital com um sistema de proteção solar – Memorial Darcy Ribeiro, 2010 – Visão interna e externa (Arq. João Figueiras Lima – Lelé).....	35
Figura 14 - Carta solar da cidade de Maceió.	36
Figura 15 – Exemplo de céu parcialmente nublado em Maceió-AL. Fotografia tirada com lente olho de peixe.....	42
Figura 16- Divisões da hemisfera celeste e sua projeção no plano horizontal	42
Figura 17 - Corte esquemático de uma prateleira de luz e seu funcionamento.	48
Figura 18 – Sala de leitura principal, Biblioteca nacional de Paris (1859-68).....	48
Figura 19 - Relação do nível de distribuição da iluminação lateral (A) e zenital (B).	49
Figura 20 - Iluminação zenital com o artifício do uso de telhas transparentes.	49
Figura 21 - Sistema zenital formado por painéis cortados à laser, em forma de pirâmide e o esquema do redirecionamento da luz de acordo com a altura solar.	49
Figura 22 - Standed Airport (Arq. Norman Foster - London, 1991).....	50
Figura 23 - Corte do sistema zenital com seleção angular.	52
Figura 24 - Modelo básico de cúpula (Corte esquemático do ambiente)	53
Figura 25 - Cúpula do Shopping Pátio Higienópolis, São Paulo	53
Figura 26 - Modelo básico de claraboia (Corte esquemático do ambiente).	54
Figura 27 - Pinacoteca do Estado de São Paulo (autoria do Arqtº Paulo M. da Rocha).	54

Figura 28 - Modelo básico de Shed (corte esquemático / efeito ilustrativo da iluminação)	54
Figura 29 - Exemplo de cobertura com sheds – Hospital Sarah Kubitschek (Rio).....	55
Figura 30 - Modelo básico de domo (corte esquemático do ambiente).....	55
Figura 31 - Exemplos de coberturas com domos.	55
Figura 32 - Modelo básico de teto transparente (corte esquemático do ambiente)	56
Figura 33 - Exemplo de teto transparente com estrutura metálica	56
Figura 34 - Modelo básico de lanternim (corte esquemático do ambiente)	56
Figura 35 - Efeito ilustrativo da iluminação de um lanternim alongado.	56
Figura 36 - Fontes de luz natural que alcançam o ambiente.	57
Figura 37 - Dimensões escolhidas – vigotas e lajotas	66
Figura 38 - Imagem ilustrativa da abertura zenital.....	68
Figura 39 - Detalhe da abertura zenital com o protetor solar.	69
Figura 40 - Vista superior - Protetores solares.	69
Figura 41 - Protetor Parcial	70
Figura 42 - Imagem ilustrativa do sombreamento – Vista superior	70
Figura 43 - Corte no sentido Leste-oeste – Protetor 1 e 2	71
Figura 44 - Corte no sentido Leste-oeste - Protetor 1	71
Figura 45 - Perspectivas ilustrativa da abertura com protetor solar com anteparo (destacado na cor amarela).....	71
Figura 46 – Corte no sentido Leste-oeste / Modelos do anteparo.	72
Figura 47 - Planta do Modelo Básico – Disposição uniforme das aberturas.....	73
Figura 48 - Planta do Modelo Alternativo - Disposição uniforme das aberturas	73
Figura 49 - Imagens ilustrativas da distribuição das aberturas na laje considerando o posicionamento normal das vigotas.....	74
Figura 50 - Localização da cidade de Maceió (adaptação pela autora) - Mapa do Brasil.....	76
Figura 51 - Tela do programa TropLux para o processamento.	77
Figura 52 - Plantas baixas - Modelos com a malha de pontos do plano de análise (grid).....	80
Figura 53 - Disposição do Modelo Básico com Protetor 1 e Protetor 2.....	88
Figura 54 - Disposição do Modelo Alternativo com Protetor 1 e Protetor 2	95
Figura 55 - Posição das formas nas aberturas na laje	121
Figura 56 - Distribuição da ferragem de distribuição.....	122
Figura 57 - Carta Solar de Maceió e transferidor de ângulos	124
Figura 58 - Abertura padrão (sem protetor solar) nas duas opções de posicionamento	125

Figura 59 - Máscara de sombra da abertura sem protetor – Posição 1	125
Figura 60 - Posição 1 para as aberturas nos dois modelos	125
Figura 61 - Máscara de sombra da abertura sem protetor – Posição 2	126
Figura 62 - Posição 2 para as aberturas nos dois modelos	126
Figura 63 - Angulação necessária para proteção solar total das aberturas	127
Figura 64 - Abertura com a protetor solar (total) para Posição 1	127
Figura 65 - Abertura com o protetor solar (total) para Posição 2	128
Figura 66 - Abertura com o Protetor Geral – Para qualquer orientação solar	128
Figura 67 - Vista em planta da diagramação para $x = 1$	130
Figura 68 - Vista em planta da diagramação para $x = 2$	130
Figura 69 - Diagramação com duas linhas de aberturas, com $x = 1$	131
Figura 70 - Disposição das aberturas no sentido do comprimento do ambiente.	133
Figura 71 - Distribuição das aberturas em planta baixa	134
Figura 72 - Distribuição das 10 aberturas no ambiente	135
Figura 73 - Diagramação da laje com as vigotas, lajotas e as 10 aberturas.....	135
Figura 74 - Corte com os ângulos do início e fim do sombreamento.....	136
Figura 75 - Corte com os ângulos do início e fim do sombreamento.....	136
Figura 76 - Carta solar de Maceió com os ângulos encontrados.	137
Figura 77 - Direção dos raios solares para Posição 2 – Vista Superior.....	137
Figura 78 – Corte – Menor altura solar para Maceió considerada às 7h e 17h	137
Figura 79 - Imagem ilustrativa das aberturas desencontradas – Vista superior da laje.....	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Altura total (h) da laje	29
Tabela 2 - Área mínima e quantidade de armadura de distribuição	30
Tabela 3- Níveis de iluminamento natural	40
Tabela 4 - Combinações para a construção dos modelos	74
Tabela 5 - Refletâncias das superfícies internas do modelo em estudo.....	75
Tabela 6- Simulações processadas	78
Tabela 7- Combinações para as análises comparativas	79
Tabela 8 - Método de avaliação de desempenho – IULN	79
Tabela 9 - Iluminância média anual - Protetor 1 X Protetor 1 com anteparo.....	89
Tabela 10 - Horários de penetração solar para o Modelo Básico com Protetor Parcial	93
Tabela 11 - Horários de penetração solar para o Modelo Alternativo com Protetor Parcial....	99
Tabela 12 - IULN - com protetor solar – Modelo Básico x Modelo Alternativo.....	103
Tabela 13 - Iluminância Média Anual com protetor solar - Modelo Básico x Modelo Alternativo	103
Tabela 14 - Coeficientes de variação - Modelo Básico x Modelo Alternativo	104
Tabela 15 - Diferença percentual entre os modelos - Iluminância Média.....	104
Tabela 16 - Largura do ambiente pela quantidade de linhas de aberturas para as Lajes Nervuradas de Concreto Armado - LC.....	132
Tabela 17 - Comprimento do ambiente pela quantidade de colunas de aberturas	133
Tabela 18 - Iluminâncias por classe de tarefas visuais para interiores	140
Tabela 19 – Fatores determinantes da Iluminância adequada (NBR 5413:1992):	140
Tabela 20 – Descrição do tipo de céu estabelecido pela CIE.....	141
Tabela 21- Modelo Básico sem protetor solar – Norte na largura do ambiente – Céu 16	142
Tabela 22 - Modelo Básico sem protetor solar – Norte no comprimento do amb. – Céu 16.	143
Tabela 23- Modelo Básico com Protetor 1 – Norte na largura do ambiente – Céu 16.....	143
Tabela 24 - Modelo Básico com Protetor 2 – Norte no comprimento do amb. – Céu 16.....	144
Tabela 25 - Modelo Básico c/ Protetor 1 c/ anteparo – Norte na largura do amb. – Céu 16..	144
Tabela 26 - Modelo Básico com Protetor Geral – Norte na largura do amb. – Céu 16	145
Tabela 27 - Modelo Básico com Protetor Geral – Norte no comprimento do amb. – Céu 16	145
Tabela 28 - Modelo Básico com Protetor Parcial – Norte na largura do amb. – Céu 16	146
Tabela 29 - Modelo Básico com Protetor Parcial – Norte no comprim. do amb. – Céu 16..	146
Tabela 30 - Modelo Alternativo sem protetor solar – Norte na largura do amb. – Céu 16....	147

Tabela 31 - Modelo Alternativo sem protetor solar – Norte no comprimento do amb.	147
Tabela 32 - Modelo Alternativo com Protetor 2 – Norte na largura do amb. – Céu 16.....	148
Tabela 33 - Modelo Alternativo com Protetor 1 –Norte no comprimento do amb. –Céu 16.	148
Tabela 34 - Modelo Alternativo com Prot. Geral – Norte na largura do amb. – Céu 16	149
Tabela 35 - Modelo Alternativo c/ Prot. Geral –Norte no comprimento. do amb. –Céu 16.	149
Tabela 36 - Modelo Alternativo com Prot. Parcial – Norte na largura do amb. – Céu 16.....	150
Tabela 37 - Modelo Alternativo c/ Prot. Parcial –Norte no comprimento do amb. –Céu 16.	150

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Exemplo da contribuição relativa de cada componente. (Adaptação da autora)...	57
Gráfico 2 - Propriedades do vidro transparente comum.....	68
Gráfico 3 – Distribuição da Iluminância Média Anual no ambiente.....	81
Gráfico 4 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 2000$) - Modelo Básico s/ protetor solar	83
Gráfico 5 - Iluminância média anual (lx) - Modelo Básico sem protetor solar.....	84
Gráfico 6 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 2000$) - Modelo Alternativo sem protetor solar.	85
Gráfico 7 - Iluminância média anual (lx) - Modelo Alternativo sem Protetor solar	86
Gráfico 8 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 500$).....	87
Gráfico 9 - Iluminância média anual (lx) - Modelo Básico com protetor solar	88
Gráfico 10 - Modelo Básico com uso do Protetor 1 com anteparo	89
Gráfico 11 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 500$) - Modelo Básico com Protetor Geral.....	90
Gráfico 12 - Iluminância média anual (lx) – Modelo Básico c/ Protetor Geral	91
Gráfico 13 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 500$) - Modelo Básico com Protetor Parcial.	92
Gráfico 14 - Iluminância média anual (lx) – Modelo Básico c/ Protetor Parcial	92
Gráfico 15 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 500$).....	94
Gráfico 16 - Iluminância média anual - Modelo Alternativo com protetor solar.....	95
Gráfico 17 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 500$) - Modelo Alternativo com Protetor Geral.	96
Gráfico 18 - Iluminância média anual (lx) – Modelo Alternativo c/ Protetor Geral	97
Gráfico 19 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 500$) - Modelo Alternativo c/ Protetor Parcial.	98
Gráfico 20 - Iluminância média anual (lx) – Modelo Alternativo c/ Protetor Parcial.....	98
Gráfico 21 - Iluminância Média anual - Modelos sem os protetores solares	100
Gráfico 22 - IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 2000$) - Modelos sem os protetores solares. .	100
Gráfico 23 - Iluminância Média anual - Modelo sem protetor solar X com protetor solar ajustado a orientação	101
Gráfico 24 - IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 2000$) - Modelo s/ protetor solar X com protetor solar ajustado a orientação	101

Gráfico 25 - Iluminância Média anual - Modelos com protetores solares	102
Gráfico 26- IULN - Modelos com protetores solares.....	102
Gráfico 27 - Iluminância Média Horária anual - Modelo Básico.....	105
Gráfico 28 - Iluminância Média Horária anual - Modelo Alternativo	105
Gráfico 29 - Iluminância Média mensal - Modelo Básico	106
Gráfico 30 - Iluminância Média mensal - Modelo Alternativo	106

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Considerações iniciais	16
1.2	Objetivos	19
1.3	Estrutura da dissertação	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Sistema construtivo pré-moldado – aspectos gerais e tendências	21
2.2	Lajes nervuradas	24
2.2.1	Classificação das Lajes nervuradas pré-moldadas.....	27
2.2.2	Elementos que compõem as lajes	28
2.2.3	Etapas de Execução	31
2.3	Iluminação natural	32
2.3.1	Projeto arquitetônico e iluminação natural	32
2.3.2	Disponibilidade de luz natural	41
2.3.3	Sistemas de iluminação natural	46
2.3.4	Avaliação da Iluminação Natural	57
3	ETAPAS METODOLÓGICAS	66
3.1	Caracterização dos modelos	66
3.1.1	Introdução dos protetores solares nas aberturas	68
3.1.2	Definição das dimensões do ambiente.....	72
3.1.3	Modelos propostos.....	74
3.2	Seleção da ferramenta de simulação	74
3.3	Características do ambiente para as simulações	75
3.4	Parâmetros para as simulações	75
3.5	Simulações	78
3.6	Forma de apresentação e análise dos resultados	79
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	82
4.1	Modelos sem protetores solares	82
4.1.1	Modelo Básico sem protetores solares	82
4.1.2	Modelo Alternativo sem protetores solares	84
4.2	Modelos com protetores solares	86
4.2.1	Modelo Básico com protetores solares	86

4.2.2	Modelo Alternativo com protetores solares	93
4.3	Comparativo do desempenho luminoso dos modelos	99
4.3.1	Modelos sem protetores solares.....	99
4.3.2	Modelo sem protetor solar X Modelo com protetor solar	100
4.3.3	Modelos com protetor solar	102
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	107
	REFERÊNCIAS	111
	GLOSSÁRIO	118
	APÊNDICES	120
	Apêndice A	121
	Apêndice B	124
	Apêndice C	129
	Apêndice D	136
	ANEXOS	139
	Anexo A	140
	Anexo B	141
	Anexo C	142

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é desenvolvida uma apresentação geral da pesquisa. Inicia-se com as considerações sobre o tema, em seguida são relacionados o objetivo geral e os específicos e por fim é apresentada a estruturação geral da dissertação.

1.1 Considerações iniciais

Nas últimas décadas, os problemas decorrentes do aumento do consumo de energia, da inconsequente extração de recursos naturais e da necessidade crescente da eliminação de rejeitos reforçam a ideia de que, além de insustentável, o atual modelo de desenvolvimento é indesejável, sob os critérios de preservação ambiental. A partir desta constatação, a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento da ONU (Organização das Nações Unidas), na busca da construção de um novo enfoque para o desenvolvimento, cria o conceito de desenvolvimento sustentável, como “um modelo de desenvolvimento capaz de atender às necessidades de consumo da geração atual, sem comprometer os recursos necessários para satisfação das necessidades das gerações futuras” (MME, 2011).

A tendência do consumo de energia elétrica nos países era de crescer proporcionalmente ao Produto Interno Bruto (PIB), no entanto a partir da década de 1970, com a primeira grande crise do petróleo, essa relação vem sofrendo uma transformação, uma vez que todo país que se dispõe ao desenvolvimento deve fazê-lo de forma eficiente e sustentável. Além disso, foi reforçada a ideia da descentralização da produção de energia e a busca de uma maior participação das fontes renováveis.

Para Cavalcanti (2012), no modelo da teoria econômica dominante inexistente preocupação com o meio ambiente, recursos naturais, poluição e depleção. Mas o fato é que se precisa encarar o processo econômico enquadrado dentro do sistema que o envolve, caso contrário não se tem desenvolvimento, apenas crescimento¹. Para ele o desafio é saber qual a escala da economia é compatível com a disponibilidade de recursos da natureza, a escala sustentável.

A contribuição dos edifícios para o consumo de energia, residencial e comercial, tem aumentado constantemente atingindo valores entre 20% e 40% nos países desenvolvidos e superou outros setores principais: industrial e transporte (LOMBARD et al, 2008).

¹ Crescimento implica sempre menos meio ambiente. Quanto mais gente na Terra, quanto mais produção econômica, quanto mais artefactos construídos, tanto menos natureza (CAVALCANTI, 2012).

No Brasil, após a crise de energia ocorrida em 2001, houve uma significativa redução do consumo de energia nas edificações, em especial no setor residencial. Mas, nos últimos anos observou-se um crescimento no consumo, neste setor, proporcionalmente maior que o crescimento do PIB. De acordo com o Procel Edifica, o consumo de energia elétrica nas edificações corresponde a cerca de 45% do consumo faturado no país. Iniciativas para a melhoria da eficiência energética devem ser bem-vindas. As edificações prontas, assim como as construções constituem segmentos com potencial de economia de energia. Estima-se que, com a implementação de ações de eficiência energética nos sistemas de iluminação, ar condicionado e intervenções arquitetônicas na envoltória, haveria uma redução no consumo de aproximadamente 30% para as edificações existentes (com reforma e/ou atualização) e de 50% para as edificações novas (utilizando-se tecnologias energeticamente eficientes desde a concepção inicial do projeto) (Procel, 2010).

O crescimento da população mundial, aumentando a demanda para os serviços de construção e de melhores níveis de conforto, juntamente com o aumento do tempo gasto no interior dos edifícios, garantem que a tendência para o aumento na demanda de energia vai continuar no futuro (LOMBARD et al, 2008). É importante que a sociedade busque incentivos para o aproveitamento dos recursos naturais sem conflitar com aspectos econômicos, ambientais e sociais. A necessidade de uma adequação ou concepção das edificações a partir dos princípios bioclimáticos destaca-se no novo paradigma de conforto ambiental aliado à eficiência energética. Os princípios bioclimáticos baseiam-se em estratégias passivas² de aproveitamento dos recursos oferecidos pelo meio, como radiação solar, ventilação, iluminação natural, sombreamento, enfim, na busca de melhores condições ambientais.

No que se refere à iluminação natural, além de ser um importante recurso para se alcançar o conforto luminoso no interior das edificações contribui na redução no consumo de energia elétrica. Em locais de trabalho pode gerar outros benefícios econômicos devido a uma melhor produtividade dos ocupantes.

Uma iluminação adequada pode melhorar a eficiência visual, que está relacionada à percepção de contraste e de cor, à acuidade visual, e à velocidade e precisão no desempenho de tarefas visuais (HOPKINSON et al, 1975).

² Estratégias passivas são consideradas aquelas que não utilizam meios mecânicos nem elétricos para obtenção das cargas de iluminação, esfriamento e aquecimento.

De acordo com Marques (2007) no Brasil, a iluminação representa, aproximadamente, 23% do consumo de energia elétrica no setor residencial, 44% no setor comercial e serviços públicos e 1% no setor industrial. Destaca-se que o consumo geral de energia vem crescendo, principalmente nas edificações residenciais, efeito do aumento de renda das famílias nos últimos anos. O consumo no setor residencial apresentou crescimento de 6,5% no biênio 2009-2008, enquanto que no setor industrial, o consumo elétrico diminuiu 5,5% no mesmo período (BEN, 2010). Em 2010, o setor residencial manteve a tendência de crescimento (6,6%), reflexo das políticas de inclusão social, além do aumento de renda per capita (BEN, 2011).

O céu tropical tem muita luz, conseqüentemente, no geral o País tem condições favoráveis ao uso da iluminação natural o ano inteiro e poderia reduzir em grande parte (durante o dia e durante o ano) o tempo de utilização de iluminação artificial gerando uma significativa economia de energia elétrica.

Observa-se muitas vezes, no entanto, a utilização da iluminação artificial em ambientes durante o dia, justamente pelo fato da iluminação natural não ser suficiente nas áreas mais afastadas da janela ou até mesmo ser inexistente. A qualidade da solução geométrica do arranjo físico de uma edificação está ligada à maneira como o espaço é enclausurado, o qual tem influência nos aspectos estéticos e no desempenho funcional, energético e econômico (MARTINS; OLIVEIRA, 1999).

Um bom projeto de iluminação, que possibilite obter níveis adequados para o desenvolvimento das tarefas no ambiente, deverá englobar aspectos relacionados ao dimensionamento, forma, orientação e sistema das aberturas para um melhor aproveitamento da iluminação natural e deverá fazer uso de sistemas de iluminação artificial, apenas quando for necessário complementar os níveis obtidos com a iluminação natural, visando assim, conservar energia e diminuir a carga de calor pelas luminárias (ELEY ASSOCIATES, 1993).

O desempenho luminoso de uma edificação pode ser considerado satisfatório se as exigências de conforto visual³ e as exigências de economia de energia elétrica para iluminação artificial dos ambientes forem atendidas (CORBELLA; YANNAS, 2003).

É importante considerar os instrumentos disponíveis aos arquitetos, a serem utilizados como estratégias de projeto para o maior aproveitamento da luz natural. Dentre os

³ Conforto visual ou luminoso é considerado como um conjunto de condições que propiciem ao usuário desenvolver suas atividades visuais com precisão, sem riscos de acidentes e com o menor esforço para sua visão (CORBELLA, YANNAS, 2003). Essas condições estão relacionadas a alguns critérios de desempenho da iluminação (detalhados no item 2.3.4.2).

componentes arquitetônicos existentes, o sistema de abertura zenital, quando bem planejado é um instrumento eficaz na captação da iluminação natural. Uma das principais características é uma maior uniformidade de distribuição da luz em relação à iluminação lateral, uma vez que, em geral, as aberturas estão uniformemente distribuídas pela área de cobertura e tem suas projeções paralelas ao plano de utilização ou de trabalho (CORBELLA; YANNAS, 2003).

A utilização de iluminação zenital é o ponto central deste estudo, e está relacionada diretamente a ambientes confinados, que são aqueles com as paredes laterais sem contato com o exterior ou com um contato insuficiente. O presente estudo pretende mostrar, que numa condição de obstrução excessiva ou limitada entrada de luz natural, é possível por meio de um sistema de aberturas zenitais simples se alcançarem níveis satisfatórios de iluminação natural.

Como a maior quantidade de exemplos que utilizam estratégias passivas encontra-se nas residências unifamiliares, e como na maioria das construções de pequeno e médio porte com laje, o uso da laje nervurada pré-moldada é muito frequente, resolveu-se fazer um estudo com aberturas zenitais nessas lajes para o clima da cidade de Maceió, relacionando as dimensões da abertura ao tamanho da lajota, de forma que se torne uma estratégia de simples execução, acessível à maioria das classes da população e com um bom desempenho luminoso.

1.2 Objetivos

O trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho da iluminação natural em ambiente interno, por meio de aberturas zenitais em laje nervurada pré-moldada, com vistas à redução do consumo de energia no ambiente.

Os objetivos específicos são:

- a) Avaliar o desempenho luminoso de aberturas zenitais em ambiente padrão com as dimensões das aberturas relacionadas ao tamanho da lajota de laje nervurada pré-moldada;
- b) Analisar o desempenho luminoso das aberturas zenitais no ambiente considerando a influência do posicionamento das vigotas em relação ao vão;
- c) Analisar a influência da introdução de protetores solares nas aberturas no desempenho luminoso no ambiente;
- d) Analisar a influência de um anteparo nos protetores solares, introduzido no intuito de incrementar o desempenho luminoso nos horários de baixa altura solar.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, no primeiro capítulo é apresentado uma visão geral do tema estudado, o objetivo geral e os específicos, e esta descrição da estrutura da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta o referencial teórico em que foi embasada a pesquisa e está dividido em três partes. A primeira trata de aspectos gerais e tendências do sistema construtivo pré-moldado; a segunda descreve o sistema estrutural de lajes nervuradas, dando ênfase nas lajes nervuradas pré-moldadas de concreto armado, objeto específico do estudo e a terceira faz uma revisão de iluminação natural, na sua relação com o projeto arquitetônico, disponibilidade, sistemas de iluminação e as formas para sua avaliação.

No terceiro capítulo encontram-se as etapas metodológicas utilizadas na pesquisa. Consistem na caracterização do modelo de um ambiente para servir de base nas análises e de suas variáveis comparativas, na escolha do programa de simulação e na seleção das características do ambiente e dos parâmetros para as simulações e a descrição da forma de apresentação e análise dos resultados.

O quarto capítulo apresenta e analisa os dados coletados das simulações, verifica o desempenho luminoso do sistema proposto e de suas variáveis e traz um estudo comparativo dos resultados alcançados entre os modelos.

O quinto e último capítulo, apresenta as conclusões da pesquisa, uma síntese dos resultados obtidos, as limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros. Na sequência são relacionadas as fontes do referencial teórico, é apresentado um glossário com alguns termos técnicos que foram utilizados e, ao final, são colocados os apêndices e anexos necessários ao desenvolvimento da pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo encontra-se uma revisão dos assuntos relacionados ao tema deste trabalho, abordando aspectos sobre lajes nervuradas pré-moldadas, sobre o sistema construtivo pré-fabricado de uma forma mais geral e por fim uma fundamentação nos aspectos da iluminação natural.

Tentou-se fazer uma revisão sobre o tema específico das aberturas zenitais em lajes nervuradas pré-moldadas, mas não foi encontrado nada neste sentido. Com isso, sobre as lajes nervuradas pré-moldadas foram enfocados apenas alguns aspectos executivos, uma vez que serão propostas algumas intervenções construtivas.

2.1 Sistema construtivo pré-moldado – aspectos gerais e tendências

No Brasil, assim como em outros países em desenvolvimento, as desigualdades socioeconômicas propiciam realidades antagônicas, que na construção civil é percebido nas técnicas ultra-avançadas convivendo ao lado de técnicas artesanais, arraigadas nas tradições, que muitas vezes são reforçadas por um teimoso e acomodado conservadorismo.

Segundo Sabbatini (1989), *“evoluir no sentido de aperfeiçoar-se como indústria é o caminho natural da construção civil”*. Ele destaca a industrialização da construção como um processo que, por meio de desenvolvimentos tecnológicos, conceitos e métodos organizacionais e investimentos de capital, visa incrementar a produtividade e elevar o nível de produção. E indica a racionalização construtiva como uma ferramenta da industrialização: *“racionalização construtiva é um processo composto pelo conjunto de todas as ações que tenham por objetivo otimizar o uso de recursos materiais, humanos, organizacionais, energéticos, tecnológicos, temporais e financeiros na construção em todas as suas fases”*, desde as concepções iniciais, passando pelo desenvolvimento do projeto, até atingir a etapa de produção.

A industrialização apresenta caráter repetitivo, bem representado pela pré-moldagem que reduz os desperdícios e reflete diretamente na produtividade da mão-de-obra, caminho para se melhorar a eficiência do processo (BRUMATTI, 2008).

Uma das maneiras de se obterem ganhos de produtividade é com a padronização. Padronização é *“a aplicação de normas a um ciclo de produção ou a um setor industrial completo com objetivo de estabilizar o produto ou o processo de produção”* (ROSSO,1966, apud BRUMATTI,2008, p.16).

Numa visão mais abrangente, o sistema construtivo em concreto pré-moldado é uma forte tendência, verifica-se nas obras a introdução de diversos elementos pré-fabricados e sua utilização está cada vez mais crescente. Fundamentalmente, o emprego da pré-moldagem promove o desenvolvimento tecnológico, pois envolve a criação e utilização de equipamentos, valoriza a mão-de-obra e possibilita um controle maior na qualidade dos produtos.

Inicialmente, seu uso era mais restrito a estrutura de galpões industriais, atualmente, nota-se outra realidade, os elementos pré-fabricados estão presentes em vários tipos de obras, desde galpões, conjuntos térreos residenciais, edificações comerciais em geral, e até edifícios altos residenciais ou comerciais, praticamente com todos os seus elementos pré-fabricados (ver Figura 1).

Figura 1- Exemplos de elementos pré-fabricados



a) Estrutura de pilares e vigas



(b) Painéis de fachada



c) Escada



d) Paredes

Fonte: ABCIC, 2011.

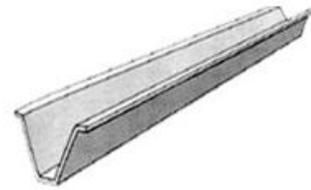
No que se refere à iluminação zenital, a indústria dos pré-moldados oferece as Vigas Telhas W, que podem ser dispostas alternadamente com domos formando linhas de iluminação zenital ou podem ser montadas em diferentes níveis, formando lanternins,

favorecendo as condições de iluminação e de ventilação (ver Figura 2). Fabricadas em concreto protendido, permitem a fixação de suportes para forros, luminárias, dutos de ar condicionado e pequenos equipamentos (ABCIC, 2011). No entanto, não se enquadra no uso em edificações de pequeno porte devido às grandes dimensões das peças (o comprimento pode chegar a 30,0 m) e à necessidade de equipamentos para elevá-las no momento da montagem.

Figura 2 - Vigas Telha W com domos



a) Iluminação zenital com vigas telhas W



b) Ilustração da viga telha W

Fonte: ABCIC, 2011.

A pré-fabricação no Brasil, apesar de relativamente nova já está posicionada em um patamar elevado e desenvolveu-se rapidamente a partir da década de 80, porém, há ainda muito a se pesquisar, inovar e descobrir na pré-fabricação brasileira (SERRA et al, 2005).

Por outro lado, o uso dos pré-fabricados ainda precisa romper obstáculos culturais. Para o arquiteto Paulo Eduardo Campos, apesar da construção pré-fabricada de concreto ter se consolidado como a forma mais viável e mais difundida para se promover a industrialização da construção, falta uma visão de futuro sobre a pré-fabricação em nosso país. Ele aponta alguns fatores que contribuem para isso, dentre eles, o não rompimento do estigma que no passado a construção pré-fabricada era associada à uniformidade, à monotonia e à rigidez na arquitetura, e a falta de conhecimento de que além de uma qualidade arquitetônica, as novas obras pré-fabricadas possuem qualidades no nível de acabamento e de conforto para o usuário final (ABCIC, 2011).

Com exceção de grande parte da região centro-sul do Brasil, ainda há uma grande lacuna que separa à realidade da indústria da construção e à possibilidade de aplicação de sistemas pré-fabricados e procedimentos industrializados. Apesar da enorme demanda, principalmente devido ao gigantesco déficit habitacional brasileiro, a maneira de se construir ainda continua basicamente, a partir das formas tradicionais de construção.

O sistema estrutural que utiliza lajes com nervuras pré-moldadas, objeto desse estudo, se enquadra naqueles que combinam o uso da fabricação em série, sob condições controladas, no entanto, sem que seja preciso a utilização de equipamentos sofisticados e mão-de-obra especializada.

2.2 Lajes nervuradas

De acordo com a NBR 6118:2003 (Projetos de estruturas de concreto- Procedimento), “lajes nervuradas são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos está localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte” (ver Figura 3).

Figura 3 - Exemplos de lajes nervuradas



a) Vários pavimentos com laje nervurada moldada “in-loco”



b) Vista inferior de uma laje nervurada pré-moldada (Fonte: Autora,2011).

As lajes nervuradas moldadas no local, como o nome já diz, têm as etapas de execução realizadas “in loco”, sendo necessário o uso de formas e escoramento. Normalmente, as nervuras são nas duas direções, mas também podem ser executadas apenas em uma direção, dependendo do projeto estrutural. Atualmente, são muito usadas nos edifícios por proporcionar plantas livres para os pavimentos, reduzindo-se o número de vigas, pois possibilita o apoio das paredes diretamente sobre a laje.

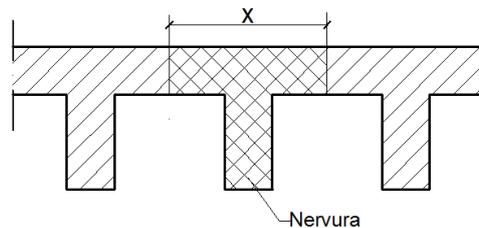
O primeiro trabalho que se tem conhecimento sobre lajes nervuradas foi feito na França por François Coignet na segunda metade do século XIX. A partir daí, os alemães começaram a desenvolver o sistema de lajes nervuradas pré-moldadas similar ao que se tem atualmente. Sua utilização foi mais intensa a partir da Segunda Guerra Mundial, movida pela extrema necessidade de reconstrução (SERRA et al, 2005).

A laje nervurada pré-moldada é um subsistema construtivo amplamente utilizado nas edificações brasileiras, principalmente nas edificações de pequeno e médio porte.

Inicialmente, foram disseminadas por grandes empresas, no entanto, devido às facilidades de fabricação das vigotas (principalmente as convencionais de concreto) foram também propagadas por inúmeras pequenas empresas, muitas até informais.

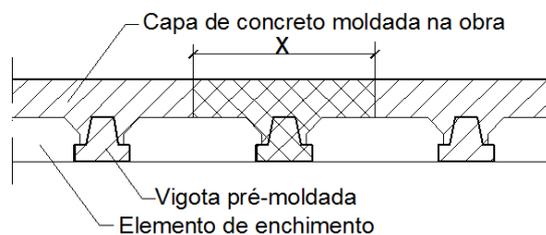
Na tipologia de lajes nervuradas pré-moldadas se empregam vigotas pré-fabricadas, com elementos de enchimento entre as vigotas e solidarizados por uma capa de concreto com armadura de distribuição. Em função de sua geometria, essas lajes são consideradas estruturalmente como lajes nervuradas pré-moldadas, no entanto, o grande volume de concreto moldado no local faz com que as nervuras sejam na realidade, parcialmente pré-moldadas (ver Figura 4 e Figura 5). Por conta disso, alguns autores acrescentam esse enfoque em sua descrição: lajes pré-moldadas são lajes nervuradas constituídas por nervuras em que parte da nervura é pré-fabricada em concreto armado (vigotas) e a parte complementar é concretada no local junto com a mesa (capa), solidarizando os elementos (BOCCHI JUNIOR; GIONGO, 2010; FLÓRIO, 2004).

Figura 4 - Detalhe da seção T (nervura) de uma laje nervurada moldada “in loco”



Fonte: Autora, 2011.

Figura 5 - Detalhe da seção T equivalente numa laje nervurada pré-moldada



Fonte: Autora, 2011.

A laje nervurada pré-moldada veio como uma alternativa a laje nervurada moldada no local apresentando desempenho satisfatório e compatível com suas características. O grande diferencial é que ela possui simultaneamente as vantagens das lajes nervuradas bem como, da construção pré-moldada.

A diferença em sua denominação de laje nervurada pré-moldada ou pré-fabricada está no modo de produção e no controle de qualidade ⁴ das vigotas. Uma vez que todas as vigotas são pré-moldadas, mas nem todas são consideradas pré-fabricadas. Neste estudo é tratada como laje nervurada pré-moldada.

As vigotas e os elementos de enchimento são de fácil e rápida montagem e servem de forma para a capa de concreto que é moldada no local da obra. Essa característica para esse tipo de laje mantém uma das principais vantagens que é a eliminação de formas e a redução (ou até eliminação, dependendo do vão) na quantidade de escoras utilizadas na execução, quando comparada ao sistema convencional de laje maciça ou o sistema nervurado moldado “in loco”.

Outras vantagens das lajes nervuradas pré-moldadas são:

- a diminuição do peso da estrutura e economia devido à eliminação da maior parte de concreto abaixo da linha neutra;

- a existência de fábricas de pré-moldados em quase todas as cidades brasileiras;

- não é preciso o uso de equipamentos sofisticados nem de mão de obra especializada.

As principais desvantagens:

- o limite dos vãos, mas que dependendo do porte da construção não se aplica tal desvantagem;

- menor rigidez na estrutura como um todo, uma vez que normalmente, concentram a maior parte da carga em uma só direção.

Di Pietro (1993) apud Flório (2004) foi uma das dissertações pioneiras em lajes pré-fabricadas e abordou a tecnologia de execução com vigotas de concreto analisando inclusive a questão de custo e abordou também a fabricação, comentando as questões de qualidade e industrialização.

Bocchi Jr. (1995) mostrou em seu trabalho, que o encaminhamento correto, desde o dimensionamento até a execução dessas lajes é fundamental para o bom desempenho das mesmas, de maneira segura e econômica, e acrescentou através de um exemplo numérico, que o custo das lajes pré-moldadas é bem inferior ao custo das lajes moldadas no local.

⁴ De acordo com a NBR 9062 (1985), elemento pré-fabricado é um elemento pré-moldado, produzido industrialmente, mesmo em instalações temporárias em canteiros de obra, mas com recursos para uma produção sob condições rigorosas de controle de qualidade. E o que caracteriza o elemento pré-moldado é ser executado fora do local de utilização definitiva na obra, porém produzido em condições menos rigorosas de controle de qualidade.

Gaspar (1997) fez um estudo da segurança das lajes pré-fabricadas na fase da construção analisando fundamentalmente os elementos que as constitui e seu processo construtivo. Procurou apresentar uma visão global sobre o tema, analisando as limitações desse sistema construtivo tendo em vista o estabelecimento de exigências mínimas para garantir uma construção segura, uma vez que ainda não existia na época uma norma que garantisse as condições de segurança exigidas para as estruturas de concreto armado. Estudou, inclusive, a questão do escoramento propondo um modelo para o cálculo do espaçamento entre as escoras.

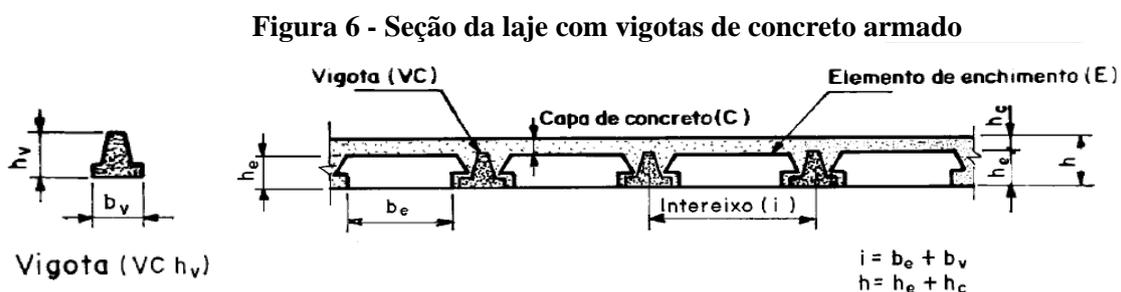
Flório (2004) em sua dissertação apresentou toda a metodologia para o projeto e a execução de lajes pré-fabricadas unidirecionais, onde foram discutidos vários detalhes construtivos que interferem no funcionamento das mesmas.

2.2.1 Classificação das Lajes nervuradas pré-moldadas

A principal classificação deste tipo de laje leva em consideração o tipo de vigota pré-fabricada utilizada e está dividida em três tipos conforme descrito a seguir:

a) Lajes pré-moldadas de concreto armado – LC

Foram as primeiras a serem desenvolvidas utilizando nervuras de concreto armado. São formadas por vigotas de concreto armado convencionais (VC) que têm a seção transversal usualmente formando um “T” invertido (também conhecidas como nervuras tipo trilho), com armadura totalmente englobada pelo concreto da vigota (NBR 14859-1: 2002) (ver Figura 6). São recomendadas para vãos de até 5 metros entre os apoios.



Fonte: ABNT - NBR 14859-1, 2002.

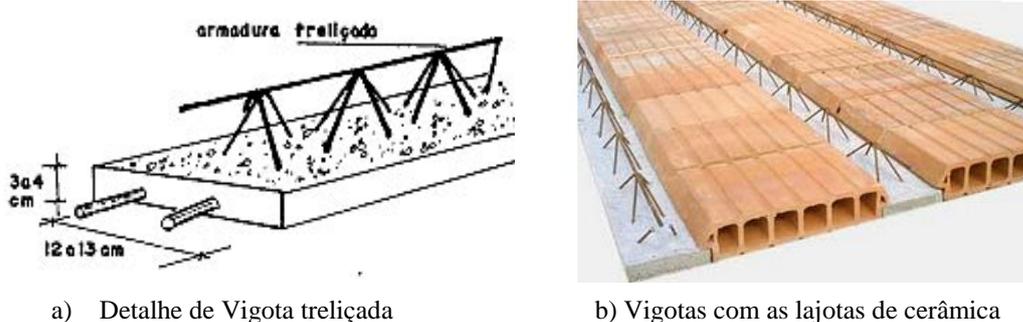
b) Lajes pré-moldadas de concreto protendido – LP

Compostas por vigotas de concreto protendido (VP) no formato convencional semelhante às vigotas de concreto armado, no entanto, com armadura ativa pré-tensionada que possibilita seu uso em vãos maiores, normalmente na ordem de 10m.

c) Lajes pré-moldadas treliçadas - LT

Compostas por vigotas treliçadas (VT), que são as que têm seção formada por uma placa de concreto, com armadura em forma de treliça espacial (arranjo especial de armadura soldada) parcialmente englobada por esse concreto (ver Figura 7). Esta laje pode vencer vãos de até 12m entre apoios.

Figura 7 - Vigotas treliçadas



a) Detalhe de Vigota treliçada

b) Vigotas com as lajotas de cerâmica

2.2.2 Elementos que compõem as lajes

Neste item estão elencadas as principais características dos elementos que compõem as lajes. Normas definem suas dimensões, resistência, cuidados na fabricação e utilização, e serão citadas no decorrer do texto.

a) Vigotas pré-moldadas

Já descritas no item 2.2.1, acrescenta-se que sejam comuns de concreto armado, protendidas ou treliçadas, as vigotas são geralmente fabricadas respeitando um módulo de 10 cm ou sob encomenda a depender do projeto. Normalmente, são posicionadas pelo menor vão do ambiente e têm comprimento limitado não podendo ser empregadas em todos os tipos de projeto arquitetônico (BORGES, 1997).

Alguns fabricantes têm para pronta entrega diversas vigotas, nos tamanhos mais utilizados para as situações de cargas mais comuns. E para facilitar a escolha das mesmas, também fornecem tabelas dos vãos máximos permitidos para cada tipo de laje em função da sobrecarga, das condições de apoio e da altura da laje.

b) Elementos de enchimento (E)

São componentes pré-fabricados, de preferência leves e de baixo custo, de materiais inertes diversos, dentre eles lajotas de cerâmica, de concreto e blocos de poliestireno expandido – EPS (popularmente conhecido como isopor). São produzidos modelos de diversas dimensões, conforme o fabricante e de acordo com a Norma NBR 14859:2002.

Não são considerados como colaboradores no contexto de resistência e rigidez da laje, sua função é reduzir o volume de concreto, o peso próprio da laje, servir de forma para o concreto da capa e tornar a superfície inferior plana.

As vantagens dos blocos de EPS em relação às lajotas cerâmicas (ver Figura 8) estão relacionadas principalmente ao fato de serem leves, resistentes e facilmente recortáveis, no entanto, em Maceió as lajotas cerâmicas ainda são as mais utilizadas. Provavelmente, devido à tradição regional em seu uso, ao custo inicial ser menor e a facilidade de se encontrar em qualquer loja de material de construção.

Figura 8 – Exemplos de elementos de enchimento



a) Blocos de EPS

b) Lajotas cerâmicas

Em função das diferentes alturas disponíveis dos elementos de enchimento, a altura total das lajes deve ser padronizada conforme a Tabela 1. As diferentes larguras dos elementos de enchimento proporcionam os variados intereixos entre as vigotas, para as de concreto convencionais o mínimo é de 33 cm (NBR 14859-1).

Tabela 1 - Altura total (h) da laje

Dimensões em centímetros	
Altura do elemento de enchimento (h_e)	Altura total da laje (h)
7,0	10,0 ; 11,0 ; 12,0
8,0	11,0 ; 12,0 ; 13,0
10,0	14,0 ; 15,0
12,0	16,0 ; 17,0
16,0	20,0 ; 21,0
20,0	24,0 ; 25,0
24,0	29,0 ; 30,0
29,0	34,0 ; 35,0

Fonte: ABNT - NBR14859-1, 2002.

c) Armadura complementar

É a armadura adicionada na obra, tem a função de aumentar a resistência das lajes. A mais comum é a armadura de distribuição, posicionada na capa nas direções transversal e

longitudinal, para a distribuição das tensões oriundas de cargas concentradas e para o controle da fissuração (ver Figura 9). A NBR14859-1 define o número de barras mínimo por metro, conforme descrito na Tabela 2. Existem outras armaduras complementares, que são especificadas para atender às necessidades particulares de cada projeto.

Figura 9 - Armadura de distribuição (visão antes da concretagem da capa)



Fonte: Autora, 2012.

Tabela 2 - Área mínima e quantidade de armadura de distribuição

Aço	Área mínima	Número de barras	
		Ø 5,0 mm	Ø 6,3 mm
CA 25	0,9 cm ² /m	5	3
CA 50, CA 60 e tela soldada	0,6 cm ² /m	3	3

Fonte: ABNT - NBR 14859-1, 2002.

d) Concreto complementar

É o concreto adicionado na obra para a complementação das vigotas pré-fabricadas formando as nervuras; para formação da capa e das nervuras transversais quando necessárias. A função da capa é garantir a distribuição dos esforços atuantes, aumentar a resistência da laje e nivelar o piso (FLÓRIO, 2004).

O concreto deve atender às especificações das normas específicas e a resistência à compressão é especificada no projeto estrutural e de execução da laje. A designação da altura da laje deve ser composta por sua sigla (LC, LP ou LT), seguida da altura total da laje (h), da altura do elemento de enchimento (he), mais a altura da capa (hc) que é medida a partir da face superior do elemento de enchimento, sendo todos os valores expressos em centímetros (NBR 14859-1). No exemplo LC12 (8+4), representa uma laje com as vigotas de concreto convencionais com 12 cm de altura, sendo 8 cm da lajota e 4 cm do capeamento.

2.2.3 Etapas de Execução

Neste item se descreve sucintamente os processos envolvidos na construção das lajes nervuradas pré-moldadas. Com a inclusão das aberturas zenitais propostas, algumas etapas foram incluídas e outras sofreram pequenas alterações (ver Apêndice A).

As principais etapas de execução de uma laje nervurada pré-moldada são:

_ Nivelamento dos apoios; execução da cinta de amarração, ou viga, sobre a qual se apoiarão ou se semi-engastarão as vigotas da laje;

_ Escoramento (com cimbramento):

Normalmente, faz-se o uso de escoras provisórias (de madeira ou metálicas) como apoios intermediários (ver Figura 10) devidamente contraventados, para minimizar a deformação das vigotas devido às cargas de trabalho durante a execução, pois a laje só apresenta a rigidez necessária depois da concretagem da capa e do processo de cura.

