



XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído

XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído

JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

SOMBREAMENTO X EXPOSIÇÃO AO SOL: ANÁLISE DO BALANÇO DA RADIAÇÃO SOLAR EM FORMAS INCLINADAS E DESLOCADAS

FONTENELLE, M. R. (1); MAYERHOFER, V. R. B. (2); PINHO, A. L. A. de (3)

(1) PhD, Professora do Departamento de Arquitetura, mariliafontenelle@id.uff.br
Universidade Federal Fluminense, Departamento de Arquitetura, Campus da Praia Vermelha, Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói-RJ, CEP 24210-240, Tel: (21) 2629-5746.

(2) Aluno de iniciação científica, Escola de Arquitetura e Urbanismo - UFF, vmayerhofer@id.uff.br

(3) Aluna de iniciação científica, Escola de Arquitetura e Urbanismo - UFF, aleticiamorim@gmail.com

RESUMO

Este artigo objetiva avaliar se a redução das cargas térmicas por superfícies auto sombreadas é capaz de superar o aumento das cargas térmicas em fachadas opostas com mesma área exposta ao sol. A partir de uma forma base prismática de proporções 1:1:2 (LxHxC), foram originadas quatro formas adotando-se as operações formais Deslocar e Inclinado e alternando-se o sombreamento entre as maiores e menores fachadas. Simulações computacionais foram realizadas por meio da suíte de aplicativos *Rhinoceros*, *Grasshopper* e *Ladybug* a fim de calcular a radiação solar (kWh/m²) total e por fachada sobre as formas estudadas, considerando quatro orientações e seis contextos climáticos brasileiros. Os resultados indicam que a radiação solar total incidente na envoltória é maior em Fortaleza e menor em Florianópolis, para todas as orientações solares e cenários estudados. De um modo geral, as formas inclinadas apresentam um aporte solar anual um pouco mais elevado que as formas deslocadas, por terem maior área de superfície efetivamente exposta ao sol. As formas com sombreamento na maior fachada são as que apresentam maiores cargas térmicas. Destaca-se ainda que as formas inclinadas e deslocadas apresentam um aumento expressivo das cargas térmicas em relação à forma base. Conclui-se que a redução das cargas térmicas por sombreamento é significativamente inferior ao aumento do aporte solar decorrente da maior exposição ao sol na fachada oposta e, que, portanto, a adoção do auto sombreamento não compensa nestes casos.

Palavras-chave: forma; auto sombreamento; radiação solar

ABSTRACT

This paper aims to evaluate if the reduction of thermal loads by self-shaded surfaces can overcome the increase of thermal loads by opposite facades with the same area exposed to the sun. From a prismatic base form of 1:1:2 (WxHxL), four different scenarios are created by adopting the design operations Shift and Skew and by alternating the shading between the largest and the smallest facades. Numerical simulations are carried out by means of *Rhinoceros*, *Grasshopper* and *Ladybug* to calculate solar radiation (kWh/m²) – total and by facade – on each form, considering four solar orientations and six different Brazilian climatic contexts. The results indicate that Fortaleza and Florianopolis present, respectively, the highest and the lowest total solar radiation for all orientations and scenarios. In general, the skewed forms present higher solar gains than shifted forms, due to the greater surface area exposed to the sun. Thermal loads are higher when self-shading is adopted on the largest façades. Furthermore, skewed and shifted forms present a remarkable increase of the solar gains compared to the base form. We conclude that the reduction of the thermal loads by self-shading is significantly inferior to the increase of the solar contribution due to the greater exposure to the sun in the opposite façade. Therefore, the adoption of the self-shading does not compensate in these cases.

Keywords: form; self-shading; solar radiation

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, diversas pesquisas vêm se concentrando em avaliar a influência da forma no desempenho termo-energético das edificações. Em comum, estes estudos investigam os parâmetros que geram maior e menor aporte solar pela envoltória e seus impactos no consumo de energia para resfriamento e aquecimento. Dentre os parâmetros dimensionais analisados, destacam-se a relação largura x profundidade e a taxa de compacidade.

A relação largura x profundidade foi estudada por Mascaró e Mascaró (1992) para prédios de 10 pavimentos com proporções variando entre 4:1 e 1:4, em oito capitais brasileiras. Conclui-se que a forma alongada com maiores fachadas voltadas para norte e sul resulta em menores cargas térmicas. Ressaltam também que para cada latitude existe uma relação ótima entre largura e profundidade e que, para a maioria dos contextos estudados, a proporção 2:1 é a mais eficiente. Pedrini e Lamberts (2003) complementam que as formas alongadas ajudam a aumentar o aproveitamento da ventilação natural e maximizar o uso da luz natural.

A taxa de compacidade, isto é, a relação entre área de superfície e volume do edifício, é explorada por Ling, Ahmad e Ossen (2007) Caruso, Fantozzi e Leccese (2013) e Rashdi e Embi (2016). Estes autores destacam que, para minimizar a radiação solar no envelope e as cargas para resfriamento, a seção do edifício e a área de envoltória devem ser as mais compactas possíveis, o que pode ser obtido por meio de formas curvas.

Mantendo-se o volume e área de piso original de diversos edifícios existentes, Caruso, Fantozzi e Leccese (2013) reduzem em até 38% a radiação solar total aumentando-se a compacidade da forma. Yeang (1999) indica taxas de compacidade ótimas para diferentes contextos climáticos, sendo 1:1 para clima frio, 1:1,6 para clima temperado; 1:2 para clima árido e 1:3 para clima tropical.

Há ainda poucas pesquisas focadas nos efeitos do sombreamento gerado pela própria forma – o auto sombreamento – nas cargas térmicas e no consumo de energia da edificação. As pesquisas conduzidas por Capeluto (2003), Zerefos et al (2012) e Chan e Chow (2014) se destacam por investigar parâmetros não dimensionais da forma que reduzem a radiação solar incidente na envoltória, como a inclinação de fachadas e coberturas.

Capeluto (2003) explora o potencial de redução das cargas térmicas dos edifícios por meio de forma piramidal invertida, considerando o contexto climático de Jerusalém (30° N). Para todas as orientações estudadas, há uma redução no consumo energético quando adotado auto sombreamento por meio de fachadas inclinadas. Esta melhoria é mais perceptível nas orientações leste e oeste do que para a orientação sul.

Zerefos et al (2012) comparam o desempenho de um edifício situado em Atenas (38° N) quando adotada uma forma ortogonal (fachadas verticais e cobertura horizontal) e uma forma complexa (fachadas e coberturas inclinadas). Verificou-se que pequenas diferenças de inclinação nas fachadas (4° na fachada leste e 7° na fachada oeste) e cobertura promovem uma redução de quase 8% do consumo de energia em comparação à forma ortogonal.

Chan e Chow (2014) avaliam o balanço energético anual da forma piramidal invertida para três contextos climáticos na China: Hong Kong (22° N), Shanghai (31° N) e Beijing (39° N). Concluem que esta geometria é adequada apenas para o clima subtropical de Hong Kong, onde a economia no consumo por resfriamento supera o aumento nos gastos com aquecimento.

Hachem, Athienitis e Fazio (2011) analisam o potencial solar de 7 diferentes formas (quadrado, retângulo, trapézio, L, U, H e T) para um edifício residencial de 2 pavimentos localizado em Montreal (45° N). Os autores identificam uma redução de até 15, 26 e 46% na forma T, L e U, respectivamente, em comparação à forma retangular, o que é resultado do auto sombreamento gerado por essas formas.

É inquestionável que o auto sombreamento é uma estratégia desejável para clima quente e úmido. Entretanto, questiona-se ainda se a redução das cargas térmicas por superfícies sombreadas é capaz de superar o aumento das cargas térmicas por superfícies com mesma área expostas ao sol. Esta situação é identificada em geometrias resultantes das operações formais Deslocar e Inclinadas descritas por Di Mari e Yoo (2012) e adotadas em diversos edifícios contemporâneos, conforme destaca a Figura 1.

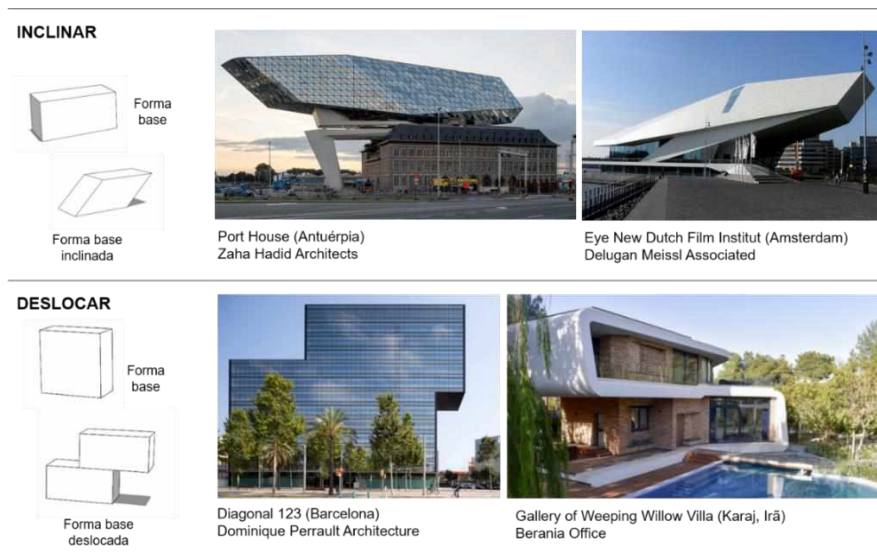


Figura 1 – Edifícios compostos pelas operações formais Inclinare Deslocar. Fonte: os autores

2. OBJETIVO

Este artigo objetiva avaliar se a redução das cargas térmicas por superfícies auto sombreadas é capaz de superar o aumento das cargas térmicas em fachadas opostas com mesma área exposta ao sol, considerando orientações solares distintas e o contexto climático de seis capitais brasileiras.

3. MÉTODO

A metodologia foi estruturada em 3 etapas:

1. Definição das formas investigadas;
2. Análise da radiação solar incidente por meio de simulações computacionais;
3. Análise e comparação dos resultados.

3.1. Definição das formas investigadas

A partir de uma forma base prismática de proporções 1:1:2 (LxHxC), foram originadas quatro formas adotando-se as operações formais Deslocar e Inclinare descritas por Di Mari e Yoo (2012). Estas operações geram auto sombreamento de superfícies ao mesmo tempo que aumentam a exposição das superfícies opostas.

As geometrias resultantes alternam o sombreamento entre as maiores e menores fachadas. O ângulo de sombreamento utilizado é de 45°. A figura 2 apresenta as formas investigadas e suas respectivas taxas de compacidade (TC).