Figura 10 - Exemplo de escoramento para laje pré-fabricada.

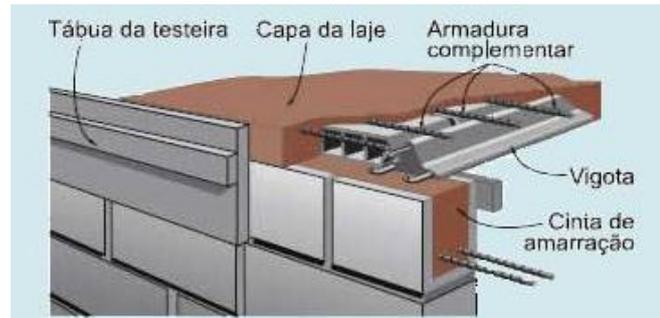


Fonte: Autora, 2012.

_ Colocação das vigotas e lajotas:

Nas lajes pré-moldadas as vigotas são apoiadas nas extremidades, normalmente na direção do menor vão, em vigas ou cintas de amarração (ver Figura 11). Utiliza-se uma lajota em cada extremidade, intercalando-as com as vigotas para servirem de gabarito de montagem e na sequência se completa com as demais lajotas.

Figura 11 - Apoio das vigotas sobre cinta de amarração



_ Colocação da armadura complementar prevista no projeto:

Etapa onde se posiciona a ferragem de distribuição e/ou as outras armações de acordo com as indicações na planta fornecida pelo fabricante ou calculista, e que ficará envolvida pelo concreto da capa (ver Figura 11).

_ Instalação de passadiços (tábuas) para o trânsito de pessoal e transporte de concreto;

_ Instalações (elétricas, hidráulicas, águas pluviais, ar condicionado, etc.);

_ Lançamento, adensamento e cura do concreto complementar:

A concretagem da parte complementar das nervuras juntamente com a capa ocorre quando todas as armaduras adicionais e os dutos para passagens de instalações elétricas e hidráulicas estiverem posicionados.

_ Retida do escoramento após o tempo necessário para o processo de cura da laje.

2.3 Iluminação natural

Esta seção traz uma revisão de iluminação natural, de sua importância numa visão integrada do projeto arquitetônico com os condicionantes naturais e com a economia de energia, de suas fontes e disponibilidade, dos sistemas de iluminação e das formas de avaliação da eficácia da luz natural.

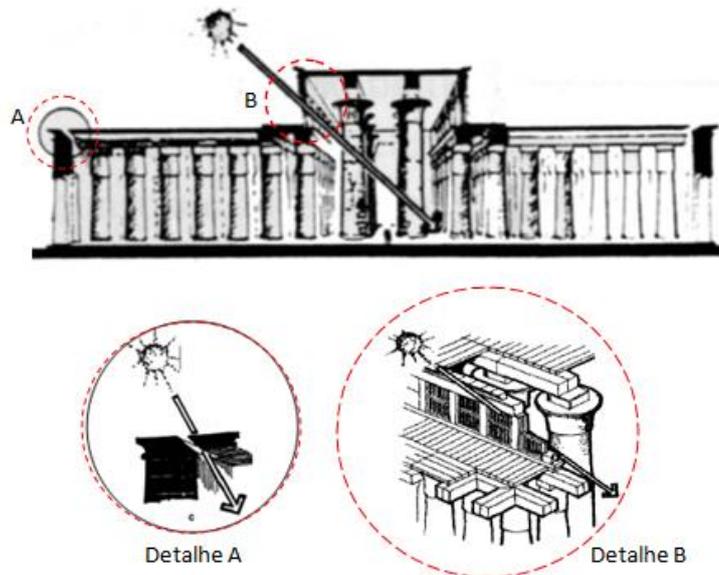
2.3.1 Projeto arquitetônico e iluminação natural

Durante a história da arquitetura, a luz natural foi usada de acordo com a finalidade a que se destinava o edifício e com relação às características do meio ambiente em que estava inserido. Até o final do século XIX, em qualquer país ou clima, a iluminação natural foi considerada como um dos principais condicionantes de projeto (LAM, 1986; ROBBINS, 1986; MOORE, 1991). No entanto, nos edifícios góticos do período medieval, não se

projetava a iluminação para atender as necessidades humanas, nem sequer de uso doméstico. A casa era fria, mal iluminada, o conceito de conforto ambiental era em uma dimensão não mensurável, era a configuração do espaço. Criavam-se recantos de particular beleza e eficiência dentro dos princípios de projeto deste período (MASCARÓ, 1990).

Na arquitetura pré-industrial, são nas edificações religiosas que se constata as manifestações mais antigas de projeto consciente de iluminação natural. Em alguns templos no Egito Antigo, por exemplo, a luz natural era admitida por aberturas direcionadas para a posição do sol em horários específicos e por aberturas zenitais preenchidas por grelhas de pedra para suavizar a luz incidente (ver Figura 12); na Roma Antiga, óculos e lanternins eram combinados proporcionando iluminação zenital em ambientes largos e profundos; no período Gótico, em Roma, aberturas escondidas combinadas com intrincados sistemas de transferência de luz, proporcionavam uma dramatização de formas e espaços internos (MOORE, 1991).

Figura 12 - Grande Templo de Ammon em Karnak, Egito (1530 a.C.). (a) Detalhe das fendas na pedra para passagem de luz solar e (b) Detalhe das grelhas de pedra para suavizar a luz solar.



Fonte: BAKER; STEEMERS(2002), adaptação pela autora.

Posteriormente, com o advento da luz elétrica, a iluminação interna não mais dependia da proximidade com o exterior e a iluminação natural durante o dia, em muitas edificações, foi aos poucos sendo considerada como algo com pouca ou nenhuma importância. No entanto, com a crise do petróleo ocorrida em 1973 e com o aumento da população mundial, os problemas decorrentes do aumento do consumo de energia têm merecido atenção, dentre eles, a inconsequente extração de recursos naturais, a necessidade crescente da eliminação de

rejeitos e os efeitos negativos para o ser humano do uso indiscriminado de ambientes com iluminação artificial. Com isso, voltou-se a atenção para projetos que visem um desenvolvimento sustentável.

Desenvolvimento sustentável caracteriza-se por um compromisso responsável dos envolvidos e se concebe como um processo socioeconômico em que se minimiza o uso de matéria e energia, se minimizam os impactos ambientais (lançamento de dejetos), se maximiza o bem-estar ou utilidade social e se atinge uma situação de eficiência máxima no uso dos recursos – de modo semelhante ao modelo de funcionamento da natureza (CAVALCANTI, 2012). Para Goldemberg e Lucon (2007), a eficiência energética de uma forma geral é, sem dúvida, a maneira mais efetiva de ao mesmo tempo reduzir os custos e os impactos ambientais.

A arquitetura que se enquadra no projeto de desenvolvimento sustentável é aquela que, a partir dos preceitos fundamentais deste novo paradigma, modifica o ambiente natural de maneira a obter um espaço confortável, adequado ao clima local, energeticamente eficiente e com baixo custo de manutenção, causando, necessariamente baixo impacto ambiental (MME, 2011; CORBELLA; YANNAS, 2003).

Com relação aos aspectos de iluminação natural, uma maior eficiência energética pode ser obtida basicamente de dois modos (PEREIRA, 1995; AMORIM, 2002):

- Economia direta:

O uso otimizado da luz natural possibilita uma redução no uso da luz artificial. É importante também, um estudo dos circuitos elétricos visando acioná-los, de acordo com a necessidade de complementação da luz natural.

- Economia indireta:

Quando se há um bom projeto de iluminação natural, há menores ganhos de calor solar e de calor gerado pela iluminação artificial, diminuindo a carga de refrigeração artificial.

De forma geral, o conforto térmico e o luminoso devem ser considerados conjuntamente, esta visão integrada e adequada às necessidades do usuário possibilita, sobretudo, ambientes mais confortáveis e com uma maior eficiência energética. Roncálio e Pereira (1995) reforçam que o uso da luz natural para iluminação de edifícios é uma das estratégias mais efetivas para favorecer a redução da demanda energética em construções, e garantir maior qualidade aos ambientes.

No Nordeste do Brasil, por estar próximo à linha do Equador, o nível de iluminação natural é bastante alto e a temperatura do ar, geralmente também é alta, com isso deve-se ter cuidado com a luz proveniente da radiação solar direta nos ambientes, visto que pode significar problemas de desconforto térmico e luminoso para os usuários. Vários autores citam esse conflito entre luz e calor, como um dos principais problemas a serem resolvidos nos projetos de iluminação (HOPKINSON et al, 1975; CHICHERCHIO,1978; MOORE, 1991). E Rivero (1986) destaca a insolação como a principal causa de desconforto térmico nas edificações.

O sombreamento é um dos mecanismos mais eficazes de combater o desconforto térmico causado pela radiação. Para isso, as aberturas precisam de um sistema que controle a entrada direta do Sol (protetores solares), no entanto, o sombreamento em excesso interfere significativamente no rendimento da iluminação natural e, conseqüentemente, reduz sua eficiência energética (BITTENCOURT, 1993). Protetores solares são todos os componentes cuja finalidade essencial seja controlar adequadamente a radiação solar, podendo ser de diferentes formas e materiais (ver exemplo na Figura 13).

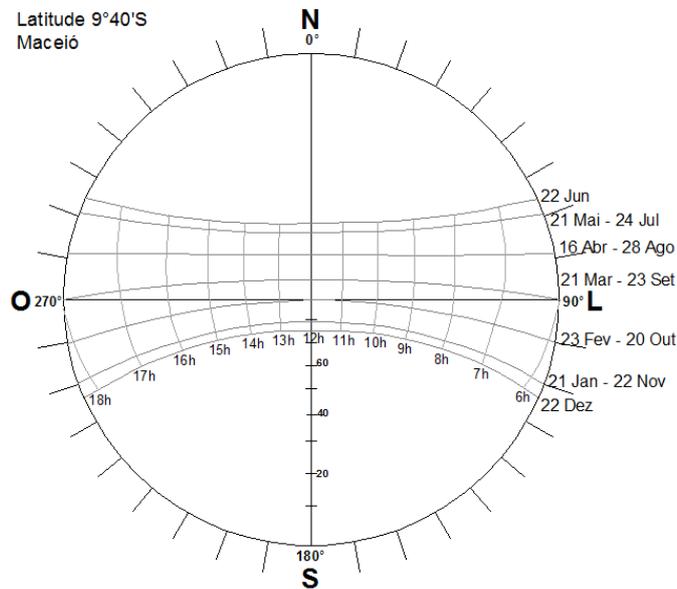
Figura 13 - Iluminação zenital com um sistema de proteção solar – Memorial Darcy Ribeiro, 2010 – Visão interna e externa (Arq. João Figueiras Lima – Lelé).



Fonte: Arcoweb, 2012.

Os estudos solares possibilitam a análise da distribuição espacial e temporal da radiação solar. As projeções das trajetórias do sol no plano do horizonte representadas nas cartas solares auxiliam no projeto de protetores solares (BITTENCOURT, 2004). Na Carta Solar da cidade de Maceió, mostrada na Figura 14, pode-se ter uma visão das diversas posições do sol de acordo com a trajetória anual.

Figura 14 - Carta solar da cidade de Maceió.



As condições climáticas de cada localidade influenciam na disponibilidade de luz natural. Projeto bioclimático é uma abordagem que tira vantagem do clima por meio da aplicação correta de elementos de projeto e tecnologia para economia de energia, mantendo o conforto dos ocupantes na edificação (GOULART; PITTA, 1994).

No Brasil, na maior parte do ano é possível se alcançarem condições de conforto luminoso por meio da aplicação de técnicas passivas. Deve-se salientar que, se a abordagem bioclimática for considerada desde as fases iniciais do projeto pode proporcionar um potencial maior de economia de energia. Entretanto, apesar da comprovada vantagem de integrar estes conceitos ao projeto, há uma dificuldade considerável em sua aplicação.

De acordo com Szokolay (2002) o pensamento científico deveria impregnar os estágios iniciais de projeto para impedir que a arquitetura dê passos para trás e torne-se uma simples forma de arte, em que não haja formas objetivas de classificá-la ou de qualificá-la.

Maciel (2006) em sua pesquisa investigou as principais barreiras da integração de conceitos bioclimáticos ao projeto arquitetônico e descreveu como aspectos relacionados, entre outros, o fato de os arquitetos em geral considerarem questões técnicas um limite à criatividade e liberdade no processo projetual e, em geral, as questões ambientais estarem diretamente relacionadas às técnicas; e a falta de confiança relacionada a essas questões.

Para Souza (2004) o motivo do uso da luz natural no projeto arquitetônico permanecer, relativamente pouco elaborado e intuitivo se deve a tecnologia em iluminação natural ser assunto recente no ensino de arquitetura e do urbanismo no Brasil, o que pode explicar, em

parte, a não incorporação das técnicas de utilização de iluminação natural pelos profissionais que atuam no setor da concepção de projeto e construção das edificações.

A luz natural é um recurso gratuito e inesgotável, não polui e nem prejudica o ecossistema. Diversos são os benefícios da iluminação natural, dentre eles (ROBBINS, 1986; MOORE, 1991):

- economia de energia;
- melhor qualidade da luz e do ambiente;
- alta eficácia luminosa - a luz do sol apresenta maior eficácia quando comparada com a maior parte das fontes de luz elétrica, isso reduz os ganhos de calor do ambiente e o consumo de energia para refrigeração;
- excelente reprodução de cores – apresenta uma definição mais real das cores;
- melhora a modelagem e percepção visual dos espaços e objetos, devido às suas características direcionais;
- contato com o exterior - contribui para a orientação espacial e temporal dos usuários.
- benefícios físicos e psicológicos aos usuários.

Majoros (1998) reforça que dentre os aspectos positivos da luz natural pode-se dizer que a qualidade da iluminação é melhor, uma vez que a visão humana desenvolveu-se com a luz natural, e a constante mudança da quantidade de luz natural no tempo e no espaço é favorável, pois proporciona efeitos estimulantes no ambiente.

Quanto à preferência pela luz natural, vários estudos foram desenvolvidos. Todos eles apontam que a maioria das pessoas, conscientes ou não da qualidade da luz natural, dão preferência a ela, e não a iluminação artificial (ANDRADE, 2004). No entanto, segundo Martau (2009), devido às modificações dos hábitos humanos de trabalho e de descanso, é frequente o uso prolongado da iluminação artificial, por vezes em espaços com baixos níveis de iluminação, e com isso os indivíduos estão sofrendo alterações na sua saúde. Figueiró (2010) alerta sobre a importância da iluminação natural em edificações residenciais, principalmente para promover a saúde das pessoas que passam mais tempo em casa, como idosos e crianças, que necessitam de mais cuidados quanto aos ciclos biológicos para garantir a saúde.

A iluminação inadequada durante o dia é uma das características que gera a Síndrome do Edifício Doente (Sick Building Syndrome – SBS). Esta síndrome faz com que pelo menos

20% dos seus ocupantes fiquem com letargia, dificuldade de concentração, problemas respiratórios, etc, sintomas que comumente desaparecem quando os ocupantes saem do edifício (GARROCHO, 2009).

Álvares (1985) indica que um bom projeto de iluminação será aquele que além atender de forma adequada às necessidades do homem com relação à informação visual relacionadas à execução de atividades, deve atender às necessidades biológicas por informação visual, relacionadas ao conceito de sobrevivência e segurança, que englobam as necessidades por orientação espacial, ajuste do relógio biológico, contato com elementos da natureza e delimitação do território pessoal. Lam (1986) reforça que o melhor uso da luz natural não se refere somente à economia de energia, mas também à criação de ambientes que traduzam uma sensação de bem estar que e sejam luminosamente agradáveis para os ocupantes.

Dois aspectos da iluminação natural devem ser compreendidos de forma integrada, ou seja, como veículo de expressão arquitetônica (filosofia do projeto) e como sistema ambiental da edificação (otimização de todos os componentes internos e externos de uma edificação) (PEREIRA, 1995). A exigência mínima de iluminação natural em cada ambiente está relacionada às características de uso de cada projeto, e inicialmente, as condições alcançadas vão depender do projetista. No entanto, muitos projetos são elaborados sem considerar o aproveitamento adequado da luz natural ou até mesmo sem considerá-la, como se fosse totalmente dispensável; e, como consequência, ocorre a necessidade de utilizar-se a iluminação artificial durante o dia, mesmo com céu claro e luz abundante no exterior da edificação.

A iluminação natural em um ambiente pode ser facilitada por meio de cuidadosas escolhas no projeto de arquitetura, na orientação das fachadas e no layout. No entanto, o número de condicionantes que interferem é grande, tornando-se difícil estabelecer uma regra geral para todos os casos. É importante, na contribuição da qualidade do espaço construído, o aproveitamento das experiências ocorridas na arquitetura no decorrer dos tempos e a aplicação de conhecimentos científicos, incluindo pesquisas para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos com uma melhor qualidade ambiental e com eficiência energética. Mas, para que haja uma efetiva utilização dos princípios de iluminação natural nos projetos alguns fatores são importantes, dentre eles, uma maior conscientização por parte dos projetistas, uma legislação específica e uma maior exigência do usuário enquanto consumidor.

Para definir as normas ou regras de iluminação, devem ser levadas em consideração as características de cada localidade e do tipo de edificação. No que se refere à legislação, no

Brasil existem as Normas Brasileiras (NBR) e os Códigos de edificações (distintos para cada cidade). As normas de iluminação dispõem de informações técnicas como conceitos básicos e definições, iluminância mínima em função do tipo do ambiente, procedimentos de cálculos e medições, etc. Os códigos tratam de dados construtivos como o dimensionamento de aberturas e localização de janelas.

O atual Código de edificações da cidade de Maceió, na Seção II do Capítulo II, que trata dos vãos de iluminação e ventilação, em seu Artigo 319 diz o seguinte: “O atendimento aos níveis de iluminação, ventilação e acústica, é de competência e responsabilidade dos profissionais que subscrevem o projeto” (PREFEITURA DE MACEIÓ, 2007). Essa imprecisão de critérios técnicos faz com que o arquiteto, engenheiro ou projetista assumam a responsabilidade de defini-los, e, na maioria das vezes, a partir da sua experiência (ou não) em outros projetos. Neste sentido, o que se vê muitas vezes é a necessidade de edificações com condições mais adequadas ao uso, resultado de um mau dimensionamento ou posicionamento incorreto das aberturas.

No Código de edificações da cidade de Maceió de 1985 existia uma definição para a área mínima destinada às aberturas, em relação à área do piso do ambiente ($1/6$ para iluminação e $1/12$ para ventilação), mas que nem sempre atendia aos requisitos de conforto e eficiência energética, pois não era levada em consideração a localização e o tipo da esquadria a ser colocado posteriormente, nem o posicionamento da abertura em relação à fachada (CÂNDIDO, 2006). Além do que, elementos de proteção, como beirais, varandas brises e cobogós não são considerados, aspectos que influenciam nos níveis e na distribuição da iluminância no ambiente. Percebe-se uma lacuna na elaboração das normas e regulamentos, de indicações efetivas do que os projetistas devem considerar para o melhor aproveitamento da luz natural. Esses parâmetros deveriam ser definidos pela legislação, inclusive considerando-se os aspectos relacionados ao clima local. Atualmente no Brasil, a norma específica que estabelece níveis de iluminância é apenas para iluminação artificial de interiores, a NBR 5413:1992.

Em 2005 entraram em vigor as primeiras NBRs que tratam de iluminação natural em edificações. Elas abrangem temas relacionados a definições, procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural e para a determinação da iluminação natural em ambientes internos, bem como os procedimentos para as medições de iluminância e luminância dos ambientes. Esta norma foi um avanço na área de iluminação natural nas

edificações, no entanto, não é de fácil utilização na prática, pois não relaciona diretamente as condições de iluminação natural com as variáveis arquitetônicas. Com isso, é importante que se inclua no Código de edificações da cidade os parâmetros técnicos de luz natural que atendam as necessidades humanas e a exigências de conservação de energia.

Em maio de 2010 entrou em vigor a NBR 15.575:2008 (Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho), que estabelece o desempenho mínimo obrigatório para alguns sistemas ao longo da vida útil do empreendimento, independente de como os sistemas foram construídos. Essa norma veio como uma forma de traduzir tecnicamente as necessidades dos usuários de imóveis, por meio de requisitos qualitativos e quantitativos. Questões como durabilidade dos sistemas, manutenibilidade da edificação e conforto (térmico, lumínico, acústico e antropodinâmico) dos usuários serão avaliados.

No item de conforto lumínico, a NBR 15.575 define como obrigatoriedade, o nível mínimo de 60 lx de iluminação natural para os ambientes como sala de estar, dormitórios, copa/cozinha e área de serviço. Para um maior conforto dos usuários são sugeridos dois outros níveis (intermediário e superior), conforme os valores apresentados na Tabela 3. No entanto, não é informado em que condições (horário, época do ano, etc) devem-se comprovar estes níveis.

Tabela 3- Níveis de iluminamento natural

Dependência	Iluminamento geral para os níveis de desempenho (lux)		
	Mínimo	Intermediário	Superior
Sala de estar	≥ 60	≥ 90	≥ 120
Dormitório			
Copa/cozinha			
Área de serviço			
Banheiro	Não requerido	≥ 30	≥ 45
Corredor ou escada interna à unidade			
Corredor de uso comum (prédios)			
Escadaria de uso comum (prédios)			
Garagens/estacionamentos			

Fonte: ABNT - NBR 15.575-1, 2008. Anexo E3.

Ghisi e Lamberts (1998) alertam para a necessidade também, de uma normalização que estabeleça limites de consumo de eletricidade para edificações brasileiras devido ao uso indiscriminado da energia elétrica. Neste sentido, no projeto arquitetônico deve-se ter como base que a iluminação artificial seja uma complementação e não uma substituição da iluminação natural (CORBELLA; YANNAS, 2003).

2.3.2 Disponibilidade de luz natural

A principal fonte de luz natural é o Sol. Ela pode ser emitida de forma direta, com os raios solares (luz natural direta) ou de forma indireta, quando é proveniente da abóbada celeste, através dos fenômenos de refração e reflexão na atmosfera, também convertida em fonte de luz (luz natural difusa) (BAKER; STEEMERS, 2002). Quanto mais baixo estiver o sol no céu, maior é a distância atmosférica que o feixe de luz terá que atravessar e menor a quantidade de luz disponível (TREGENZA; LOE, 1998; FROTA, 2004).

Em se tratando da luz direta do sol, a quantidade de luz contida em 1m² poderia garantir, caso uniformemente distribuída, em torno de 500 lx de iluminação sobre uma área de 200 m². (RONCÁLIO; PEREIRA, 1995). No entanto, devido seu alto conteúdo energético (luz e calor) procura-se geralmente excluí-la do ambiente interno devido aos possíveis efeitos adversos, dentre eles:

- desconforto térmico (superaquecimento);
- desconforto luminoso (ofuscamento);
- prejuízo na integridade física dos materiais.

A luz natural proporciona ao ambiente uma variabilidade que depende do percurso do sol, e uma imprevisibilidade que depende das condições do céu, que por sua vez depende também de outros fatores, como pluviosidade (presença de nuvens), ventos dominantes (que ajudarão a manter o céu limpo ou não), poluição atmosférica, etc.(MASCARÓ, 1978). De maneira mais geral, a disponibilidade de luz natural é determinada principalmente pela latitude e nebulosidade, no entanto, as condições atmosféricas e a luz refletida do solo influenciam de uma forma mais local (BAKER; STEEMERS, 2002).

Para propostas de iluminação natural, as características do céu é o parâmetro climático de maior relevância. Ele vai definir a distribuição de luminância da principal fonte de luz, dando também a possibilidade da luz do sol (CABÚS, 2002). Quanto mais dados se possuírem, melhor para a previsão de disponibilidade de luz natural tanto no desenvolvimento de projetos como na criação das normatizações, uma vez que cada região tem suas características de céu que influenciarão consideravelmente nos resultados de iluminação interna dos ambientes.

Na NBR 15215-2 (2005) a caracterização das condições do céu é feita utilizando-se o método de cobertura do céu estimada pela observação do montante de cobertura de nuvens,

expressa numa escala de 0 a 100% e apresenta-se nas três condições básicas (ver exemplo na Figura 15):

- céu encoberto: 75% a 100%
- céu parcialmente encoberto: 35% a 75%
- céu claro: 0% a 35%

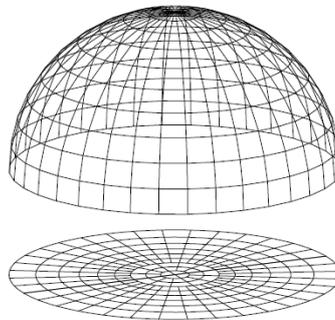
Figura 15 – Exemplo de céu parcialmente nublado em Maceió-AL. Fotografia tirada com lente olho de peixe.



Fonte: CABÚS, 2002.

A iluminância devido à abóbada celeste pode ser determinada por meio de cálculos, a partir da distribuição de luminâncias do céu. A posição do sol, as nuvens, a composição da atmosfera alteram o processo de difusão, gerando áreas com diferentes luminâncias que formam a configuração do céu e sua distribuição de luminâncias. Uma das formas de determinar essa distribuição é dividindo-o em parcelas e como cada parcela tem sua luminância, ao integrar-se a contribuição de cada parcela tem-se a iluminância total no plano horizontal (NBR 15215-2:2005), ver Figura 16. O objetivo é caracterizar as condições de céu da forma mais precisa possível, com isso muitas formas de subdivisão têm sido propostas.

Figura 16- Divisões da hemisfera celeste e sua projeção no plano horizontal



Fonte: ABNT - NBR 15215-3,2005.

O conceito de Coeficientes de Luz Natural, proposto por Tregenza como um método para calcular as iluminâncias internas devido à luz natural, simplificou a simulação de diferentes distribuições de céu e padrões de luz solar e fez a previsão diária e anuais possíveis. Os coeficientes de luz natural representam o somatório das componentes de céu, de reflexão externa e de reflexão interna (CABÚS, 2002). A principal vantagem desta abordagem é que uma vez calculados os coeficientes de luz natural para todas as parcelas do céu para um ponto de referência, a iluminância ou luminância no ponto de referência pode ser calculada rapidamente para qualquer outra condição do céu, por combinar os coeficientes de luz natural com o de distribuição luminosa do céu (REINHART, 2010).

Os valores estimados da disponibilidade de luz natural para uma localidade qualquer são obtidos por algoritmos universalmente aceitos que, por sua vez, derivam de medições sistematizadas por um longo período de tempo (suficiente para se evitar erros de situações atípicas sazonais ou anuais) e de modelos preditivos desenvolvidos em diversos países ao longo de várias décadas (SCARAZZATO, 1995).

Durante muito tempo o estudo científico da iluminação natural, concentrou-se em climas temperados e quase todos os cálculos eram baseados na disponibilidade de luz natural de céus uniformes ou nublados (encobertos), típico das regiões pioneiras nos estudos. No entanto, nas últimas quatro décadas cresceu mundialmente o estudo dos padrões de céu. Três fatores principais contribuíram para isso: o custo crescente da energia elétrica que impulsionou estudos voltados para economia de energia, o crescimento da consciência ecológica e a disponibilidade da computação, que facilitou o registro e análise estatística dos inúmeros dados de céus reais (CABÚS, 2002).

Em 1991, a Comissão Internacional de Iluminação⁵ (Commission Internationale de L'Eclairage - CIE) lançou o Programa Internacional de Medições de Luz Natural (International Daylight Measurement Program - IDMP) com o objetivo de estimular os países a implementarem estações medidoras de luz natural, cujos resultados pudessem gerar subsídios ao estabelecimento de normas e recomendações visando uma melhor utilização deste recurso natural, tanto com relação a conservação de energia como para contribuir em uma melhor qualidade de vida às pessoas. No entanto, poucas estações foram realmente implementadas decorrente de vários motivos, dentre eles, ainda a falta de priorização desta

⁵ A CIE é uma entidade internacional independente, sem fins lucrativos, sediada em Viena (Áustria), fundada em 1913. Aceita como a autoridade máxima na área da iluminação, e atualmente é reconhecida pela ISO - International Organization for Standardization e pela IEC - International Electrotechnical Commission, como uma organização internacional de caráter normativo.

linha de pesquisa (SCARAZZATO, 2004). Somente em dezembro de 2001, em Florianópolis-SC, iniciou-se em funcionamento a primeira estação de medição sistemática de iluminação natural brasileira de acordo com as normas do IDMP (SOUZA; PEREIRA, 2004).

Em 1994, a Illuminating Engineering Society of North America (IES)⁶ publicou o documento intitulado “Recommended Practice for the Calculation of Daylight Availability, que fornece uma série de algoritmos que foram baseados juntamente com medições realizadas e métodos preditivos, desenvolvidos ao longo de 60 anos em vários países (décadas de 1920 a 1980). Além disso, dispõe de informações das três condições de céu: claro, parcialmente nublado e encoberto. As equações fornecem os valores mais próximos à média dos dados obtidos ao longo do tempo e determinam valores médios de iluminâncias e luminâncias. Ressalta-se aqui que os dados assim calculados podem apresentar variações substanciais em relação a valores instantâneos medidos de iluminâncias, no entanto, considera-se que este tipo de equações fornecem resultados bastante satisfatórios (SOUZA, 1997).

Em 2002 a CIE baseada em estudos anteriores, propõe um conjunto de distribuição de luminância que considera a divisão do céu em 145 partes e possibilita modelar o céu sob condições diversas e são adotados 15 modelos de céus. Os modelos são divididos em três grupos de cinco, correspondendo às três condições básicas de nebulosidade, céu claro, encoberto e parcialmente nublado (ver Anexo B). Destina-se a ser uma base universal para a classificação das medidas das distribuições de luminância de céu e para fornecer um método para calcular luminância de céu nos procedimentos de projeto de iluminação natural (CABÚS, 2002).

Avaliar a disponibilidade de luz natural é uma tarefa bastante complexa devido ao seu comportamento dinâmico, no entanto, com a possibilidade da determinação dos dados de luminância de cada localidade, várias pesquisas e programas de simulação computacional foram então desenvolvidos para auxiliar e facilitar o conhecimento do comportamento interior da luz natural.

O número de estações IDPM no mundo tropical ainda é limitado e considerando a escassez de dados medidos sobre a disponibilidade de luz natural no Brasil, os estudos são desenvolvidos no intuito de suprir esta carência e determinar os modelos de céu

⁶ IES é uma organização científica sem fins lucrativos, fundada em NovaYork em 1906 com o objetivo de melhorar o ambiente iluminado, transmitindo conhecimentos em iluminação. Seus membros são profissionais respeitados mundialmente.

predominantes para algumas regiões. Alguns estudos são feitos, inclusive, para comparar dados medidos com dados obtidos através de modelos preditivos.

Janjaia et al (2008) apresentam um modelo para o cálculo da luminância do céu onde a refletividade da atmosfera da Terra obtida a partir de dados de satélite foi usada para classificar as condições de céu.

De maneira geral, regiões litorâneas têm mais céus nublados que regiões interioranas, exceto as situadas em latitudes altas. Localizações de latitude altas também tendem a ter mais nuvens e conseqüentemente menos horas de raio de sol (BAKER; STEEMERS, 2002).

Bittencourt (1993) pesquisou o clima do litoral do nordeste brasileiro, e apresentou que a condição de céu típico em climas quentes úmidos é parcialmente nublado e que as ocorrências de céu claro são raras (cerca de 4,5% em média), enquanto os céus nublados são acima de 15%; Souza e Pereira (2004) também indicaram que o céu intermediário ou parcialmente nublado é um tipo de céu dos mais frequentes em território brasileiro e deve ser considerado em estudos de iluminação natural; Scarazzato (1995), desenvolveu o software DLN com o objetivo de contribuir com um modelo preditivo da disponibilidade de luz natural.

Cabús (2002) propôs uma metodologia simplificada para medir a luminosidade do céu e correlacionar os resultados com os padrões da CIE para propor um céu típico para um local específico. Analisando as Normas Climatológicas de trinta anos (1961 a 1990) e os dados da estação meteorológica do Aeroporto Zumbi dos Palmares no período de 1982 a 1997, apresentou a probabilidade de ocorrência dos céus para a cidade de Maceió: céu parcialmente nublado como o mais frequente na maior parte do ano, ocorrendo em 61,8% do período, o céu encoberto aparece com 25,8% e o céu claro com apenas 12,4%. De acordo com o método utilizado sugere que o conjunto dos três modelos de céu é a melhor escolha para os cálculos de iluminação natural.

Os modelos de céu da CIE ajudam a investigar o desempenho de um edifício em algumas condições selecionadas, mas não permitem que se avalie como o edifício vai realizar o desempenho durante todo o ano. Para isso é necessário, por meio de um arquivo climático, modelar todas as condições de céu do local do edifício ao longo do ano, denominado de céu dinâmico. Simulações de iluminação natural podem ser divididas em métodos estáticos e dinâmicos de acordo se eles consideram uma única ou uma série de condições de céus

consecutivos (REINHART, 2010). Os resultados são apresentados em uma série de dados de iluminâncias e luminâncias dentro da edificação.

2.3.3 Sistemas de iluminação natural

Os sistemas de iluminação natural mais utilizados são os com abertura direta para o exterior da edificação (ou para uma área livre interna), de forma lateral ou zenital. Outro sistema consiste na utilização de dutos de luz, e tem a característica de conduzir a luz natural a locais sem acesso direto a ela por meio de materiais reflexivos, no entanto, seu uso é bem mais restrito e não é tratado neste trabalho.

O sistema de iluminação natural é fundamental para a obtenção do conforto térmico e luminoso nas edificações. Suas dimensões devem ser cuidadosamente determinadas, uma vez que uma de suas funções é admitir a entrada de luz natural enquanto controla os ganhos e perdas de calor. O balanço correto dos requerimentos térmicos e luminosos reduz a necessidade do uso de equipamentos elétricos, ajudam a promover uma arquitetura mais adequada ao clima do local e em harmonia com a natureza (MACÊDO, 2002).

Para a escolha do sistema mais adequado, deve-se levar em conta a forma e a disposição dos ambientes que compõem o edifício, o tipo da tarefa visual a ser executada bem como os aspectos econômicos, tecnológicos e relativos ao clima local (LAM, 1986).

A avaliação da eficácia do sistema escolhido, quanto à sua capacidade de atender às necessidades visuais do usuário, de fornecer níveis adequados de iluminação e de ser energeticamente eficiente, é feita mediante o conhecimento do comportamento radiante das aberturas, ou seja, do desempenho desses sistemas ante as várias condições climáticas que se apresentem (SOUZA; PEREIRA, 2004).

A relação entre quanto da luz incidente será refletida, absorvida e transmitida pelo sistema de abertura varia de acordo com as propriedades ópticas do material que forma a superfície (BAKER et al, 1993).

Segundo Koenigsberger et al (1977), existem três variáveis situadas na zona de ação dos projetistas para controlar a radiação solar através de uma janela: orientação, tamanho e proteções solares (internas ou externas). A orientação e o tamanho são determinantes na quantidade de calor e luz solar que penetram pela abertura e as proteções solares irá bloquear ou controlar a incidência da radiação solar direta pelas aberturas. A influência dos protetores ocorre devido aos múltiplos processos de reflexão entre os elementos de controle solar que

bloqueiam parcialmente ou filtram a luz natural incidente na abertura e modificam a direção da luz para o ambiente interno (BOGO et al, 2009).

Cada sistema de iluminação responde de forma peculiar diante da variação de iluminância externa, dos diferentes tipos de céu e dos ângulos de incidência da radiação solar. A utilização correta de cada sistema possibilita que trocas térmicas, luminosas e visuais entre o interior e o exterior da edificação aconteçam de forma a favorecer o conforto físico e psicológico dos usuários. A seguir são feitos alguns comentários sobre esses sistemas de iluminação, com uma ênfase maior para a iluminação zenital, objeto do presente estudo.

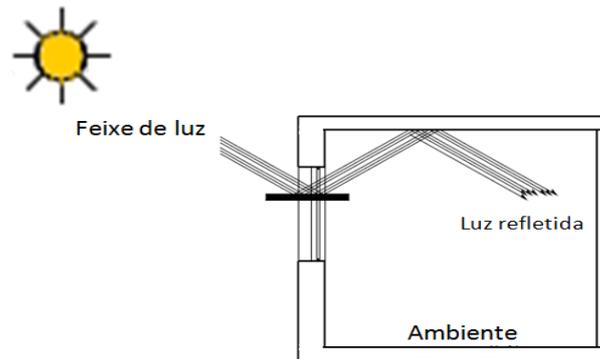
2.3.3.1 Sistema de abertura lateral

A iluminação proveniente de aberturas laterais é a que acontece através de componentes de passagem laterais que são os que ficam localizados nas superfícies verticais da envoltória (fachadas). Como exemplo, podem-se citar as janelas, as portas em terraços, as paredes translúcidas e as cortinas de vidro.

Uma das principais características do sistema de iluminação lateral é a diminuição dos níveis de iluminação à proporção que aumenta a distância em relação à abertura. O que implica em contraste claro/escuro acentuado entre pontos do ambiente, comprometendo o conforto visual, quando a luz provém de um só lado (BAKER, STEEMERS, 2002; CORBELLA; YANNAS, 2003). Percebe-se nestes casos, que o nível médio de iluminação pode não representar adequadamente a iluminância do espaço interno. Neste sentido, várias pesquisas são desenvolvidas abordando a influência da profundidade dos ambientes na iluminação natural internamente, com propostas da relação entre as dimensões do ambiente com as dimensões e localização das aberturas para uma iluminação mais uniforme. Hopkinson et al (1975) sugere que a iluminação útil em um ambiente alcançará (acima do plano de trabalho) somente uma distância de 2,5 vezes a altura do piso até o topo da janela. Bittencourt et al (1995), reforça que as janelas altas produzem uma melhor distribuição do fluxo luminoso, reduzindo os níveis de iluminação natural nas regiões próximas às aberturas e aumentando nas regiões mais afastadas.

Um recurso que pode ser utilizado para melhorar a penetração da iluminação em um ambiente é o uso de elementos de redirecionamento da luz do sol, conhecidos como prateleiras de luz, que podem minimizar esse efeito de contraste e favorecer a uniformidade luminosa no ambiente (ARAÚJO et al, 2005), a importância desses elementos também é tema de vários estudos (ver Figura 17).

Figura 17 - Corte esquemático de uma prateleira de luz e seu funcionamento.



Fonte: Autora, 2011.

2.3.3.2 Sistema de abertura zenital

A iluminação zenital é a porção de luz natural produzida pela luz que entra através dos fechamentos superiores (coberturas) dos espaços internos (NBR 15215-1:2005). Esse tipo de iluminação possui enorme capacidade de captar a radiação luminosa, quer do sol, quer da abóbada celeste (ver exemplo na Figura 18).

Figura 18 – Sala de leitura principal, Biblioteca nacional de Paris (1859-68).

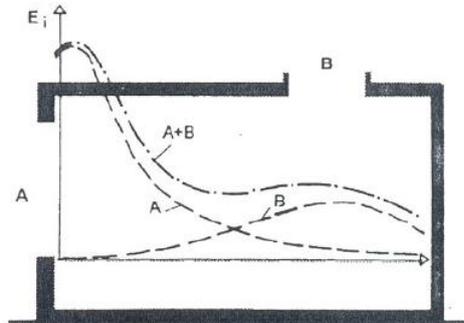


Fonte: BAKER; STEEMERS (2002)

O sistema de abertura zenital possibilita uma maior uniformidade na distribuição da luz em relação à iluminação lateral, além de poder atingir áreas não iluminadas pelas aberturas laterais em ambientes mais profundos (LAM,1986; ROBBINS, 1986; MOORE,1991). Segundo Robbins (1986), esse tipo de iluminação possui maior facilidade de integração com a iluminação artificial, pois ambas chegam ao plano de trabalho a partir do

teto. A Figura 19 ilustra por meio da seção de um ambiente, um exemplo da relação entre a distribuição da iluminação lateral e zenital.

Figura 19 - Relação do nível de distribuição da iluminação lateral (A) e zenital (B).



Fonte: MAJOROS (1998).

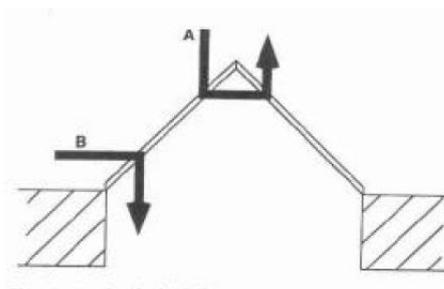
A iluminação zenital pode ser proveniente de estratégias de projeto das mais simples, como por exemplo, uma telha transparente em meio às telhas opacas (Figura 20), ou pode ser resultado de aberturas com formatos, materiais e/ou tecnologias mais diferenciados (Figura 21 e Figura 22).

Figura 20 - Iluminação zenital com o artifício do uso de telhas transparentes.



FONTE: Autora, 2010.

Figura 21 - Sistema zenital formado por painéis cortados à laser, em forma de pirâmide e o esquema do redirecionamento da luz de acordo com a altura solar.



Fonte: MOEK, 1998.

Figura 22 - Standed Airport (Arq. Norman Foster - London, 1991).



Fonte: LABCON, 2012.

Chichierchio (1978) observa que a decisão pelo uso deste tipo de iluminação pode ser tomada tanto por aspectos objetivos, quanto subjetivos, em função do efeito que se espera obter. Em espaços de grandes dimensões, inclusive em altura, a utilização da luz natural zenital é a estratégia de projeto mais adequada (ANDRADE, 2004). Como por exemplo, uma cobertura tipo “shed” em atividades industriais, nos espaços destinados a funções produtivas que exigem boa uniformidade e quantidade de luz. Para Garrocho (2005), dentre as tipologias arquitetônicas existentes, os centros comerciais (ou centros de compras, comumente chamados de “shoppings centers”) são edificações que mais recebem sistemas de iluminação natural zenital.

Outras características do sistema de abertura zenital é captar grandes quantidades de luz proveniente de alturas solares mais elevadas e a possibilidade de receber o dobro da radiação solar, se comparado com as aberturas laterais de fachada. Geralmente é pouco indicado para locais com altos índices de luminosidade (locais de baixa latitude), uma vez que pode gerar aquecimento indesejado no ambiente interno. No entanto, se bem projetado é capaz de controlar a radiação solar de forma a redirecioná-la e introduzi-la em quantidade suficiente para iluminação, de maneira uniforme, sem ganhos térmicos desnecessários e evitando-se problemas de ofuscamento (BAKER; STEEMERS, 2002). Por outro lado, a luz proveniente de baixas alturas solares é transmitida de forma ineficiente (ROBBINS, 1986; MOORE, 1991).

Macêdo (2002) em sua pesquisa a respeito do ganho térmico proporcionado por alguns sistemas de iluminação natural, analisou térmica e luminosamente seis sistemas de iluminação, dentre eles abertura zenital com vidro simples (3 mm) e abertura zenital com sistema de seleção angular e vidro simples (3 mm). A partir das análises, foi comprovado que,

quando bem dimensionados, os sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol podem filtrar a radiação solar, proporcionando iluminação adequada, distribuição da luz mais uniforme e ganhos térmicos reduzidos.

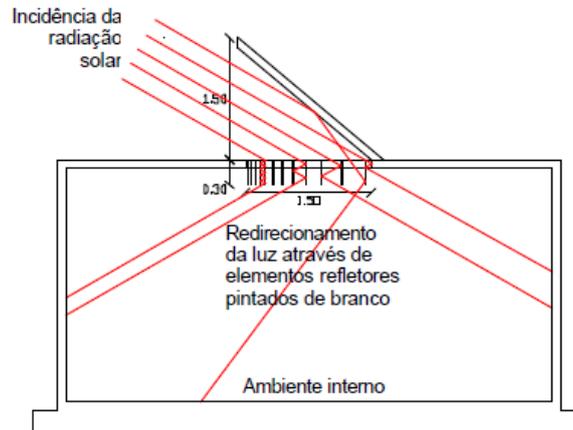
As aberturas zenitais podem receber sistemas de fechamento bastante comuns (como um vidro fixo transparente) aos mais sofisticados, inclusive com movimentos de abertura e tecnologias avançadas de direcionamento de elementos de proteção solar baseados na disponibilidade de luz natural. Garrocho (2005) em sua pesquisa descreveu esses sistemas avançados para otimização da luz natural e analisou por meio de simulações, o desempenho lumínico de dois tipos⁷, com diferentes materiais nas superfícies iluminantes para aberturas zenitais amplas, características para Shopping Centers, no intuito de aprofundar o conhecimento de novas tecnologias de materiais disponíveis para uma correta utilização das mesmas no contexto do clima de Brasília.

Roncálio e Pereira (1995) projetaram e analisaram modelos físicos em escala reduzida de uma proposta arquitetônica composta por um átrio com abertura zenital, com um conjunto de venezianas de dois modelos diferentes para proporcionar o redirecionamento e controle da luz direta do sol. No primeiro, as venezianas eram triangulares espelhadas (angularmente seletivas para redirecionar a luz direta do sol com altura abaixo de 40°) e no segundo, eram lâminas lineares difusoras de luz. Em ambas as propostas foram eliminadas a incidência direta dos raios solares no interior do ambiente e houve um aumento significativo no nível de iluminação.