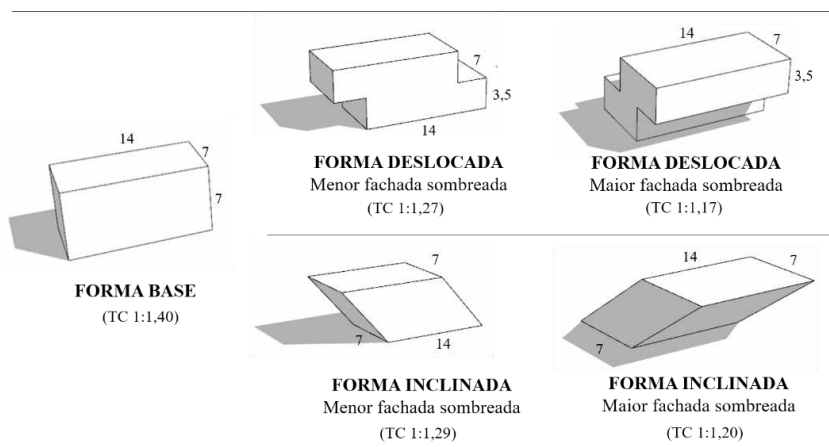


Figura 2 – Formas investigadas. Fonte: os autores

3.2. Análise da radiação solar incidente por meio de simulações computacionais

A partir da modelagem 3D das geometrias no software *Rhinceros*, foram realizadas simulações computacionais por meio dos plug-ins *Grasshopper* e *Ladybug*. As simulações visam calcular a radiação solar (kWh/m²) total e por fachada considerando as orientações Norte, Sul, Leste, Oeste e seis contextos climáticos (Tabela 1). Foram escolhidas cidades com diferentes condições de radiação solar anual (Figura 3) e que tem o sombreamento como estratégia bioclimática recomendada (MMA, 2018). Os arquivos climáticos (TRY) foram obtidos no site do LabEEE, disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/>>.

Tabela 1 – Cidades e latitudes simuladas e arquivos climáticos utilizados. Fonte: os autores

Cidade	Latitude	Zona Bioclimática	Aplicabilidade do sombreamento (%)
Belém	01° 27'	8	34%
Fortaleza	03° 43'	8	36%
Recife	08° 03'	8	25%
Salvador	12° 58'	8	27%
Rio de Janeiro	22° 54'	8	27%
Florianópolis	27° 35'	3	19%

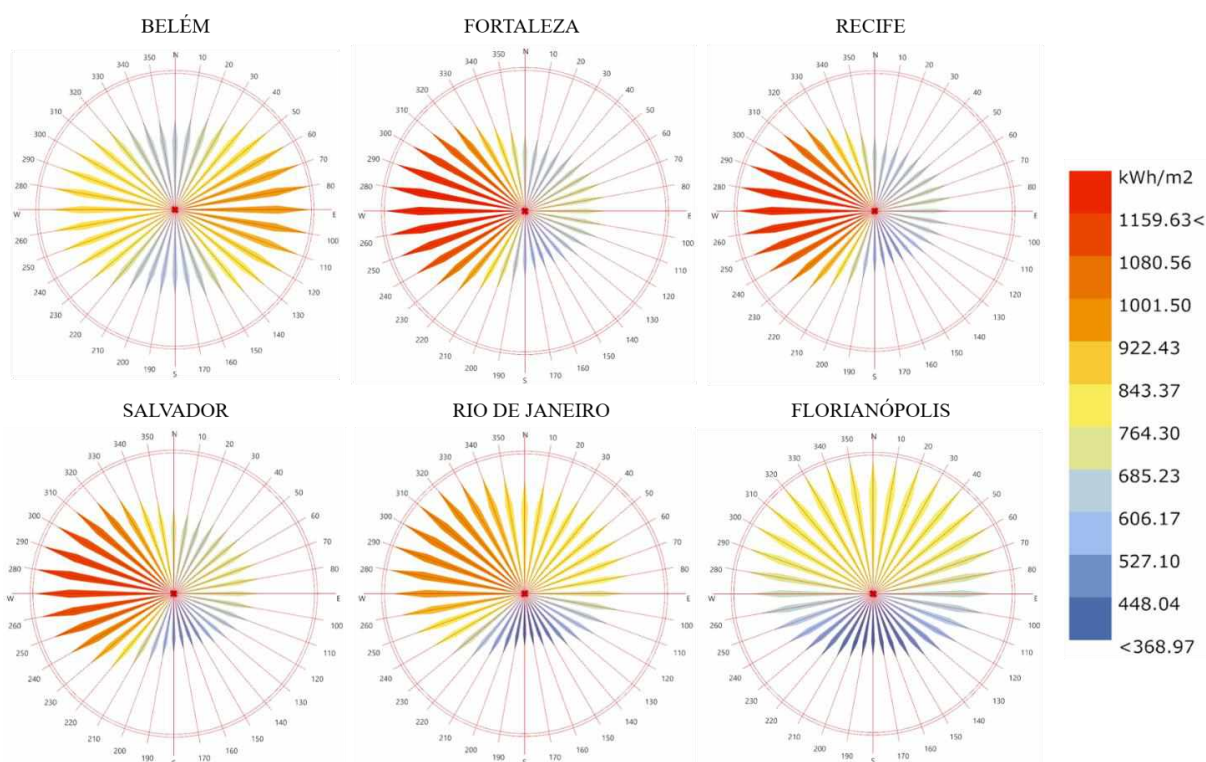


Figura 3 – Radiação solar anual (kWh/m²) nas seis cidades estudadas. Fonte: Ladybug.

A malha computacional utilizada é composta por pontos espaçados em 0,50m. Os dados sobre os materiais das superfícies foram desconsiderados de modo a obter exclusivamente a radiação solar direta incidente nas geometrias.

A figura 4 apresenta o fluxo de trabalho utilizado nas simulações.