Macêdo (2002), baseado em um método sugerido por Moore (1991), propôs um sistema muito similar de seleção angular, composto por uma superfície superior levemente inclinada e lâminas (venezianas) que interceptam toda a radiação solar direta, que ganha qualidade difusa antes de iluminar o ambiente (ver Figura 23). Ele fez a comparação do desempenho desse sistema com um sistema zenital de vidro simples, os resultados mostraram uma iluminação não uniforme com o vidro simples e uma iluminação bastante uniforme com o sistema de seleção angular. Bertolotti e Moura (2007), também fizeram um estudo de um dispositivo zenital com seleção angular, no entanto, dirigido para salas de aula e em conjunto com as aberturas laterais, e foi previsto um potencial de conservação de energia de 65%, para uma condição sem o uso de controles automáticos para o acionamento da iluminação artificial.

⁷ Os sistemas avançados selecionados foram os denominados de painéis prismáticos e o Okasolar, inclusive por serem os dois únicos materiais disponíveis para a possível simulação no programa computacional escolhido (GARROCHO,2005).

Figura 23 - Corte do sistema zenital com seleção angular.



Fonte: MACÊDO, 2002.

Os estudos mostram que um melhor aproveitamento da luz difusa por reflexão nas aberturas zenitais possibilita se atingir o nível necessário de iluminação com qualidade e ainda favorecer o conforto térmico e a economia no consumo de energia.

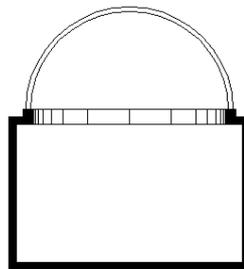
Os exemplos citados foram com uma única abertura zenital por ambiente. Em relação a estudos com mais aberturas e menores, pode-se citar o trabalho de Correa (1997), que fez uma análise comparativa real do desempenho lumínico de dois tipos de sala de aula em Barcelona (Espanha), com iluminação zenital. Uma com uma abertura lateral alta e contínua e a outra com oito dômus distribuídos uniformemente na laje de cobertura. Apesar dos valores dos níveis de iluminação para a sala com os dômus serem menores do que a outra, as iluminâncias obtidas em ambas as salas estão de acordo com os códigos de iluminação considerados. Vale salientar que os valores mais baixos obtidos na sala com os dômus se deram devido à elevada altura dos mesmos em relação à laje (1,70 acima dela), no entanto, esta sala apresentou as superfícies com iluminâncias melhor distribuídas. Cabús (1997) fez uma análise comparativa baseada em conceitos estatísticos, da influência da quantidade, forma e distribuição de aberturas zenitais (com uma superfície translúcida 100% difusora sem proteção solar) no desempenho luminoso de um ambiente, tendo como referencial um sistema de iluminação que produza uma distribuição de iluminâncias uniforme. O parâmetro adotado foi o coeficiente de variação, e dentre as diversas colocações do trabalho, para uma mesma área total de abertura (equivalente a 4% da área do piso), têm-se que o aumento do número de aberturas no sentido paralelo à maior dimensão do ambiente resulta em uma melhor distribuição de iluminâncias, do que aqueles com o mesmo número no sentido perpendicular e que o formato mais alongado do ambiente, de acordo com os níveis de refletividade das

superfícies, melhora a distribuição das iluminâncias. Verificou-se também que com o alongamento do ambiente, fica desprezível a influência do número de aberturas em linha sobre o desempenho, enquanto a influência do número de aberturas em coluna aumenta, o que reforça que um simples aumento no número de aberturas não implica necessariamente em ganho de desempenho, do ponto de vista da distribuição de iluminâncias.

Algumas pesquisas comprovam que a maioria das pessoas prefere ambientes que possam ter uma visão para o ambiente externo, isto se dá principalmente pela necessidade de informações sobre o mundo exterior (TREGENZA; LOE, 1998; CORBELLA; YANNAS, 2003). A abertura zenital não proporciona essa visão, mas através dela é possível inferir o tempo e a hora do dia, aspectos importantes para controlar o relógio biológico das pessoas. Apresentam maiores dificuldades de manutenção, no entanto, a limpeza deve ser prevista de forma regular para manter os padrões de iluminação planejados. Existem diferentes tipos de aberturas zenitais, a seguir relacionam-se as tipologias mais comuns:

- a) cúpula: Cobertura hemisférica vazada ou construída com materiais translúcidos, cobrindo toda ou a maior parte do espaço abaixo (ver Figura 24 e Figura 25);

Figura 24 - Modelo básico de cúpula (Corte esquemático do ambiente)



Fonte: FAU/USP, 2011.

Figura 25 - Cúpula do Shopping Pátio Higienópolis, São Paulo



FONTE: Autora (2010).

- b) clarabóia: é uma abertura situada numa cobertura plana ou inclinada para a entrada de luz no ambiente, também chamadas de janelas de cobertura (ver Figura 26 e Figura 27). Quando horizontal essa tipologia necessita de maior manutenção na limpeza, devido à facilidade ao acúmulo de poeira;

Figura 26 - Modelo básico de claraboia (Corte esquemático do ambiente).



Fonte: FAU/USP, 2011.

Figura 27 - Pinacoteca do Estado de São Paulo (autoria do Arqtº Paulo M. da Rocha).



Fonte: FAU/USP, 2011.

- c) dente-de-serra ou sheds: Caracteriza-se por uma série de superfícies paralelas inclinadas com aberturas verticais ou inclinadas em um dos lados, proporcionando uma iluminação zenital mais difusa e uniforme. Seu uso é mais comum em fábricas e ambientes com grandes vãos (ver Figura 28 e Figura 29). Para realidade dos trópicos recomenda-se que as aberturas fiquem voltadas para o Sul, para o aproveitamento da luz difusa e para evitar-se a incidência direta solar na maior parte do ano;

Figura 28 - Modelo básico de Shed (corte esquemático / efeito ilustrativo da iluminação)



Fonte: FAU/USP, 2011.

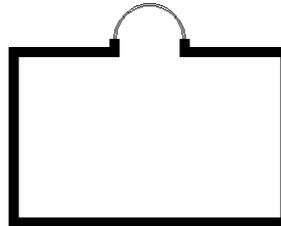
Figura 29 - Exemplo de cobertura com sheds – Hospital Sarah Kubitschek (Rio)
Arquiteto João Figueiras Lima (Lelé).



Fonte: LABCON, 2012.

- d) domo: Caracterizado por uma abertura formada por uma superfície hemisférica, podendo ser construído com material totalmente translúcido ou com material opaco com perfurações (ver Figura 30 e Figura 31);

Figura 30 - Modelo básico de domo (corte esquemático do ambiente)



Fonte: FAU/USP, 2011.

Figura 31 - Exemplos de coberturas com domos.



Fonte: FAU/USP, 2011.

- e) teto transparente ou cobertura translúcida: Fechamento horizontal (ou com pequena inclinação) parcialmente constituído por material translúcido, cobrindo toda ou maior parte do espaço abaixo. Seu uso não é adequado nos trópicos, devido à grande quantidade de calor que transmite (ver Figura 32 e Figura 33).

Figura 32 - Modelo básico de teto transparente (corte esquemático do ambiente)



Fonte: FAU/USP, 2011.

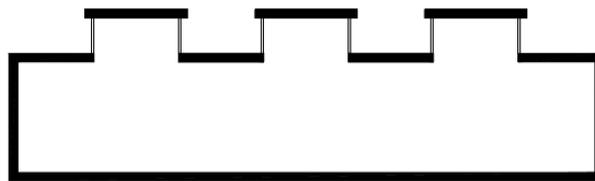
Figura 33 - Exemplo de teto transparente com estrutura metálica



Fonte: LABCON, 2012.

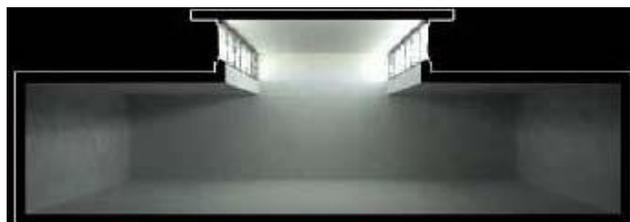
- f) lanternim: Caracteriza-se por uma elevação, geralmente na parte mais alta do telhado, apresenta pelo menos duas faces opostas iluminantes (ver Figura 34 e Figura 35). Pode ter o comprimento igual ao do espaço abaixo ou constituir-se de módulos com abertura quadrada ou, circular. No Brasil, é recomendável que as partes iluminantes sejam orientadas a Norte-Sul. Esta tipologia é a que mais se adéqua a proposta do presente estudo.

Figura 34 - Modelo básico de lanternim (corte esquemático do ambiente)



Fonte: FAU/USP, 2011.

Figura 35 - Efeito ilustrativo da iluminação de um lanternim alongado.



Fonte: FAU/USP, 2011.

2.3.4 Avaliação da Iluminação Natural

Para se avaliar o desempenho dos sistemas de abertura na iluminação natural interna, primeiramente é necessário quantificar a iluminância no ambiente. A partir do critério quantitativo é possível uma avaliação qualitativa com os critérios de desempenho de iluminação. A interpretação das medidas de desempenho permite tomar as decisões de projeto (REINHART, 2010).

2.3.4.1 Determinação quantitativa da Iluminância Natural

A determinação da iluminância em um ambiente pode ser feita por meio de medições ou simulações. Deve ser considerado o somatório da luz que atinge cada ponto (pré-definido) diretamente do sol e do céu (componente direta) mais a luz que chega após reflexões nas superfícies internas e externas (componentes refletidas), uma vez que todas as superfícies refletem luz continuamente em trocas constantes de fluxo (ver Figura 36). O Gráfico 1 mostra a contribuição relativa de cada componente para um ambiente típico com obstrução externa.

Figura 36 - Fontes de luz natural que alcançam o ambiente.

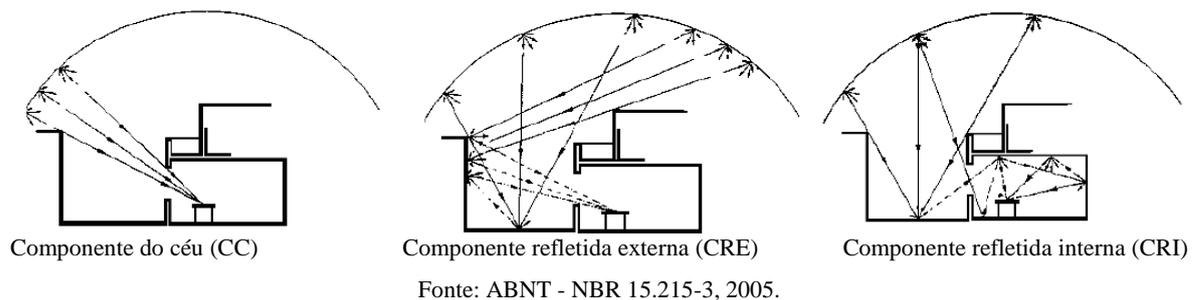
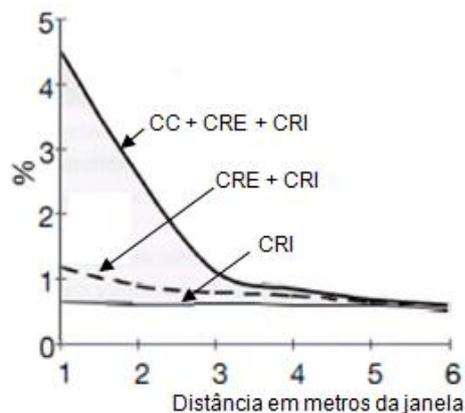


Gráfico 1 – Exemplo da contribuição relativa de cada componente. (Adaptação da autora)



Fonte: BAKER; STEEMERS, 2002.

A componente direta depende da parte do céu que é vista de um ponto, no interior do ambiente, através das aberturas. Para se considerar a componente direta do céu é importante, portanto, a localização, formato e o tamanho da(s) abertura(s).

A componente refletida interna corresponde à quantidade de luz que chega ao ponto, decorrente da reflexão do piso, das paredes e do teto. Depende, portanto, do índice de refletância dessas superfícies. Chama-se refletância a razão entre a luz refletida e a luz incidente, também conhecida como fator de reflexão. Uma superfície pode absorver ou refletir mais ou menos a radiação incidente, de acordo com sua cor e textura. A reflexão das superfícies será tanto maior quanto mais claras forem. No Brasil, os fabricantes de tintas e outros revestimentos, em geral ainda não fornecem as informações sobre a refletância ou absorvância dos materiais, o que reflete em algumas pesquisas na área, como por exemplo, o estudo feito por Dornelles (2008), onde ela registrou uma base de dados de absorvância solar para tintas imobiliárias e propôs três métodos de determinação para superfícies opacas.

A componente refletida externa corresponde à quantidade de luz que chega ao ponto, decorrente da reflexão do entorno natural (solo e vegetação) e edificado (edificações próximas). Cabús (2002) reforça que, em regiões tropicais, onde a luminosidade é intensa, a luz refletida do solo é um componente importante na iluminação natural nos ambientes.

Por outro lado, a vegetação e as edificações muitas vezes constituem-se obstruções à luz proveniente do céu. Por conta disso, alguns autores procuram inserir indicadores de controle da obstrução do céu em legislações urbanas.

As medições de iluminância podem ser realizadas em ambientes reais ou em modelos físicos executados em escala reduzida, a NBR 15215-4 (2004) estabelece algumas recomendações que devem ser seguidas.

As simulações são realizadas basicamente, por meio de modelos computacionais. A decisão de que método utilizar depende da natureza e do contexto em que está inserido o estudo. Normalmente, leva-se em consideração fatores, como, a eficiência de cálculo, viabilidade financeira e o tempo de levantamento e processamento dos dados. A seguir, têm-se as principais características de cada um:

a) medições

As medições em ambientes reais têm como objetivo avaliar as condições de iluminação no ambiente, em condições reais de ocupação e utilização.

As medições em modelos físicos ou modelos reduzidos em escala (conhecidos como maquetes) podem ser uma boa solução para previsão e análise conjunta de uma série de aspectos em um ambiente de projeto complexo. Podem ser desenvolvidas em condições simuladas (céu artificial utilizando um heliodon) ou reais (sob condições de céu real).

A escala da maquete deve ser coerente com o tamanho da fotocélula de medição. A Norma 15215-4 (2004) indica algumas recomendações para a execução das mesmas, e dentre elas, que a escala de sua construção não deve ser menor do que 1:40, devido a importância de uma melhor reprodução de alguns detalhes internos para maior exatidão dos resultados.

Nos modelos reduzidos é possível a realização das medições de iluminação sem requerimentos para compensação da escala, diferentemente da maioria das outras análises, como térmica, estrutural, acústica e ventilação, onde os aspectos da escala tendem a distorcer o fenômeno (ROBBINS, 1986; MOORE, 1991). No entanto, um aspecto importante é quanto à forma e ao coeficiente de reflexão de todas as superfícies, que devem reproduzir ao máximo a situação real. Bodart et al (2008) apresentam uma metodologia para avaliar as características fotométricas e calorimétricas de materiais internos, para avaliação de iluminação natural. O objetivo é comparar esses parâmetros no tamanho real dos materiais com os mesmos nas maquetes para contribuir para a modelagem de materiais com precisão, nas ferramentas de simulação da luz natural, como também, na construção correta de maquetes.

O uso de medições em modelo de escala reduzida vem diminuindo rapidamente em relação a uma pesquisa de 1994, visto que, a confiabilidade das ferramentas de simulação de iluminação natural tem aumentado (REINHART; FITZ, 2006).

b) simulações computacionais

As simulações computacionais são capazes de resolver por meio de cálculos complexos e um banco de dados com informações auxiliares como dados climáticos, as diversas interações entre superfícies, parâmetros climáticos e atributos dos materiais e, pela sua velocidade e atual disponibilidade, os aplicativos podem considerar os diversos dados, de forma independente ou em conjunto (CABÚS, 1997). Basicamente uma ferramenta de simulação requer informações sobre o ambiente e sobre a (as) condição (ões) predominante(s) de céu para calcular através dos algoritmos a distribuição de iluminâncias ou luminâncias.

As simulações de luz natural podem ser divididas em simulações estáticas e dinâmicas, dependendo se elas consideram um único tipo de céu ou uma série de condições consecutivas (REINHART, 2010).

Existem vários programas de simulação computacional direcionados para o estudo da iluminação natural, alguns, inclusive, apresentam uma visualização bem realística do ambiente, o que facilita a visualização dos efeitos qualitativos. As características específicas de cada um é que serão determinantes na escolha para os diferentes estudos. A seguir têm-se as características de alguns programas:

_ O programa TropLux, criado por Cabús (2002) baseia-se em três conceitos fundamentais para o cálculo da iluminação natural, o método Monte Carlo, o método do Raio Traçado e o conceito de Coeficientes de Luz Natural. Dentre outras características possibilita que a iluminância seja calculada simultaneamente, para diferentes orientações das aberturas, diferentes tipos de céu (no padrão CIE- Comissão Internacional de Iluminação), diferentes dias do ano e horas do dia. Processa separadamente a contribuição da luz oriunda do sol e do céu; os ambientes podem ter geometria complexa e permite configurar a refletância e transmitância dos materiais construtivos do ambiente analisado. Em sua edição mais recente - TropLux 6, foi incluída a possibilidade de se trabalhar com o céu dinâmico, considerando a influência dos três tipos de céu padrão em proporções equivalentes ao clima luminoso da cidade (CABÚS, 2012 b).

_ O Radiance foi desenvolvido principalmente para simular luminâncias e iluminâncias sob condições de céu selecionadas. O Daysim, utilizando os mesmos algoritmos de simulação do Radiance, juntamente com a abordagem dos coeficientes de luz natural, simula as distribuições de iluminâncias em todas as condições de céu durante o ano (REINHART, 2010). O Daysim utiliza o mesmo arquivo climático utilizado no EnergyPlus, outro software que realiza simulação de iluminação natural, ambos permitem simulações de modelos com geometrias complexas (DIDONÉ, PEREIRA, 2009). Alguns programas simulam tanto a iluminação natural como a artificial para ambientes internos ou externos, como o Lumen Micro, criado em 2006.

_ O EnergyPlus é um software para simulação termoenergética, no entanto, possui limitações no módulo de iluminação natural, que superestima a luz em ambientes internos. Para contornar essa limitação, Didoné e Pereira (2010) propõem uma metodologia para a avaliação da eficiência energética, considerando o aproveitamento da luz natural através de dois programas: o EnergyPlus e o Daysim. Ambos utilizam o mesmo arquivo climático e permitem simulações de modelos com geometrias complexas. Alguns programas simulam tanto a iluminação natural como a artificial para ambientes internos ou externos, como exemplo, o Lumen Micro, criado em 2006.

Desde as primeiras hipóteses do processo projetual, os critérios de energia devem considerar os demais, como circulação, estrutura, viabilidade de construção e estética (PEDRINI; SZOKOLAY, 2005). Baseados neste princípio, alguns estudos são feitos com diretrizes para criar uma ferramenta que possibilite estimar o desempenho de determinados projetos a partir das simulações das primeiras decisões arquitetônicas.

Gagne et al (2011) propõem uma ferramenta interativa para as primeiras fases do projeto de iluminação natural especificamente, que consiste em dois componentes principais: uma base de informações sobre os efeitos de uma variedade de condições de projeto, no desempenho da iluminação natural e uma lógica de tomada de decisões baseada em regras, que é usada para determinar as alterações mais susceptíveis para melhorar o desempenho de um determinado projeto. O sistema funciona como um "consultor de iluminação natural virtual", orientando o usuário para melhorar o desempenho do projeto.

A luz do dia é extremamente variável, é importante utilizar um programa que permita fazer as configurações o mais próximo da dinâmica da realidade local. Os programas que utilizam o arquivo climático se diferenciam por poder prever a quantidade de luz natural em um ambiente no decorrer do ano inteiro.

2.3.4.2 Critérios de desempenho da iluminação natural

O desempenho luminoso de uma edificação pode ser considerado satisfatório se as exigências de conforto visual e as exigências de economia de energia elétrica para iluminação artificial dos ambientes da edificação forem atendidas (LAMBERTS et al, 1997). Com base nessas duas exigências é possível a formulação de critérios quantitativos e qualitativos de desempenho que devem ser atendidos nas edificações, dentre eles:

a) nível de Iluminância

É a base inicial para se analisar o desempenho luminoso de um ambiente. Cada tarefa visual necessita de iluminância adequada para possibilitar uma eficiência visual. Para determinar uma boa iluminância, diversos fatores influenciam e devem ser observados, dentre eles, o tipo de tarefa a ser executada no ambiente, a idade de quem vai executá-la, o período de duração, a velocidade de execução, o campo visual, etc. Em decorrência disso, as normas da maioria dos países especificam a iluminância mínima necessária para a realização de tarefas. A Norma disponível no Brasil, NBR 5413:1992, estabelece valores de referência de iluminâncias médias mínimas em serviço, para iluminação artificial em interiores, exigidos

para diferentes tipos de atividades. Variam de 20 a 20000 lx a depender das características da tarefa e da idade do observador (ver Anexo A).

Normas de iluminação são sempre definidas dentro de um contexto de valores econômicos e sociais. No entanto, às vezes é uma questão de bom senso, pois os valores são determinados para a maioria das pessoas, mas existem diferenças consideráveis entre os indivíduos (TREGENZA; LOE, 1998).

A condição de iluminação de um ambiente, normalmente, é considerada em relação a um plano de trabalho, que é um plano imaginário, geralmente com altura de 0,75 m de altura em relação ao piso (NBR 5413:1992).

De maneira geral, entre 100 lx e 500 lx tem-se uma boa condição de iluminação para atividades domésticas. Atividades de escritório são mais diversificadas e precisam de níveis mais altos, entre 500 lx e 1000 lx. Acima desse limite, encontram-se tarefas visuais de maior precisão (ARAÚJO, 2006).

b) uniformidade e Diversidade

A distribuição correta da luz no ambiente é muito importante e seu grau de dificuldade aumenta quando a fonte de luz é natural (CABÚS, 1997). Uniformidade e diversidade são critérios qualitativos relacionados com a forma de distribuição da luz no ambiente. A uniformidade é determinada pela relação entre a iluminância mínima e a iluminância média encontrada em um mesmo período de medição e a diversidade é a relação entre a iluminância máxima sobre a mínima (quanto menor o índice de Diversidade, maior a Uniformidade). O recomendado é que, de maneira geral, essa relação entre o valor de iluminância mais alto e o valor mais baixo em todo o plano de trabalho não exceda 5:1 (TREGENZA; LOE, 1998).

Em alguns ambientes a iluminação uniforme é mais recomendada, especialmente ambientes de trabalho, em outros é desejável uma maior variação (LAMBERTS et al, 1997).

A má distribuição da luz pode gerar pontos em um mesmo ambiente com excesso e deficiência de luminosidade simultaneamente, por conta disso, o nível médio de iluminação nem sempre caracteriza adequadamente a iluminância. Na variação dos níveis de iluminação se percebe os pontos de carência e os excessos, essa análise é mais bem visualizada nas curvas de isoiluminância que mostram a distribuição da luz no plano de trabalho (PEREIRA; LEDER, 1998). A ABNT por meio da NBR 5413 (1992) recomenda que a iluminância em qualquer ponto do campo de trabalho não seja inferior a 70% da iluminância média.

c) ofuscamento

O ofuscamento pode ser direto ou indireto, e deve ser evitado controlando os níveis de luminância da tarefa visual e de seu entorno. Ofuscamento direto é o desconforto ou perda de acuidade visual causado pela visualização direta de fontes de luz com luminância (brilho) acima de certos limites e em ângulos indesejáveis e o ofuscamento indireto é causado pelo reflexo da luz na superfície de trabalho. Causa perda de acuidade pela diminuição de contraste (HOPKINSON et al, 1975; BAKER; STEEMERS, 2002).

De acordo com Lamberts et al (1997) o ofuscamento pode ocorrer devido a dois efeitos distintos:

- Contraste: quando a proporção entre as luminâncias de objetos do campo visual seja maior que 10:1.
- Saturação: ocorre normalmente, quando a luminância média da cena excede 25.000 cd/m².

A presença de contrastes excessivos entre as superfícies do ambiente de trabalho também é causadora de fadiga, devido à constante necessidade de adaptação do olho a situações de maior ou menor luminosidade. Entretanto, certo grau de contraste é positivo, pois uma distribuição de iluminâncias não uniforme produz ambientes mais dinâmicos do ponto de vista da percepção. A distribuição homogênea pode resultar em um ambiente demasiado estático (LAM, 1986).

2.3.4.3 Métodos de avaliação do desempenho luz natural

A iluminação interna decorrente da luz natural varia com as condições de céu. Valores absolutos não são os mais indicados para a verificação do desempenho real nas edificações. Reinhart et al (2006) destacam a necessidade de se aprofundar no conceito de medidas dinâmicas para a avaliação da luz do dia no interior dos ambientes. Com estas medidas é possível capturar o comportamento que ocorre entre um edifício, seus ocupantes e o clima local, através de uma base anual de dados, promovendo uma maior aproximação do projeto à realidade local.

Alguns dos métodos sugeridos como indicadores de desempenho da luz natural:

a) Fator de Luz do Dia (*Daylight Factor* - DF)

O método Fator de Luz do Dia é baseado no trabalho de um grande número de pesquisadores, elaborado ao longo de 70 anos, e é definido como a razão entre a iluminância interna (E_i) e a iluminância externa (E_e), medidas simultaneamente sobre um plano horizontal

nos dois locais, sob condições de céu encoberto (do padrão da CIE) e expresso em porcentagem (ROBBINS, 1986; TREGENZA; LOE, 1998). Pode ser expresso com a seguinte equação:

$$DF = (E_i/E_e) \times 100 (\%)$$

O Fator de Luz do Dia é uma taxa e não um nível absoluto. Inclusive, diferentes iluminâncias podem resultar em um mesmo DF. Foi amplamente divulgado como um instrumento de avaliação simples e rápido, mas as variações de distribuição de luminosidade do céu e, em especial da luz do sol eram geralmente negligenciados (CABÚS, 2002).

Apesar de ter sido utilizado durante muitos anos, esse método tem sido questionado pelo fato de utilizar apenas o céu encoberto e não retratar a realidade da iluminação natural no ambiente, já que a radiação solar direta exerce forte influência no desempenho da luz natural face ao conforto visual (REINHART, 2010). Como métodos alternativos ao Fator de Luz do Dia, outros métodos foram propostos: Autonomia da Luz Natural (Daylight Autonomy-DA) por Reinhart (2002), e a Iluminância Útil da Luz Natural (Useful Daylight Illuminance- UDI), por Nabil e Mardaljevic (NABIL; MARDALJEVIC, 2006).

b) Autonomia da Luz Natural (Daylight Autonomy – DA)

A Autonomia de Luz Natural corresponde à porcentagem de horas por ano (do ambiente ocupado) em que a iluminância no plano de trabalho atinge um valor mínimo previamente estipulado (500 lx) e pode ser mantida somente por luz natural. Diferente do convencional Fator de Luz do Dia, o DA só pode ser calculado usando simulações computacionais e foi designado para ajudar a interpretação da análise do arquivo climático que emprega a realidade, a variação temporária do céu e as condições do sol e os níveis horários de iluminação natural absoluta (NABIL; MARDALJEVIC, 2006).

Uma Autonomia de Luz Natural alta caracteriza o potencial de iluminação natural de um espaço, mas como é independente da potência elétrica instalada e do tipo controle não é uma garantia para economia de energia de iluminação (REINHART, 2010). Além disto, este índice não permite a identificação de situações onde os níveis de iluminação são excessivamente elevados, podendo provocar efeitos adversos associados ao conforto visual e a carga térmica (MATOS et al., 2007).

c) Autonomia da Luz Natural Contínua (Continuous Daylight Autonomy – DAcon)

A Autonomia de Luz Natural Contínua (DAcon), proposta por Rogers (2006), é um conjunto de medidas com base nas definições da Autonomia da Luz Natural convencional (DA), no entanto, um índice parcial é atribuído aos intervalos de tempo em que a iluminação natural se encontra abaixo do nível mínimo de iluminância do projeto. Por exemplo, se há a necessidade de 500 lx e são conseguidos 400 lx pela luz natural em um determinado período de tempo, um índice de 0,8 é dado para este período (referente ao percentual alcançado). Com isso elimina-se o limite rígido entre conformidade e não conformidade das condições de iluminação no ambiente (REINHART et al. 2006).

d) Iluminância Útil da Luz Natural – IULN (Useful Daylight Illuminance- UDI)

O método IULN, proposto por Mardaljevic e Nabil (2005), é também uma medida dinâmica de desempenho da luz natural e vem complementar o método DA (Autonomia de Luz Natural), já que este último não leva em consideração a possibilidade da utilização conjunta da luz natural e artificial, através da dimerização, quando a iluminância proveniente da luz natural varia de 100 a 500 lx. Além disso, o DA não considera que valores de iluminância muito elevados podem causar desconforto sendo, portanto, indesejáveis.

O UDI corresponde então, à percentagem de horas em um ano em que a iluminância no plano de trabalho atinge um valor dentro de uma variação confortável e como o próprio nome sugere uma iluminação útil para o ocupante. De acordo com o método essa variação é definida de 100 a 2000 lx, baseada em estudos efetuados relacionados com o conforto humano em espaços de escritórios iluminados pela luz natural. Abaixo de 100 lx, o nível de iluminância é considerado muito pequeno e insuficiente para contribuir significativamente na redução da iluminação artificial. Acima de 2000 lx a iluminância é muito alta, podendo produzir desconforto térmico, visual ou ambos (NABIL; MARDALJEVIC, 2005).

De acordo com Lida (1997), até 1000 lx o rendimento visual cresce enquanto a fadiga visual decresce. A partir desse ponto até 2000 lx há um aumento discreto no rendimento visual com um acréscimo da fadiga visual. Ultrapassando os 2000 lx o rendimento visual tende a permanecer constante, com um aumento da fadiga visual. Por isso somente em situações especiais utilizam-se níveis de iluminação maiores que 2000 lx.

3 ETAPAS METODOLÓGICAS

Esse capítulo apresenta as etapas metodológicas que foram utilizadas para a avaliação do desempenho luminoso das aberturas zenitais propostas em laje nervurada pré-moldada.

A metodologia baseia-se na definição de um modelo de ambiente com aberturas zenitais com dimensões relacionadas ao tamanho da lajota, para a geração dos dados de iluminância por meio de um programa de simulação computacional e um estudo comparativo do desempenho luminoso no ambiente a partir de algumas variáveis adotadas em relação à abertura.

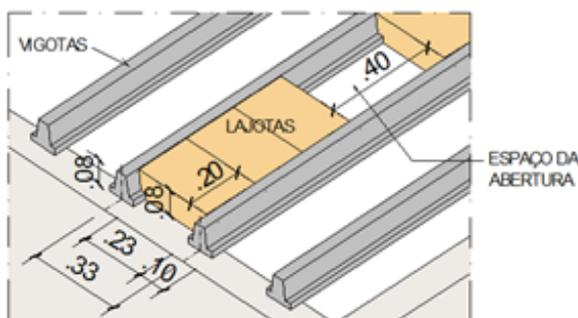
Na primeira parte define-se o modelo de referência e os modelos a serem comparados. Em seguida descreve-se o programa utilizado e as características do ambiente adotadas para as simulações. Por fim, são definidos os demais parâmetros para as simulações e as combinações a serem analisadas.

3.1 Caracterização dos modelos

A definição dos modelos para as simulações foi vinculada à escolha de um dos tipos de laje nervurada pré-moldada e de seus elementos, devido à variedade de suas dimensões. A partir daí foi definido o tamanho das aberturas e do ambiente para o estudo. Em seguida foram inseridos os parâmetros para as análises e comparações, dentre eles a variação na disposição das vigotas (que influencia a posição das aberturas) e a colocação de protetores solares nas aberturas.

A proposta apresentada neste trabalho está direcionada às lajes nervuradas pré-moldadas de concreto armado (convencional) – LC, unidirecionais, com lajotas de cerâmica como elemento de enchimento (ver dimensões na Figura 37). De acordo com alguns fabricantes e construtores são as mais utilizadas em Maceió, nas obras de pequeno porte entre os tipos existentes dessas lajes, conforme descritos no item 2.2.1.

Figura 37 - Dimensões escolhidas – vigotas e lajotas



Lajotas (be x he x c) = 0,23 x 0,08 x 0,20
 Vigotas (bv x hv) = 0,10 x 0,08 m
 Intereixo = 0,30 m

Fonte: A autora, 2011.

A laje escolhida tem uma nomenclatura de LC12 (8 + 4) (ver item 2.2.2 d) e já deve apresentar a inclinação necessária ao escoamento das águas pluviais. No entanto, como a cobertura do ambiente será a própria laje (sem telhas) com as aberturas zenitais, a espessura inicial de 12 cm, nas simulações foi acrescida para 20 cm, considerando a execução de uma camada de impermeabilização e de um isolamento térmico e uma borda de acabamento nas aberturas.

Todas as aberturas zenitais tiveram o mesmo o tamanho, que na proposta foi definido como o espaço equivalente à retirada de duas lajotas, correspondendo a uma área de 0,092m² por abertura (2 x 0,20m x 0,23m), conseqüentemente com sua maior dimensão sempre paralela às vigotas (ver Figura 37).

Não foi considerada para o estudo a opção de cada abertura ser apenas o espaço de uma lajota, devido à necessidade de se ter mais aberturas para corresponder à área total de abertura necessária no ambiente, o que ocasionaria um acréscimo de tempo e de mão-de-obra no momento da construção. No entanto, esta opção não deve ser descartada e pode ser feito, inclusive, um estudo paralelo do efeito estético internamente, em relação à quantidade e localização das aberturas. No caso da retirada de três lajotas ou mais por abertura, foi descartado para não comprometer a resistência da laje, uma vez que, apesar das lajotas não contribuírem na resistência das mesmas, ocasionaria um distanciamento da ferragem de distribuição do capeamento, acima do prescrito pela norma (ver Tabela 2), sendo necessário um cálculo específico e provavelmente, um acréscimo na ferragem complementar.

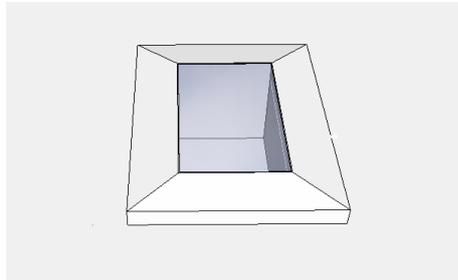
A quantidade de aberturas correspondente à área total de abertura necessária para o ambiente foi determinada a partir de uma relação com a área do piso. Adotou-se neste trabalho um percentual inicial em torno de 4% da área do piso, baseado em um estudo de iluminação zenital feito por Cabús (1997).

A distribuição das aberturas na laje, conseqüentemente, é definida em função da modulação dos elementos constituintes da mesma e a critério do projetista. Neste estudo, foi considerada uma distribuição uniforme das aberturas. A princípio, divide-se a área do ambiente pelo número pré-definido de aberturas e centraliza cada abertura nesses espaços, no entanto, devido à modulação dos elementos da laje, nem sempre o centro das aberturas ficará rigorosamente centralizado nessas divisões.

Para um controle seletivo (chuva, poeira, insetos) foi previsto um fechamento com vidro transparente comum (que posteriormente poderá ser adaptado para ser pivotante, para

proporcionar também a circulação de ar) e também uma borda de acabamento inclinada (batente) para evitar possíveis infiltrações de água de chuva (ver Figura 38).

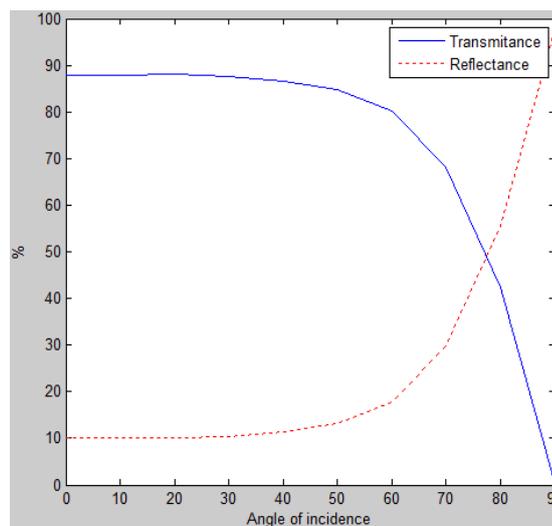
Figura 38 - Imagem ilustrativa da abertura zenital



Fonte: Autora, 2011.

O Gráfico 2 mostra as propriedades do vidro utilizado, já definidas no programa de simulação escolhido, e indica o percentual de refletância e transmitância do vidro em relação ao ângulo de incidência da luz.

Gráfico 2 - Propriedades do vidro transparente comum.

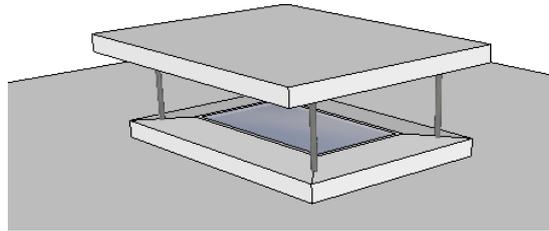


Fonte: CABÚS (2011).

3.1.1 Introdução dos protetores solares nas aberturas

Como o estudo foi desenvolvido para uma cidade tropical, tornou-se necessário a introdução de protetor solar nas aberturas. Foi previsto um protetor solar simples em forma de placa horizontal elevada (que também pode ser de concreto pré-moldado), conforme a Figura 39. Vale salientar que a figura é apenas ilustrativa, as barras de sustentação não foram consideradas nas simulações, por não representarem diferenças significativas nos resultados, assim como, a placa de proteção ter sido considerada com espessura zero, já que a espessura não alteraria os resultados, apenas aumentaria o tempo de processamento.

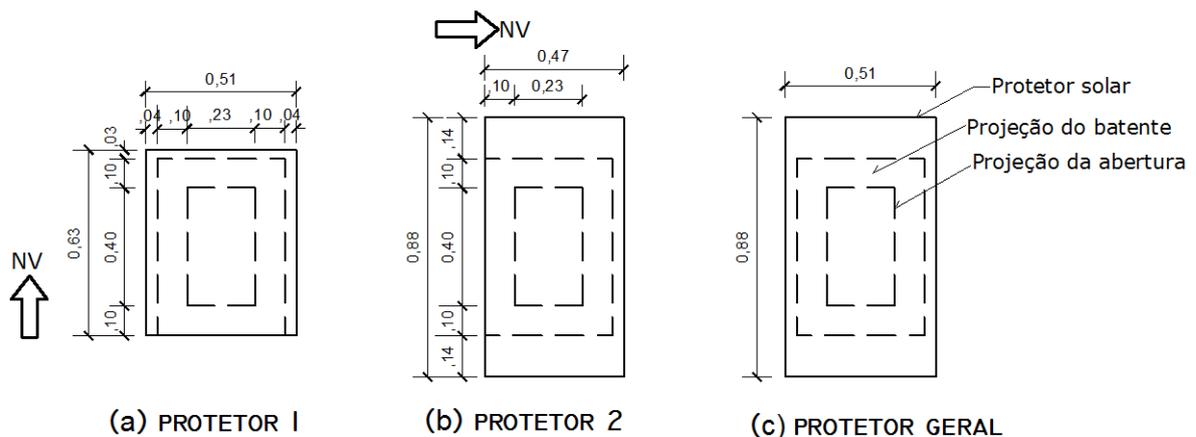
Figura 39 - Detalhe da abertura zenital com o protetor solar.



Fonte: Autora, 2011.

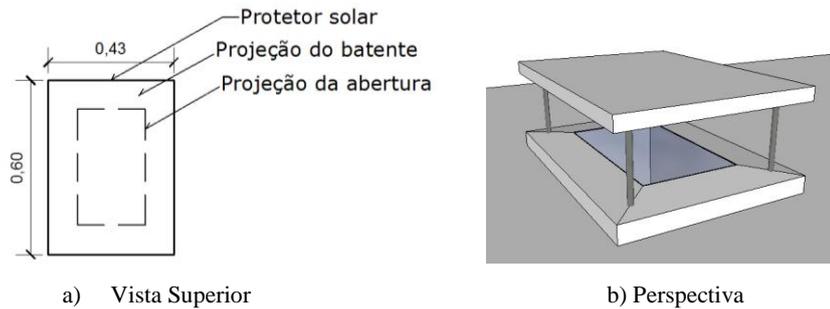
As dimensões e o posicionamento dessas placas devem ser determinados a partir da orientação do projeto, pois devido ao formato retangular das aberturas, os ângulos limites de penetração dos raios solares no ambiente são diferentes nos dois lados. Com o auxílio da carta solar de Maceió foram determinados três tamanhos de protetores de forma que não houvesse incidência direta dos raios solares no ambiente, denominados de Protetor 1 e 2 para atender a duas orientações específicas e outro para atender a qualquer orientação, denominado de Protetor Geral, conforme Figura 40 (detalhamento no Apêndice B).

Figura 40 - Vista superior - Protetores solares.



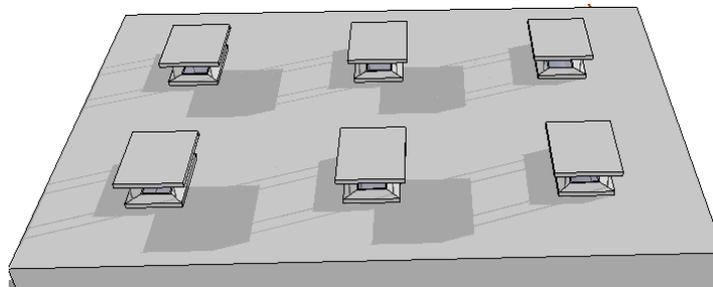
Fonte: Autora, 2011.

Considerando uma situação de utilização desse sistema de abertura de uma forma mais comercial (para qualquer orientação de projeto), além do Protetor Geral, foi feita uma análise do desempenho das aberturas para um protetor solar apenas no tamanho da abertura mais o batente a sua volta denominado de Protetor Parcial (ver Figura 41). Pretende-se verificar qual a influência no desempenho luminoso, de alguma incidência solar no ambiente, para este tamanho de protetor com as dimensões mais ajustadas à abertura.

Figura 41 - Protetor Parcial

Fonte: Autora, 2011.

A luz natural proporcionada pelas aberturas zenitais de uma forma geral é transmitida de forma ineficiente nos horários de baixas alturas solares, que coincidem com o início da manhã e com o final da tarde. Sendo assim, neste estudo duas medidas foram tomadas: primeiro foi feita uma verificação nos horários de 7h e 17h se a proteção solar de uma abertura estaria causando sombreamento na vizinha e prejudicando a iluminância interna nestes horários (ver Figura 42). Foi verificado que devido às dimensões do modelo proposto não houve sombreamento nesses horários, ver detalhamento no Apêndice D.

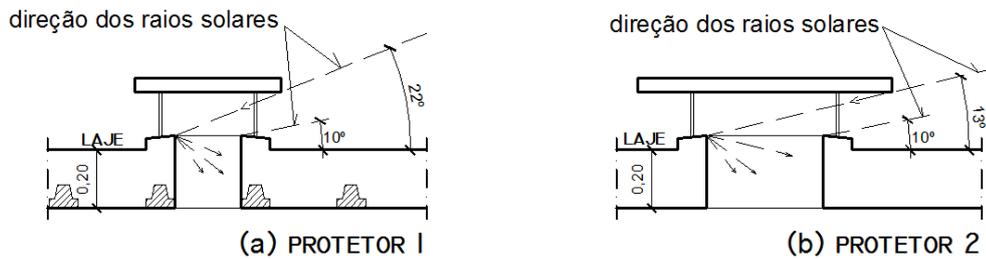
Figura 42 - Imagem ilustrativa do sombreamento – Vista superior

Fonte: Autora, 2011.

A outra medida foi tentar otimizar a entrada de luz por meio de um protetor solar com um anteparo, de forma a favorecer a reflexão dos raios solares para o interior do ambiente.

O anteparo nas aberturas foi introduzido no sentido de captar e redirecionar os raios solares entre 10° (menor inclinação solar anual às 7h e 17h para Maceió) e o ângulo (limitado pelo protetor solar) dos raios solares que penetram pelo espaço entre o protetor e a laje e que possam ser redirecionados para as laterais das aberturas e daí para o interior do ambiente. De acordo com a Figura 43 verifica-se que quando é necessário o uso do Protetor 1, a penetração solar apresenta uma amplitude mais significativa (de 10° a 22°) do que com o uso do Protetor 2 (de 10° a 13°), portanto, o estudo com o anteparo foi feito apenas para o Protetor 1.

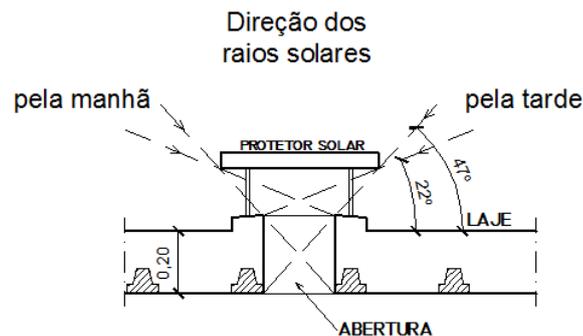
Figura 43 - Corte no sentido Leste-oeste – Protetor 1 e 2



Fonte: Autora, 2011.

Para o Protetor 1, os raios com inclinação maior que 22° e menor que 47° já incidem diretamente nas laterais da laje na abertura. Para a altura solar acima dos 47° haveria incidência solar direta no interior do ambiente, o que foi evitado com a introdução do protetor (ver Figura 44).

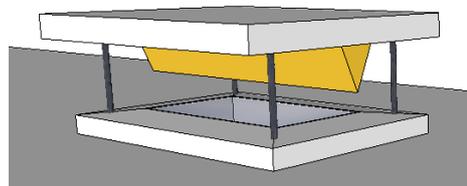
Figura 44 - Corte no sentido Leste-oeste - Protetor 1



Fonte: Autora, 2011.

Os anteparos ficariam acoplados aos protetores solares, conforme a Figura 45, e nas simulações foram considerados com material difuso, considerando que seria uma peça única pré-moldada de concreto.