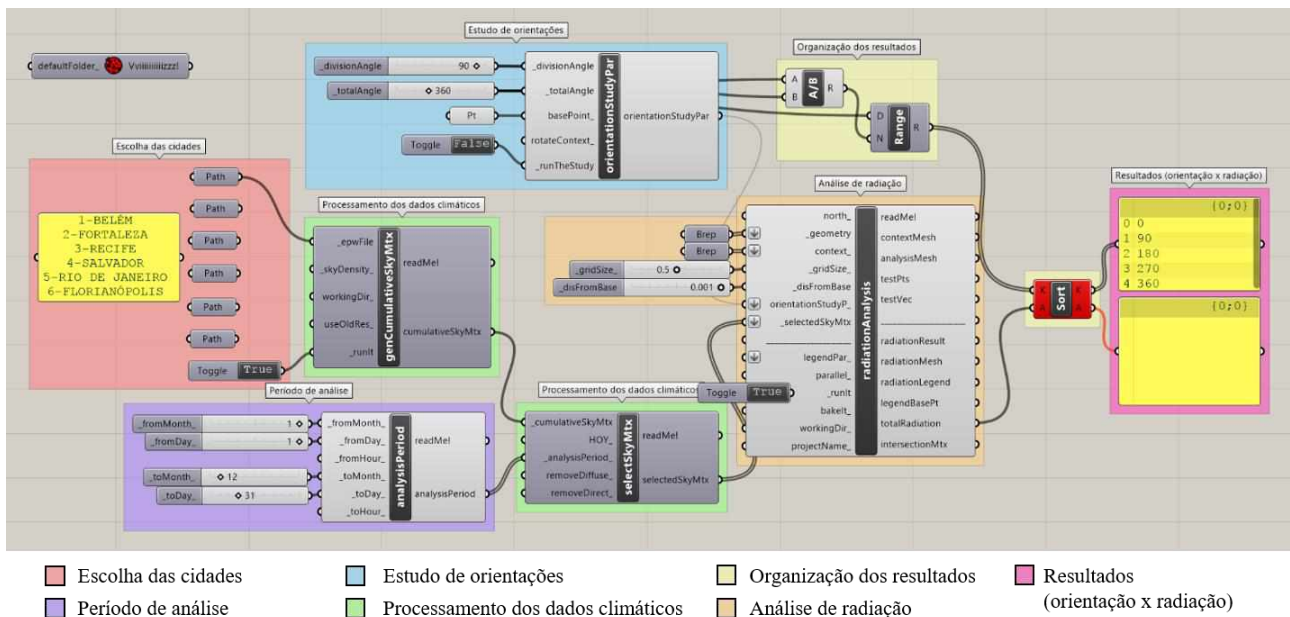


Figura 4 – Fluxo de trabalho no Grasshopper. Fonte: os autores

3.3. Análise e comparação dos resultados

Os resultados serão analisados e comparados considerando:

- A radiação solar anual (kWh/m^2) incidente na envoltória;
- A diferença percentual de radiação solar total entre forma base e formas transformadas;
- A diferença percentual de radiação solar por fachada entre a forma base e as formas transformadas, considerando apenas as fachadas exposta e sombreada.

4. RESULTADOS

Latitude e Orientação Solar

Os resultados das simulações computacionais apontam que a radiação solar total incidente na envoltória é maior em Fortaleza e menor em Florianópolis, para todas as orientações solares e cenários estudados (Figura 5 e 6). Isto reflete diretamente as condições de radiação solar apresentadas na Figura 3, que indicam que quanto menor a latitude, maior tende a ser a radiação solar incidente. Uma exceção ocorre em Belém, em virtude das chuvas vespertinas recorrentes nesta cidade.

Comparando-se a radiação solar total entre forma base e formas transformadas (Figura 7 e 8), verifica-se que em Belém, Fortaleza, Recife e Salvador, a orientação da fachada sombreada para norte e sul não apresenta diferenças significativas de radiação solar em relação a forma base, mas é expressiva quando se orienta o sombreamento para leste e oeste. Isto se explica pelo fato de que a diferença de radiação solar é mais pronunciada entre leste e oeste (Figura 3) e também porque o sombreamento é menos eficiente para alturas solares baixas. No Rio de Janeiro e em Florianópolis, este comportamento se inverte, pois não só o sombreamento é mais eficiente para norte, como também a diferença de radiação solar nestas latitudes é mais expressiva entre norte e sul.

Forma inclinada x forma deslocada

Comparando-se as Figuras 5 e 6, verifica-se que, na maioria dos casos, as formas inclinadas apresentam um aporte solar anual um pouco mais elevado que as formas deslocadas. Embora as primeiras apresentem menor área total de envoltória que as segundas (portanto, maior compactidade), a área de superfície efetivamente exposta à radiação solar direta é maior para as superfícies inclinadas. Deste modo, além da taxa de compactidade, a exposição efetiva das superfícies ao sol também influencia nas cargas térmicas.

Sombreamento na maior x menor fachada

Observa-se que as formas com sombreamento na maior fachada são as que apresentam maiores cargas térmicas em todos os casos (Figura 5-8), devido ao aumento de 4 e 8% da área de superfície efetivamente exposta ao sol para as formas deslocadas e inclinadas, respectivamente. A diferença de radiação entre os

cenários com auto sombreamento na maior e menor fachada é menos perceptível quando o sombreamento ocorre nas fachadas norte.

Forma base x forma transformada

As Figuras 7 e 8 destacam que as formas inclinadas e deslocadas apresentam um aumento expressivo das cargas térmicas em relação à forma base. Isto revela que, ainda que as formas transformadas sejam beneficiadas pelo auto sombreamento, este não é capaz de compensar o incremento da radiação solar nas fachadas opostas. Destaca-se que nas formas inclinadas, uma das fachadas é transformada em cobertura, enquanto que nas formas deslocadas, amplia-se a área de superfície horizontal, o que justifica o peso da exposição ao sol em relação ao auto sombreamento.

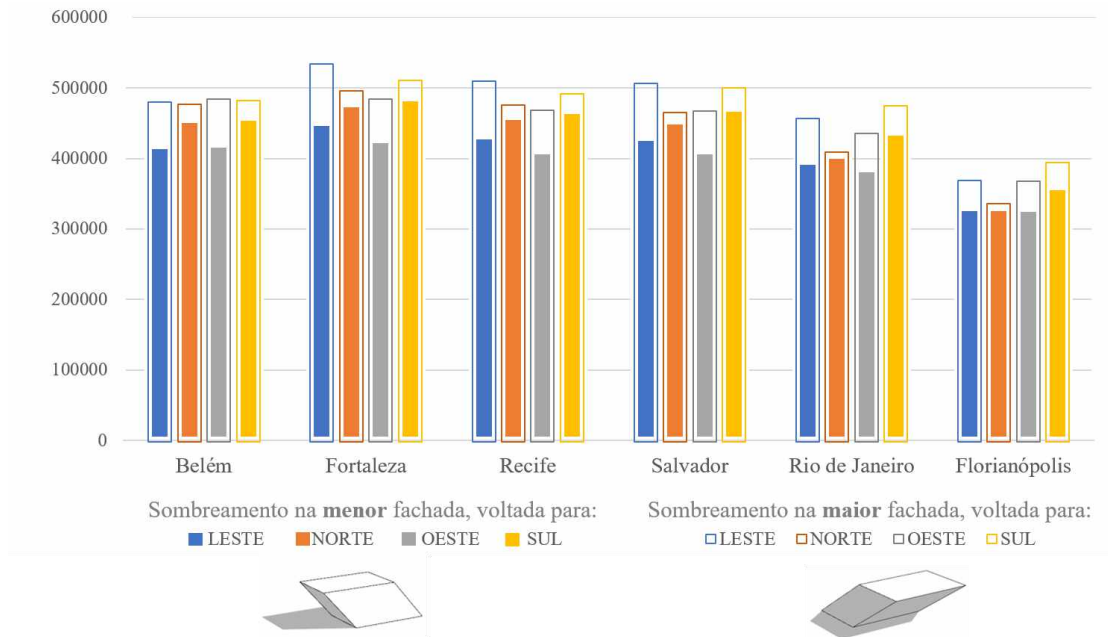


Figura 5 – Radiação solar anual total (kWh/m²) – Forma Inclinada

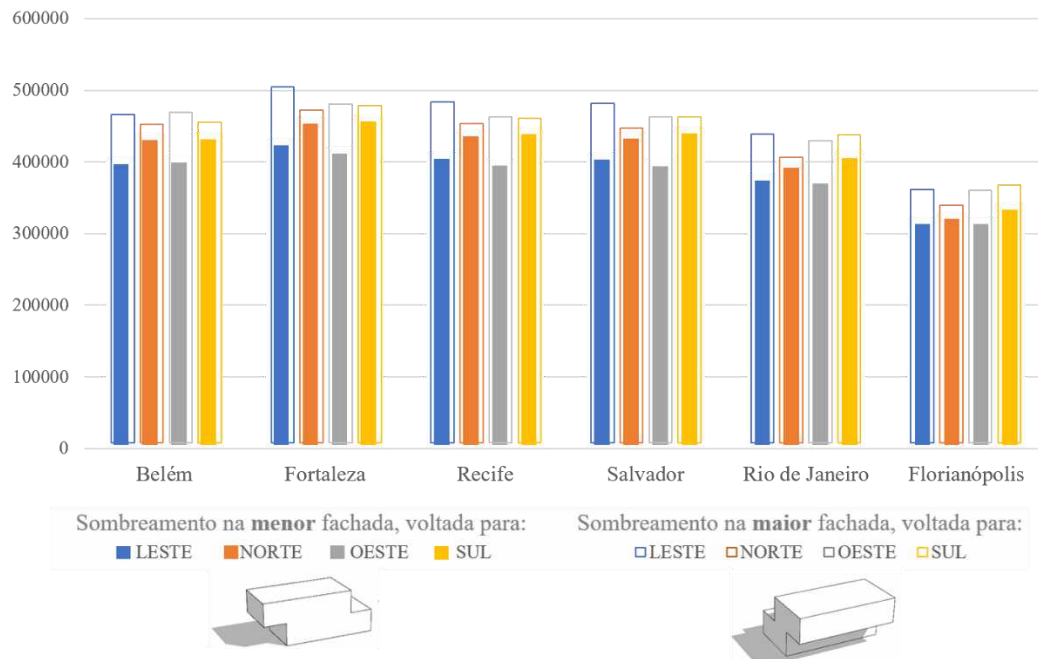


Figura 6 – Radiação solar anual total (kWh/m²) – Forma Deslocada

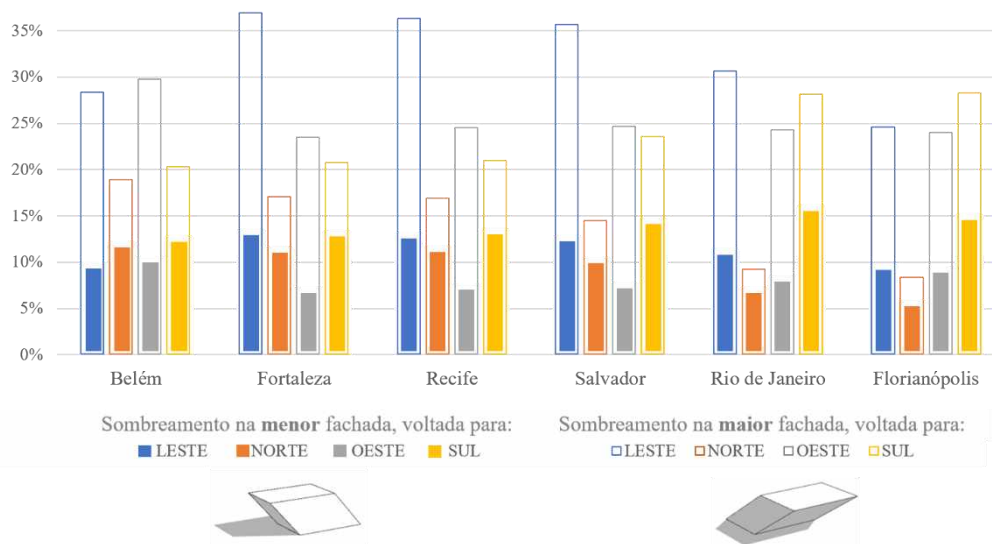


Figura 7 – Aumento da radiação solar anual em relação à forma base – Forma Inclinada