Figura 45 - Perspectivas ilustrativa da abertura com protetor solar com anteparo (destacado na cor amarela)

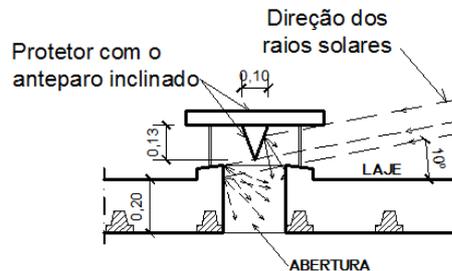


Fonte: Autora, 2011.

A Figura 46 ilustra a incidência dos raios solares com as reflexões no anteparo e mostra as dimensões adotadas. A altura do anteparo foi determinada no intuito de interceptar os raios a partir dos 10° e a inclinação foi aleatória, uma vez que a superfície foi considerada

difusa. Cabe um estudo posterior considerando outras inclinações e uma superfície especular para o anteparo, questões que não foram aprofundadas por não ser o objetivo principal do trabalho.

Figura 46 – Corte no sentido Leste-oeste / Modelos do anteparo.



Fonte: Autora, 2011.

3.1.2 Definição das dimensões do ambiente

Na prática, as dimensões dos ambientes são definidas no projeto. Nesta fase, sempre que possível, deve-se fazer um ajuste de acordo com as dimensões dos elementos constituintes do tipo de laje a ser utilizada para evitar ou minimizar corte nas lajotas evitando-se perdas de material e de desperdício na mão-de-obra. No Apêndice C foram construídas tabelas com as dimensões para a largura e comprimento de um ambiente, considerando uma distribuição uniforme das aberturas propostas para o tipo de laje em estudo.

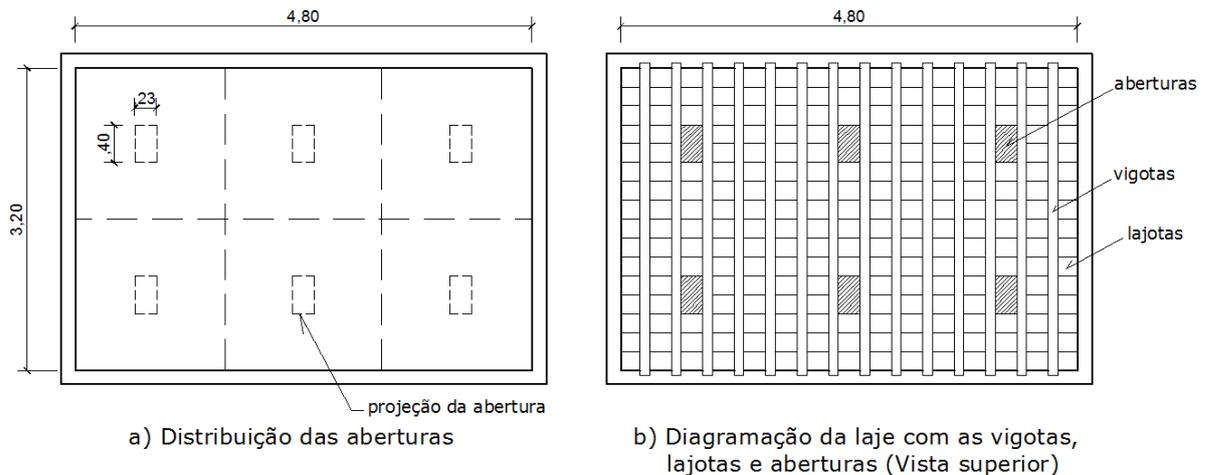
As dimensões do modelo para a realização das simulações foram determinadas baseadas nos tamanhos mais comercializados dos elementos constituintes da laje escolhida. Normalmente, o tamanho das vigotas está associado à largura do ambiente e de acordo com alguns fabricantes as mais comercializadas estão entre 3,00 m e 4,00 m. A vigota de 4,0 m é inclusive, o tamanho determinado pelo SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos na Indústria da Construção Civil) para a pesquisa mensal de preço coletado entre os fabricantes. Assim sendo, a princípio, ficou determinado um modelo retangular de 4,0 m x 6,0m, (comprimento de 1,5 vezes a largura) e que no ajuste das dimensões para as aberturas ficassem uniformemente distribuídas, as medidas seriam 4,0m x 6,60m com 10 aberturas zenitais (ver exemplo do Apêndice C). Porém, como a influência do posicionamento das vigotas em relação ao vão também é analisada, uma vez que determina o posicionamento das aberturas, tornou-se mais adequado a escolha de dimensões que tivessem valores próximos nas duas direções (largura e comprimento) para ambas as situações de posicionamento dos apoios das vigotas, respeitando o tamanho máximo aconselhado para o tipo escolhido ⁸. De acordo com a

⁸ É importante frisar que mudança no sentido do apoio das vigotas tem que atender também, as exigências estruturais do projeto.

Tabela 16 e Tabela 17 do Apêndice C, foi definido para o estudo um ambiente com 3,20 x 4,80m com as aberturas distribuídas conforme a Figura 47 e Figura 48.

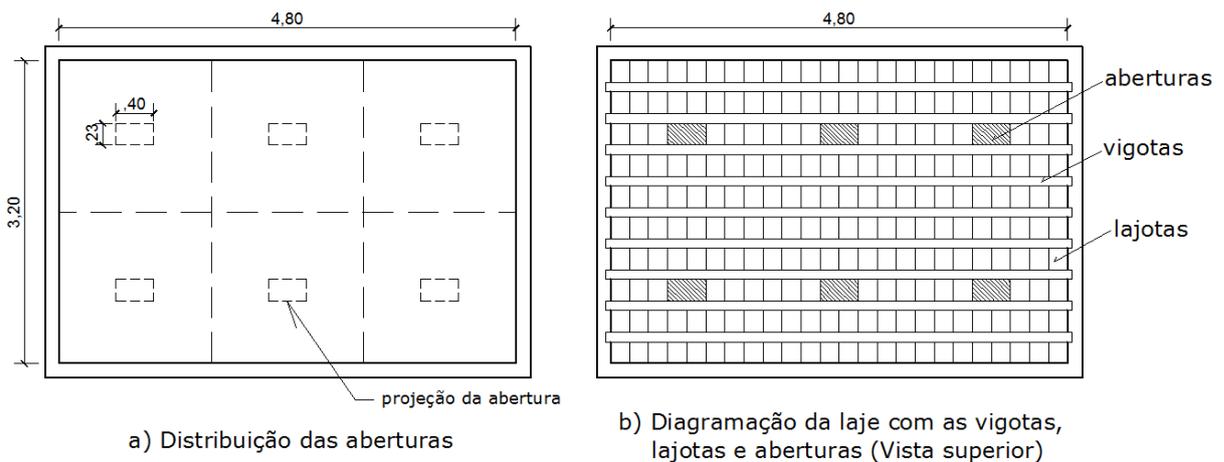
A Figura 47 mostra a planta do ambiente com a distribuição das aberturas em relação ao posicionamento normal das vigotas (pelo menor vão) e foi denominado no estudo de Modelo Básico. A Figura 48 mostra a mesma planta, porém com as aberturas numa posição perpendicular a anterior, resultado de uma disposição alternativa para as vigotas (pelo maior vão), e foi denominado de Modelo Alternativo.

Figura 47 - Planta do Modelo Básico – Disposição uniforme das aberturas



Fonte: Autora, 2011.

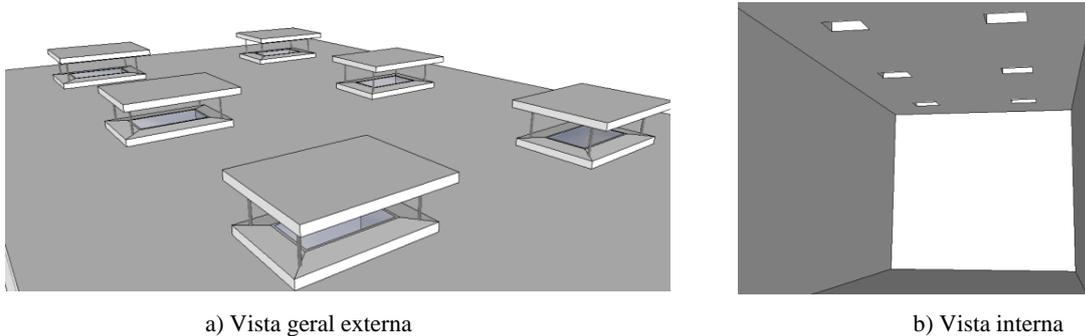
Figura 48 - Planta do Modelo Alternativo - Disposição uniforme das aberturas



Fonte: Autora, 2011.

A Figura 49 mostra de forma ilustrativa a distribuição das aberturas na laje com os protetores solares.

Figura 49 - Imagens ilustrativas da distribuição das aberturas na laje considerando o posicionamento normal das vigotas.



a) Vista geral externa

b) Vista interna

Fonte: Autora, 2011.

3.1.3 Modelos propostos

A pesquisa é desenvolvida a partir de um modelo de ambiente com dimensões de 3,20m x 4,80 m totalizando 15,36m², com seis aberturas zenitais conforme detalhado no item 3.1.2 e com o pé-direito de 2,80m, dimensão bastante utilizada nas edificações comuns.

Foram definidos quatro tamanhos de protetores solares simples, dois referentes às orientações específicas e dois de uso geral (um para uma proteção solar total e o outro parcial), e um protetor solar com um anteparo conforme detalhamento no item 3.1.1. A Tabela 4 mostra um resumo das combinações feitas para a construção dos modelos.

Tabela 4 - Combinações para a construção dos modelos

Combinações	Sem Protetor solar	Protetor 1 (0,51 x 0,63)	Protetor 2 (0,47 x 0,88)	Protetor Geral (0,51x0,88)	Protetor Parcial (0,43x0,60)	Protetor 1 com anteparo
Modelo Básico	x*	x	x	x*	x*	x
Modelo Alternativo	x*	x	x	x*	x*	

* Foram feitas para as duas orientações propostas, as demais apenas para a orientação respectiva ao tamanho do protetor solar.

3.2 Seleção da ferramenta de simulação

A análise foi feita por meio de simulações computacionais por esse método apresentar grandes vantagens de rapidez e flexibilidade e de proporcionar simultaneamente uma variedade de resultados e considerados confiáveis.

Alguns dos programas disponíveis para o processamento de cálculo de iluminação natural não conseguem simular satisfatoriamente a realidade da iluminação natural nos trópicos, quer seja por limitações nos padrões de distribuição de luminâncias do céu, quer seja

por dificuldades em simular as geometrias complexas da arquitetura tropical, com suas diversas formas de protetores contra a radiação solar direta (CABÚS, 2005).

O programa escolhido foi o TropLux e os condicionantes que mais influenciaram na escolha foram ele ter sido desenvolvido especialmente para o uso em regiões tropicais, de possibilitar definir as configurações o mais próximo da realidade local, de permitir a entrada de dados com facilidade, de apresentar resultados bastantes confiáveis, tanto em forma de tabelas, gráficos ou em curvas de isoiluminâncias e pela disponibilidade no programa de se trabalhar com o céu dinâmico. Suas características estão mais detalhadas no item 2.3.4.1 b.

3.3 Características do ambiente para as simulações

O modelo é considerado como um ambiente de uso múltiplo em obras de pequeno porte. E para o estudo não há divisórias nem mobiliário específico.

Não foi previsto janela lateral, uma vez que o objetivo do trabalho está relacionado apenas às aberturas zenitais. A localização da porta foi aleatória, pois como é considerada fechada não influenciará nos resultados.

As refletâncias internas para os modelos foram consideradas plenamente difusas para um padrão de ambientes com cores claras. Os valores adotados para as superfícies com pintura (paredes e teto) foram de acordo com os valores disponíveis em Dornelles (2008) referentes à tinta Novacor PVA Látex e o valor considerado para o piso foi de acordo com Cardoso (2006), (ver Tabela 5). A refletância das laterais das aberturas, das superfícies da placa de proteção e dos anteparos propostos foi considerada igual a do teto.

Tabela 5 - Refletâncias das superfícies internas do modelo em estudo

SUPERFÍCIES	CORES	MATERIAL	REFLETÂNCIAS
Piso	Cinza claro	Cerâmica	0,42
Teto	Branco	Tinta Novacor PVA Látex	0,813
Paredes internas	Branco Sereno	Tinta Novacor PVA Látex	0,687

O estudo foi feito considerando que as edificações recebem uma iluminação natural externa sem obstruções pelo entorno.

3.4 Parâmetros para as simulações

Todas as simulações para a coleta dos valores de iluminância foram processadas de forma idêntica, considerando o ano inteiro para uma mesma localidade e mesmo período do dia, detalhados a seguir.

Cada clima e atividade demandam condições luminosas diferenciadas. E em cada clima a distribuição de luminâncias no céu é variável, como foi discutido no item 2.3.2. Para este trabalho foram consideradas as condições climáticas da cidade de Maceió, como exemplo de trópico úmido. Maceió, capital do estado de Alagoas, é uma cidade litorânea localizada na latitude de $9^{\circ} 40' S$ e longitude $35^{\circ} 47' O$, seu clima é tropical quente e úmido e com radiação solar intensa (BRASIL, 1992), (ver Figura 50). O modelo de céu considerado na pesquisa foi o céu dinâmico, que considera a influência dos três tipos de céu padrão nas proporções do clima luminoso da cidade, conforme comentado no último parágrafo do item 2.3.2.

Figura 50 - Localização da cidade de Maceió (adaptação pela autora) - Mapa do Brasil.



Fonte: Base cartográfica IBGE/ano 2001.

Para as simulações foi definido o horário solar, e é avaliado um período de 11 horas, das 7h às 17h, período com aproveitamento da luz natural, para todos os dias do ano, de maneira a avaliar seu comportamento anual no interior do ambiente.

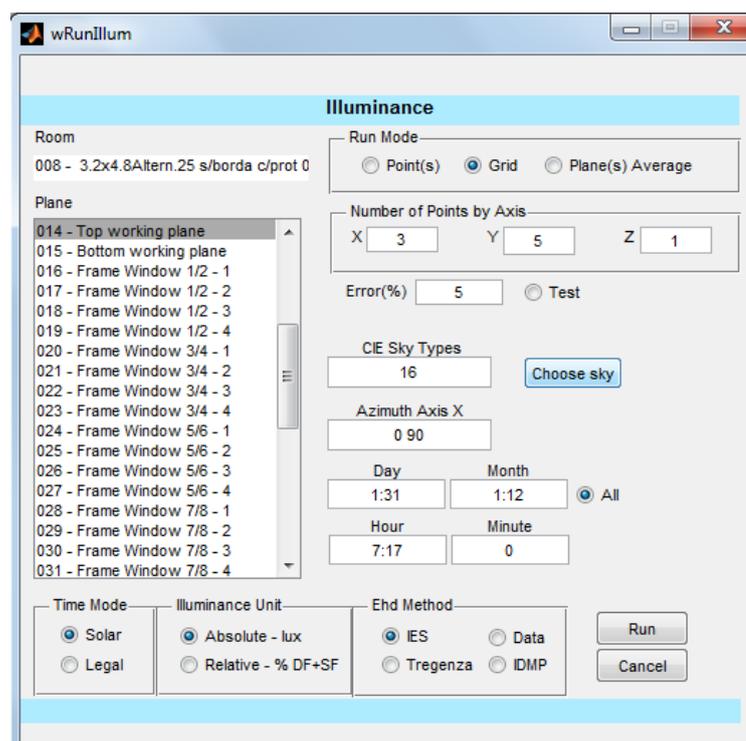
Quando o sistema de abertura é lateral se tem uma influência grande no desempenho da iluminação de acordo com a orientação das fachadas. No sistema de abertura zenital proposto a influência é bem menor, e devido ao formato retangular das aberturas os ângulos de incidência dos raios solares apresentam diferenças de acordo com a orientação. Como as laterais das aberturas são paralelas às laterais do ambiente, duas orientações foram escolhidas

para as simulações e correspondem ao Norte paralelo à largura e ao comprimento do ambiente. O ambiente foi modelado com a largura sempre no eixo X e o comprimento no eixo Y, portanto as orientações serão denominadas de Norte no X e Norte no Y. No TropLux a orientação do ambiente é definida pelo ângulo entre o Norte verdadeiro e o eixo X, no sentido horário (denominado de azimute e variando de 0° a 360°), portanto as duas orientações escolhidas, no programa terão azimute 0° e 90°.

Foi utilizado nas simulações o método de cálculo da iluminância horizontal difusa com base nos algoritmos definidos pela IES (Illuminating Engineering Society). A margem de erro estatístico para componente refletida foi de 5%, como recomendado por Cabús (2006).

Os dados de entrada para as simulações foram tabulados conforme a forma requerida pelo programa. Inicialmente foram inseridos os dados da geometria do ambiente e das propriedades das superfícies e do solo. Na sequência, a partir das opções fornecidas foram definidos a localidade (com latitude e longitude), a opção de céu dinâmico, a orientação solar, os dias e horas definidos para o estudo, o método de cálculo das iluminâncias, a margem de erro a ser considerada e o modo de processamento (por um ponto específico ou por malha de pontos). A Figura 51 mostra a tela do programa com um exemplo de escolhas para o processamento.

Figura 51 - Tela do programa TropLux para o processamento.



Fonte: Cabús, 2012a (adaptado pela autora).

3.5 Simulações

As simulações de referência foram para o ambiente com as aberturas em relação ao posicionamento normal das vigotas denominado de Modelo Básico, conforme detalhamento no item 3.1.2 e ilustrado na Figura 47. Inicialmente foram consideradas as aberturas sem proteção solar e depois com os protetores solares propostos. Para verificar a influência do posicionamento das vigotas, novas simulações foram feitas para o modelo denominado Alternativo (detalhado no item 3.1.2).

O objetivo do estudo é avaliar o desempenho das aberturas zenitais e relacioná-lo conjuntamente aos parâmetros de posicionamento das vigotas, orientação e proteção solar. Com os dados gerados nas simulações foram feitas as comparações entre os modelos para identificar os parâmetros com melhor aproveitamento de luz natural para o modelo de abertura zenital nas condições propostas. Foram construídos, portanto, 11 modelos e processadas 17 simulações, detalhadas conforme a Tabela 6 a seguir.

Tabela 6- Simulações processadas

SIMULAÇÕES PROCESSADAS	
Nº	Descrição
1	Modelo Básico sem protetor - N paralelo à largura do ambiente
2	Modelo Básico sem protetor - N paralelo ao comprimento do ambiente
3	Modelo Básico com Protetor 1 - N paralelo à largura do ambiente
4	Modelo Básico com Protetor 2 - N paralelo ao comprimento do ambiente
5	Modelo Básico com Protetor 1 c/ anteparo inclinado - N paralelo à largura do ambiente
6	Modelo Básico com Protetor Geral - N paralelo à largura do ambiente
7	Modelo Básico com Protetor Geral - N paralelo ao comprimento do ambiente
8	Modelo Básico com Protetor parcial - N paralelo à largura do ambiente
9	Modelo Básico com Protetor parcial - N paralelo ao comprimento do ambiente
10	Modelo Alternativo sem protetor - N paralelo à largura do ambiente
11	Modelo Alternativo sem protetor - N paralelo ao comprimento do ambiente
12	Modelo Alternativo com Protetor 2- N paralelo à largura do ambiente
13	Modelo Alternativo com Protetor 1 - N paralelo ao comprimento do ambiente
14	Modelo Alternativo com Protetor Geral - N paralelo à largura do ambiente
15	Modelo Alternativo com Protetor Geral - N paralelo ao comprimento do ambiente
16	Modelo Alternativo com Protetor parcial - N paralelo à largura do ambiente
17	Modelo Alternativo com Protetor parcial - N paralelo ao comprimento do ambiente

De acordo com a numeração da Tabela 6 as simulações escolhidas para as análises comparativas dos desempenhos luminosos estão indicadas na Tabela 7 e descritas em seguida.

Tabela 7- Combinações para as análises comparativas

ANÁLISES COMPARATIVAS - SIMULAÇÕES															
	Norte no eixo X							Norte no eixo Y							
REFERÊNCIA	1	1	3	10				2	2	11					
COMPARAÇÃO	10	3	6	8	5	12	14	16	11	4	7	9	13	15	17

Primeiramente, serão comparados os dois modelos (Básico e alternativo) sem protetores solares, para verificar nas duas orientações solares qual modelo apresenta melhor desempenho (1 com 10 e 2 com 11).

Depois, cada modelo sem protetor solar é comparado (também nas duas orientações) com os modelos respectivos com protetor solar, nos três tamanhos propostos, para verificar a variação no desempenho conforme o protetor escolhido (para o Modelo Básico: 1 com 3,6 e 8; e 2 com 4,7,e 9; para o Modelo Alternativo: 10 com 12, 14 e 16; e 11 com 13, 15 e 17).

A análise do desempenho dos protetores com os anteparos é feita para o Modelo Básico e apenas para a orientação do Norte alinhado à largura do ambiente, conforme detalhado no item 3.1.1 (comparação da nº 3 com a nº 5).

3.6 Forma de apresentação e análise dos resultados

Depois que as simulações são concluídas, a avaliação do desempenho luminoso no ambiente é feita considerando o método da Iluminância Útil da Luz Natural – IULN (NABIL e MARDALJEVIC, 2006), comentado no item 2.3.4.3, dentro dos intervalos de iluminância (E) relacionados na Tabela 8.

Tabela 8 - Método de avaliação de desempenho – IULN

ILUMINÂNCIA ÚTIL DA LUZ NATURAL - IULN		
CRITÉRIOS		
ILUMINÂNCIA (lx)		DESEMPENHO
Intervalo 1	$E < 100$	INSUFICIENTE
Intervalo 2	$100 \leq E \leq 500$	ÚTIL, MAS COM NECESSIDADE DE ILUMINAÇÃO COMPLEMENTAR
Intervalo 3	$500 < E \leq 2000$	ÚTIL
Intervalo 4	$E > 2000$	EXCESSIVA

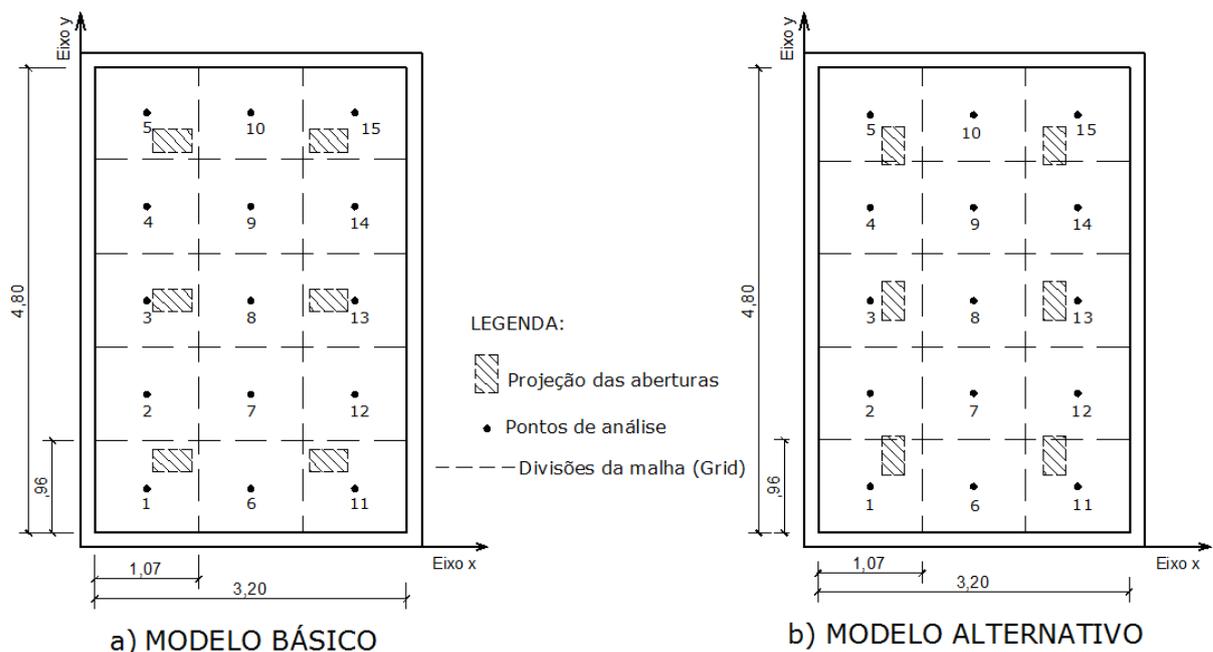
Fonte: NABIL; MARDALJEVIC (2006). Adaptado pela autora.

E = Iluminância

De acordo com a Norma 15215-4 para caracterizar adequadamente a iluminância em um plano de trabalho, o ambiente deve ser dividido em áreas iguais, com formato próximo ou igual a um quadrado e a iluminância deve ser medida no centro de cada área. Conforme a mesma norma, para medições em um ambiente nas dimensões propostas a quantidade de pontos deveria ser no mínimo nove (o que daria áreas retangulares). A partir dessas informações, para a realização das simulações os ambientes foram divididos em 15 setores com uma área de aproximadamente 1,00 m² conforme mostrado na Figura 52 criando-se uma malha imaginária, caracterizando um plano de análise na altura do plano de trabalho.

O Programa TropLux fornece os valores mínimos, médios e máximos de iluminância interna no centro de cada setor para todos os dias do ano, como também os coeficientes de variação para cada simulação e o percentual de ocorrência dos valores médios de iluminância interna, enquadrados nos intervalos de desempenho da IULN.

Figura 52 - Plantas baixas - Modelos com a malha de pontos do plano de análise (grid).



Fonte: Autora, 2011.

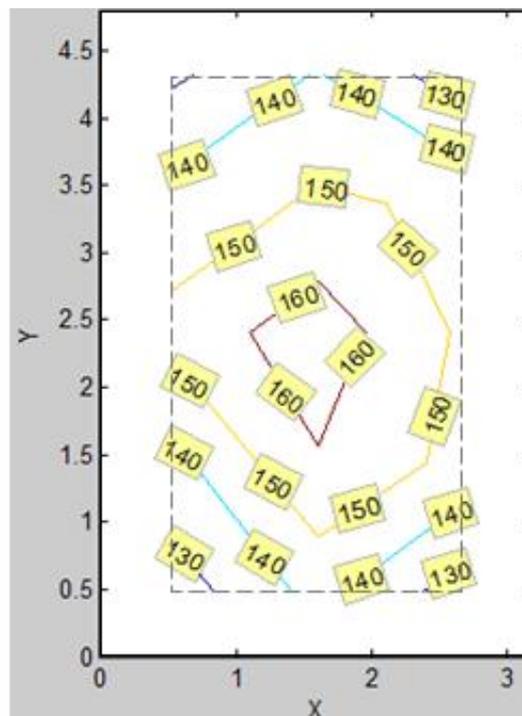
De posse desses valores gerados pelo TropLux e considerando-se os 15 pontos por geometria, foram construídas planilhas no programa da Microsoft Office Excel e foram calculadas a média das iluminâncias médias (\bar{E}_m) e a média dos percentuais de iluminâncias dentro dos intervalos da IULN, para cada geometria em análise. A partir dessas médias, foi comparado o desempenho luminoso entre as diferentes geometrias e os resultados foram

representados por meio de gráficos e tabelas. No Anexo C encontram-se as tabelas com os valores anuais médios por ponto encontrados para cada simulação.

Para um estudo mais detalhado do desempenho das aberturas, também foi feita uma análise do comportamento médio anual horário dos índices e por meio de gráficos e de isocurvas verificou-se sua variação e distribuição no ambiente.

Para facilitar a visualização, os gráficos com as isocurvas foram posicionados na mesma posição das plantas baixas esquemáticas mostradas anteriormente na Figura 52. Os eixos X e Y estão representando a largura e comprimento do ambiente respectivamente, com os valores em metros. A área limitada pela linha tracejada nesses gráficos representa a região compreendida pelos 15 pontos simulados e os valores nas isocurvas representam o desempenho médio anual em relação ao índice de desempenho analisado indicado (ver exemplo no Gráfico 3).

Gráfico 3 – Distribuição da Iluminância Média Anual no ambiente.



Fonte: Cabús, 2012 a (adaptado pela autora).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os principais resultados das simulações a partir da metodologia utilizada, e as análises de acordo com os objetivos do trabalho. Inicialmente é apresentada a média anual de iluminância e dos percentuais de iluminância dentro dos intervalos considerados úteis pelo modelo de IULN, em seguida são feitas as análises comparativas do desempenho luminoso entre os modelos conforme a Tabela 7 e por fim é apresentado um resumo das análises. Inicialmente, apresentam-se os resultados do desempenho luminoso dos modelos sem proteção solar, a seguir, os resultados considerando a introdução de protetor solar e por fim, os comparativos de desempenho.

4.1 Modelos sem protetores solares

Neste item serão apresentados os resultados do desempenho luminoso para um ambiente com as aberturas sem protetores solares nas duas orientações, inicialmente para o Modelo Básico em seguida para o Modelo Alternativo.

4.1.1 Modelo Básico sem protetores solares

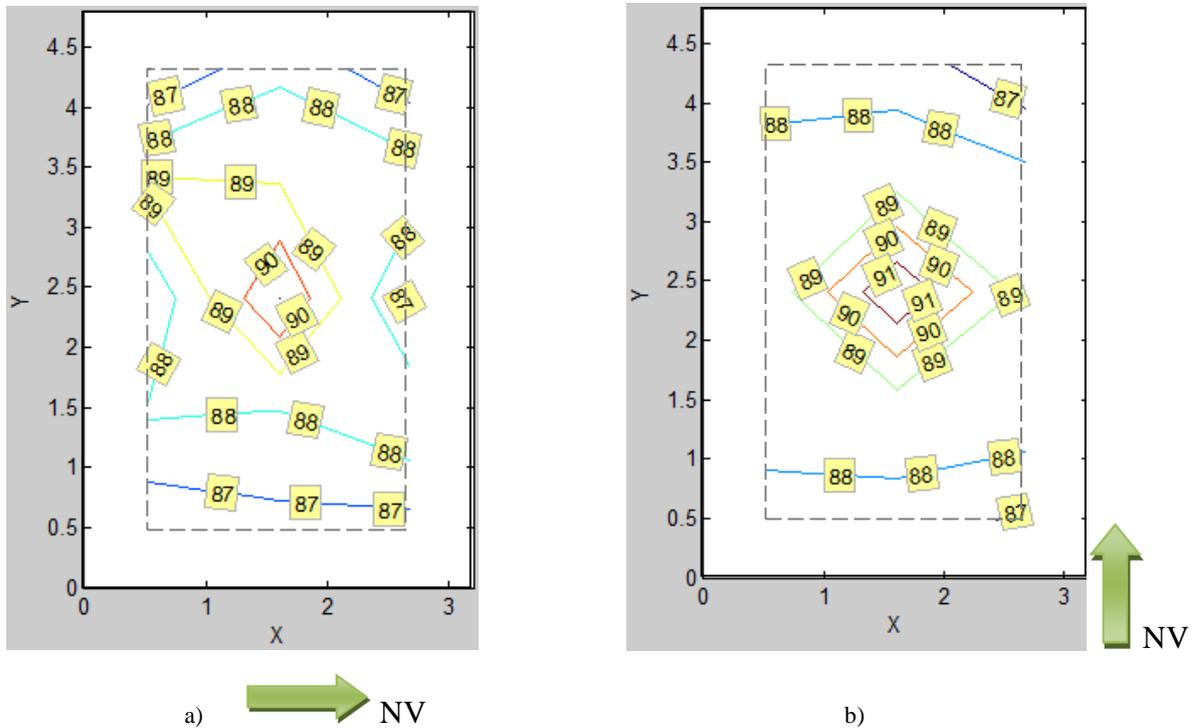
Para o Modelo Básico, o desempenho médio em relação à Iluminação Útil para as duas orientações foi de 88%. O Gráfico 4 a e b mostram que em ambas as orientações, em todo o ambiente, mais de 85% das iluminâncias durante o ano ficaram no intervalo considerado útil ($100 \leq E \leq 2000$), e que no centro do ambiente concentraram-se o maior número de ocorrências.

O modelo de avaliação de IULN traz uma subdivisão caracterizada de Iluminância útil, com necessidade de iluminação complementar ($100 \leq E \leq 500$), neste intervalo o percentual foi de 40% das ocorrências nas duas orientações.

Em relação aos valores absolutos de iluminância, para a orientação com a largura do ambiente paralela ao Norte a média anual foi de 703 lx e para a orientação do Norte paralelo com o comprimento do ambiente, foi de 484 lx. Inicialmente, poder-se-ia concluir que a primeira situação teve um comportamento luminoso 45% maior. No entanto, como ocorreram incidências de valores de pico devido à penetração direta dos raios solares em alguns pontos (ver Tabelas 1 e 2 no Anexo C), resolveu-se verificar se o número dessas ocorrências foi equilibrado nas duas orientações. Os valores de pico foram registrados em apenas alguns pontos e estão incluídos no percentual de ocorrências durante o ano dos níveis acima de 2000 lx

(em torno de 1%), que na prática não são desejados principalmente, pela possibilidade de causarem ofuscamento e excesso de contraste na iluminação do ambiente.

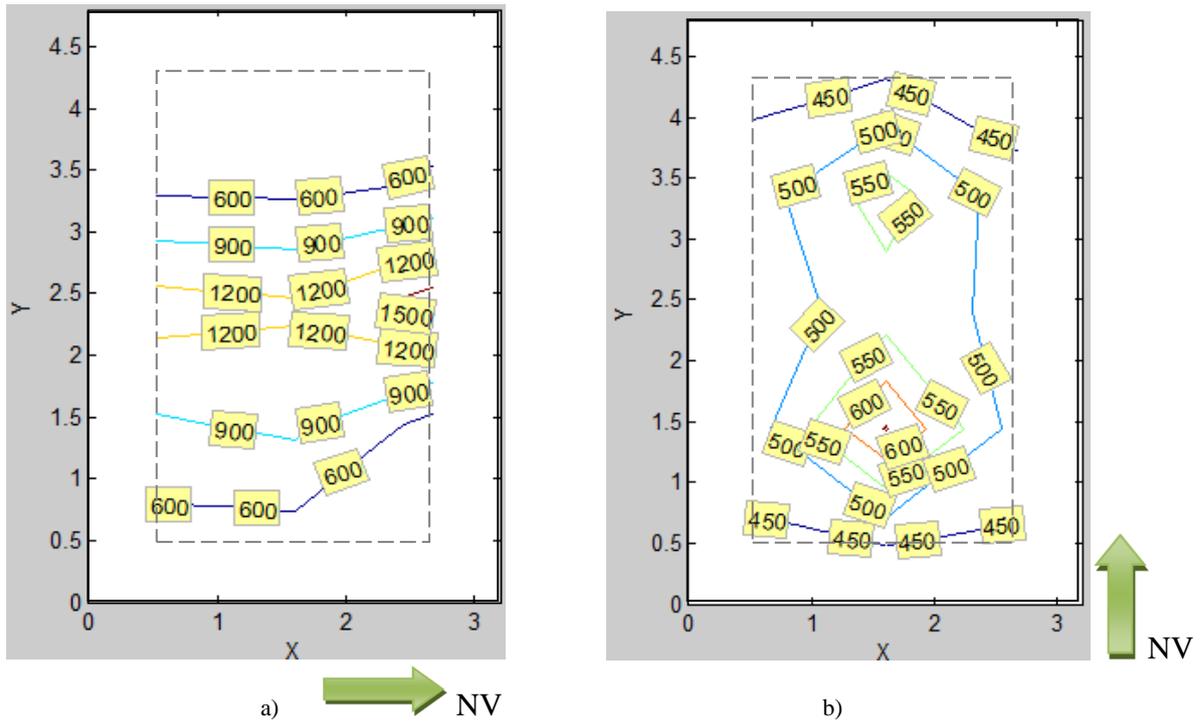
Gráfico 4 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 2000$) - Modelo Básico s/ protetor solar



Fonte: Cabús, 2012 a (adaptado pela autora).

Para a primeira situação (Norte no eixo X) foram verificados 252 registros dos valores de pico nos pontos simulados durante o ano, totalizando 0,4% do total de dados coletados, e 25 registros para a outra orientação representando apenas 0,04% dos dados. Mesmo os percentuais sendo muito pequenos, foram determinadas novas médias excluindo-se os valores da componente direta solar, por serem muito altos comparados aos demais e as médias ficariam mais elevadas. As novas médias foram praticamente iguais, 468 lx para a orientação do Norte alinhado com a largura do ambiente e 466 lx para a outra orientação, o que era de se esperar em se tratando de uma iluminação zenital. O que mudou foi a forma da distribuição, observando o Gráfico 5 a e b a seguir, nota-se que quando o Norte está paralelo à largura do ambiente há uma tendência de uniformidade nos índices também em relação à largura do ambiente e uma variação decrescente a partir do centro em relação ao comprimento. Para a condição do Norte paralelo ao comprimento do ambiente, verifica-se uma maior uniformidade nos índices em uma grande área central e com dois focos mais iluminados.

Gráfico 5 - Iluminância média anual (lx) - Modelo Básico sem protetor solar



Fonte: Cabús, 2012 a (adaptado pela autora).

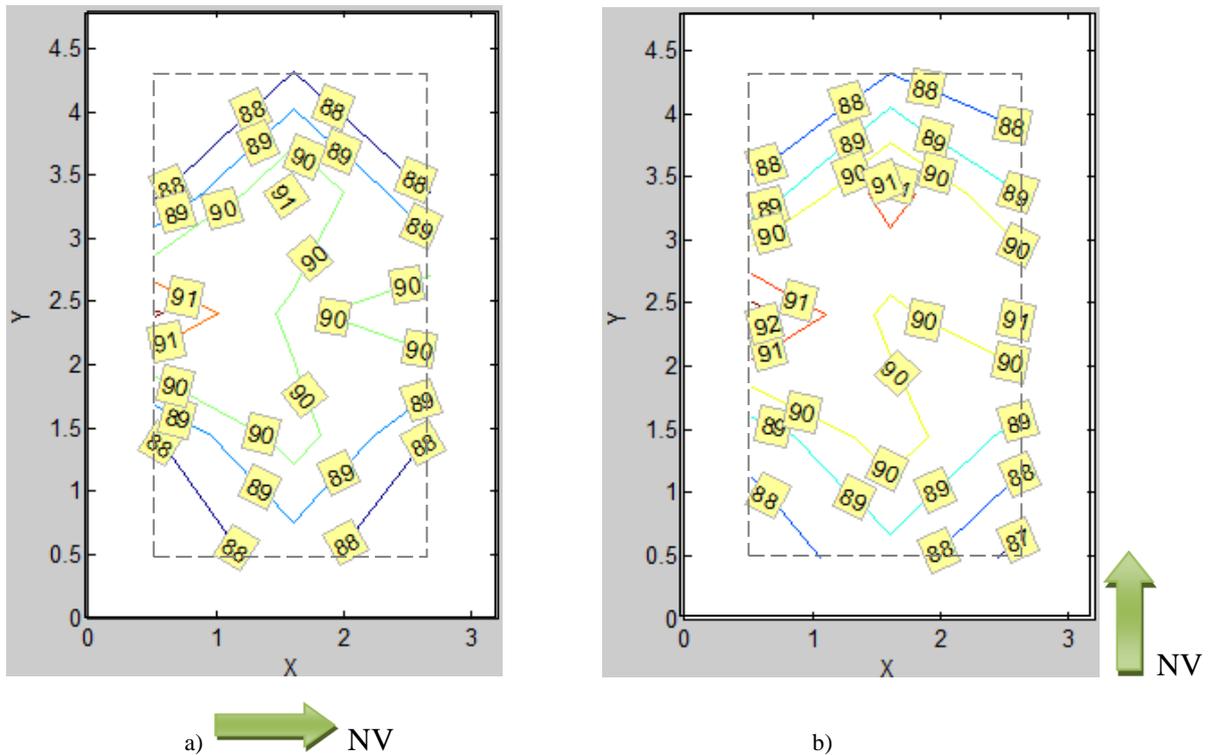
4.1.2 Modelo Alternativo sem protetores solares

O Modelo Alternativo trata de um ambiente com as mesmas dimensões do Modelo Básico, no entanto, considerando as vigotas apoiadas em relação ao comprimento do ambiente (conforme detalhado no item 3.1.2), o que resulta no posicionamento da abertura com sua maior dimensão paralela também a maior dimensão do ambiente.

A média do desempenho anual em relação à Iluminação Útil para as duas orientações foi de 89%. O Gráfico 6 a e b mostra que em ambas as orientações, em todo o ambiente, mais de 85% das iluminâncias durante o ano ficaram dentro do intervalo considerado útil (entre 100 e 2000 lx), e que os maiores índices também se concentraram numa área central, no entanto, maior do que no Modelo Básico.

O percentual da IULN no intervalo 2 ($100 \leq E \leq 500$) foi de 40% para a orientação do Norte paralelo ao eixo X, e 42 % para a outra orientação. Vale destacar que orientação que apresentou o percentual menor neste intervalo teve um desempenho um pouco melhor no intervalo 3 ($500 < E \leq 2000$).

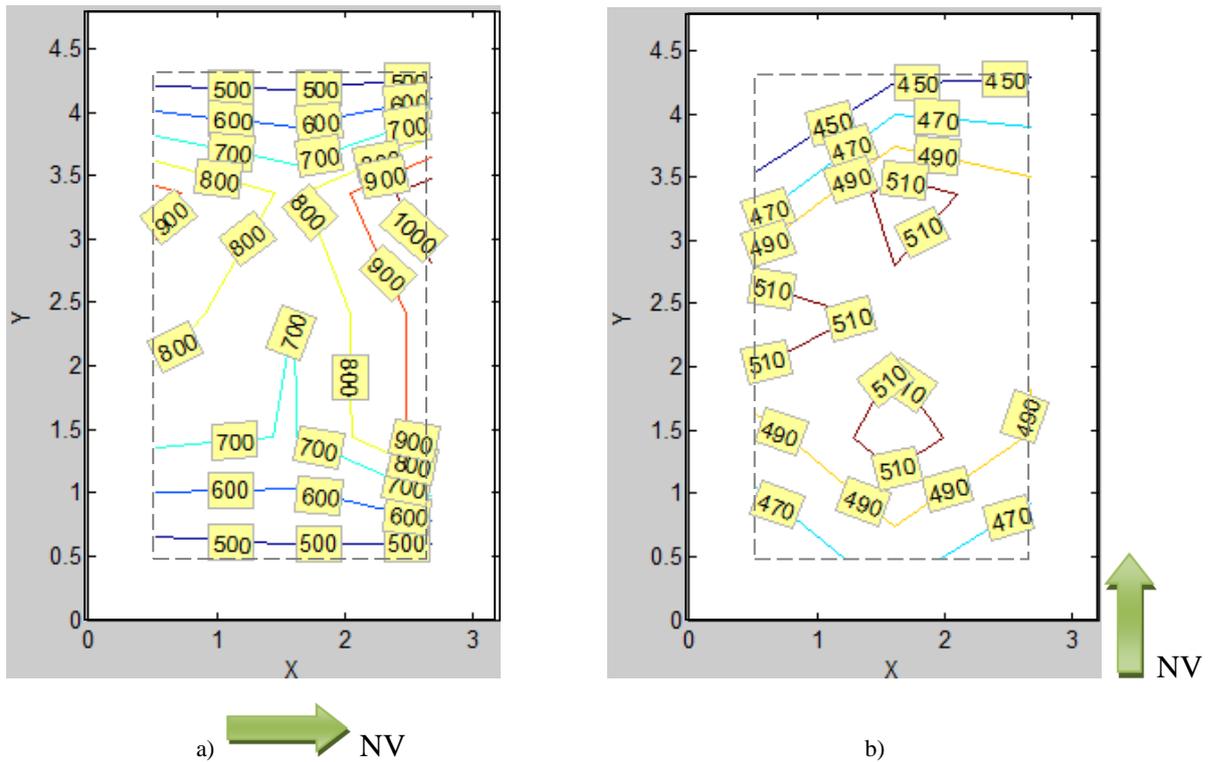
Gráfico 6 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 2000$) - Modelo Alternativo sem protetor solar.



Fonte: Cabús, 2012 a (adaptado pela autora).

Em relação aos valores absolutos de iluminância, para a orientação com o Norte paralelo à largura do ambiente, a média das médias anuais foi de 691 lx, no entanto, alguns valores foram também influenciados pela componente direta solar elevando os valores das médias (ver Tabela 30 no Anexo C). Neste caso, também foi feito uma nova análise excluindo-se os valores da componente solar direta, uma vez que foram registradas 225 ocorrências. A nova média foi de 487 lx e para a orientação com o Norte no eixo Y, não houve influência direta da componente solar nos valores encontrados e a média das médias anuais dos pontos simulados foi de 480 lx. Como no Modelo Básico as médias foram bem próximas e apenas com uma distribuição diferente para as duas orientações. O Gráfico 7 a e b mostram essa distribuição e nota-se que quando o Norte está paralelo à largura do ambiente há também uma tendência de uniformidade nos índices em relação a largura do ambiente, mas só nos extremos, na área central esta uniformidade acompanha o sentido do comprimento. Para a condição do Norte paralelo ao comprimento do ambiente, verificam-se duas regiões mais iluminadas próximas, envoltas de um lado com uma área central bem uniforme e do outro com uma diminuição dos índices em direção as paredes. As médias indicadas nas isocurvas do gráfico a estão bem maiores do que o gráfico b, uma vez que foram considerados os valores de pico.

Gráfico 7 - Iluminância média anual (lx) - Modelo Alternativo sem Protetor solar



Fonte: Cabús, 2012 a (adaptado pela autora).