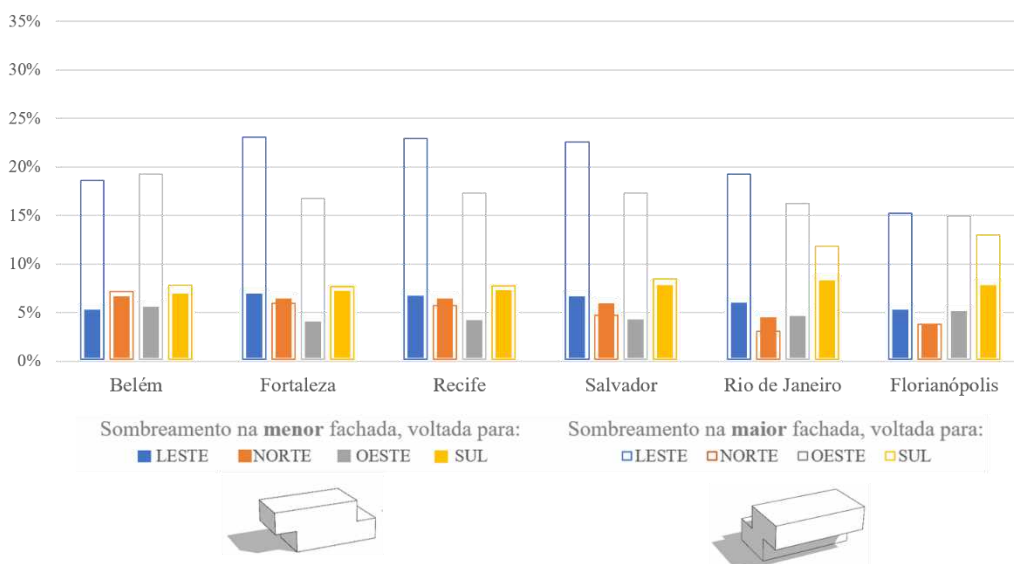


Figura 8 – Aumento da radiação solar anual em relação à forma base – Forma Deslocada

Fachada sombreada x Fachada exposta

As Figuras 9-12 apresentam a diferença percentual de radiação solar por fachada entre a forma base e as formas transformadas, considerando apenas as fachadas exposta e sombreada. Estes resultados confirmam que o aumento da radiação solar pelas superfícies expostas é expressivamente maior que a redução das cargas térmicas pelas superfícies sombreadas, sobretudo para as formas inclinadas. Isto ocorre porque a inclinação na fachada oposta ao sombreadamento aumenta sobremaneira a exposição ao sol em comparação às superfícies verticais da forma base. Na forma deslocada, a área de superfície vertical é mantida, e o aumento da carga térmica é decorrente apenas da exposição de uma nova superfície horizontal (Figura 13).

Ressalta-se ainda que, para a forma inclinada, não há diferença de aumento/redução da radiação em relação à forma base quando se alterna o sombreadamento entre a maior e menor fachada. Isto ocorre pois nesta alternância, mantém-se a proporção das superfícies expostas e sombreadas.

No que diz respeito à orientação das fachadas, observa-se que as superfícies expostas são mais sensíveis às variações de orientação solar que as superfícies sombreadas. Nestas, a radiação solar incidente varia apenas em função da eficiência do bloqueio solar, que é maior nas fachadas Norte e Sul. O incremento das cargas térmicas é mais expressivo quando a fachada exposta está voltada para Sul.

Tendo como referência a forma base, a redução das cargas térmicas na fachada sombreada é menor para as formas deslocadas que para as formas inclinadas, pois a primeira apresenta uma menor superfície beneficiada pelo bloqueio solar (Figura 13). Apesar de o sombreadamento da inclinada abranger uma maior superfície, a exposição continua tendo um peso maior no balanço final de radiação solar.

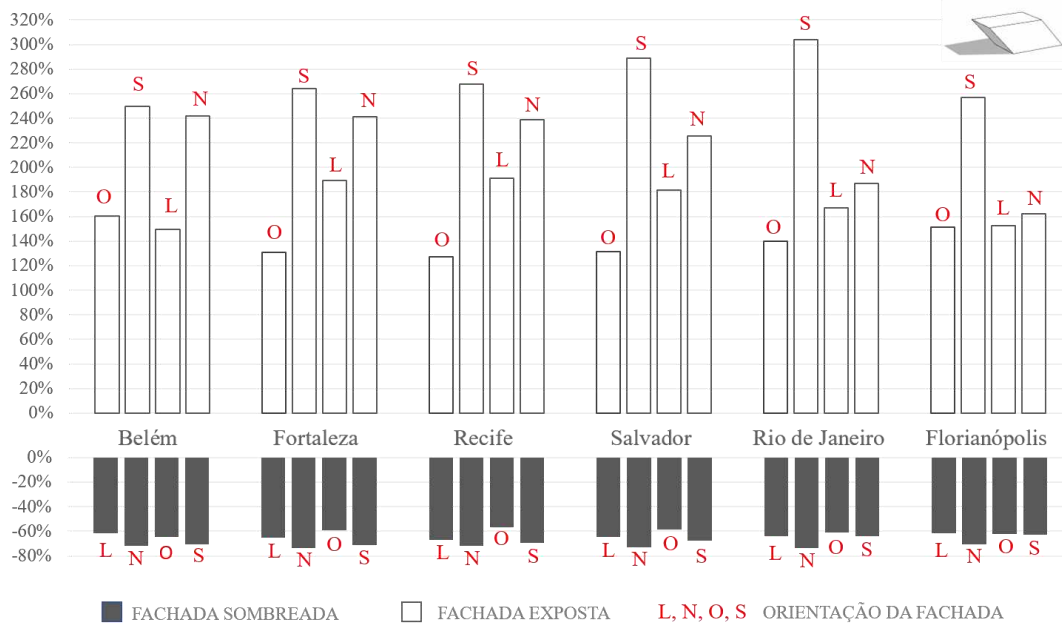


Figura 9 – Diferença de radiação solar entre fachadas da forma base e forma inclinada (menor fachada sombreada)

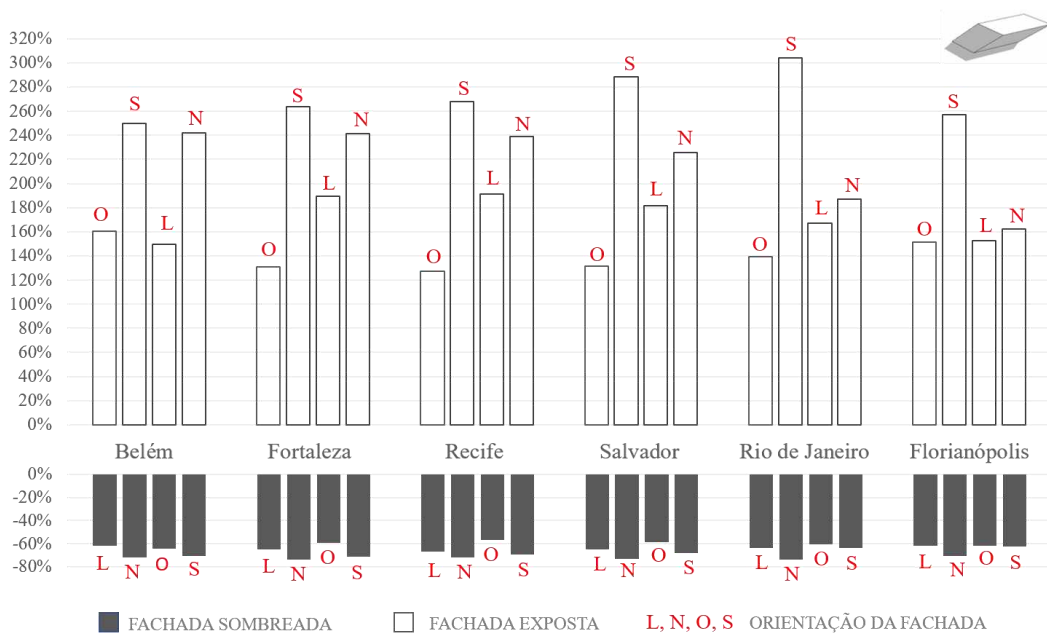


Figura 10 – Diferença de radiação solar entre fachadas da forma base e forma inclinada (maior fachada sombreada)

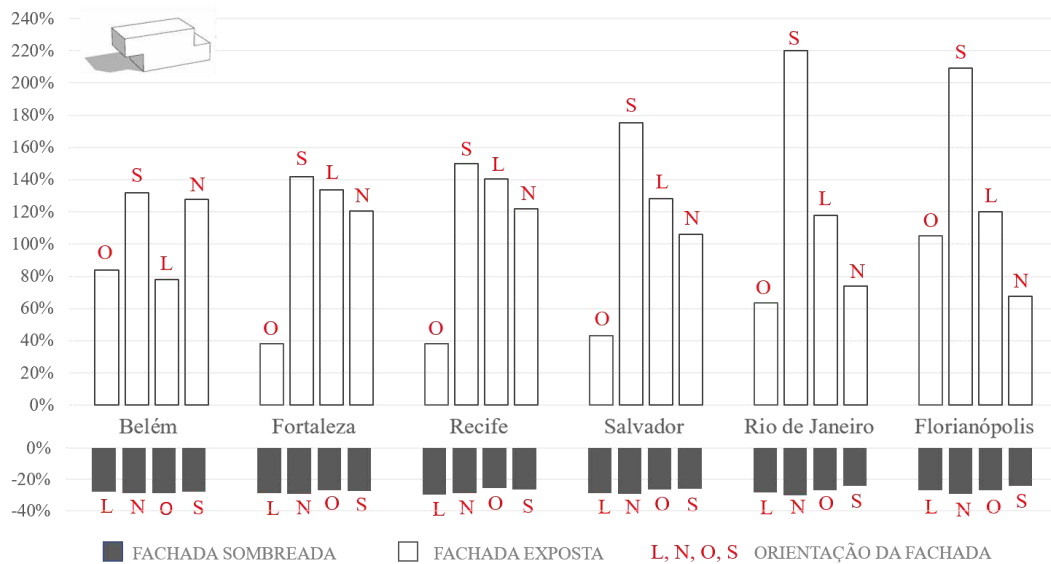


Figura 11 – Diferença de radiação solar entre fachadas da forma base e forma deslocada (menor fachada sombreada)

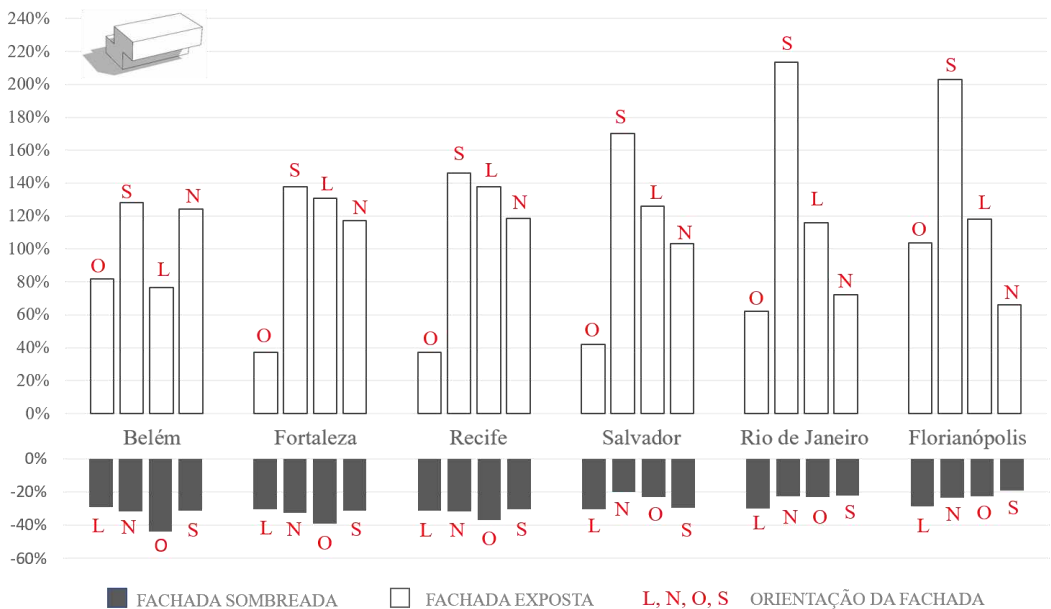


Figura 12 – Diferença de radiação solar entre fachadas da forma base e forma deslocada (maior fachada sombreada)