4.2 Modelos com protetores solares

Neste item serão apresentados os resultados das simulações para as situações com os protetores solares nas orientações propostas, inicialmente do Modelo Básico e em seguida do Modelo Alternativo. Com a introdução dos protetores solares em ambos os modelos, não foram registrados valores acima de 500 lx, portanto, os percentuais indicados de desempenho da IULN serão do intervalo 2 (de iluminâncias entre 100 e 500 lx).

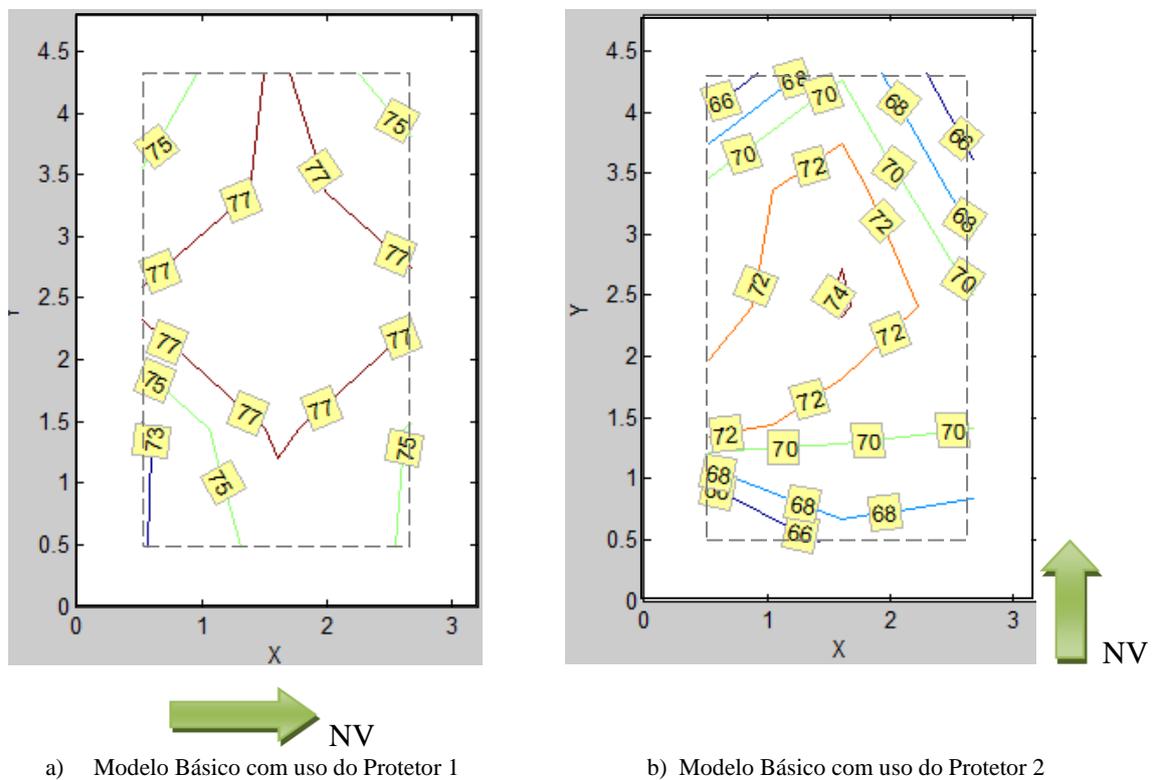
4.2.1 Modelo Básico com protetores solares

Os resultados apresentados para os ambientes estão agrupados em relação às três características dos protetores solares previstos: proteção total da penetração solar com as dimensões ajustadas a orientação (com os Protetores P1, P2 e P1 com o anteparo), proteção total da penetração solar, no entanto, com as dimensões que atendam a qualquer orientação (com o Protetor Geral) e proteção parcial da penetração solar (com o Protetor Parcial), conforme detalhados no item 3.1.1.

4.2.1.1 Modelo Básico com protetor solar total simples ajustado à orientação – Protetor 1 e Protetor 2

Os valores de IULN durante o ano no intervalo 2 ($100 \leq E \leq 500$) representaram 75,7% com o uso do Protetor 1 e 68,8% com o uso do Protetor 2. O Gráfico 8 a e b mostram a distribuição desse percentual para as duas orientações, verifica-se que com o Norte paralelo ao eixo X (uso do Protetor 1), além do maior número de ocorrências, os maiores índices atingem uma área maior do ambiente.

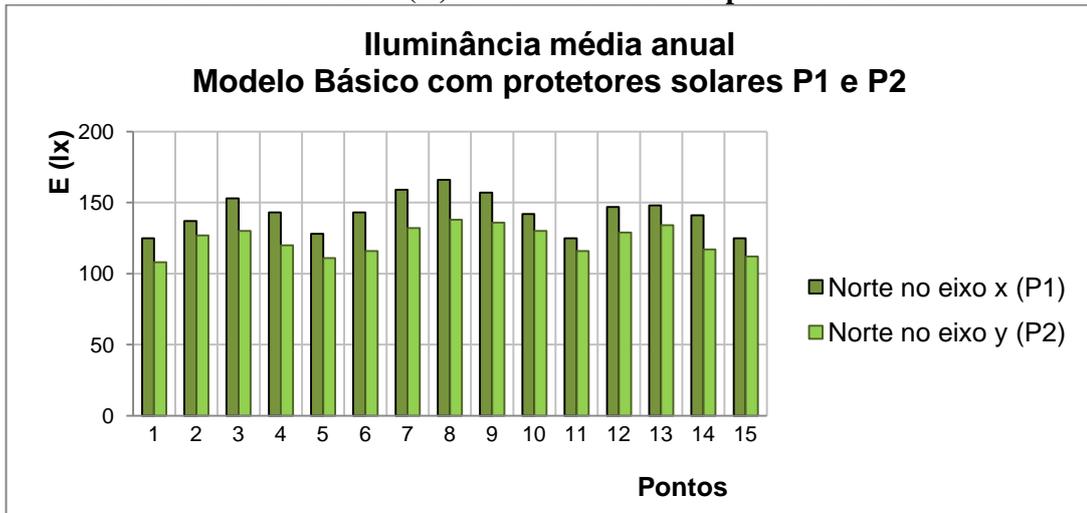
Gráfico 8 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 500$).



Fonte: Cabús, 2012a (adaptado pela autora).

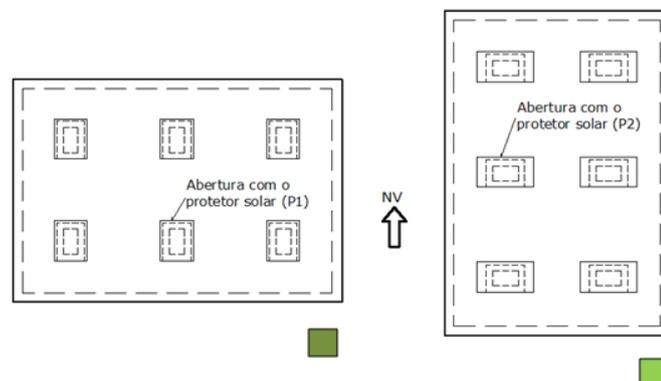
A iluminância média para o ambiente com o Protetor 1 foi de 142 lx com um coeficiente de variação de 8,9% e com o protetor 2, de 124 lx e coeficiente de variação de 8%. A uniformidade característica da iluminação zenital é reforçada pelos baixos índices dos coeficientes de variação. O Gráfico 9 ilustra a diferença nas médias anuais de iluminância em cada ponto simulado no ambiente para as duas orientações. Nota-se que nas duas situações os pontos localizados nos quatro cantos do ambiente (pontos 1, 5, 11 e 15) são os menos favorecidos, no entanto, todas as médias estão acima de 100 lx. Verificaram-se para orientação com a largura do ambiente paralela ao Norte, índices luminosos em média 15% maiores do que na outra orientação.

Gráfico 9 - Iluminância média anual (lx) - Modelo Básico com protetor solar



A Figura 53 representa o Modelo Básico nas duas orientações indicadas no Gráfico 9. Verifica-se de maneira prática que numa situação de projeto para dois ambientes com as mesmas dimensões, a mesma quantidade de aberturas, mas dispostos perpendicularmente, poderão apresentar diferenças no desempenho da iluminância em decorrência do sentido das aberturas com os protetores solares respectivos.

Figura 53 - Disposição do Modelo Básico com Protetor 1 e Protetor 2

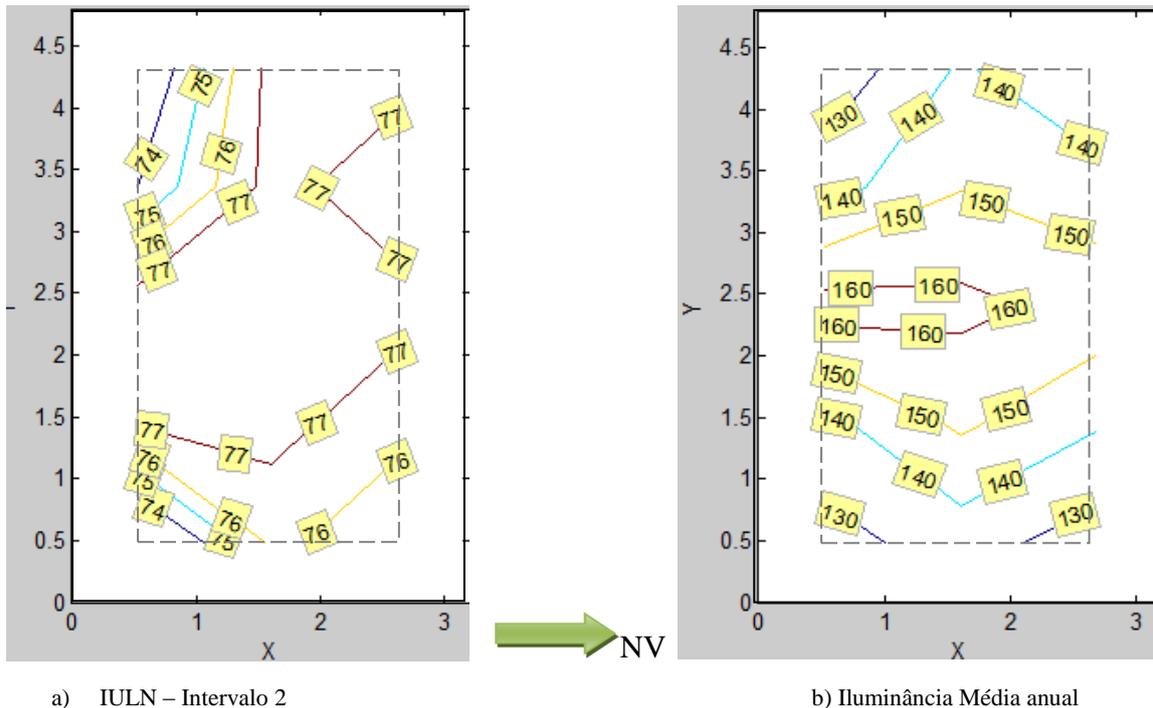


Fonte: Autora, 2012.

4.2.1.2 Modelo Básico com protetor solar total com o anteparo e ajustado à orientação

O anteparo proposto para tentar otimizar a entrada de luz por reflexão, nos horários de baixa altura solar, foi introduzido apenas no Protetor 1, conforme descrito no item 3.1.1. O ambiente apresentou uma média anual de 142 lx com coeficiente de variação de 9,3, e 76,1% de IULN no intervalo 2 ($100 \leq E \leq 500$). O Gráfico 10 a e b mostram a distribuição dos percentuais de IULN e das iluminâncias médias anuais, respectivamente.

Gráfico 10 - Modelo Básico com uso do Protetor 1 com anteparo



Fonte: Cabús, 2012 a (adaptado pela autora).

Uma análise comparativa feita na iluminância horária no ambiente em relação ao uso do Protetor 1 simples e com o anteparo, verificou-se que houve um ganho nos horários de 7, 8, 16 e 17h, no entanto, um decréscimo nos índices nos demais horários (ver Tabela 9). Quanto ao desempenho da IULN, com o Protetor 1 simples ficou no intervalo 2 ($100 \leq E \leq 500$) e foi de 75,7% e com o anteparo, de 76,1%. Como a diferença foi muito pequena, resolveu-se não incluir este tipo de protetor nas análises comparativas do item 4.3.

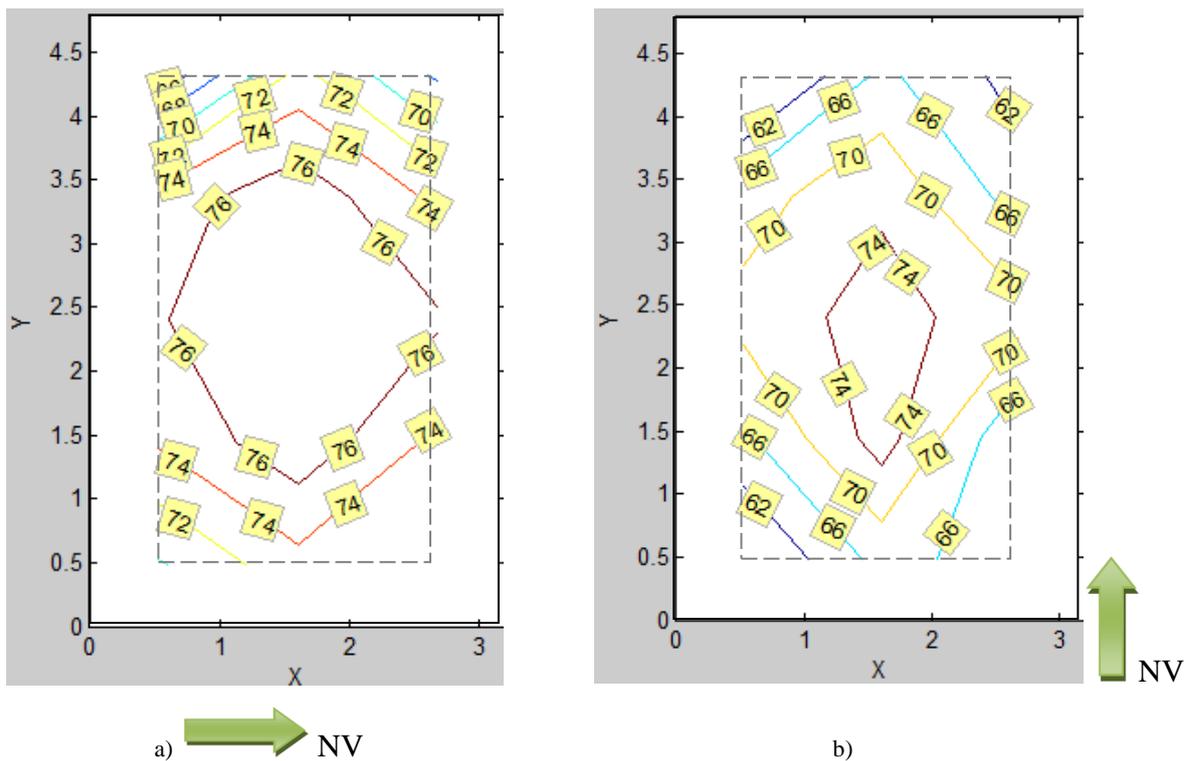
Tabela 9 - Ilumiância média anual - Protetor 1 X Protetor 1 com anteparo

Iluminância média anual – Modelo Básico - Norte no X			
Horário	Protetor 1	Prot. P1 com anteparo	Diferença (%)
7	22	24	9,1
8	95	97	2,1
9	170	168	-1,2
10	190	184	-3,2
11	184	180	-2,2
12	166	166	0,0
13	176	175	-0,6
14	181	178	-1,7
15	185	177	-4,3
16	142	144	1,4
17	59	65	10,2
Média	143	142	-0,8

4.2.1.3 Modelo Básico com protetor solar total para qualquer orientação – Protetor Geral

As simulações com o uso do Protetor Geral foram propostas para analisar a influência no desempenho utilizando-se um protetor padrão que atendesse a qualquer orientação, em relação a um protetor com as dimensões ajustadas a uma orientação específica. A análise foi feita para as duas orientações escolhidas, para o ambiente com a mesma orientação do uso do Protetor 1 (Norte no eixo X), com o uso do Protetor Geral a média anual foi de 125 lx e IULN de 73,4% (no intervalo $100 \leq E \leq 500$) e para o ambiente com a mesma orientação do uso do Protetor 2 (Norte no eixo Y), com o uso do Protetor Geral a média anual foi de 116 lx e IULN de 66,6%. O Gráfico 11 a e b mostra que com o Norte no eixo X, além de um pequeno aumento no percentual de ocorrências de iluminância útil, os maiores percentuais atingem uma área maior do ambiente.

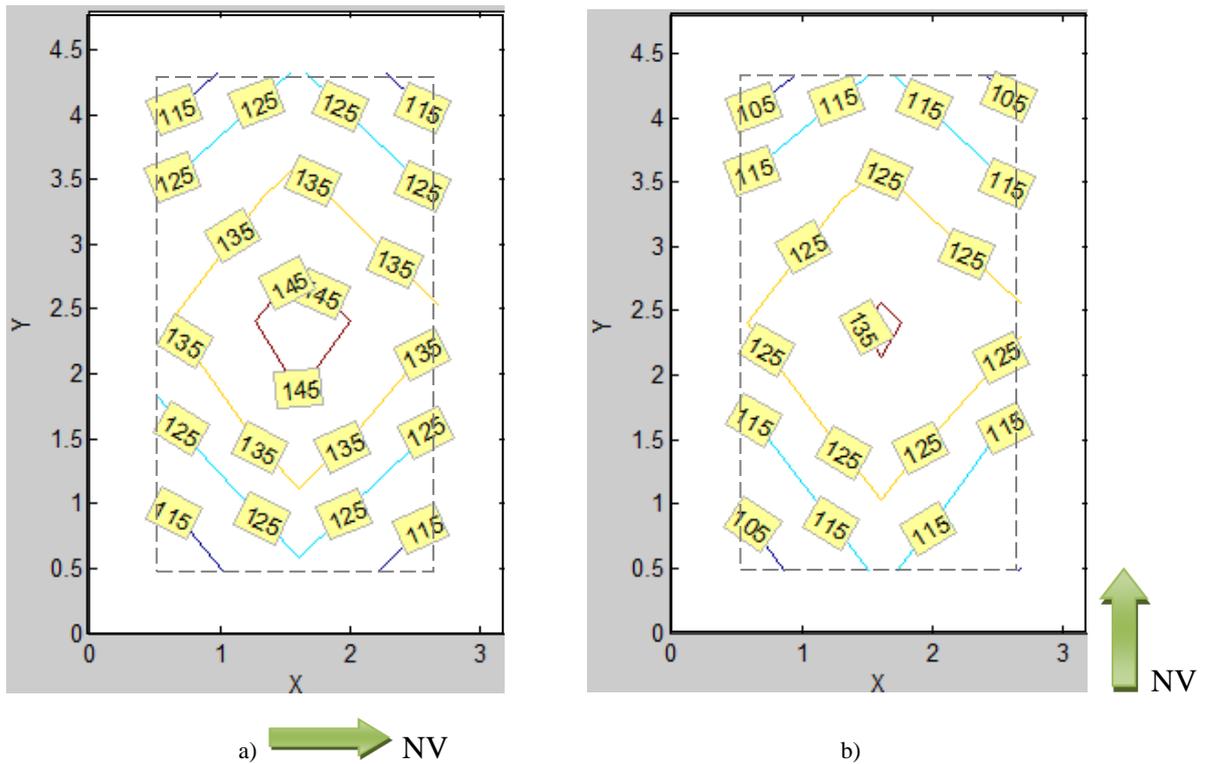
Gráfico 11 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 500$) - Modelo Básico com Protetor Geral.



Fonte: Cabús, 2012 a (adaptado pela autora).

O Gráfico 12 a e b a seguir, mostram a distribuição das médias anuais de iluminância. Em ambas as situações existe uma área central mais iluminada e os quatro cantos com as menores médias, no entanto, todas dentro do intervalo de iluminância útil.

Gráfico 12 - Iluminância média anual (lx) – Modelo Básico c/ Protetor Geral

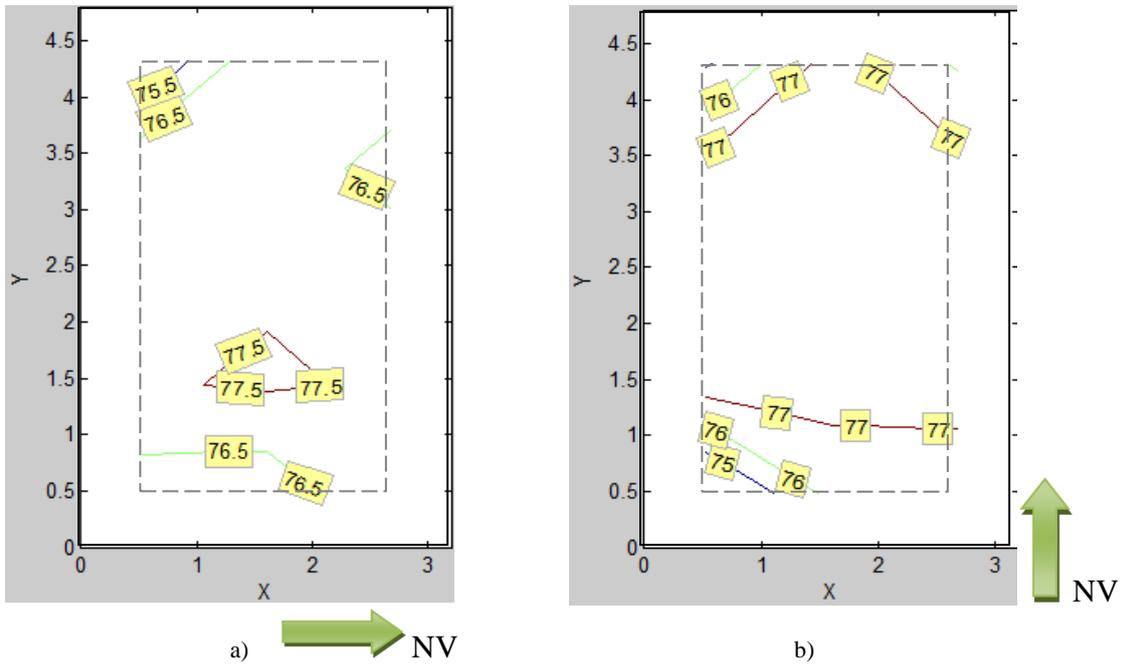


Fonte: Cabús, 2012a (adaptado pela autora).

4.2.1.4 Modelo Básico com protetor solar parcial para qualquer orientação – Protetor Parcial

As simulações com o uso do Protetor Parcial foram propostas para analisar a influência no desempenho utilizando-se um protetor padrão e menor do que os demais conforme detalhado no item 3.1.1. A análise foi feita para as duas orientações escolhidas, para o ambiente com a mesma orientação do uso do Protetor 1 (Norte no eixo X) com o uso do Protetor Parcial a média anual foi de 166 lx e a IULN no intervalo 2 ($100 \leq E \leq 500$) foi de 76,9%. Para o ambiente com a mesma orientação do uso do Protetor 2 (comprimento paralelo ao norte), com o uso do Protetor Parcial a média anual foi de 162 lx, a IULN no intervalo 2 foi de 76,7%. O Gráfico 13 a e b a seguir, mostram que o número de ocorrências de IULN foi bastante uniforme nas duas orientações e que em ambas os índices ficaram em torno de 75% para todo o ambiente.

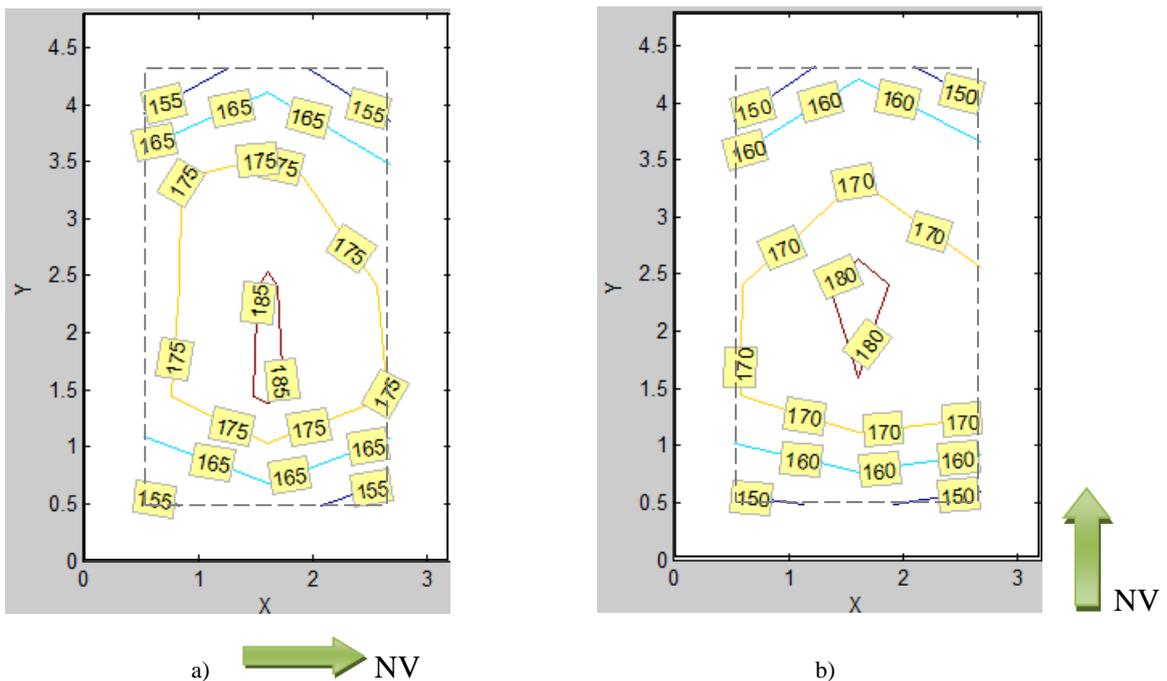
Gráfico 13 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 500$) - Modelo Básico com Protetor Parcial.



Fonte: Cabús, 2012 a (adaptado pela autora).

O Gráfico 14 a e b mostram que a distribuição das médias anuais de iluminância para as duas orientações é semelhante aos outros tamanhos de protetores, no entanto, os menores índices (antes mais nas quinas) ficam um pouco mais alongados em relação às paredes da largura do ambiente e com níveis médios acima de 150 lx.

Gráfico 14 - Iluminância média anual (lx) – Modelo Básico c/ Protetor Parcial



Fonte: Cabús, 2012 a (adaptado pela autora).

De acordo com a carta solar de Maceió (ver Apêndice B) para as condições com o uso do Protetor Parcial a incidência solar no ambiente teria uma ocorrência variando de apenas 15 minutos a uma hora de duração, de acordo com a época do ano e com a orientação solar. A Tabela 10 mostra esses horários em épocas opostas durante o ano (inverno e verão).

Tabela 10 - Horários de penetração solar para o Modelo Básico com Protetor Parcial

HORÁRIOS DE PENETRAÇÃO SOLAR – MODELO BÁSICO			
Orientação	Época do ano	Pela manhã	À tarde
Norte na larg. do amb. (Norte no eixo X)	No verão	entre 9h e 9h15	entre 14h45 e 15h
	No inverno	entre 9h20 e 9h35	entre 14h25 e 14h40
Norte no comprim. do ambiente (N no eixo Y)	No verão	entre 8h e 8h25	entre 15h35 e 16h
	No inverno	entre 8h20 e 9h20	entre 14h40 e 15h40

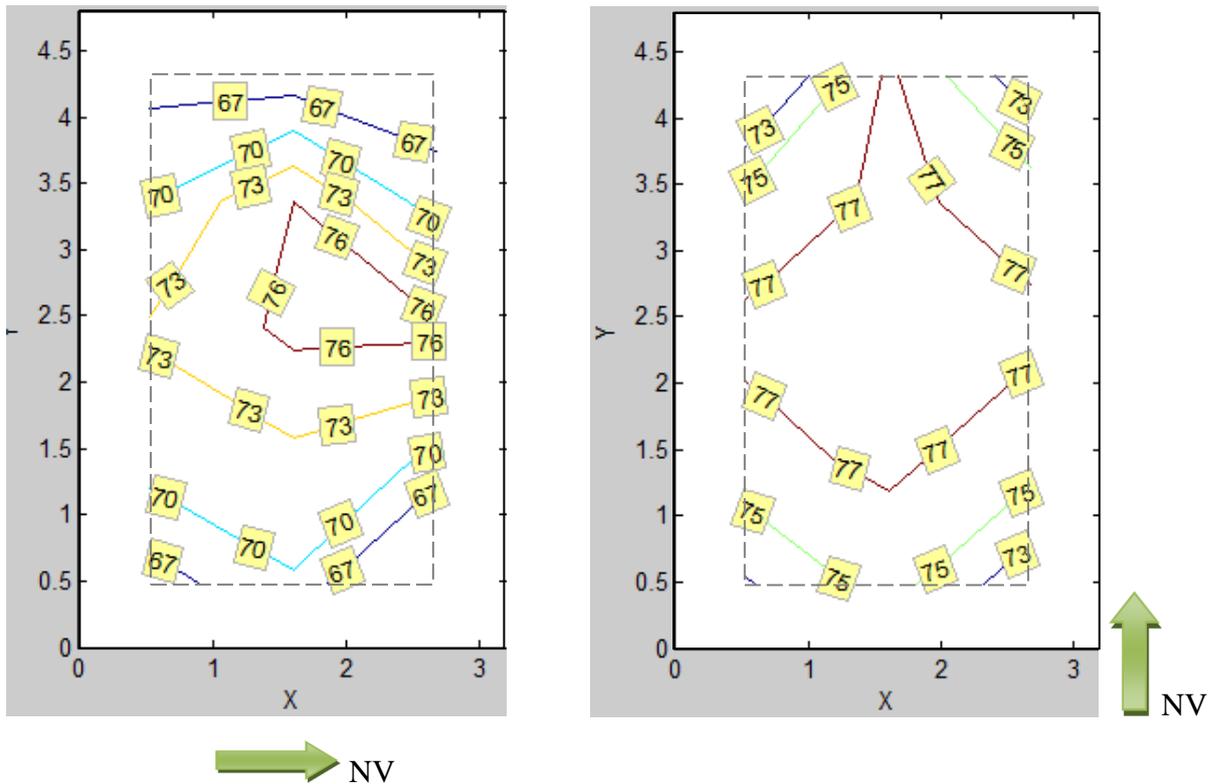
4.2.2 Modelo Alternativo com protetores solares

Para o Modelo Alternativo, os resultados apresentados para os ambientes também estão agrupados em relação às três características dos protetores solares propostos: proteção total da penetração solar com as dimensões ajustadas a orientação (com os Protetores 1 e 2), proteção total da penetração solar, no entanto com as dimensões que atendam a qualquer orientação (com o Protetor Geral) e proteção parcial da penetração solar (com o Protetor Parcial), conforme detalhados no item 3.1.1.

4.2.2.1 Com protetor solar total simples ajustado à orientação - P1 e P2

Os valores de IULN durante o ano no intervalo 2 ($100 \leq E \leq 500$) foram 75,4% com o uso do Protetor 1 (Norte no eixo Y) e 69,6% com o uso do Protetor 2. O Gráfico 15 a e b a seguir, mostram a distribuição desse percentual para as duas orientações, verifica-se que com o Norte paralelo ao eixo Y, além de um maior número de ocorrências, os maiores índices atingem uma área maior do ambiente.

Gráfico 15 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 500$)



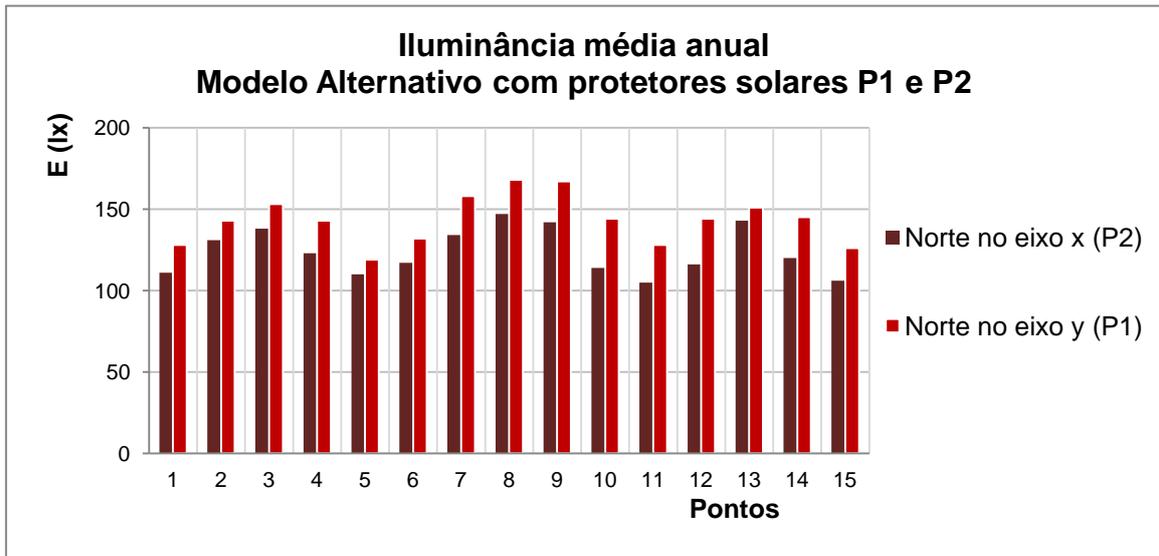
a) Modelo Alternativo com o Protetor 2

b) Modelo Alternativo com o Protetor 1

Fonte: Cabús, 2012 a (adaptado pela autora).

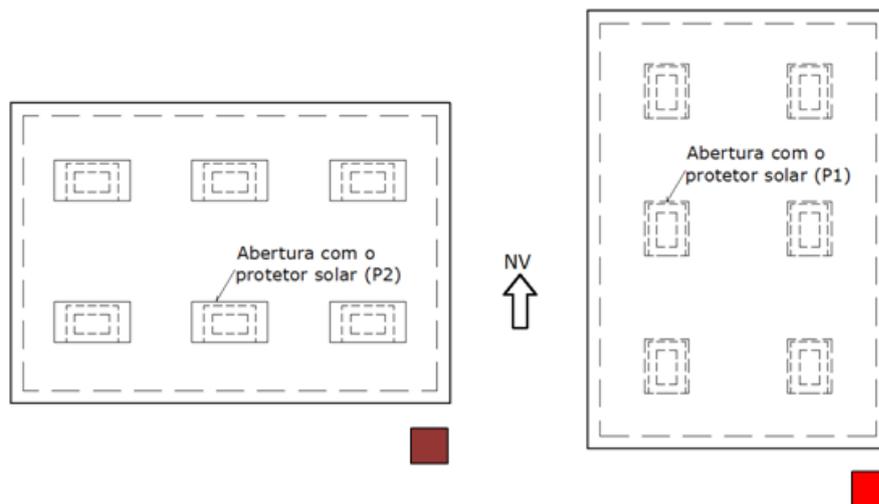
A iluminância média para o ambiente com o Protetor 1 foi de 143 lx com um coeficiente de variação de 10,3% e com o protetor 2, de 124 lx e coeficiente de variação de 11,6%. A redução dos índices luminosos no ambiente com a introdução dos protetores solares ocorreu de forma diferenciada para as duas orientações como no modelo Básico. O Gráfico 16 ilustra a diferença nas médias anuais de iluminância em cada ponto simulado no ambiente para as duas orientações. Nota-se que nas duas situações os pontos localizados nos quatro cantos (1, 5, 11 e 15) novamente são os menos favorecidos, mas com as médias acima de 100 lx. Como no Modelo Básico, a diferença nas médias dos níveis luminosos para as duas orientações foi em média de 15%, no entanto, a favor do ambiente com o comprimento paralelo ao Norte (uso também do Protetor 1).

Gráfico 16 - Iluminância média anual - Modelo Alternativo com protetor solar



A Figura 54 representa o Modelo Alternativo nas duas situações indicadas no Gráfico 16. Verifica-se de maneira prática que numa situação de projeto para dois ambientes com as mesmas dimensões, a mesma quantidade de aberturas, mas dispostos perpendicularmente, poderão apresentar 15 % de diferença nos índices de iluminância em decorrência do sentido das aberturas com os protetores solares respectivos.

Figura 54 - Disposição do Modelo Alternativo com Protetor 1 e Protetor 2

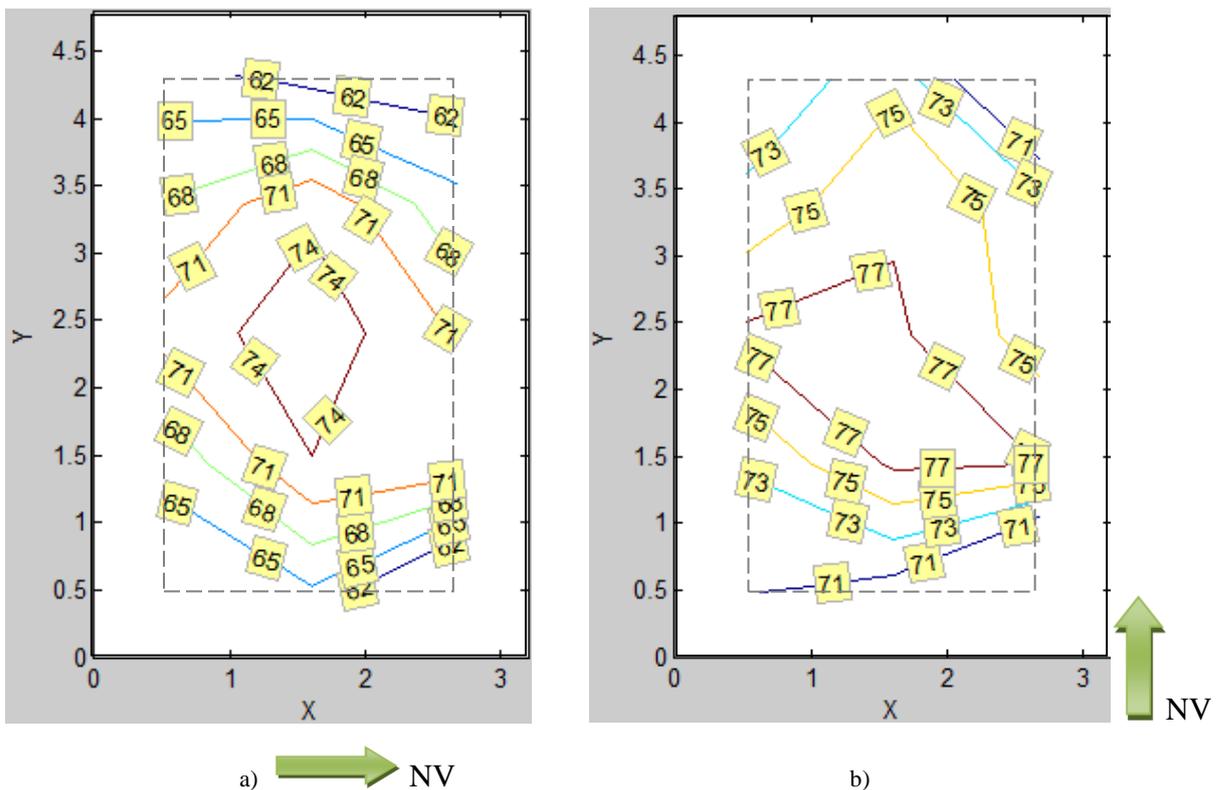


Fonte: Autora, 2012.

4.2.2.2 Com protetor solar total para qualquer orientação – Protetor Geral

As simulações com o uso do Protetor Geral no Modelo Alternativo, também foram propostas para analisar a influência na diminuição da iluminância utilizando-se um protetor padrão que atendesse a qualquer orientação, em relação a um protetor com as dimensões ajustadas a uma orientação específica. Para o ambiente com a mesma orientação do uso do Protetor 1 (Norte no eixo Y), com o uso do Protetor Geral a média anual foi de 128 lx e IULN no intervalo 2 ($100 \leq E \leq 500$) de 73,1% e para o ambiente com a mesma orientação do uso do Protetor 2 (Norte no X), com o uso do Protetor Geral a média anual foi de 118 lx e IULN de 67%. O Gráfico 17 a e b mostram que com o Norte paralelo ao eixo Y, além de um maior número de ocorrências, os maiores índices atingem uma área maior do ambiente.

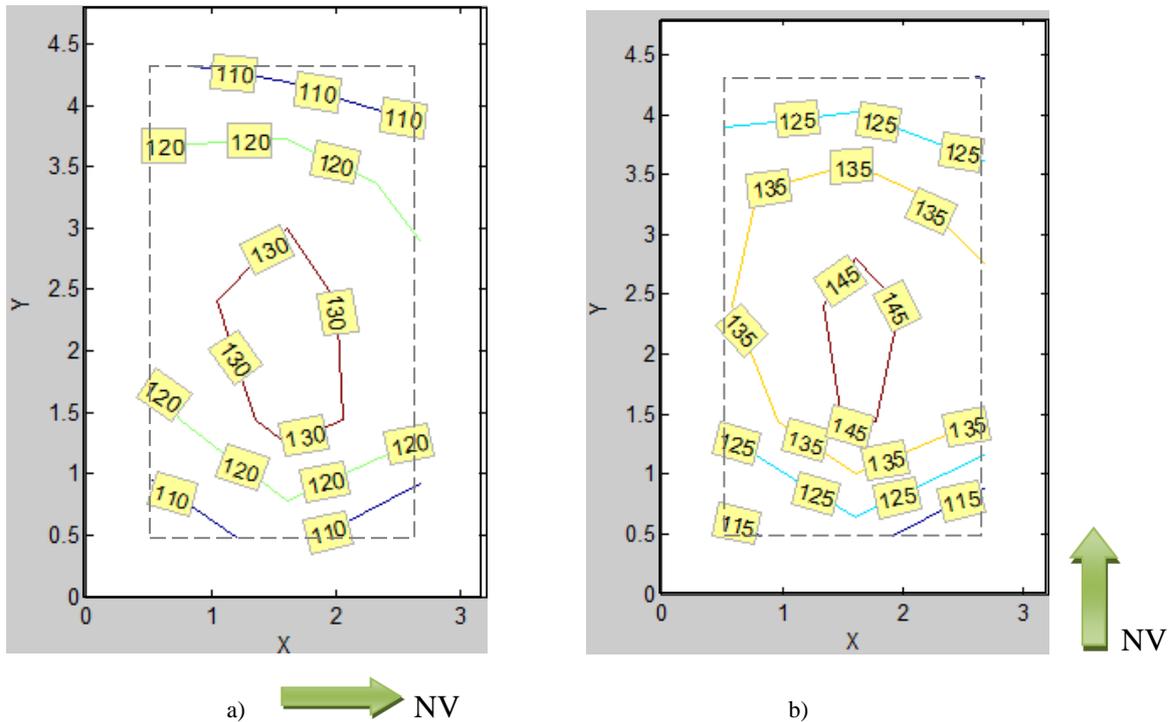
Gráfico 17 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 500$) - Modelo Alternativo com Protetor Geral.



Fonte: Cabús, 2012 a (adaptado pela autora).

O Gráfico 18 a e b mostram a distribuição das médias anuais de iluminância. Em ambas as orientações, a área central tem os maiores índices e os menores ficam nos extremos paralelos ao eixo X, no entanto, todos dentro do intervalo de iluminância útil.

Gráfico 18 - Iluminância média anual (lx) – Modelo Alternativo c/ Protetor Geral

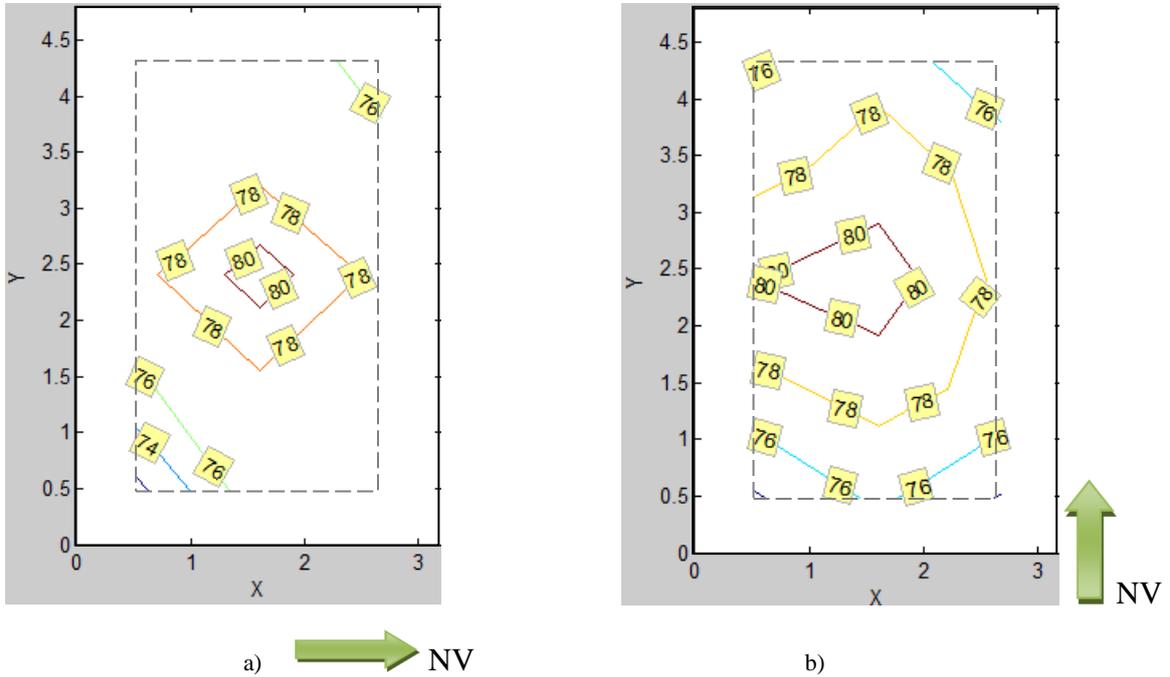


Fonte: Cabús, 2012 a (adaptado pela autora).

4.2.2.3 Com protetor solar parcial para qualquer orientação – Protetor Parcial

As simulações com o uso do Protetor Parcial no Modelo Alternativo, também foram propostas para analisar a influência no aumento da iluminância utilizando-se um protetor padrão e menor do que os demais conforme detalhado no item 3.1.1. Para o ambiente com a mesma orientação do uso do Protetor 1 (Norte no eixo Y), com o uso do Protetor Parcial a média anual foi de 168 lx e IULN ($100 \leq E \leq 500$) foi de 77,2%. Para o ambiente com a mesma orientação do uso do Protetor 2 (largura paralela ao norte), com o uso do Protetor Parcial a média anual foi de 163 lx e a IULN de 76,9%. O Gráfico 19 a e b mostram que todos os pontos do ambiente apresentam no mínimo 70% de ocorrências no intervalo 2 ($100 \leq E \leq 500$) e que com o Norte paralelo ao eixo Y, os maiores percentuais atingem uma área maior do ambiente.

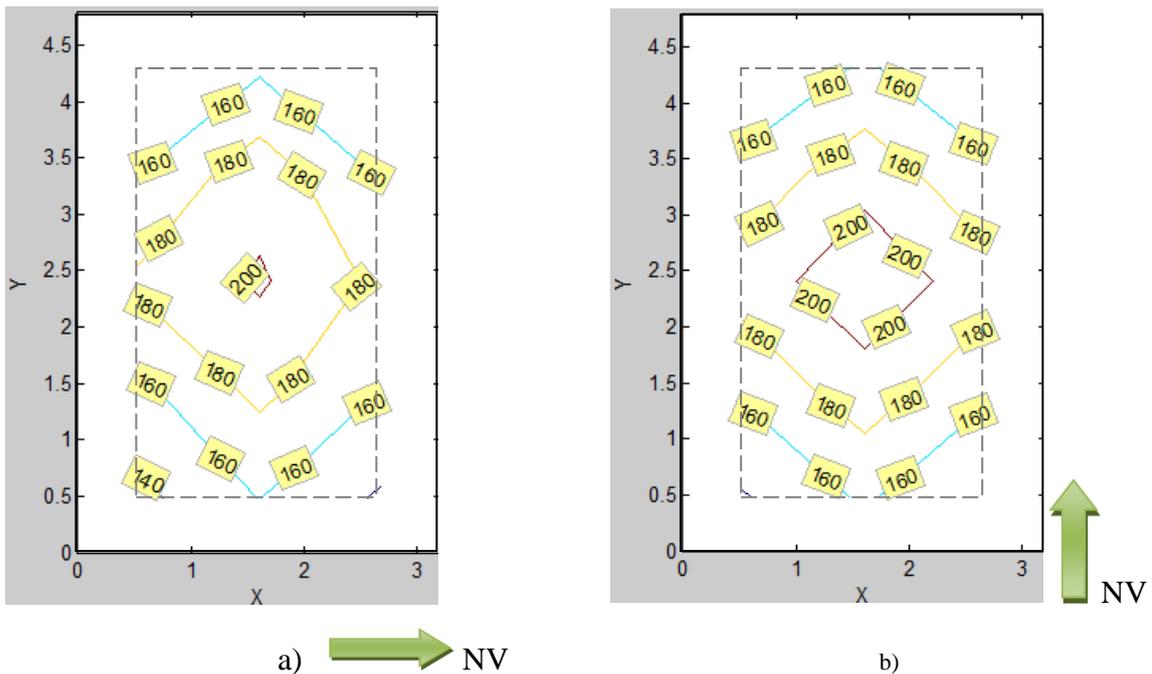
Gráfico 19 - Isocurvas dos percentuais da IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 500$) - Modelo Alternativo c/ Protetor Parcial.



Fonte: Cabús, 2012 a (adaptado pela autora).

O Gráfico 20 a e b mostram que a distribuição das médias anuais de iluminância para as duas orientações é muito semelhante aos outros tamanhos de protetores, com a região central mais iluminada e os quatro cantos com os menores níveis, todos acima de 140 lx.

Gráfico 20 - Iluminância média anual (lx) – Modelo Alternativo c/ Protetor Parcial



Fonte: Cabús, 2012 a (adaptado pela autora).

De acordo com a carta solar de Maceió (ver Apêndice B) para as condições com o uso do Protetor Parcial a incidência solar no ambiente teria uma variação de ocorrência de apenas 15 minutos a uma hora de duração de acordo com a época do ano e com a orientação solar. A Tabela 11 mostra esses horários em épocas extremas durante o ano (inverno e verão).

Tabela 11 - Horários de penetração solar para o Modelo Alternativo com Protetor Parcial

HORÁRIOS DE PENETRAÇÃO SOLAR – MODELO ALTERNATIVO			
Orientação	Época do ano	Pela manhã	À tarde
Norte na larg. do amb. (Norte no eixo X)	No verão	entre 8h e 8h25	entre 15h35 e 16h
	No inverno	entre 8h20 e 9h20	entre 14h40 e 15h40
Norte no comprim. do ambiente (N no eixo Y)	No verão	entre 9h e 9h15	entre 14h45 e 15h
	No inverno	entre 9h20 e 9h35	entre 14h25 e 14h40

4.3 Comparativo do desempenho luminoso dos modelos

Foram comparados os resultados de cada modelo em relação à orientação solar para verificar sua influência nesse tipo de abertura zenital proposta. Paralelamente, foram comparados os resultados com a mesma orientação entre modelos, para analisar a influência da disposição das vigotas, uma vez que ela define o posicionamento das aberturas.

Foi analisado também, a influência no desempenho luminoso a introdução dos protetores solares e a variação no desempenho em relação aos tamanhos de protetores propostos.

4.3.1 Modelos sem protetores solares

O Gráfico 21 mostra a iluminância média anual para os dois modelos nas duas orientações analisadas e o Gráfico 22 mostra os percentuais de ocorrência da IULN. Verifica-se que com as aberturas zenitais sem protetor solar, em ambos os modelos, a orientação praticamente não faz diferença nos índices.

Pode-se concluir que quando as aberturas forem projetadas sem os protetores solares, a laje deve ser prevista com as vigotas no sentido normal dos apoios, pelo menor vão (Modelo Básico), uma vez que no Modelo Alternativo, o acréscimo nos índices de IULN (em torno de 1%) e na iluminância (em torno de 4%) são pequenos e não justifica tal alteração.

Gráfico 21 - Iluminância Média anual - Modelos sem os protetores solares

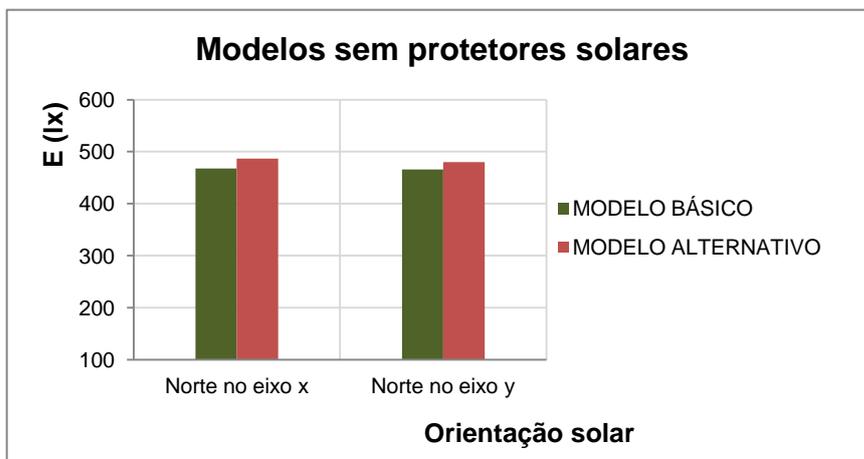
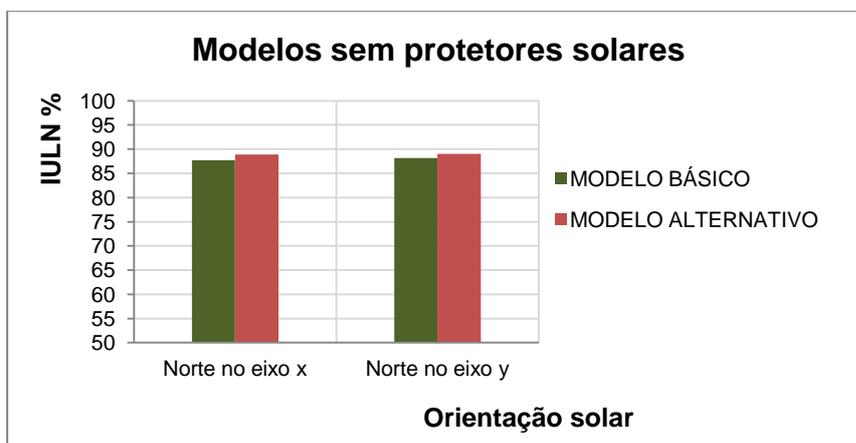


Gráfico 22 - IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 2000$) - Modelos sem os protetores solares.

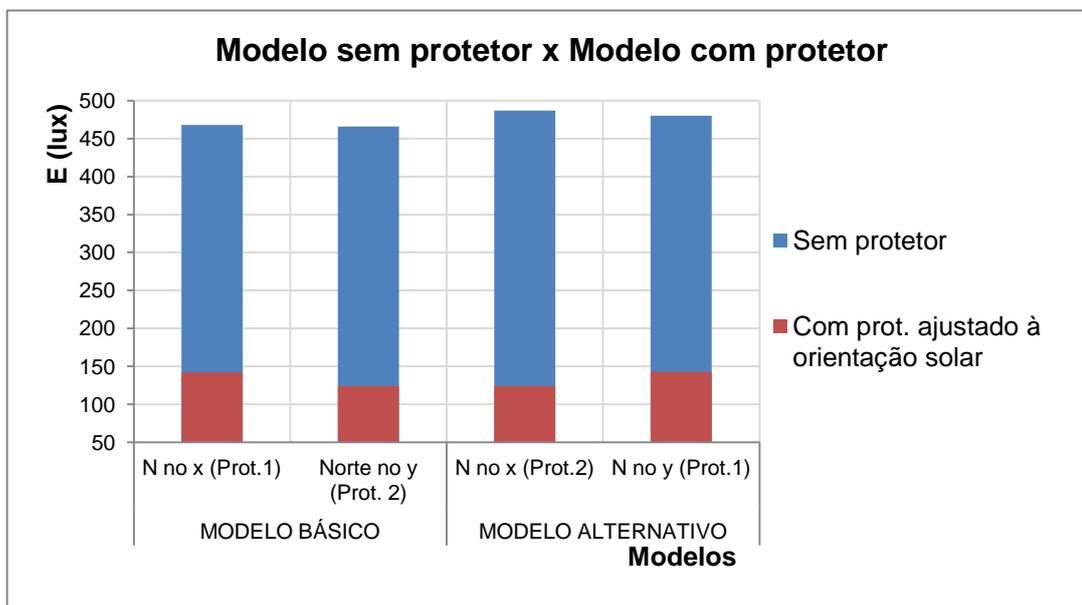


4.3.2 Modelo sem protetor solar X Modelo com protetor solar

Esta comparação é feita apenas para o uso dos protetores com as dimensões ajustadas a orientação, os demais tamanhos de protetores são comparados entre si no item 4.3.3.

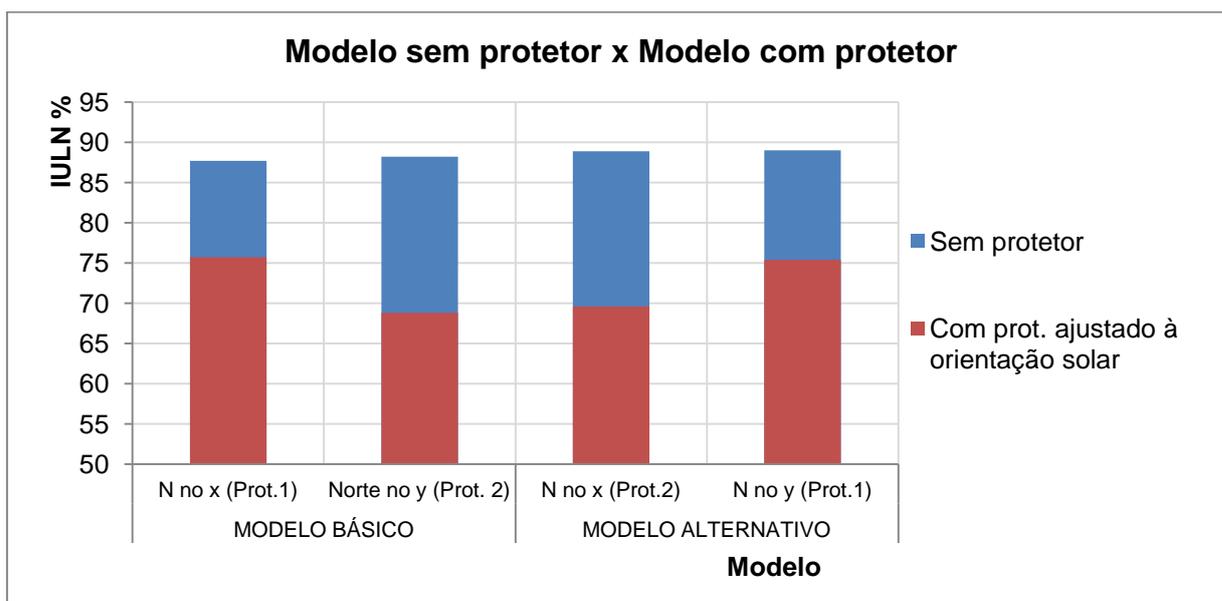
A redução nos índices luminosos no ambiente com a introdução dos protetores solares nas aberturas foi significativa, ver Gráfico 23. No modelo Básico com a orientação do Norte paralelo ao eixo X os índices com protetores representaram em média apenas 30% dos índices alcançados sem os protetores e para a orientação do Norte paralelo ao eixo Y, apenas 25%. No Modelo Alternativo os percentuais foram os mesmos, porém invertido em relação à orientação (30% para o Norte no eixo Y e 25% para o Norte no eixo X). Percebe-se que com o uso do Protetor P1 os índices foram proporcionalmente maiores, uma vez que ele tem uma menor área de cobertura em relação ao Protetor P2.

Gráfico 23 - Iluminância Média anual - Modelo sem protetor solar X com protetor solar ajustado a orientação



Em relação aos índices de desempenho de IULN, houve uma redução em torno de 17% para as orientações com o uso do protetor 1, e de 28% para as orientações com o uso do protetor 2, para ambos os modelos (ver Gráfico 24). Nota-se que o tamanho do protetor é determinante nessas variações.

Gráfico 24 - IULN (no intervalo de $100 \leq E \leq 2000$) - Modelo s/ protetor solar X com protetor solar ajustado a orientação



4.3.3 Modelos com protetor solar

O Gráfico 25 e o Gráfico 26 mostram que para todos os tamanhos de protetores analisados o desempenho é de no mínimo 66% de IULN e que a Iluminância média encontra-se acima de 110 lx.

Gráfico 25 - Iluminância Média anual - Modelos com protetores solares

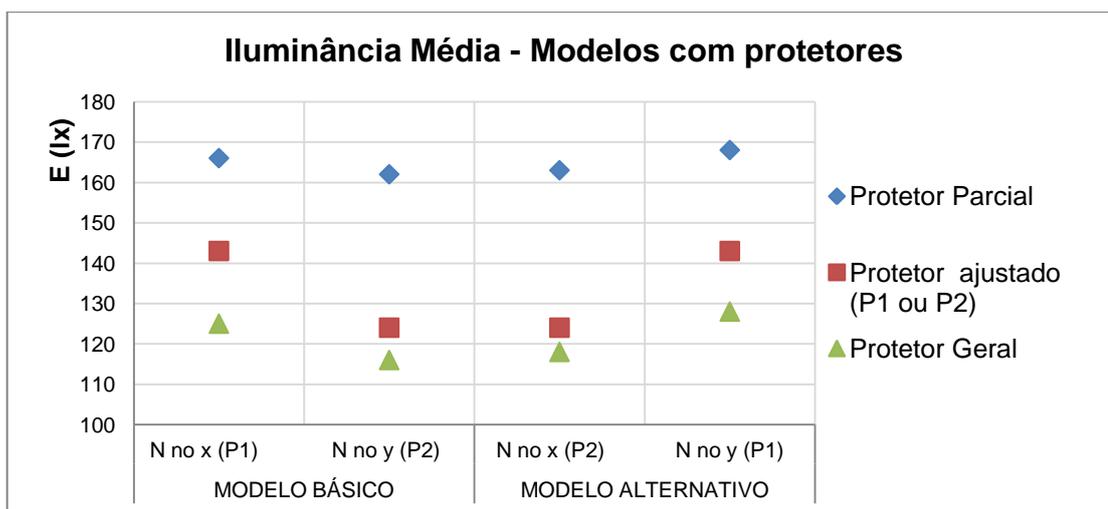
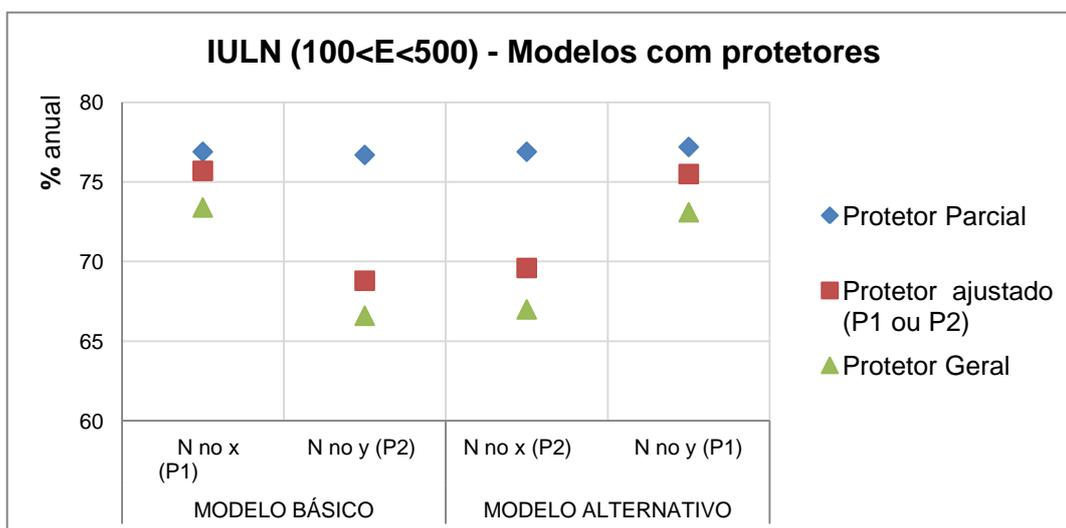


Gráfico 26- IULN - Modelos com protetores solares



Nos dois modelos, nota-se que a diferença nos valores com a mudança do Protetor P1 para o Protetor Geral ou Parcial é mais equilibrada do que a mudança em relação ao Protetor P2.

Para o Modelo Básico, em relação às duas orientações, a diferença na IULN, a favor do Norte no eixo X, foram em média 10% considerando o uso dos protetores ajustados à orientação (P1 e P2), como também, com o uso do Protetor Geral. No entanto, com a possibilidade do uso do protetor solar Parcial, praticamente não houve diferença no percentual. Com relação a Iluminância Média Anual a diferença foi em média 15% quando foram considerados os protetores ajustados à orientação (P1 e P2), de 8% com o Protetor Geral e de 2,5% com o uso do Protetor Parcial.

Para o Modelo Alternativo, a diferença na IULN e na Iluminância Média Anual em relação às duas orientações é praticamente a mesma do Modelo Básico, no entanto, a favor do Norte no eixo Y. Comparando-se o Modelo Básico com o Modelo Alternativo para uma mesma orientação, verifica-se que, com o Norte paralelo à largura do ambiente (N no eixo X) o Modelo Básico é sempre a melhor escolha, tanto em relação à iluminância média, como em relação aos índices da IULN, além de apresentar uma melhor uniformidade na distribuição da luz no ambiente, com os menores coeficientes de variação. Com o Norte paralelo ao comprimento do ambiente, apenas para os modelos com proteção solar total, o Modelo Alternativo é a melhor escolha, uma vez que com o uso do Protetor Parcial não há diferença no índice de IULN e uma diferença de apenas 3,7% na Iluminância Média, o que provavelmente não justifica a mudança no sentido das vigotas, além de um coeficiente de variação maior. A Tabela 12, Tabela 13e a Tabela 14 mostram as diferenças em termos percentuais dos parâmetros comentados acima.

Tabela 12 - IULN - com protetor solar – Modelo Básico x Modelo Alternativo

Modelos	IULN % (Intervalo 100 ≤ E ≤ 500)					
	Norte no eixo X			Norte no eixo Y		
	Modelo Básico	Modelo Alternativo	Diferença (%)	Modelo Básico	Modelo Alternativo	Diferença (%)
Protetor Parcial	76,9	76,9	0,0	76,7	77,2	-0,6
Protetor ajustado (P1 ou P2)	75,7	69,6	8,8	68,8	75,4	-8,8
Protetor Geral	73,4	67	9,6	66,6	73,1	-8,9

Tabela 13 - Iluminância Média Anual com protetor solar - Modelo Básico x Modelo Alternativo

Modelos	ILUMINÂNCIA MÉDIA ANUAL					
	Norte no eixo X			Norte no eixo Y		
	Modelo Básico	Modelo Alternativo	Diferença (%)	Modelo Básico	Modelo Alternativo	Diferença (%)
Protetor Parcial	166	163	1,8	162	168	-3,6
Protetor ajustado (P1 ou P2)	142	124	14,5	124	143	-13,3
Protetor Geral	125	118	5,9	116	128	-9,4

Tabela 14 - Coeficientes de variação - Modelo Básico x Modelo Alternativo

Modelos	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO					
	Norte no eixo X			Norte no eixo Y		
	Modelo Básico	Modelo Alternativo	Diferença (%)	Modelo Básico	Modelo Alternativo	Diferença (%)
Protetor Parcial	8,7	12,8	-32,0	9,1	13,4	-32,1
Protetor ajustado (P1 ou P2)	8,9	11,6	-23,3	8,0	10,3	-22,3
Protetor Geral	10,5	9,5	10,5	10,2	10,5	-2,9

De maneira geral, nos dois modelos (Básico e Alternativo) os índices luminosos alcançados com o uso do Protetor Parcial são em média 17% maiores do que com o uso do protetor P1 e 30% maiores do que P2. E com o uso do Protetor Geral os índices são em média 13% menores do que o uso do Protetor 1 e em média 6% menores do que P2.

Na Tabela 15 encontram-se os percentuais médios de aumento ou diminuição da iluminância com as alterações dos protetores em cada modelo.

Tabela 15 - Diferença percentual entre os modelos - Iluminância Média

		Diferença percentual	
		No Mod. Básico	No Mod. Alternativo
Protetor 1	Para o Protetor Parcial	-14,5	-14,9
	Para o Protetor Geral	13,6	11,7
Protetor 2	Para o Protetor Parcial	-23,5	-23,9
	Para o Protetor Geral	6,9	5,1

Fazendo-se uma análise do comportamento horário dos três tamanhos de protetores, na orientação de melhor desempenho para cada modelo, em ambos verificam-se níveis médios próximos ou acima de 150 lx, com exceção de 7h, 8h e 17h (baixa altura solar). As 7h e 17h os níveis ficam fora dos intervalos de iluminação útil, mas às 8 horas dependendo do tamanho do protetor utilizado os níveis podem ficar acima de 100 lx, limite para a iluminação ser considerada útil (ver Gráfico 27 e Gráfico 28).

Gráfico 27 - Iluminância Média Horária anual - Modelo Básico

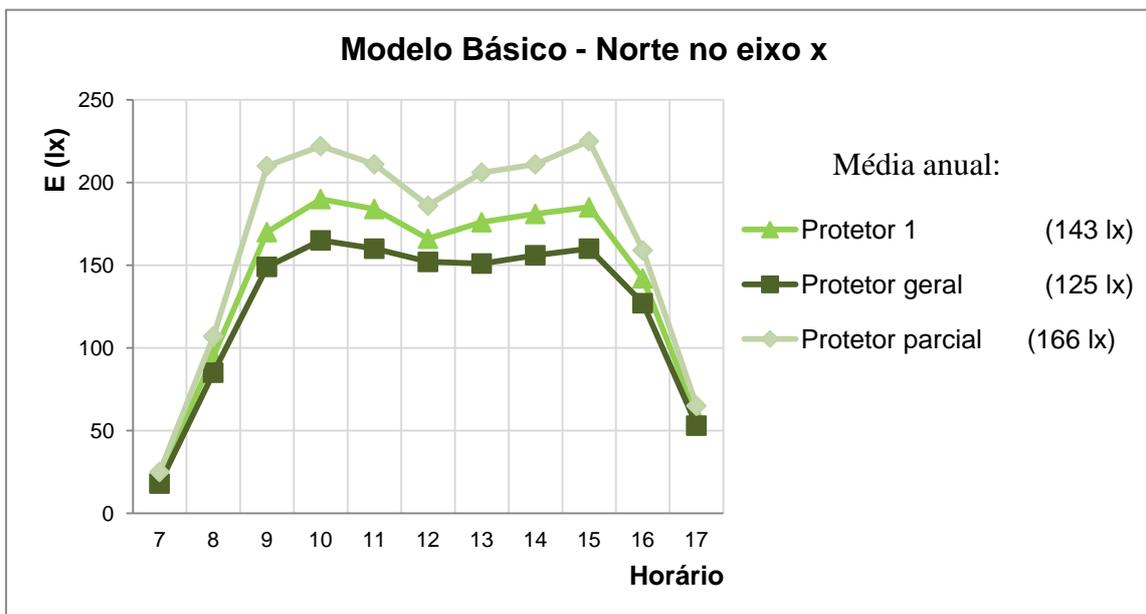
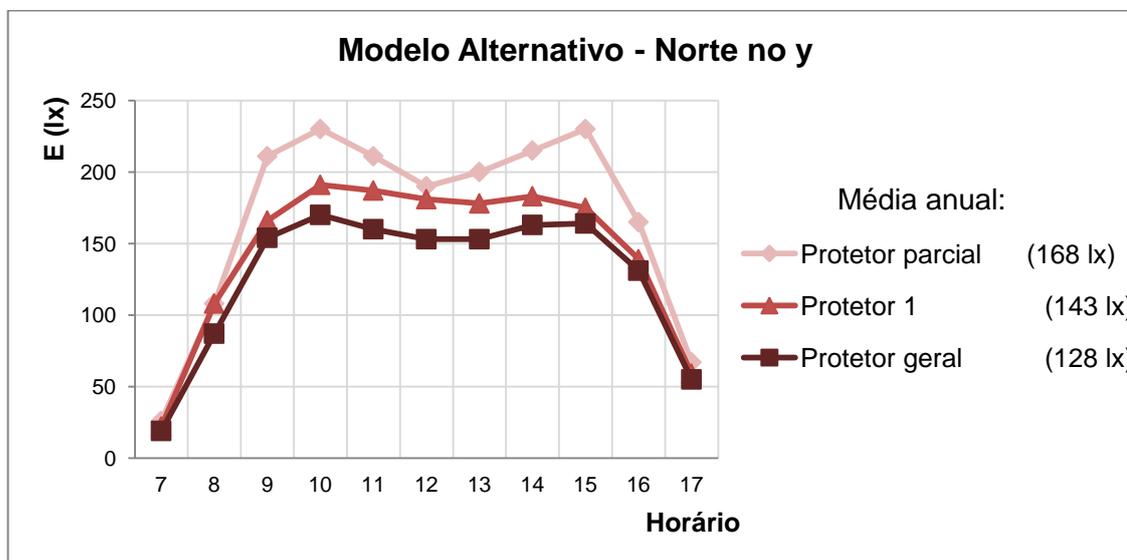


Gráfico 28 - Iluminância Média Horária anual - Modelo Alternativo



E fazendo-se uma análise do comportamento luminoso mensal para os três tamanhos de protetores, também na orientação de melhor desempenho de cada modelo, verificam-se níveis médios acima de 100 lx em todos os meses. Os meses de maio, junho e julho, como era de se esperar apresentam as menores médias (ver Gráfico 29 e Gráfico 30).

Gráfico 29 - Iluminância Média mensal - Modelo Básico

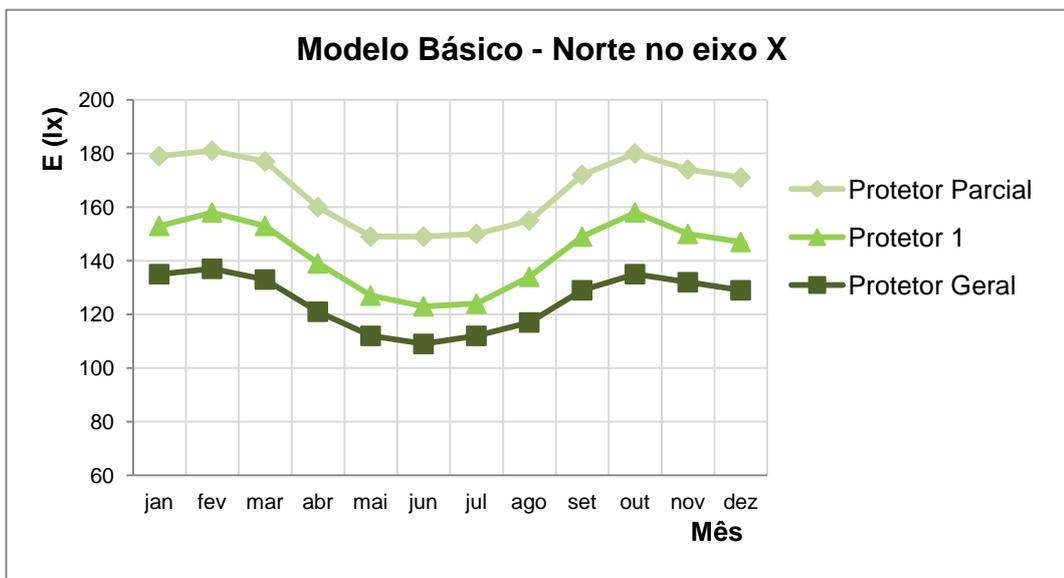
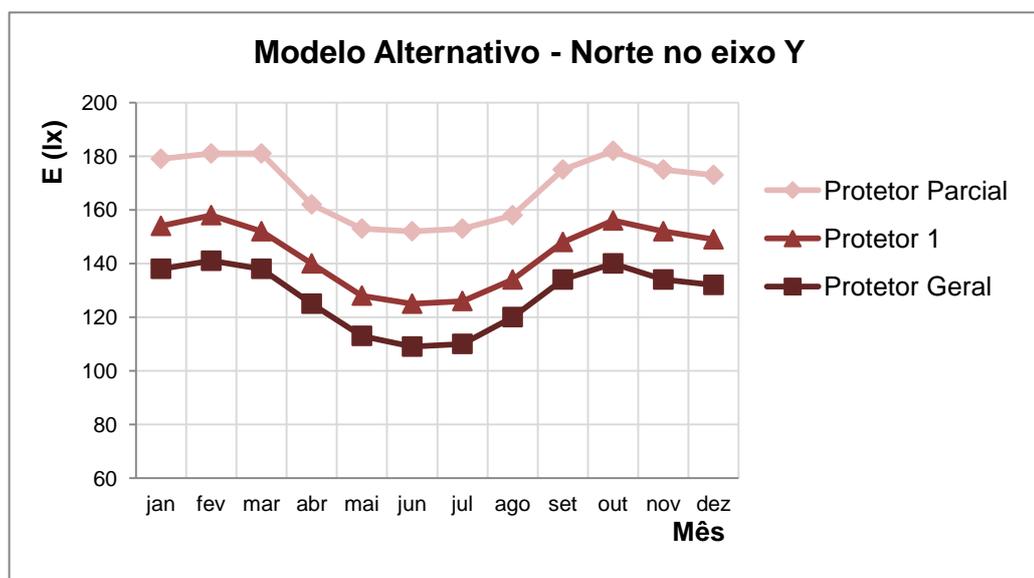


Gráfico 30 - Iluminância Média mensal - Modelo Alternativo



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A necessidade de adequação ou concepção das edificações considerando o novo paradigma de desenvolvimento sustentável é destaque no mundo inteiro. Independente da escala de um projeto, a arquitetura deve buscar soluções que envolvam as questões ambientais, sociais, econômicas e a satisfação dos usuários.

A pesquisa em questão procurou analisar um sistema de aberturas zenitais nas lajes nervuradas pré-moldadas, de forma que possa se tornar uma estratégia de projeto de simples execução e com um desempenho satisfatório de iluminação natural, direcionado a edificações de pequeno e médio porte.

Mediante as análises feitas, e de acordo com o modelo de desempenho da Iluminação Útil da Luz Natural, os resultados para os ambientes com as aberturas sem protetor solar com as características analisadas representaram um desempenho anual em torno de 88% de iluminância considerada útil (divididos em 40% no intervalo entre 100 e 500 lx e 48% no intervalo entre 500 e 2000 lx).

Com a introdução dos protetores solares houve uma diminuição no desempenho e os índices variaram de 67% a 77%. Os índices de iluminação útil para os modelos com protetor solar ficaram no intervalo 2 (entre 100 e 500 lx), que é considerado útil, mas com a necessidade de uma iluminação complementar. De acordo com a NBR 5413 de iluminação artificial, os níveis alcançados estão na classe referente à iluminação geral para áreas usadas intermitentemente ou com tarefas visuais simples, atendendo a vários exemplos de ambiente.

Para um ambiente com as aberturas sem protetor, foi verificado que a orientação solar não fez diferença nos índices de desempenho da IULN, nem da Iluminância Média Anual. No entanto, devido ao formato retangular das aberturas houve uma pequena diferença na distribuição dos índices internamente, mas sempre com a ocorrência das menores iluminâncias próximo às paredes da largura do ambiente.

Para os modelos sem protetor solar verificou-se também, que o Modelo Alternativo apresentou sempre um pequeno aumento nos índices, independente da orientação solar, o que pode ser em decorrência do sentido longitudinal da abertura ser o mesmo do ambiente. A diferença foi pequena, em média 3,5% na iluminância e 1% na IULN, por conta disso, em um projeto não se justifica a alteração no posicionamento normal das vigotas, pois acarretaria outras implicações estruturais, inclusive um aumento no custo da laje.

Com a introdução dos protetores solares nas aberturas, observa-se que a orientação solar das mesmas influencia nos resultados. Para uma mesma orientação no ambiente, entre os dois modelos de disposição das aberturas os índices de desempenho (tanto de IULN, como de Iluminância) foram sempre maiores quando a menor dimensão da abertura estava no sentido leste-oeste, o que no Modelo Básico representou o Norte no eixo X e no Modelo Alternativo, o Norte no eixo Y.

As diferenças nos desempenhos variaram dependendo da orientação e do protetor utilizado, para os tamanhos com proteção total (P1, P2 ou Protetor Geral) foram em média 10% em relação aos índices da IULN e de 6% a 15% em relação à iluminância. Para a utilização do Protetor Parcial as diferenças nos níveis de iluminância, entre os modelos foram insignificantes e dependendo da orientação não houve diferença do índice de IULN.

Portanto, se em um projeto com laje nervurada pré-moldada for previsto as aberturas zenitais com proteção solar total, deve-se observar se o posicionamento normal das vigotas ficará paralelo ao eixo Norte-sul, posição em que melhores índices de desempenho luminoso das aberturas seriam alcançados (que representa a menor dimensão da abertura no sentido leste-oeste). Caso contrário, a partir de uma análise estrutural, pode-se verificar a possibilidade de se mudar perpendicularmente o sentido normal dos apoios das vigotas. Inicialmente, se teria um custo maior devido às vigotas de maior comprimento serem mais caras (são mais reforçadas estruturalmente), por outro lado, o benefício da possível redução no consumo de energia, devido a diminuição da iluminação complementar, poderia ser mais vantajoso.

No caso do uso do Protetor Parcial não há necessidade de mudança no sentido das vigotas, o desempenho foi praticamente o mesmo para os dois modelos, independente da orientação analisada. Considerando a disposição do Modelo Básico e comparando o desempenho do protetor parcial com os de proteção solar total, sua utilização proporcionou um aumento nos índices de IULN de até 15% e na Iluminância de até 40%, a depender da orientação e do protetor considerado⁹. Vale destacar que haverá incidência solar no ambiente com este protetor, com uma duração variada durante o ano, com os limites de 15 a 25 minutos por turno no verão e de 15 minutos a uma hora por turno no inverno, a depender da época e da orientação solar.

⁹ Esta comparação foi entre os resultados com o Protetor Parcial e com o Protetor Geral para o Modelo Básico com a orientação do Norte paralelo ao comprimento do ambiente.

Mediante a possibilidade de se reproduzir esse sistema de aberturas com facilidade e diante do exposto acima, sugere-se o uso das aberturas com o Protetor Parcial como uma boa opção de utilização das aberturas propostas para a nossa região, sem interferir no posicionamento normal das vigotas e com a opção de uso de um tamanho único de protetor solar para qualquer orientação.

O estudo demonstrou que o desempenho médio diário das aberturas com protetor solar representou valores acima de 150 lx na maioria dos horários analisados, com exceção de 7h, 8h e 17h (horários de baixa altura solar).

O estudo demonstrou ainda, em termos de distribuição luminosa, que em todos os modelos os menores níveis localizaram-se geralmente, nos quatro cantos dos ambientes. Nos modelos com protetor solar, a variação entre a menor média e a média dos níveis de iluminação entre os pontos simulados em todas as combinações, ficou entre 83% e 88%, o que pode ser visualizado nos gráficos com as curvas de isoiluminância no decorrer do trabalho. A ABNT através da NBR 5413:1992, recomenda que a iluminância em qualquer ponto do campo de trabalho não seja inferior a 70% da iluminância média, portanto, os resultados foram bastante satisfatórios.

Outro ponto observado foi que o protetor solar com o anteparo proposto para tentar otimizar a entrada de luz por reflexão, nos horários de baixa altura solar, não apresentou desempenho geral satisfatório, uma vez que não houve acréscimo significativo no índice da IULN com relação ao protetor simples respectivo (apenas 0,4%). Quanto à iluminância verificou-se um ganho nos horários de 7 e 17h (de 9 e 10% em média, respectivamente), no entanto, às 8h e 16h o ganho foi muito pequeno e nos demais horários houve um decréscimo nos índices, deixando a média geral 0,8% menor.

Os níveis de desempenho alcançados com o tipo de abertura zenital proposta representaram um percentual de abertura de 3,6% da área do piso. Maiores índices podem ser atingidos aumentando-se esse percentual com um maior número de aberturas na laje. Aponta-se também, com a implantação dessas aberturas, a possibilidade de compensar a iluminação natural de ambientes em que a iluminação lateral apresente falhas, como por exemplo, em terrenos estreitos, proporcionando uma complementação nos índices, uma melhor distribuição da iluminância e conseqüentemente, uma melhora no conforto visual.

As coberturas das edificações, normalmente, recebem grande quantidade de radiação solar. Se essa radiação não for refletida, este calor será absorvido e conduzido por meio da

laje para o interior da edificação. Por conta disso, sugere-se que o acabamento superior favoreça a reflexão da radiação solar, minimizando a transmissão de calor para o interior do ambiente.

Que os resultados destas análises possam servir como subsídios na tomada de decisões por parte dos profissionais projetistas em relação às vantagens e desvantagens da inclusão de aberturas zenitais nas lajes nervuradas pré-moldadas, além de orientar fabricantes e fornecedores deste tipo de laje no sentido de divulgar esse sistema de abertura como alternativa para obtenção de melhores níveis de iluminação nas edificações, quando forem possíveis aberturas desta natureza.

LIMITAÇÕES DO TRABALHO

- O entorno foi considerado sem obstrução;
- Foi analisado para um tamanho específico de lajotas e vigotas;
- Nas simulações sem protetor as análises foram feitas considerando o fechamento com vidro transparente, não sendo analisado o comportamento da iluminação interior com a introdução de um fechamento com propriedades difusas;
- As simulações foram feitas para uma distribuição uniforme das aberturas, não sendo consideradas outras distribuições para as mesmas, nem o comportamento conjunto com aberturas laterais;
- A proposta só é recomendada para situações de laje de cobertura sem a presença de telhas, apenas com a impermeabilização.

RECOMENDAÇÕES A TRABALHOS FUTUROS

- Verificar a relação do consumo energético com a iluminação complementar necessária;
- Verificar a relação com a economia de energia a introdução das aberturas;
- Investigar a relação entre as aberturas zenitais e ganhos térmicos, considerando-as vedadas a circulação de ar e não vedadas, com um sistema de abertura pivotante;
- Considerar outras inclinações e outras características de material, para o modelo do protetor solar com o anteparo;
- Verificar o desempenho com outros percentuais de abertura em relação à área do piso.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, C. N. D. **Iluminação natural e eficiência energética – Parte I. Estratégias de projeto para uma arquitetura sustentável.** Brasília, 2002. Disponível em: <<http://www.unb.br/fau/posgraduacao/cadernos-eletronicos/edicao2002.htm>> Acesso em 03 de fevereiro de 2012.
- ANDRADE, M. S. S. de. **Avaliação dos métodos de cálculo de iluminação natural através de aberturas zenitais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação da Universidade Federal de Santa Maria – Rio Grande do Sul. 2004.
- ARAÚJO, I. A. **Influência da luz refletida pelo entorno na iluminação de edifícios no trópico úmido.** 131 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas. 2006.
- ARAÚJO, I. A.; CAVALCANTE, M. C.; CABÚS, R. C. **Influência de prateleiras de luz sob marquise na uniformidade da iluminação natural em interiores.** In: VIII Encontro Nacional e IV Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído - ENCAC/ELACAC. Maceió, AL. 2005.
- ARCOWEB – Revista digital de Arquitetura. **Memorial Darcy Ribeiro – João Figueiras Lima.** Disponível em: <<http://www.arcoweb.com.br/arquitetura/joao-filgueiras-lima-centro-cultural-20-07-2011.html>>. Acesso em julho 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA DE CONCRETO (ABCIC) – **Banco de Obras.** Disponível em: <<http://www.abcic.org.br/obras.asp>> Acesso em: Agosto de 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - **NBR 5413:** Iluminância de Interiores – Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 14859-1:** Laje pré-fabricada – Requisitos - Parte 1: Lajes unidirecionais. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. **NBR 14859-1:** Laje pré-fabricada – Requisitos - Parte 1: Lajes unidirecionais. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. **NBR 15215-1:** Iluminação natural – Parte 1: Conceitos básicos e definições. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 15215-2:** Iluminação natural – Parte 2: Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 15575-1:** Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2010.
- BAKER N.; FANCHIOTTI A. ; STREEMERS K. **Daylighting in Architecture.** James & James (Science Publishers) London, 1993.

BAKER, N.; STEEMERS, K. **Daylight Design of Buildings**. James & James (Science Publishers) London, 2002.

BEN - **Balanco Energético Nacional 2010 - ano base 2009**. Ministério das Minas e Energia, Governo Federal. Brasília, 2010. Disponível em:
<https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf>. Acesso em fevereiro de 2012.

BEN - **Balanco Energético Nacional 2011 - ano base 2010**. Ministério das Minas e Energia, Governo Federal. Brasília, 2010. Disponível em:
<https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf>. Acesso fev. de 2012.

BERTOLOTI, D., MOURA, N. C. da S. **Dispositivo zenital com seleção angular para a otimização da iluminação natural em salas de aula**. In: IX Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC. Ouro Preto/ MG. 2007.

BITTENCOURT, L **Ventilation as a cooling resource for warm-humid climates: Na investigation inside low-rise buildings**. PhD, in Environment and Energy Studies Programme, Architectural Association Graduate School: London, 1993.

_____. **Uso das cartas solares: diretrizes para arquitetos**. 4^a ed. rev. e ampl. Ed. Edufal. Maceió/AL. 2004

BOCCHI Jr., C. F. **Lajes Nervuradas de Concreto Armado: Projeto e Execução**. 1995. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Paulo. 1995.

BOCCHI Jr, C. F.; GIONGO, J. S. **Concreto Armado: Projeto e construção de lajes nervuradas**. (Material de aula da disciplina Estruturas de Concreto do Curso de Engenharia Civil) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

BODART, M.; PEÑARANDA, A.; DENEYER, A.; FLAMANT, G. Photometry and colorimetry characterisation of materials in daylighting evaluation tools. *Building and Environment*. V.43, p. 2046-2058, Dec. 2008.

BOGO, A. J.; PEREIRA, F. O. P.; CLARO, A. **Controle solar e admissão de luz natural em aberturas com proteção solar**. In: X Encontro Nacional e VI Latino- Americano de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC/ELACAC. Natal/RN. 2009.

BORGES, J. U. A. **Critérios de projeto de lajes nervuradas com vigotas pré-fabricadas**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP. 1997.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Dep. Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas 1961-1960**. Brasília, DNMET, 1992.

BRUMATTI, D. O. **Uso de pré-moldados – Estudo e viabilidade**. Monografia (Especialização na Construção civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

CABÚS, R. C. **Análise do Desempenho Luminoso de Sistemas de Iluminação Zenital em Função da Distribuição de Iluminâncias.** 1997. 195 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis. 1997.

_____. **Tropical daylighting: predicting sky types and interior illuminance in north-east Brazil.** 156 f. Tese. PhD, in Architecture, University of Sheffield, 2002.