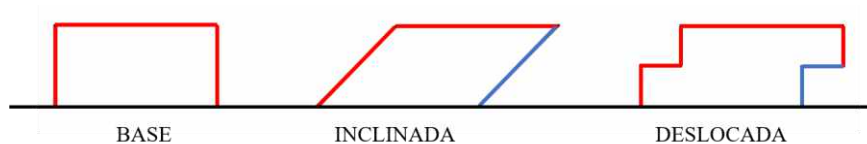


Figura 13 – Diferenças entre superfície exposta (vermelho) x sombreada (azul). Fonte: os autores.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa possibilitou avaliar se em formas deslocadas e inclinadas, a redução das cargas térmicas pelo auto sombreamento é capaz de compensar o aumento das cargas térmicas em fachadas opostas com maior exposição ao sol, considerando diferentes latitudes e orientações solares.

O auto sombreamento se mostrou uma excelente estratégia para redução das cargas térmicas. Em comparação à forma base, esta estratégia possibilitou uma redução de 24 a 30% do aporte solar da envoltória para as formas deslocadas, e de 57 a 74% para as formas inclinadas. Ou seja, o auto sombreamento gerado pela inclinação da forma é ainda mais eficiente que o gerado por deslocamento, pois esta operação formal gera menos superfícies expostas ao sol.

Em contrapartida, o aumento da exposição ao sol na fachada oposta resultou em um incremento das cargas térmicas entre 37 e 220% nas formas deslocadas e entre 127 e 304% nas formas inclinadas. Isto acontece porque na aplicação das operações formais, parte das superfícies que se configuravam como fachadas na forma base foram transformadas em coberturas inclinadas ou planas, que são os principais elementos responsáveis pelo aporte solar em edificações baixas.

Conclui-se que as formas deslocadas e inclinadas tal como apresentadas devem ser evitadas para os contextos climáticos estudados, tendo em vista que no balanço térmico da envoltória, o incremento da exposição ao sol tem um peso maior que o sombreamento.

A pesquisa revelou também que a eficiência do auto sombreamento depende da orientação solar para o qual se aplica. Tendo em vista que as formas estudadas geram um sombreamento equivalente ao de elementos de proteção solar horizontais, a redução das cargas térmicas tende a ser maior quando o auto sombreamento se volta para norte e sul. Ressalta-se que a eficiência do bloqueio solar poderia ser ainda mais expressiva para ângulos de proteção superiores a 45°.

Verificou-se também que além da latitude, outros fatores como nebulosidade (no caso de Belém) também são decisivos na intensidade da radiação e na diferença de insolação entre leste e oeste.

Ressalta-se ainda que a taxa de compactidade por si só não é suficiente para direcionar conclusões sobre o desempenho térmico das formas, pois considera a área de superfície total e não a área de superfície efetivamente exposta ao sol. Embora a forma inclinada seja mais compacta que a forma deslocada, a primeira apresentou maiores cargas térmicas que a segunda por ter maior área de superfície efetivamente exposta.

Embora o auto sombreamento não seja capaz de superar o aumento da exposição solar na fachada oposta, esta estratégia é bastante recomendável para clima quente e úmido, pois, como comprovado, promove uma redução expressiva das cargas térmicas, o que pode gerar um impacto significativo no consumo de energia das edificações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAPELUTO, I. G. Energy performance of the self-shading building envelope. **Energy and Buildings**, 35, pp. 327-336, 2003.
- CARUSO, G.; FANTOZZI, F.; LECCESE, F. Optimal theoretical building form to minimize direct solar irradiation. **Solar Energy**, v. 97 (128-137), 2013.
- CHAN, A. L. S.; CHOW, T. T. Thermal performance of air-conditioned office buildings constructed with inclined walls in different climates in China. **Applied Energy**, 114, pp. 45-57, 2014.
- DI MARI, A.; YOO, N. **Operative Design: A Catalog of spatial verbs**. Amsterdam: BIS Publishers, 2012.
- HACHEM, C.; ATHIENITIS, A.; FAZIO, P. Parametric investigation of geometric form effects on solar potential of housing units. **Solar Energy**, 85, pp. 1864-1877, 2011.
- LING, C. S.; AHMAD, M. H.; OSSEN, D. R. The effect of geometric shape and building orientation on minimising solar insolation on high-rise buildings in hot humid climate. **Journal of Construction in Developing Countries** 12 (1), 27-38, 2007.
- MASCARÓ, J. L.; MASCARÓ, L. **Incidência das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edifícios**. 2ª edição. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto Editores, 1992.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. **PROJETEEE**. Disponível em: < <http://projeteee.mma.gov.br/> >. Acesso em: 28/03/2019.
- PEDRINI, A.; LAMBERTS, R. Influência do tamanho e forma sobre o consumo de energia de edificações de escritório em clima quente. **Anais do V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**. Curitiba, 2003.
- RASHDI, W. S. S. W. M.; EMBI, M. R. Analysing Optimum Building Form in Relation to Lower Cooling Load. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 222 (782-790), 2016.
- YEANG, K. **The green skyscraper: the basis for designing sustainable intensive buildings**. Munich: Prestel Pub, 1999.
- ZEREFOS, S. C.; TESSAS, C. A.; KOTSIPOULOS, A. M.; FOUNDA, D.; KOKKINI, A. The role of building form in energy consumption: The case of a prismatic building in Athens. **Energy and Building**, v. 48 (97-102), 2012.