_____. **TropLux** – Guia do Usuário. Edições Grilu, Maceió/AL, 2006.

_____. **TropLux** versão 6. Cabús, Ricardo. Alagoas, 2012 a.

_____. **TropLux** – Guia do Usuário. Edições Grilu, Maceió/AL, 2012 b.

_____. **TropLux: um sotaque tropical na simulação da luz natural em edificações.** In: IV Encontro Latino-Americano e VIII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC/ELACAC. Maceió/AL. 2005.

CÂNDIDO, M. C. **Ventilação natural e Código de obras: uma análise das tipologias de aberturas nos edifícios de escritórios em Maceió.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas. 2006.

CARDOSO, S. de O. **Avaliação das condições da iluminação natural em salas típicas de edifícios de escritórios em Maceió-AL.** 192 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas. 2006.

CAVALCANTI, C. **Sustentabilidade: mantra ou escolha moral? Uma abordagem ecológico-econômica.** In Estudos Avançados, vol.26 n° 74, USP. São Paulo. 2012. Disponível no site do Sielo em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142012000100004&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt> Acesso em junho de 2012.

CHICHERCHIO, L.C. **Manual Técnico de Iluminação Natural.** Colorplast. São Paulo, 1978.

CORBELLA, O; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos – conforto ambiental.** Editora Revan. Rio de Janeiro, 2003.

CORREA, S. R. M. **Estudo do desempenho lumínico de salas de aula com iluminação zenital.** IV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC. Salvador/BA. 1997.

DIDONÉ, E. L.; PEREIRA, F. O. R. **O potencial da luz natural na economia de energia elétrica para iluminação artificial.** In VII Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura – ENTECA. Universidade Estadual de Maringá, Paraná. 2009.

_____. **Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v.10, n.4, p. 139-154, out./dez. 2010.

DORNELLES, K. A. **Absortância Solar de Superfícies Opacas: Conceitos, Métodos de Determinação e Base de Dados para Tintas Imobiliárias.** 143 f. Tese (Doutorado em

Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2008.

ELEY ASSOCIATES. **Advanced lighting Guidelines**. U. S. Department of Energy, Energy Commission – Electric Power Research Institute. California, 1993.

FAU/USP. **O projeto de iluminação no exercício da arquitetura**. Material de aula da disciplina Tecnologia da Arquitetura. Disponível em: <http://www.usp.br/fau/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0213/Arquivos_Anteriores/7_Cecace_2006_Iluminacao_Zenital_Estrategia_de_Projeto.pdf> Acesso em junho 2011.

FIGUEIRÓ, M. **A luz e a sua relação com a saúde**. LUME, São Paulo, Ano VIII, nº 44, junho de 2010.

FLÓRIO, M. C. **Projeto e execução de lajes unidirecionais com vigotas em concreto armado**. 240 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo. 2004.

FROTA, A. B. **Geometria da Insolação**. Ed. Geros. São Paulo, 2004.

GAGNE, J. M. L.; ANDERSEN, M.; NORFORD, L. K. **An interactive expert system for daylighting design exploration**. Building and Environment, v. 46, p. 2351-2364, nov. 2011.

GARROCHO, J. S. **Luz Natural e Projeto de Arquitetura: Estratégias para Iluminação Zenital em Centros de Compras**. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, UnB, Brasília. 2005.

_____. **Luz natural e luz artificial na reabilitação do ambiente**. In: ROMERO, M. A. B. Reabilitação Ambiental Sustentável Arquitetônica e Urbanística. Ed. Unb, Brasília. 2009.

GASPAR, R. **Análise da segurança estrutural das lajes pré-fabricadas na fase de construção**. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de estruturas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1997.

GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Proposta de normalização para limitar o consumo de energia elétrica em sistemas de iluminação**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC. Florianópolis/SC. 1998.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia e meio ambiente no Brasil**. In: Estudos Avançados, vol. 21 nº 59, USP. São Paulo, 2007. Disponível no site do Sielo em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142007000100003>>. Acesso em junho de 2012.

GOULART, S. e PITTA, T. **Advanced topics in Bioclimatology to building design, regarding environmental comfort**. PPGEC-UFSC. Florianópolis. 1994

HOPKINSON, R. G., PETHERBRIDGE, P., LONGMORE, J. **Iluminação Natural**. Trad. Antônio S. L. de Farias. 2 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1975.

- JANJAIA, S.; MASIRIA, I.; NUNEZ, M.; LAKSANABOONSONG, J. **Modeling sky luminance using satellite data to classify sky conditions**. Building and Environment, v. 43, p. 2059-2073, Dez. 2008.
- KOENIGSBERGER, O. et al. **Vivendas y edificios en zonas cálidas y tropicales**. Madrid, Ed. Paraninfo, 1977.
- LABCON – Laboratório de Conforto Ambiental. **Apresentação sobre iluminação – Slides**. Disponível em: <<http://www.labcon.ufsc.br/links.php>> Acesso em junho 2012.
- LOMBARD, L. P.; ORTIZ, J.; POUT, C. **A review on buildings energy consumption information**. Energy and Buildings, v. 40, p. 394-398, Jan. 2008.
- LAM, W. M. C.; **Sunlighting – As formgiver for architecture**. New York. Van Nostrand Reinhold Company, 1986.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo, PW Ed., 1997.
- MACÊDO, C. C.. **Análise do desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol**. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2002.
- MACIEL, A.A. **Integração de conceitos bioclimáticos ao projeto arquitetônico**. 197f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006.
- MAJOROS, A. **Daylighting**. PLEA Notes, Note 4. PLEA in Association with Department of Architecture, the University of Queensland. Edited by S. V. Szokolay, 1998.
- MARTAU, B. T. **A luz além da visão**. Lume, Ano VII, nº 38. p. 62-68. SP. Junho, 2009.
- MATOS, M.; MARINOSKI, D. L.; ORDENES, M.; PEREIRA, F. O. R.. **Análise de diferentes métodos de avaliação do aproveitamento da luz natural**. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC. Ouro Preto, MG. 2007.
- MME - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Eficiência Energética – Premissas e diretrizes básicas**. Versão 2011. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html> Acesso em junho de 2012.
- MARQUES, M. C. S. et al. **Eficiência Energética – Teoria e Prática**. Itajubá, FUPAI, 2007. Disponível em: <www.procelinfo.com.br> Acesso em novembro de 2010.
- MARTINS, D. D. N.; OLIVEIRA, R. **A qualidade geométrica da solução do arranjo físico de uma habitação e sua relação com o consumo energético da edificação**. In: V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC. Fortaleza/CE. 1999.
- MASCARÓ, L. R. de. **Luz, Clima e Arquitetura**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1978.

_____. **Evolução tecnológica e produção arquitetônica.** Tese (Doutorado) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1990.

MOORE, F. **Concepts and practice of architectural daylighting.** Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. **Useful daylight Illuminances: a new paradigm for assessing daylight in building.** Lighting Research and Technology, v.37, p.41-59, 2005.

_____. **Useful daylight Illuminances: A replacement for daylight factors.** Science Direct. Energy and Buildings v.38, p.905-913, 2006.

PEDRINI, A.; SZOKOLAY, S. **Recomendações para o desenvolvimento de uma ferramenta de suporte às primeiras decisões projetuais visando ao desempenho energético de edificações de escritório em clima quente.** Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 39-54. Jan./mar. 2005.

PEREIRA, F. O. R. **Iluminação natural no ambiente construído.** Apostila do curso ministrado durante o III Encontro Nacional e I Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC/ELACAC. Gramado/RS. 1995. Disponível em: <<http://www.labcon.ufsc.br/anexosg/288.pdf>> Acesso em julho de 2011.

PEREIRA, F. O. R.; LEDER, S. M. **Análise de proposta inovativa para uso da iluminação natural: estudo de caso.** In: VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, - ENTAC. Florianópolis/SC. 1998.

PREFEITURA DE MACEIÓ-AL. **Código de urbanismo e edificações do município de Maceió,** Lei nº 5.593, de 08 de fevereiro de 2007. Publicado no Diário Oficial do Município em 09 de fevereiro de 2007. Disponível em: <<http://www.sempla.maceio.al.gov.br/planodiretor.htm>> Acesso em julho de 2011.

_____. **Código de urbanismo e edificações do município de Maceió,** Lei nº 3.537 de 23 de dezembro de 1985.

PROCEL. **Programa nacional de conservação de energia elétrica: áreas de atuação – edificações.** Disponível em: <<http://www.eletrabras.com/elb/procel/main.asp>>. Acesso em novembro de 2010.

REINHART, C.F. **Tutorial on the use of Daysim Simulations for Sustainable Design.** Harvard Design School. Cambridge, USA. 2010. Disponível em: <<http://daysim.com/pub/Daysim3.0.Tutorial.pdf>> Acesso em fevereiro de 2011.

REINHART, C.F; FITZ, A. **From a survey on the current use of daylight simulations in building design.** Energy & Building, v.38 (7), p. 824-835, 2006.

REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. **Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design.** NRCC-48669. 2006.

RIVERO, R.. **Arquitetura e clima: condicionamento térmico natural.** 2ª ed. ver. e ampl. D. C. Luzzato Editores. Porto Alegre, 1986.

ROBBINS, C. L.. **Daylighting: Design and Analysis**. Van Nostrand Reinhold Company. Nova York, 1986.

RONCÁLIO, L. M.; PEREIRA, F. O. R.. **Avaliação de sistemas de aberturas zenitais para o aproveitamento da luz solar direta**. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC. Gramado, RS. 1995.

SABBATINI, F. H. **Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos: formulação e aplicação de uma metodologia**. Tese (Doutorado) - Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1989.

SCARAZZATO, P. **Dia típico de projeto aplicado à iluminação natural: dados referenciais para localidades brasileiras**. Tese de doutorado, USP, São Paulo. 1995.

_____. **Aula rápida – Software DLN**. In: Lume Arquitetura, Edição 10, out/Nov 2004. Disponível em: <http://www.lumearquitetura.com.br/pdf/ed10/ed_10_Aula.pdf> Acesso em agosto de 2011.

SERRA, S.M.B.; FERREIRA, M. de A.; PIGOZZO, B. N. **Evolução dos pré-fabricados de concreto**. In: 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado. São Carlos, São Paulo. 2005.

SOUZA, R. V. G. **Iluminação natural em edificações: cálculo de iluminâncias internas – desenvolvimento de ferramenta simplificada**. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1997.

SOUZA, R. V. G.; PEREIRA, F. O. R. (2004) **Primeira estação de medição de iluminação natural em território Brasileiro: análise dos dados dos dois primeiros anos de funcionamento**. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 79-94.

SZOKOLAY, S. **Putting the science back in the building**. Solar Progress, v.23, n.1, March, p.2. 2002.

TREGENZA, P.; LOE, D. **The design of lighting**. Spon Press, London, 1998.

GLOSSÁRIO

Adensamento: Ação de agitar o concreto com varas de ferro ou com vibrador, fazendo-o ocupar todo o espaço das formas e envolver bem os ferros. (dicionário Aurélio)

Armadura ativa (de protensão): Constituída por barra, fios isolados ou cordoalhas, destinada à produção de forças de protensão, isto é, na qual se aplica um pré-alongamento inicial (NBR 6118).

Átrio: Ambiente central de um edifício, com sistema de fechamento no topo com material translúcido ou transparente.

Campo de trabalho: Região onde se exigem condições de iluminância apropriadas ao trabalho visual a ser realizado, tendo como referência, normalmente, um plano horizontal a 0,75m do piso (NBR 5413:1992).

Cimbramento: Escoramento com altura necessária para possibilitar a contra-flecha da laje.

Cisalhamento: Tensão devida ao esforço cortante.

Cura: Conjunto de procedimentos para impedir que as peças sofram tensões durante o período em que ainda não atingiram resistência suficiente para receber qualquer esforço, seja por movimentação, carga de qualquer espécie, perda de água por evaporação ou mudanças de temperatura.

Curvas de isoiluminância: Linha desenhada sobre a planta de um ambiente para exibir os pontos da superfície onde as iluminâncias são iguais.

Disponibilidade de luz natural: Quantidade de luz do sol e do céu presente em uma dada localidade, hora, data e condição de céu específico.

Elementos de concreto armado: São aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre o concreto e a armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da concretização dessa aderência (NBR 6118).

Escoramento: Estrutura provisória destinada a auxiliar as vigotas pré-fabricadas a suportar a carga de trabalho durante a montagem da laje e durante o período de cura do concreto complementar lançado na obra (NBR 14859-1), pode ser de madeira ou metálico.

Heliodon: Equipamento utilizado para simular o movimento aparente do sol, em qualquer local da Terra.

Iluminância (E): Densidade do fluxo luminoso incidente em uma superfície.

Intereixo (i): Distância entre os eixos das vigotas pré-fabricadas na montagem, entre as quais serão colocados os elementos de enchimento (NBR 14859-1).

Lux (lx): Unidade de Iluminância do Sistema Internacional. Equivale a um lúmen por metro quadrado.

Pé-direito: Distância vertical do piso ao teto do ambiente.

Pré-moldado: Processo construtivo em que a obra, ou parte dela, é moldada fora do local de utilização definitivo.

Pré-fabricado: Método industrial de construção em que os elementos fabricados por métodos de produção em massa, são montados na obra, mediante equipamentos e dispositivos de elevação.

Proteção solar: Elemento opaco de controle de superfície que protege a abertura contra os raios diretos do sol, podendo refletir luz para o interior.

Refletividade: Proporção do fluxo luminoso incidente sobre uma superfície que é refletida.

APÊNDICES

APÊNDICE A – INTRODUÇÃO DE NOVOS PROCEDIMENTOS NA EXECUÇÃO DAS LAJES COM AS ABERTURAS ZENITAIS

Este texto fornece indicações a serem seguidas na execução das lajes nervuradas com as aberturas zenitais propostas, uma vez que serão necessários alguns cuidados e procedimentos extras, além das várias etapas comuns na execução de uma laje nervurada pré-moldada, descritas na seção 2.2.3. As etapas normais serão apenas citadas, e serão comentadas apenas as que foram adaptadas aos novos procedimentos.

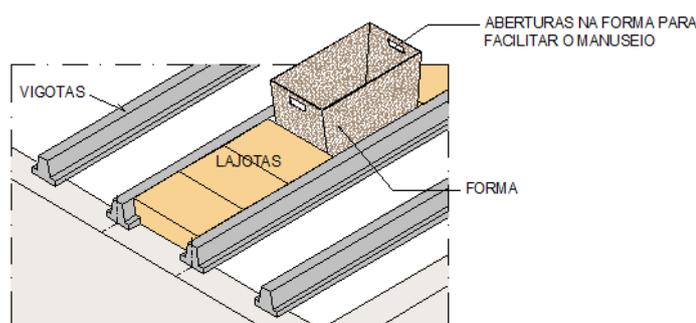
1. Nivelamento dos apoios; execução da cinta de amarração, ou viga, sobre a qual se apoiarão ou se semi-engastarão as vigotas da laje;
2. Escoramento (com cimbramento);
3. Colocação das vigotas e lajotas;

Cuidado especial deve-se ter no início da montagem da laje para que ao final, as aberturas zenitais propostas fiquem na posição correta de acordo com o projeto arquitetônico e ela apresente a inclinação necessária ao escoamento das águas pluviais. As cotas da localização da primeira vigota e da primeira lajota a ser colocada em cada laje devem estar indicadas no projeto de execução e no manual de colocação e montagem. As vigotas seguintes devem ser colocadas empregando-se uma lajota em cada extremidade para servirem de gabarito de montagem, como usualmente é feito.

4. Colocação das formas isolando os vãos das aberturas;

Durante a montagem deverá ser colocado uma forma na posição de cada abertura zenital para garantir que o espaço fique desobstruído durante a concretagem do capeamento da laje. A Figura 55 a seguir mostra uma sugestão de formato para essas formas, que devem ser em quantidade mínima equivalente ao número de aberturas para cada laje a ser concretada. O material sugerido é o metal, no intuito de serem reutilizadas em outras obras.

Figura 55 - Posição das formas nas aberturas na laje



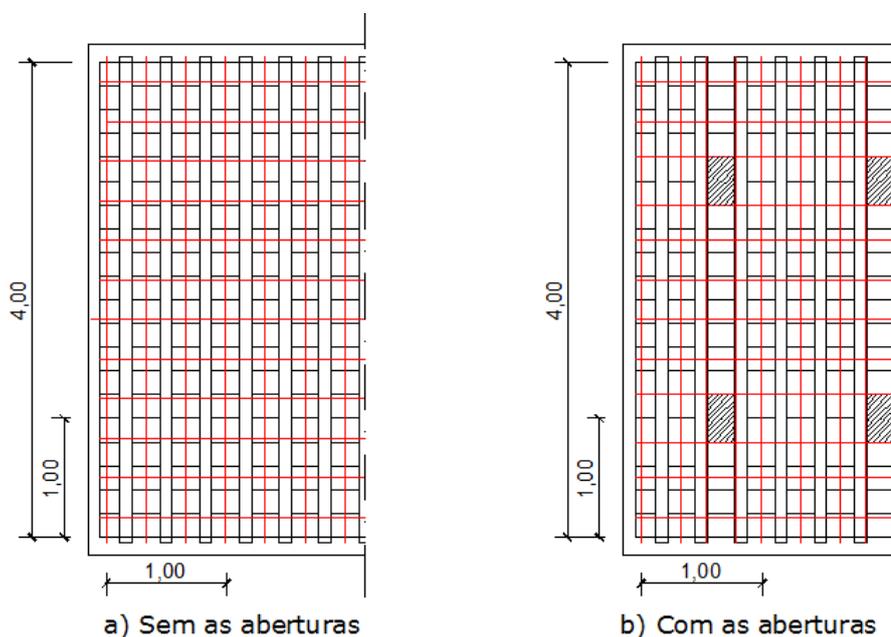
Fonte: Autora, 2011.

Para facilitar a desmoldagem deverá ser aplicado previamente um desmoldante em suas faces externas, como normalmente é feito com outros tipos de formas reutilizáveis. Devem ser confeccionadas com uma pequena angulação (em torno de 2%) para evitar que elas escorreguem pelo espaço, para facilitar tanto a retirada das mesmas como também seu armazenamento (possibilitando serem encaixadas e empilhadas). Devem ter uma altura superior às espessuras usuais das lajes para poderem ser reutilizadas em lajes com outras alturas, assim como para evitar que no momento do lançamento do concreto do capeamento elas sejam cobertas.

5. Colocação das armaduras complementares previstas no projeto;

Nesta etapa se posicionam a ferragem de distribuição, a NBR 14859-1:2002, indica a colocação de 3 barras de $6,3/m^2$ (ver Tabela 2), que normalmente ficam uniformemente distribuídas com um espaçamento de 0,33m. No entanto, devido à localização e dimensões das aberturas, esses valores tiveram que ser ajustado conforme Figura 56, mas ainda dentro do prescrito pela norma de 3 barras/ m^2 , note-se que a ferragem deve beirar as aberturas.

Figura 56 - Distribuição da ferragem de distribuição



Fonte: Autora, 2011.

Existem outras armaduras complementares para atender as particularidades de cada projeto, mas que não serão necessárias no nosso estudo, pois estamos considerando uma laje de cobertura, que não terá sobrecargas na sua estrutura. Se for necessário um cálculo específico deve-se consultar um engenheiro ou calculista.

6. Instalação de passadiços (tábuas) para o trânsito de pessoal e transporte de concreto;
7. Instalações;

Além das instalações elétricas, devem-se incluir as de coleta das águas pluviais.

8. Lançamento, adensamento e cura do concreto complementar;
10. Execução da borda de acabamento nas aberturas;

Após o concreto atingir a resistência necessária, e de preferência antes da retirada das formas das aberturas, deve-se executar (com argamassa) as bordas de acabamento das mesmas e com os quatro furos para o encaixe dos ferros de suporte da placa de proteção solar.

Uma vez que o tamanho das aberturas é o mesmo, as bordas de acabamento poderiam ser também pré-moldadas, no caso de um número maior de utilização da proposta.

11. Execução da impermeabilização da laje conforme procedimentos normais na construção civil;
12. Retirada das formas e limpeza das mesmas para usos posteriores;
13. Colocação das placas de proteção solar;

As placas poderão ser de concreto armado ou de outro material opaco e devem ser previamente executadas com as dimensões de acordo com o projeto (resultado do estudo das cartas solares). Se forem de concreto, sugere-se que os quatro pontaletes de ferro estejam chumbados nas placas, para serem apenas encaixados nas bordas das aberturas conforme descrito no item 10.

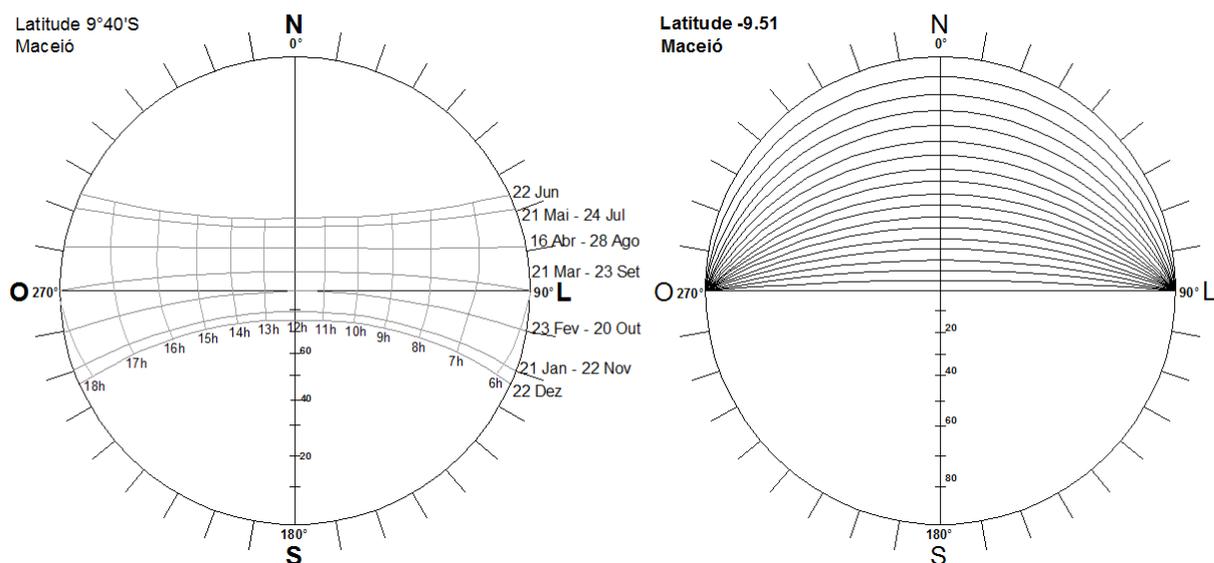
14. Retirada do escoramento

Pode ser feita antes destas últimas etapas a depender da indicação do engenheiro responsável.

APÊNDICE B – CARTA SOLAR X DIMENSIONAMENTO DOS PROTETORES SOLARES

A definição das dimensões das proteções solares das aberturas foi feita por meio de um estudo com o uso da Carta Solar de Maceió e do transferidor de ângulos (Figura 57).

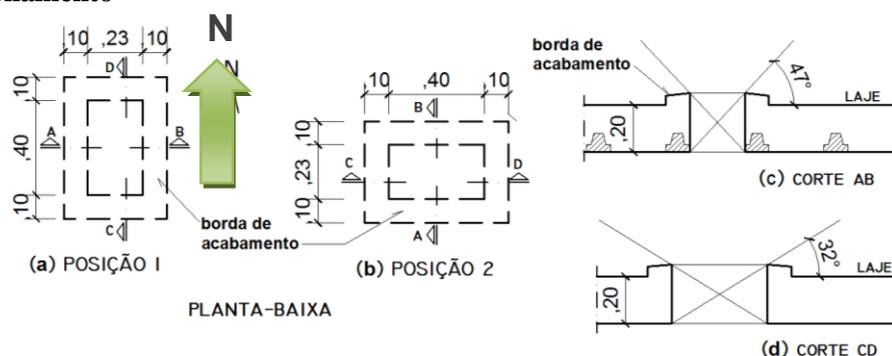
Figura 57 - Carta Solar de Maceió e transferidor de ângulos



Inicialmente, com as dimensões das aberturas e um desenho em corte obteve-se os ângulos limites da possível incidência solar pelas mesmas, sem considerar nenhuma proteção (ver Figura 58). Em seguida, com o auxílio do transferidor de ângulos verificaram-se na Carta Solar de Maceió as projeções do percurso do sol durante o ano, nos diversos horários para duas opções de posicionamento das aberturas: com o Norte paralelo ao maior sentido das aberturas (mesmo sentido das vigotas – Modelo Básico), que é chamada de Posição 1 e com o Norte paralelo ao menor sentido das aberturas (consequentemente, perpendicular às vigotas), consequentemente, Posição 2 (ver Figura 60 e Figura 62).

O posicionamento das vigotas não influencia o cálculo do dimensionamento dos protetores, o que vai influenciar é a orientação das aberturas. As duas situações propostas ilustradas na Figura 58 são chamadas de posição 1 (para o Norte paralelo a maior dimensão da abertura) e Posição 2 (para o Norte paralelo a menor dimensão da abertura). É proposto também um protetor que atenda de uma forma geral a qualquer orientação.

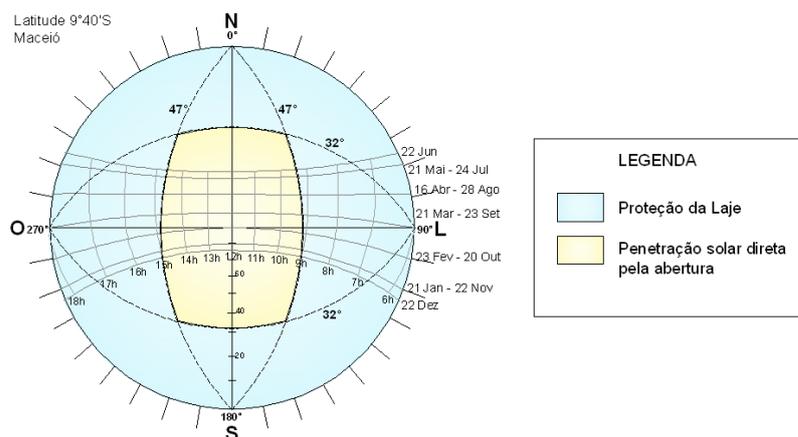
Figura 58 - Abertura padrão (sem protetor solar) nas duas opções de posicionamento



Fonte: Autora, 2011.

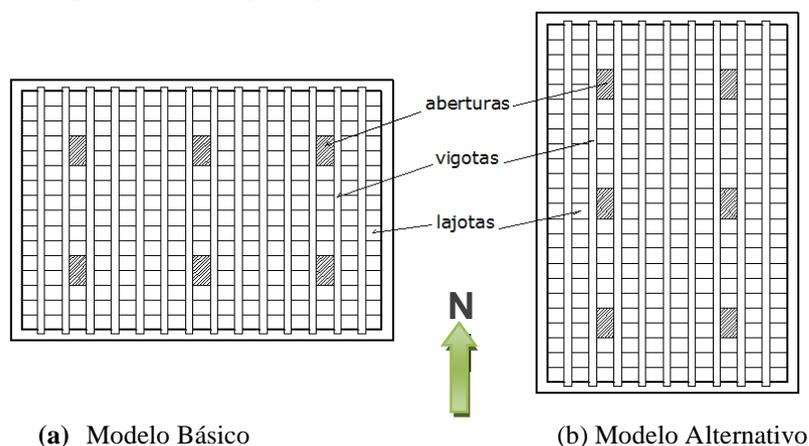
A Figura 59 mostra a máscara de sombra proporcionada pela laje na Posição 1, como também, os horários em que o sol penetra pela abertura e a Figura 61 mostra a máscara para a posição 2. A Figura 60 e a Figura 62 ilustram o posicionamento das aberturas nos dois modelos para as duas orientações.

Figura 59 - Máscara de sombra da abertura sem protetor – Posição 1



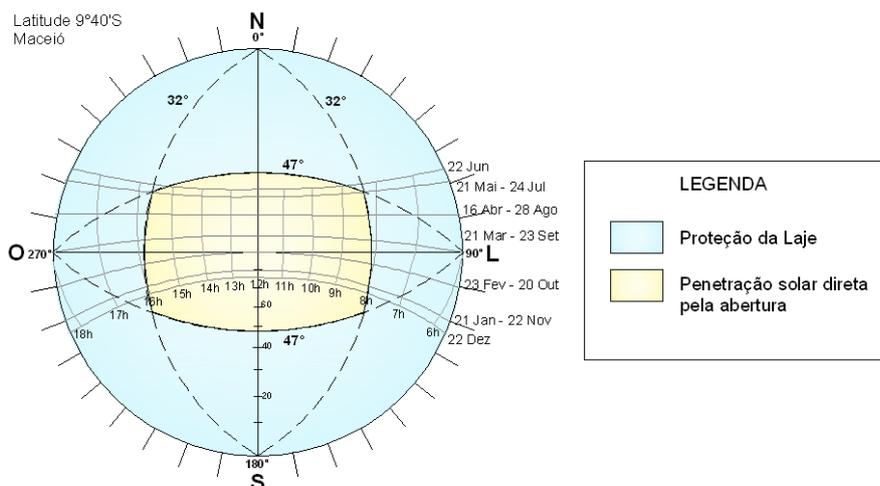
Fonte: Autora, 2011.

Figura 60 - Posição 1 para as aberturas nos dois modelos



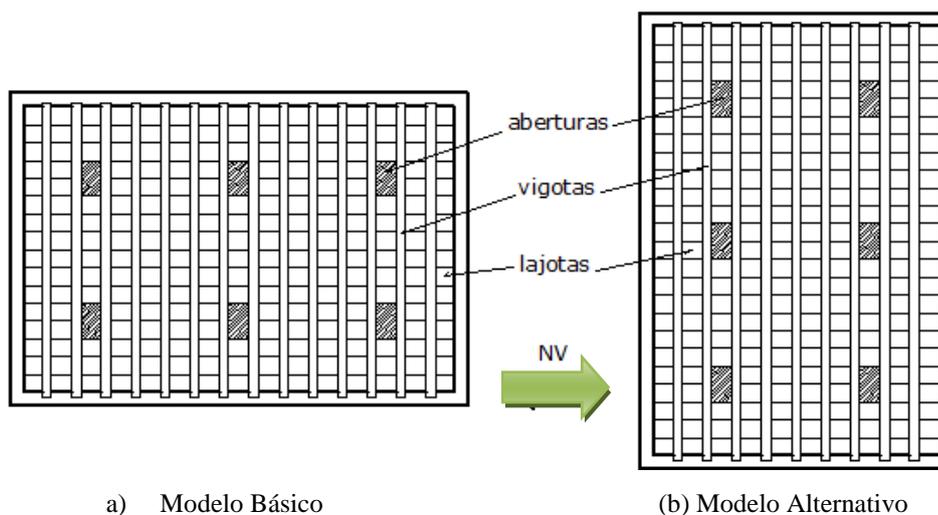
Fonte: Autora, 2011.

Figura 61 - Máscara de sombra da abertura sem protetor – Posição 2



Fonte: Autora, 2011.

Figura 62 - Posição 2 para as aberturas nos dois modelos



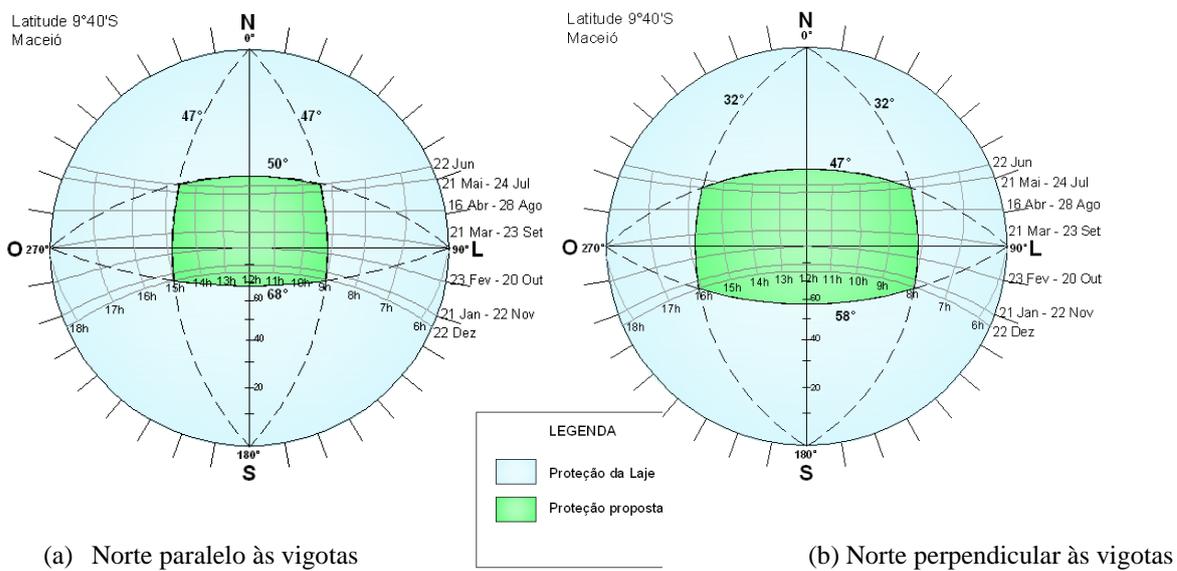
a) Modelo Básico

(b) Modelo Alternativo

Fonte: Autora, 2011.

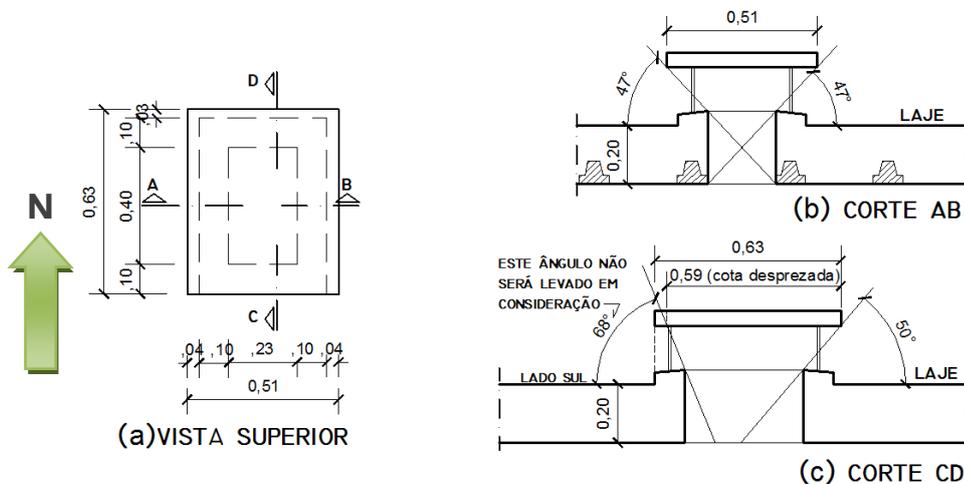
A partir daí, ajustou-se na carta solar a angulação necessária de forma que, com a introdução do protetor não houvesse incidência solar no ambiente, em momento algum nas duas orientações propostas (ver Figura 63). Com esses ângulos podem-se determinar as dimensões dos protetores solares e o posicionamento deles nas aberturas (ver Figura 64 e Figura 65). Vale salientar que na posição sul, os protetores poderiam ficar menores, no entanto, prevendo uma facilidade no momento da execução resolveu-se determinar que na face sul eles ficassem, alinhados com a borda de acabamento e centralizados no sentido leste-oeste (ver Figura 64 c e Figura 65 b).

Figura 63 - Angulação necessária para proteção solar total das aberturas



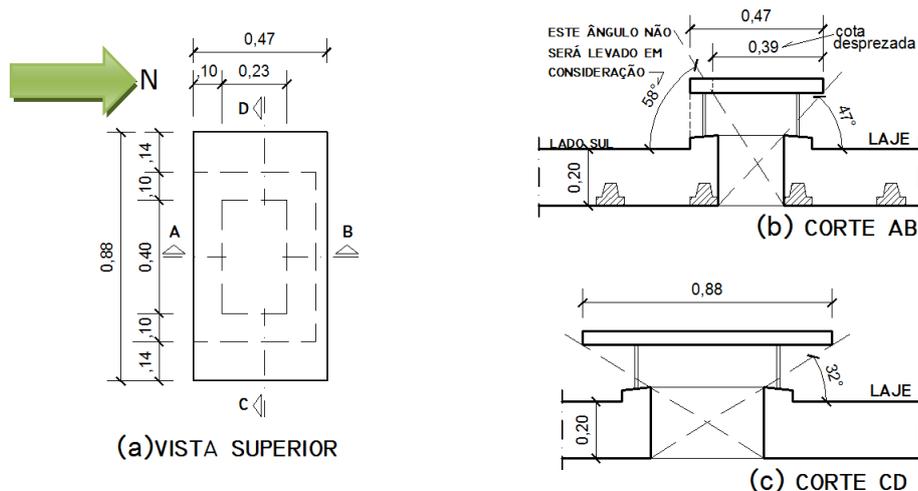
Fonte: Autora, 2011.

Figura 64 - Abertura com a protetor solar (total) para Posição 1



Fonte: Autora, 2011.

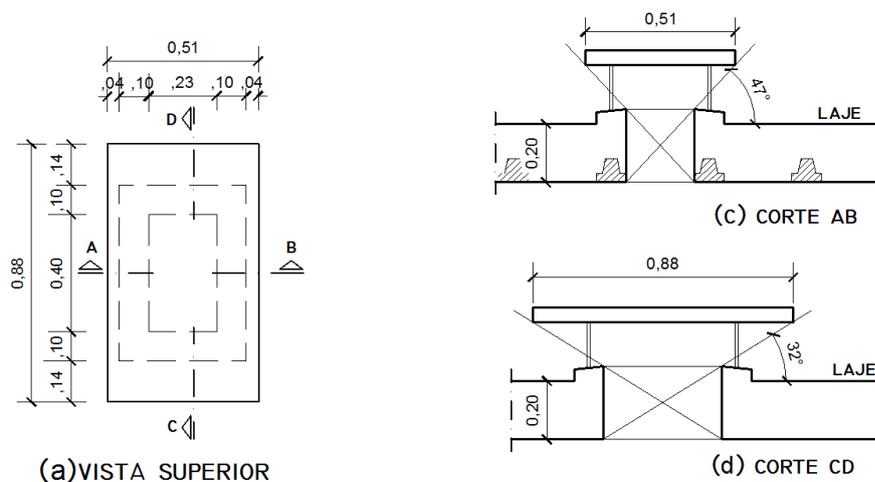
Figura 65 - Abertura com o protetor solar (total) para Posição 2



Fonte: Autora, 2011.

Para uma condição de proteção solar para todas as horas e em todos os dias do ano, as dimensões das placas de proteção solar foram, portanto, 0,51 x 0,63 m para as aberturas na Posição 1 que é denominado de protetor 1 e 0,47 x 0,88 m para a Posição 2, conseqüentemente, protetor 2. Vale destacar que o protetor 1 representa a opção com a menor área por cada placa. Para qualquer outra orientação das aberturas deve-se fazer o mesmo procedimento. Para uma proteção que atenda a qualquer orientação, o tamanho da placa é de 0,51 x 0,88m (a maior opção), denominado de protetor Geral, e deverá ficar centralizado nos dois sentidos (ver Figura 66). No entanto, deve-se procurar executá-los no tamanho exato, evitando-se o sombreamento em excesso, para proporcionar melhores iluminâncias.

Figura 66 - Abertura com o Protetor Geral – Para qualquer orientação solar



Fonte: Autora, 2011.

APÊNDICE C – AJUSTE NAS DIMENSÕES DOS AMBIENTES

As dimensões do ambiente podem ser ajustadas a partir das dimensões dos elementos pré-moldados constituintes da laje escolhida para se evitar ou minimizar corte nas lajotas e consequente perda de material e de tempo na mão-de-obra. No caso das lajes com as aberturas propostas, para que estas fiquem uniformemente distribuídas, o dimensionamento do ambiente vai depender da quantidade e da distribuição planejada, uma vez que deve ser considerada a modulação de seus elementos (vigotas e lajotas).

Para uma distribuição uniforme das aberturas, a largura e o comprimento do ambiente devem ser determinados conforme detalhamento a seguir.

- a) A largura do ambiente (normalmente, dimensão no sentido das vigotas) vai variar a depender da quantidade de fileiras de aberturas propostas (que chamaremos de linhas), conforme expressão abaixo:

$$L = n (a + x \cdot 2 \cdot le)$$

Onde:

n = número de linhas de aberturas;

a = tamanho da abertura, no sentido da vigota;

x = quantas lajotas terão de cada lado da abertura por linha;

le = largura do material de enchimento, 2 le já considerando o mínimo de uma lajota de cada lado da abertura.

Colocando os valores para o tipo de laje que estamos estudando, teremos:

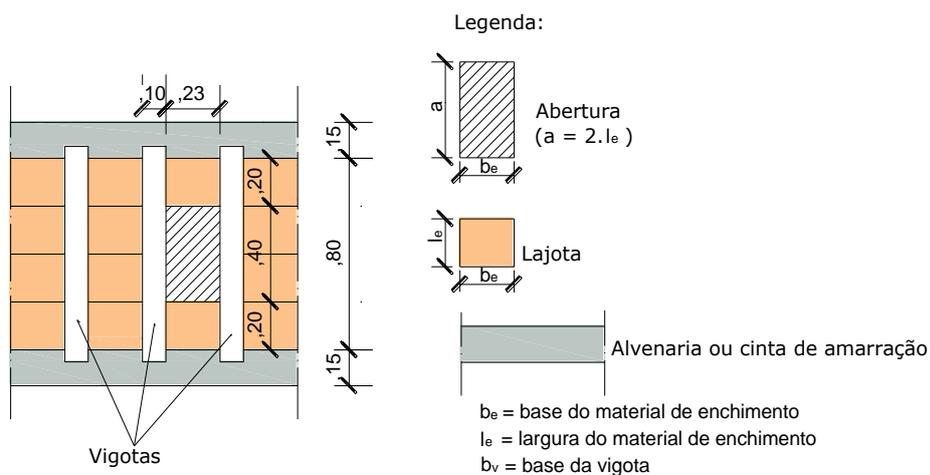
$$L = n (0,40 + 0,40x)$$

Onde $L \leq 5,0\text{m}$, que representa o comprimento máximo aconselhável para as lajes nervuradas pré-moldadas com vigotas convencionais de concreto armado - LC, objeto de nosso estudo.

- Para uma linha de aberturas (n=1):

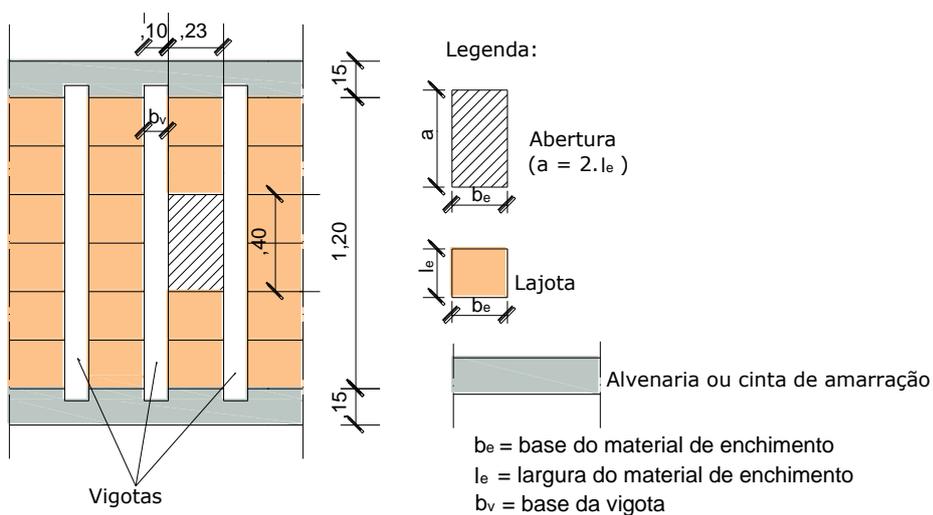
A largura deve ser múltiplo de $0,40 + 0,40x$, onde x é um número que pode variar de 0,5 a 0,5 entre 1,5 e 11,5 para não exceder o comprimento do tipo de vigota escolhida. A Figura 67 ilustra a situação de $x = 1$, resultando em uma largura de 0,80m, desprezível para um ambiente. A Figura 68 mostra a diagramação para $x = 2$, que representa a situação de duas lajotas de cada lado da abertura. As demais situações não foram ilustradas, uma vez que seguem o mesmo raciocínio.

Figura 67 - Vista em planta da diagramação para $x = 1$



Fonte: Autora, 2011.

Figura 68 - Vista em planta da diagramação para $x = 2$

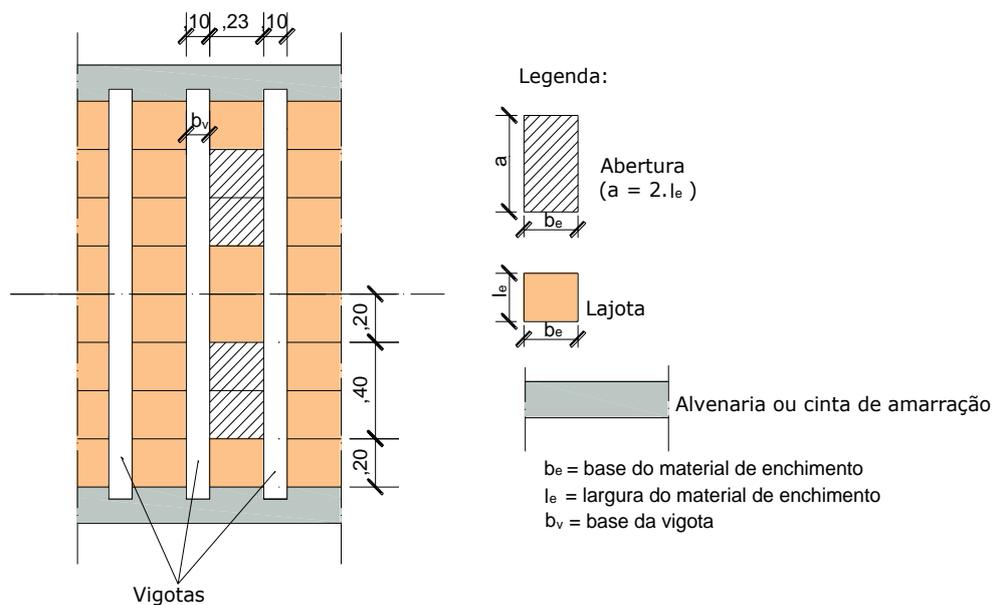


Fonte: Autora, 2011.

- Para duas linhas de aberturas ($n=2$), (ver Figura 69):

A largura do ambiente será igual a $0,80 + 0,80x$, onde x é um número que pode variar de 0,5 a 0,5 entre 1 e 5.

Figura 69 - Diagramação com duas linhas de aberturas, com $x = 1$



Fonte: Autora, 2011.

- Para três linhas de aberturas a largura do ambiente será $= 1,20 + 1,20x$, onde x é um número que pode variar de 0,5 a 0,5 entre 1 e 3.
- Para quatro linhas de aberturas a largura do ambiente será $= 1,60 + 1,60x$, onde x só poderá ser 1; 1,5 ou 2.
- Para cinco linhas de aberturas a largura do ambiente será $= 2,00 + 2,00x$, onde x só poderá ser igual a 1 ou 1,5.
- Para seis linhas de aberturas a largura do ambiente será $= 2,40 + 2,40x$, onde x só poderá ser igual a 1, conseqüentemente, a largura do ambiente será de 4,80m.
- A partir de sete linhas de aberturas, este tipo de laje não se adéqua, uma vez que ultrapassaria o tamanho máximo aconselhado para as vigotas. A largura do ambiente mínima daria de 5,60 m (considerando $x = 1$ numa relação para a largura de $2,80 + 2,80x$).

A Tabela 16 indica um resumo com as dimensões para a largura do ambiente com lajes as nervuradas pré-moldadas de Concreto Armado - LC, com as dimensões de seus elementos relacionadas às utilizadas no trabalho e indicadas anteriormente na Figura 37, de forma que as aberturas fiquem uniformemente distribuídas.

Tabela 16 - Largura do ambiente pela quantidade de linhas de aberturas para as Lajes Nervuradas de Concreto Armado - LC

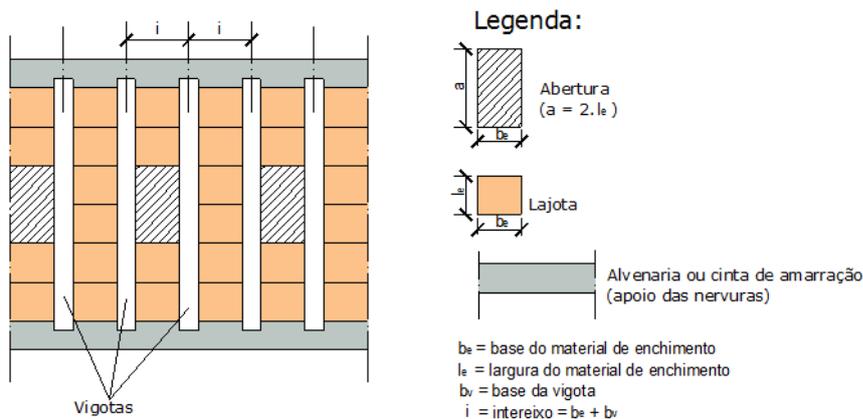
LARGURA DO AMBIENTE (m)						
QUANTIDADE DE LINHAS DE ABERTURAS (n)						
	1	2	3	4	5	6
x	múltiplo de 0,40+0,40x	múltiplo de 0,80 + 0,80x	múltiplo de 1,20 + 1,20x	múltiplo de 1,60 + 1,60x	múltiplo de 2,00 + 2,00x	múltiplo de 2,40 + 2,40x
1	/	1,60	2,40	3,20	4,00	4,80
1,5	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00
2	1,20	2,40	3,60	4,80	6,00	
2,5	1,40	2,80	4,20	5,60		
3	1,60	3,20	4,80			
3,5	1,80	3,60	5,40			
4	2,00	4,00				
4,5	2,20	4,40				
5	2,40	4,80				
5,5	2,60	5,20				
6	2,80					
6,5	3,00					
7	3,20					
7,5	3,40					
8	3,60					
8,5	3,80					
9	4,00					
9,5	4,20					
10	4,40					
10,5	4,60					
11	4,80					
11,5	5,00					

x = nº de lajotas de cada lado da abertura por linha

Em vermelho são as medidas que já ultrapassam o limite para o tipo de laje escolhida.

- b) O comprimento do ambiente deve ser múltiplo da medida do intereixo da laje (i) iniciando com o mínimo de dois intereixos, e será em função da quantidade de fileiras de aberturas neste sentido (que chamaremos de colunas) e da distância entre elas (ver Figura 70).

Figura 70 - Disposição das aberturas no sentido do comprimento do ambiente.



Fonte: Autora, 2011.

A Tabela 17 indica um resumo com as dimensões para o comprimento do ambiente com as lajes nervuradas pré-moldadas em estudo, de forma que as aberturas fiquem uniformemente distribuídas.

Tabela 17 - Comprimento do ambiente pela quantidade de colunas de aberturas

		COMPRIMENTO DO AMBIENTE (m)							
Nº de intereixos por abertura	múltiplo de	QUANTIDADE DE COLUNAS DE ABERTURAS							
		1	2	3	4	5	6	7	8
2	0,66	/	1,32	1,98	2,64	3,30	3,96	4,62	5,28
3	0,99	/	1,98	2,97	3,96	4,95	5,94	6,93	7,92
4	1,32	1,32	2,64	3,96	5,28	6,60	7,92	9,24	10,56
5	1,65	1,65	3,30	4,95	6,60	8,25	9,90	11,55	13,20
6	1,98	1,98	3,96	5,94	7,92	9,90	11,88	13,86	15,84
7	2,31	2,31	4,62	6,93	9,24	11,55	13,86	16,17	18,48

Fonte: Autora, 2011.

No caso de uma coluna de aberturas só foram considerados os valores maiores do que 1,20 m (referente à menor largura encontrada – ver Tabela 16) para justificar ser o comprimento do ambiente.

Não foi feito a continuação da tabela a partir de 8 vezes o intereixo por cada abertura, devido a área total de abertura ficar menor do que o intervalo inicialmente proposto para o estudo, de 3 a 4% da área do ambiente. Como exemplo, se fosse considerado o menor módulo

de uma abertura para essa condição de 8 intereixos, teríamos um ambiente com: 1,20 m (menor largura com 1 linha de abertura) x 2,64 m (menor comprimento com 1 coluna de 8 intereixos), que daria uma área de 3,17 m². E uma abertura nesse espaço seria equivalente a apenas 2,9% da área.

Por outro lado, a quantidade de colunas de aberturas pode ser livre, vai depender da dimensão do ambiente no projeto.

Abaixo será descrito um exemplo de ajuste nas dimensões para as aberturas ficarem uniformemente distribuídas em um ambiente de 4,00 m x 6,00 m = 24,00 m².

Inicialmente calcula-se a quantidade de aberturas necessárias:

$$\text{Considerando 4\% para área total de abertura} = 24,00 \times 4\% = 0,96\text{m}^2$$

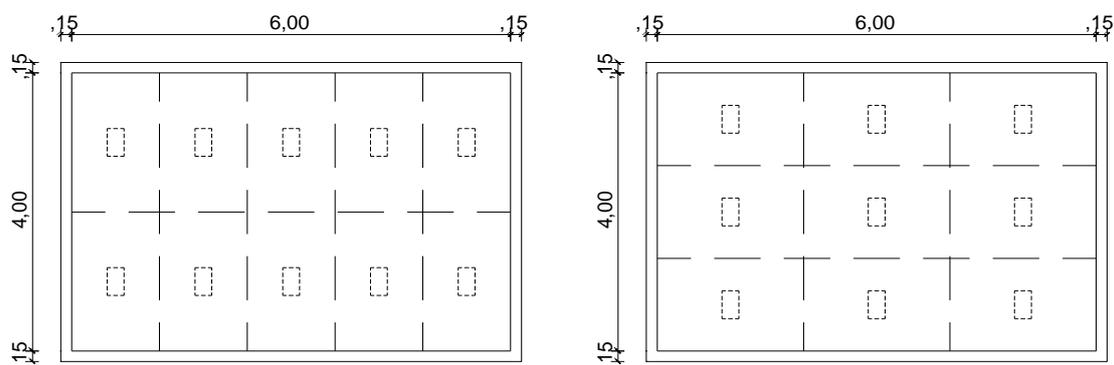
Lembrando que essa área total tem que ser múltiplo de 0,092m² (área de cada abertura zenital proposta).

$$0,96\text{m}^2 / 0,092\text{m}^2 = 10,43 \text{ aberturas (considera-se então, apenas o número inteiro)}$$

$$10 \text{ aberturas} \times 0,092\text{m}^2 = 0,92\text{m}^2 \text{ (que equivale a 3,8\% de abertura em relação à área inicial do piso do ambiente)}$$

Outra opção de distribuição seriam com 9 aberturas que daria uma área de 0,82m² (equivalente a 3,4%). Ficando a escolha, a critério do projetista, de acordo com a distribuição desejada para as mesmas. A Figura 71 mostra as duas opções em planta.

Figura 71 - Distribuição das aberturas em planta baixa



a) Opção com 10 aberturas

b) Opção com 9 aberturas

Fonte: Autora, 2011.

Ajustando as dimensões iniciais de 4,00 x 6,00 para as mais próximas de acordo com a

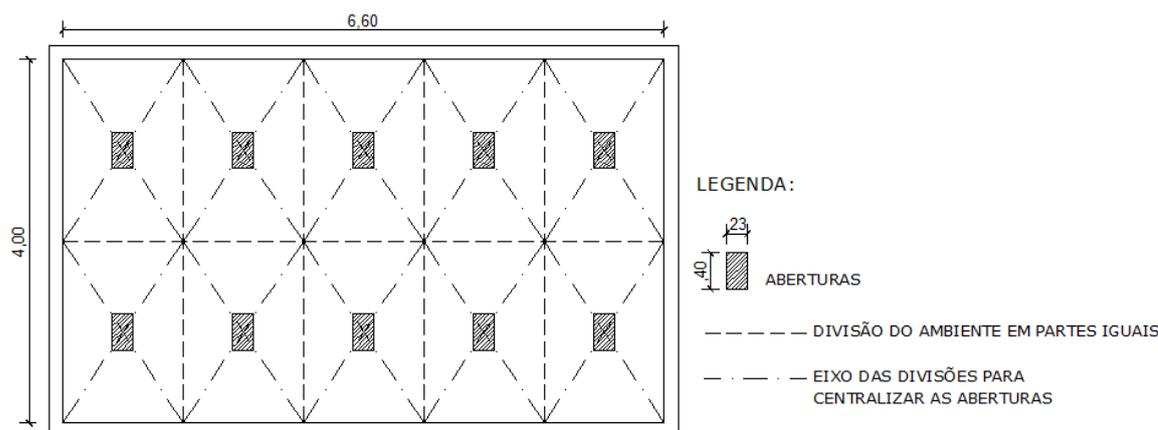
Tabela 16 e Tabela 17, tem-se o seguinte:

- Para 10 aberturas (distribuídas em 2 linhas e 5 colunas) – um ambiente de 4,00 m x 6,60 m (26,40 m² com a área total de abertura agora de 3,48%);

- Para 9 aberturas – ambiente de 3,60 m x 5,94 m (21,38 m² com 3,87% de abertura); ou 3,60 m x 6,83 m (24,58 m² com 3,36% de abertura). A opção de 4,80 m x 5,94 m (28,51 m²) daria apenas 2,90% de abertura, fora do intervalo inicialmente proposto.

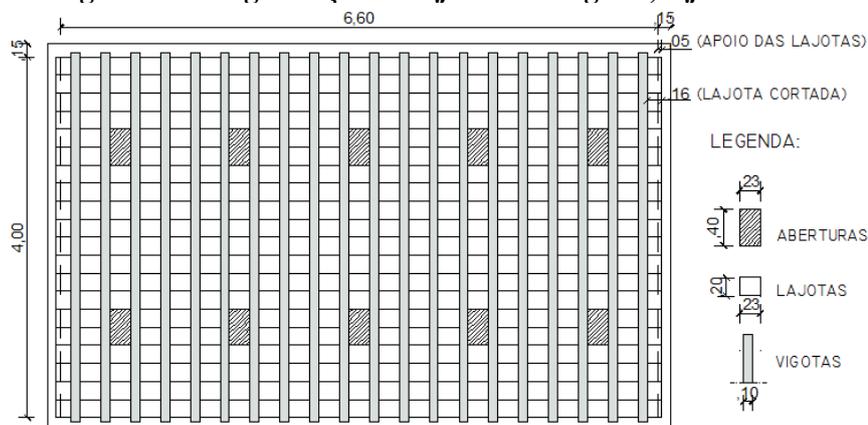
A Figura 72 e a Figura 73 mostram a distribuição das aberturas na laje e a diagramação de seus elementos constituintes para a opção com 10 aberturas zenitais. Outros parâmetros podem ser levados em consideração na escolha, no momento dos ajustes das dimensões do ambiente, que são os custos na construção de mais ou menos aberturas e o efeito estético das mesmas no ambiente interno que também pode ser feito com a posição das aberturas sem estarem uniformemente distribuídas no espaço.

Figura 72 - Distribuição das 10 aberturas no ambiente



Fonte: Autora, 2011.

Figura 73 - Diagramação da laje com as vigotas, lajotas e as 10 aberturas.



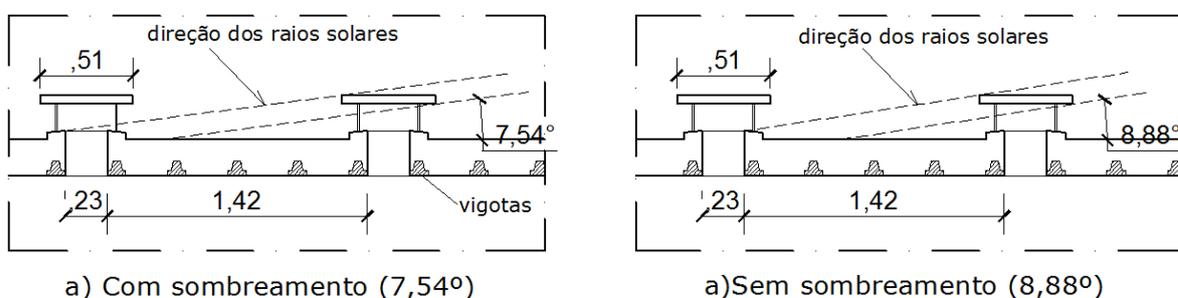
Fonte: Autora, 2011.

APÊNDICE D – ESTUDO DO SOMBREAMENTO NAS ABERTURAS

A verificação do possível sombreamento das aberturas, pelas placas de proteção das aberturas vizinhas nos horários em que o Sol está mais baixo foi feita para o Modelo Básico nas duas orientação solar propostas: Com o Norte Verdadeiro paralelo com as vigotas – (no maior sentido das aberturas) e perpendicular às vigotas – (no menor sentido das aberturas).

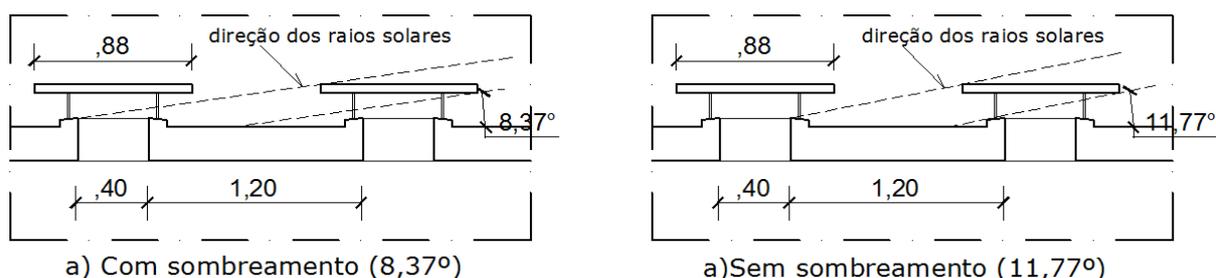
Inicialmente, através de um corte pelas aberturas nas duas posições no sentido Leste-oeste, verificaram-se os ângulos em que isto poderia ocorrer (ver Figura 74 e Figura 75) e em seguida com o auxílio da Carta solar, os horários e as épocas do ano respectivas.

**Figura 74 - Corte com os ângulos do início e fim do sombreamento
(vigotas no sentido Norte/Sul para o Modelo Básico)**



Fonte: Autora, 2011.

**Figura 75 - Corte com os ângulos do início e fim do sombreamento
(vigotas no sentido Leste/Oeste para o Modelo Básico)**



Fonte: Autora, 2011.

De acordo com a carta solar de Maceió (ver Figura 76) não haverá sombreamento nas aberturas para as distâncias consideradas no modelo. Na posição 2, no período entre maio e julho a altura solar às 7h e 17h poderia resultar em um sombreamento de no máximo 10 minutos, mas mesmo assim isto não acontece devido a trajetória solar, que nesta época do ano nestes horários desloca o sombreamento na projeção horizontal (de 21° a aproximadamente 27°). A Figura 77 mostra que mesmo com 21° o sombreamento já não acontece.

Figura 76 - Carta solar de Maceió com os ângulos encontrados.

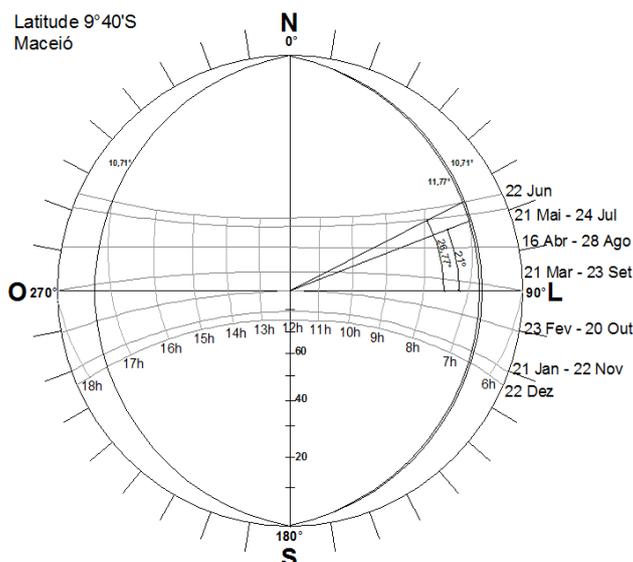
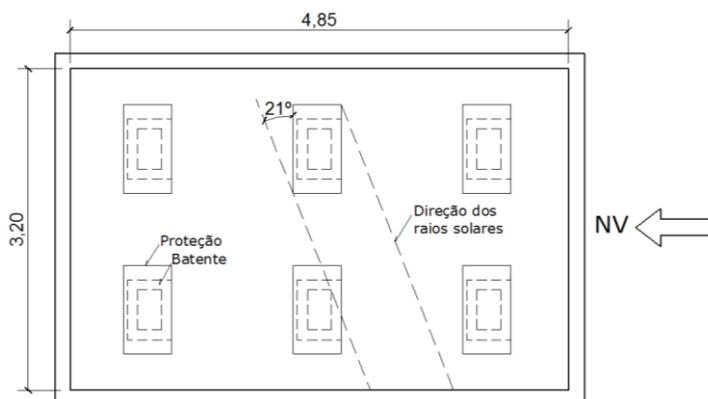


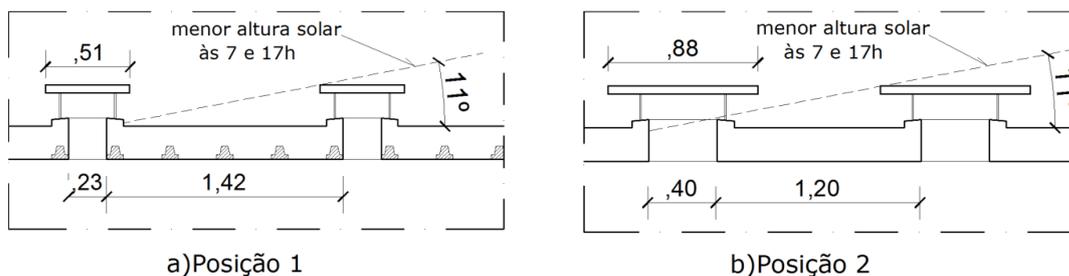
Figura 77 - Direção dos raios solares para Posição 2 – Vista Superior



Fonte: Autora, 2011.

De uma forma geral, para Posição 1 só haverá sombreamento se a distância entre os eixos da abertura for menor do que 5 inteiros. E para Posição 2 se a distância entre as aberturas for menor do que 6 lajotas (ver Figura 78).

Figura 78 – Corte – Menor altura solar para Maceió considerada às 7h e 17h



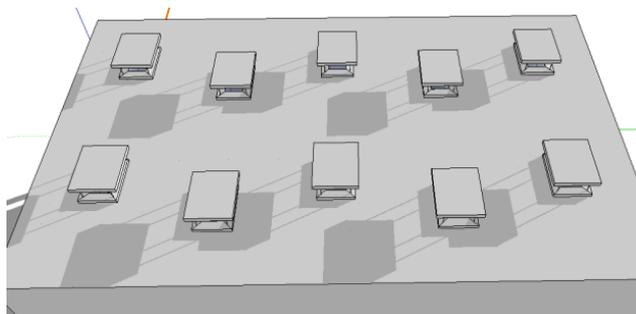
a) Posição 1

b) Posição 2

Fonte: Autora, 2011.

Em outros estudos, dependendo da distância entre as aberturas, se houver sombreamento sugere-se avaliar o desempenho luminoso de modelos com a disposição das aberturas desencontradas no intuito de minimizar esse sombreamento (ver Figura 79).

Figura 79 - Imagem ilustrativa das aberturas desencontradas – Vista superior da laje



Fonte: Autora, 2011.

ANEXOS

ANEXO A - ILUMINÂNCIAS POR CLASSE DE TAREFAS VISUAIS PARA INTERIORES

Tabela 18 - Iluminâncias por classe de tarefas visuais para interiores

Classe	Iluminância (lx)	Tipo de atividade
A - Iluminação geral para áreas usadas interruptamente ou com tarefas visuais simples	20 - 30 - 50	Áreas públicas com corredores escuros
	50 - 75 - 100	Orientação simples para permanência curta
	100 - 150 - 200	Recintos não usados para trabalho contínuo, depósitos.
	200 - 300 - 500	Tarefas com requisitos visuais limitados, trabalho bruto de maquinaria, auditórios.
B - Iluminação geral para área de trabalho	500 - 750 - 1000	Tarefas com requisitos visuais normais, trabalho médio de maquinaria, escritórios.
	1000 - 1500 - 2000	Tarefas com requisitos especiais, gravação manual, inspeção, indústria de roupas.
C - Iluminação adicional para tarefas visuais difíceis	2000 - 3000 - 5000	Tarefas visuais exatas e prolongadas, eletrônica de tamanho pequeno.
	5000 - 7500 - 10000	Tarefas visuais muito extensas, montagem de microeletrônica.
	10000 - 15000 - 20000	Tarefas visuais muito especiais, cirurgia.

Fonte: ABNT - NBR 5413, 1992.

Para seleção da iluminância adequada é recomendável analisar os fatores determinantes conforme a Tabela 19, para determinar o seu peso. A partir daí, somar os valores encontrados (algebricamente, considerando o sinal) e escolher o valor utilizando a seguinte regra:

- Usar a iluminância inferior do grupo, quando o valor total for igual a -2 ou -3; a iluminância superior, quando a soma for +2 ou +3; e a iluminância média, nos outros casos.

Tabela 19 – Fatores determinantes da Iluminância adequada (NBR 5413:1992):

Características da tarefa e do observador	Peso		
	-1	0	+1
Idade	Inferior a 40 anos	40 a 55 anos	Superior a 55 anos
Velocidade e precisão	Sem importância	Importante	Crítica
Refletância do fundo da tarefa	Superior a 70%	30 a 70%	Inferior a 30%

ANEXO B - DESCRIÇÃO DO TIPO DE CÉU ESTABELECIDO PELA CIE

Tabela 20 – Descrição do tipo de céu estabelecido pela CIE

Num	Descrição - Inglês	Classificação	Detalhamento - português
1	Overcast, steep gradation (approx CIE overcast)	Encoberto	Gradação alta (Aproxima-se do Céu Encoberto CIE Tradicional)
2	Overcast, steep gradation, brightening towards sun	Encoberto	Gradação alta, Brilho aumenta na direção ao Sol
3	Overcast, moderate gradation, uniform in azimuth	Encoberto	Gradação moderada, uniforme em azimute
4	Overcast, moderate gradation, brightening towards sun	Encoberto	Gradação moderada, Brilho aumenta na direção ao Sol
5	Uniform sky	Encoberto	Céu Uniforme
6	Partly cloudy, moderately graded, brightening towards sun	Parcialmente nublado	Gradação moderada, brilho aumenta na direção ao Sol
7	Partly cloudy, moderately graded, brighter circumsolar	Parcialmente nublado	Gradação moderada, região solar mais brilhante
8	Partly cloudy, rather uniform, clear solar corona	Parcialmente nublado	Relativamente uniforme, coroa solar limpa
9	Partly cloudy, shaded sun position	Parcialmente nublado	Sol sombreado
10	Partly cloudy, brighter circumsolar	Parcialmente nublado	Região solar mais brilhante
11	White-blue sky with clear solar corona	Claro	Céu branco-azulado com coroa solar limpa
12	CIE clear sky with low turbidity	Claro	Céu claro padrão CIE clássico com baixa turbidez
13	CIE clear sky with higher turbidity	Claro	Céu claro padrão CIE clássico, com alta turbidez
14	Cloudless turbid with broader solar corona	Claro	Céu com turbidez sem nuvens com coroa solar ampla
15	White-blue turbid sky with wide solar corona	Claro	Céu branco-azulado com turbidez e ampla coroa solar

Fonte: CABÚS, 2006.

ANEXO C - PLANILHAS DE DADOS DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Todos os valores foram referentes ao céu dinâmico, que no programa TropLux recebe a denominação de céu 16.

LEGENDA:

	Maior média da coluna
	Menor média da coluna
xxxxxx	Valores de pico

Tabela 21- Modelo Básico sem protetor solar – Norte na largura do ambiente – Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	429	1278	46	13,8	44,4	41,8	0,0
2	796	64985	54	11,1	40,9	47,3	0,7
3	1293	69648	54	11,5	40,7	46,5	1,3
4	495	1082	55	10,8	37,5	51,7	0,0
5	441	1178	46	14,0	42,5	43,5	0,0
6	442	1069	46	13,3	43,1	43,6	0,0
7	923	59370	53	11,1	39,2	48,7	1,0
8	1206	64122	60	7,8	37,3	53,7	1,2
9	500	56306	53	11,0	37,7	51,3	0,0
10	462	1167	49	12,2	42,5	45,3	0,0
11	408	1054	46	13,4	46,7	39,9	0,0
12	492	1096	54	11,1	40,5	48,4	0,0
13	1629	69951	54	11,4	42,6	44,2	1,8
14	612	66038	55	11,1	33,8	54,9	0,2
15	420	992	45	13,7	41,5	44,8	0,0
Média	703	30622	51	11,8	40,7	47,0	0,4
c.v.(%)	55,0	107,2	9,0	13,8	8,0	9,3	149,4
Componente direta do sol	235	29640	0				
Média s/ comp. direta do sol	468	982	51				

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 22 - Modelo Básico sem protetor solar – Norte no comprimento do amb. – Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E<2000	E>2000
1	441	1166	47	12,7	46,7	40,6	0,0
2	477	1065	53	11,1	36,9	52,0	0,0
3	474	1147	53	11,7	39,6	48,7	0,0
4	478	1047	54	11,1	40,3	48,6	0,0
5	435	1114	46	13,0	43,5	43,5	0,0
6	450	994	46	12,3	39,9	47,8	0,0
7	654	55023	52	11,2	36,5	52,0	0,3
8	524	1092	59	8,1	34,7	57,2	0,0
9	574	59116	52	11,1	34,1	54,5	0,3
10	449	936	48	12,4	43,3	44,3	0,0
11	443	1196	46	13,2	46,5	40,3	0,0
12	481	1138	54	11,2	37,3	51,5	0,0
13	488	1294	54	11,3	36,7	52,0	0,0
14	472	1038	54	11,7	40,0	48,3	0,0
15	414	1039	45	13,8	50,0	36,2	0,0
Média	484	8560	51	11,7	40,4	47,8	0,0
c.v.(%)	12,6	230,2	8,4	11,4	11,7	12,2	263,9
Componente direta do sol	18	7518	0				
Média s/ comp. direta do sol	466	1042	51				

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 23- Modelo Básico com Protetor 1 – Norte na largura do ambiente – Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100<E<500	500<E<2000	E>2000
1	125	230	10	27,1	72,9	0,0	0,0
2	137	244	12	27,3	72,7	0,0	0,0
3	153	280	12	22,6	77,4	0,0	0,0
4	143	265	12	24,6	75,4	0,0	0,0
5	128	244	11	26,6	73,4	0,0	0,0
6	143	247	12	24,2	75,8	0,0	0,0
7	159	276	13	22,6	77,4	0,0	0,0
8	166	305	14	22,6	77,4	0,0	0,0
9	157	301	13	22,6	77,4	0,0	0,0
10	142	236	12	22,6	77,4	0,0	0,0
11	125	213	10	25,1	74,9	0,0	0,0
12	147	280	13	25,1	74,9	0,0	0,0
13	148	257	12	22,6	77,4	0,0	0,0
14	141	236	12	22,6	77,4	0,0	0,0
15	125	232	10	26,5	73,5	0,0	0,0
Média	143	256	12	24,3	75,7	0,0	0,0
c.v.(%)	8,9	10,4	9,7	7,4	2,4	x	x

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 24 - Modelo Básico com Protetor 2 – Norte no comprimento do amb. – Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	108	201	9	40,9	59,1	0,0	0,0
2	127	247	11	26,6	73,4	0,0	0,0
3	130	261	11	29,1	70,9	0,0	0,0
4	120	239	11	29,3	70,7	0,0	0,0
5	111	212	10	36,2	63,8	0,0	0,0
6	116	224	10	32,6	67,4	0,0	0,0
7	132	269	11	29,5	70,5	0,0	0,0
8	138	265	12	25,7	74,3	0,0	0,0
9	136	251	12	26,6	73,4	0,0	0,0
10	130	266	11	30,2	69,8	0,0	0,0
11	116	225	10	33,2	66,8	0,0	0,0
12	129	233	11	29,9	70,1	0,0	0,0
13	134	251	12	29,6	70,4	0,0	0,0
14	117	248	10	33,3	66,7	0,0	0,0
15	112	217	10	36,0	64,0	0,0	0,0
Média	124	241	11	31,2	68,8	0,0	0,0
c.v.(%)	8,0	8,6	7,5	13,3	6,0	x	x

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 25 - Modelo Básico c/ Protetor 1 c/ anteparo – Norte na largura do amb. – Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	126	254	10	28,1	71,9	0,0	0,0
2	137	255	11	22,9	77,1	0,0	0,0
3	164	293	13	22,4	77,6	0,0	0,0
4	136	288	11	26,0	74,0	0,0	0,0
5	123	233	10	27,2	72,8	0,0	0,0
6	135	241	11	23,8	76,2	0,0	0,0
7	152	288	12	22,6	77,4	0,0	0,0
8	163	314	13	22,6	77,4	0,0	0,0
9	150	283	12	22,6	77,4	0,0	0,0
10	141	254	11	22,7	77,3	0,0	0,0
11	125	227	10	24,6	75,4	0,0	0,0
12	141	260	12	23,8	76,2	0,0	0,0
13	157	278	12	22,6	77,4	0,0	0,0
14	144	251	12	23,8	76,2	0,0	0,0
15	131	223	10	22,6	77,4	0,0	0,0
Média	142	263	11	23,9	76,1	0,0	0,0
c.v.(%)	9,3	10,2	9,1	7,6	2,4	x	x

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 26 - Modelo Básico com Protetor Geral – Norte na largura do amb. – Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	108	196	8	30,2	69,8	0,0	0,0
2	119	207	9	25,8	74,2	0,0	0,0
3	134	243	10	24,1	75,9	0,0	0,0
4	126	214	10	25,1	74,9	0,0	0,0
5	107	192	8	35,6	64,4	0,0	0,0
6	123	240	10	26,7	73,3	0,0	0,0
7	141	303	11	22,6	77,4	0,0	0,0
8	150	271	12	22,6	77,4	0,0	0,0
9	138	264	11	22,6	77,4	0,0	0,0
10	126	237	10	27,3	72,7	0,0	0,0
11	109	183	9	27,4	72,6	0,0	0,0
12	122	261	9	26,5	73,5	0,0	0,0
13	137	251	11	23,7	76,3	0,0	0,0
14	125	233	10	26,4	73,6	0,0	0,0
15	109	187	9	32,3	67,7	0,0	0,0
Média	125	232	10	26,6	73,4	0,0	0,0
c.v.(%)	10,5	15,1	10,0	14,0	5,1	x	x

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 27 - Modelo Básico com Protetor Geral – Norte no comprimento do amb. – Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	100	190	8	42,8	57,2	0,0	0,0
2	110	194	9	34,8	65,2	0,0	0,0
3	125	241	10	28,6	71,4	0,0	0,0
4	118	214	10	31,8	68,2	0,0	0,0
5	98	188	8	45,0	55,0	0,0	0,0
6	117	212	10	32,6	67,4	0,0	0,0
7	131	298	11	24,2	75,8	0,0	0,0
8	136	276	12	24,3	75,7	0,0	0,0
9	128	241	11	26,7	73,3	0,0	0,0
10	117	231	10	33,0	67,0	0,0	0,0
11	105	186	9	36,0	64,0	0,0	0,0
12	110	219	9	37,6	62,4	0,0	0,0
13	127	246	11	28,5	71,5	0,0	0,0
14	116	231	10	35,7	64,3	0,0	0,0
15	101	179	9	39,5	60,5	0,0	0,0
Média	116	223	10	33,4	66,6	0,0	0,0
c.v.(%)	10,2	15,3	10,0	18,8	9,5	x	x

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 28 - Modelo Básico com Protetor Parcial – Norte na largura do amb. – Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	153	289	12	24,0	76,0	0,0	0,0
2	172	301	15	22,6	77,4	0,0	0,0
3	171	326	14	22,6	77,4	0,0	0,0
4	174	346	15	22,6	77,4	0,0	0,0
5	141	343	11	25,6	74,4	0,0	0,0
6	160	324	13	24,2	75,8	0,0	0,0
7	187	321	15	22,4	77,6	0,0	0,0
8	186	373	15	22,6	77,4	0,0	0,0
9	178	378	15	22,6	77,4	0,0	0,0
10	161	296	13	22,6	77,4	0,0	0,0
11	149	284	12	22,6	77,4	0,0	0,0
12	175	319	16	22,6	77,4	0,0	0,0
13	174	334	14	22,6	77,4	0,0	0,0
14	168	305	14	24,0	76,0	0,0	0,0
15	142	291	12	22,6	77,4	0,0	0,0
Média	166	322	14	23,1	76,9	0,0	0,0
c.v.(%)	8,7	9,0	9,7	4,0	1,2	x	x

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 29 - Modelo Básico com Protetor Parcial – Norte no comprim. do amb. – Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	148	270	12	26,5	73,5	0,0	0,0
2	170	299	15	22,6	77,4	0,0	0,0
3	169	297	14	22,6	77,4	0,0	0,0
4	166	292	15	22,6	77,4	0,0	0,0
5	134	232	11	25,1	74,9	0,0	0,0
6	152	282	13	23,7	76,3	0,0	0,0
7	179	317	15	22,6	77,4	0,0	0,0
8	183	373	15	22,6	77,4	0,0	0,0
9	170	326	15	22,6	77,4	0,0	0,0
10	159	282	13	22,6	77,4	0,0	0,0
11	146	286	12	23,6	76,4	0,0	0,0
12	176	298	16	22,6	77,4	0,0	0,0
13	170	328	14	22,6	77,4	0,0	0,0
14	169	340	14	22,6	77,4	0,0	0,0
15	140	251	12	24,1	75,9	0,0	0,0
Média	162	298	14	23,3	76,7	0,0	0,0
c.v.(%)	9,1	11,9	9,7	5,0	1,5	x	x

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 30 - Modelo Alternativo sem protetor solar – Norte na largura do amb. – Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	452	1098	47	12,7	43,0	44,3	0,0
2	726	65075	54	11,5	42,4	45,6	0,5
3	854	69284	61	7,4	41,1	51,0	0,5
4	927	65863	53	11,4	39,3	48,5	0,8
5	438	1047	47	12,5	49,8	37,7	0,0
6	474	1076	49	11,6	38,4	50,0	0,0
7	695	58817	58	9,1	35,1	55,4	0,4
8	699	61375	55	10,0	32,6	57,1	0,3
9	779	59925	59	8,4	32,9	58,3	0,4
10	452	995	48	12,0	47,4	40,6	0,0
11	441	1189	47	12,9	46,6	40,5	0,0
12	943	66596	55	11,1	34,7	53,3	0,9
13	942	69925	59	8,4	36,6	54,4	0,6
14	1076	66559	56	10,9	32,6	55,4	1,1
15	467	1061	49	12,1	42,3	45,6	0,0
Média	691	39.326	53	10,8	39,7	49,2	0,4
c.v.(%)	32,4	82,6	9,1	16,1	14,1	13,3	100,8
Componente direta do sol	204	38407	0				
Média s/ comp. direta do sol	487	919	53				

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 31 - Modelo Alternativo sem protetor solar – Norte no comprimento do amb.

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	455	1192	47	12,6	44,4	43,0	0,0
2	481	1059	54	11,7	41,1	47,2	0,0
3	531	1186	61	7,5	37,3	55,2	0,0
4	455	1109	53	11,8	41,6	46,6	0,0
5	428	1111	47	13,0	49,6	37,4	0,0
6	478	1086	49	11,4	43,9	44,7	0,0
7	522	1063	58	9,4	36,7	53,9	0,0
8	502	1004	55	10,3	35,1	54,6	0,0
9	521	1091	59	8,5	37,7	53,8	0,0
10	444	1159	48	12,0	47,0	41,0	0,0
11	455	1327	47	13,4	43,1	43,5	0,0
12	488	1111	55	11,5	43,2	45,3	0,0
13	493	1127	59	8,8	39,3	51,9	0,0
14	497	1046	56	11,1	37,8	51,1	0,0
15	448	1073	49	12,8	47,3	39,9	0,0
Média	480	1.116	53	11,1	41,7	47,3	0,0
c.v.(%)	6,6	6,9	9,1	16,1	10,4	12,3	x

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 32 - Modelo Alternativo com Protetor 2 – Norte na largura do amb. – Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	111	218	9	34,4	65,6	0,0	0,0
2	131	254	11	28,5	71,5	0,0	0,0
3	138	270	12	26,7	73,3	0,0	0,0
4	123	248	11	30,0	70,0	0,0	0,0
5	110	214	10	34,1	65,9	0,0	0,0
6	117	229	10	30,3	69,7	0,0	0,0
7	134	263	12	27,6	72,4	0,0	0,0
8	147	272	13	23,3	76,7	0,0	0,0
9	142	293	12	24,0	76,0	0,0	0,0
10	114	222	10	34,7	65,3	0,0	0,0
11	105	207	9	41,5	58,5	0,0	0,0
12	116	234	10	30,4	69,6	0,0	0,0
13	143	276	14	23,3	76,7	0,0	0,0
14	120	214	11	31,4	68,6	0,0	0,0
15	106	209	9	35,4	64,6	0,0	0,0
Média	124	242	11	30,4	69,6	0,0	0,0
c.v.(%)	11,6	11,7	13,8	16,8	7,3	x	x

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 33 - Modelo Alternativo com Protetor 1 – Norte no comprimento do amb. – Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	128	222	10	27,2	72,8	0,0	0,0
2	143	276	12	23,6	76,4	0,0	0,0
3	153	274	12	22,6	77,4	0,0	0,0
4	143	265	12	24,3	75,7	0,0	0,0
5	119	241	10	30,4	69,6	0,0	0,0
6	132	234	11	24,1	75,9	0,0	0,0
7	158	287	13	22,6	77,4	0,0	0,0
8	168	361	15	22,6	77,4	0,0	0,0
9	167	323	14	22,6	77,4	0,0	0,0
10	144	266	12	22,6	77,4	0,0	0,0
11	128	238	10	28,4	71,6	0,0	0,0
12	144	284	12	24,0	76,0	0,0	0,0
13	151	270	12	22,6	77,4	0,0	0,0
14	145	264	12	23,7	76,3	0,0	0,0
15	126	220	11	28,4	71,6	0,0	0,0
Média	143	268	12	24,6	75,4	0,0	0,0
c.v.(%)	10,3	13,9	12,3	10,6	3,5	x	x

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 34 - Modelo Alternativo com Prot. Geral – Norte na largura do amb. – Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	104	205	9	37,0	63,0	0,0	0,0
2	117	213	10	34,3	65,7	0,0	0,0
3	127	227	11	27,9	72,1	0,0	0,0
4	124	261	10	31,8	68,2	0,0	0,0
5	111	220	9	36,8	63,2	0,0	0,0
6	114	230	9	35,5	64,5	0,0	0,0
7	134	250	11	26,1	73,9	0,0	0,0
8	134	276	11	24,1	75,9	0,0	0,0
9	128	256	11	26,6	73,4	0,0	0,0
10	107	198	9	39,3	60,7	0,0	0,0
11	98	180	8	45,6	54,4	0,0	0,0
12	124	225	10	26,7	73,3	0,0	0,0
13	124	265	11	29,2	70,8	0,0	0,0
14	116	226	10	34,1	65,9	0,0	0,0
15	104	195	9	39,9	60,1	0,0	0,0
Média	118	228	10	33,0	67,0	0,0	0,0
c.v.(%)	9,5	12,4	9,9	18,7	9,2	x	x

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 35 - Modelo Alternativo c/ Prot. Geral –Norte no comprimento. do amb. –Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	113	200	9	28,9	71,1	0,0	0,0
2	127	217	10	26,8	73,2	0,0	0,0
3	134	241	11	22,6	77,4	0,0	0,0
4	133	261	10	26,3	73,7	0,0	0,0
5	118	226	9	29,0	71,0	0,0	0,0
6	121	224	9	30,0	70,0	0,0	0,0
7	147	254	11	22,7	77,3	0,0	0,0
8	148	276	11	22,6	77,4	0,0	0,0
9	140	261	11	23,3	76,7	0,0	0,0
10	118	217	9	25,5	74,5	0,0	0,0
11	102	181	8	37,4	62,6	0,0	0,0
12	135	229	10	23,0	77,0	0,0	0,0
13	139	306	11	25,9	74,1	0,0	0,0
14	129	230	10	26,1	73,9	0,0	0,0
15	115	206	9	33,8	66,2	0,0	0,0
Média	128	235	10	26,9	73,1	0,0	0,0
c.v.(%)	10,5	13,7	9,9	16,1	5,9	x	x

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 36 - Modelo Alternativo com Prot. Parcial – Norte na largura do amb. – Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	135	275	11	28,5	71,5	0,0	0,0
2	155	290	13	24,2	75,8	0,0	0,0
3	184	356	17	22,6	77,4	0,0	0,0
4	160	298	14	22,6	77,4	0,0	0,0
5	141	277	12	23,9	76,1	0,0	0,0
6	160	296	13	22,6	77,4	0,0	0,0
7	185	332	16	22,4	77,6	0,0	0,0
8	203	360	20	19,0	81,0	0,0	0,0
9	192	345	17	22,6	77,4	0,0	0,0
10	156	267	13	22,6	77,4	0,0	0,0
11	138	260	12	22,7	77,3	0,0	0,0
12	160	338	13	22,6	77,4	0,0	0,0
13	176	343	17	22,6	77,4	0,0	0,0
14	158	286	13	23,3	76,7	0,0	0,0
15	141	303	12	24,8	75,2	0,0	0,0
Média	163	308	14	23,1	76,9	0,0	0,0
c.v.(%)	12,8	11,0	17,6	8,4	2,5	x	x

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).

Tabela 37 - Modelo Alternativo c/ Prot. Parcial –Norte no comprimento do amb. –Céu 16

Pontos	Iluminância anual (lx)			Percentual de desempenho (IULN)			
	Média	Máx.absoluta	Mín.absoluta	E<100	100≤E≤500	500<E≤2000	E>2000
1	139	240	11	26,2	73,8	0,0	0,0
2	163	294	13	22,6	77,4	0,0	0,0
3	189	347	17	20,0	80,0	0,0	0,0
4	166	297	14	22,6	77,4	0,0	0,0
5	143	331	12	24,2	75,8	0,0	0,0
6	163	280	13	23,6	76,4	0,0	0,0
7	192	339	16	21,2	78,8	0,0	0,0
8	213	365	20	18,8	81,2	0,0	0,0
9	193	363	17	21,1	78,9	0,0	0,0
10	162	306	13	22,6	77,4	0,0	0,0
11	141	301	12	26,1	73,9	0,0	0,0
12	164	320	13	22,6	77,4	0,0	0,0
13	190	331	17	22,4	77,6	0,0	0,0
14	164	290	13	22,6	77,4	0,0	0,0
15	144	270	12	25,7	74,3	0,0	0,0
Média	168	312	14	22,8	77,2	0,0	0,0
c.v.(%)	13,4	11,2	17,6	9,3	2,8	x	x

Fonte: CABÚS, 2012a (adaptado pela autora).