

Desempenho energético e ambiental de soluções de fachada para edifícios de escritórios no Brasil

Rosilene R Brugnera, MArch

IAU-USP, São Carlos, SP, Brasil

rosileneregolao@gmail.com

Karin M. S. Chvatal, PhD

IAU-USP, São Carlos, SP, Brasil

Ricardo Mateus, PhD

CTAC, Universidade do Minho

RESUMO

Os edifícios são grandes responsáveis pelo consumo energético e pelas emissões de CO₂, causadores do efeito estufa, e representam um desafio global para o futuro de baixo carbono. As fachadas recebem destaque por serem o maior elemento construtivo e exercerem grande influência no consumo de energia das edificações. Investir em eficiência energética e reduzir os impactos ambientais negativos são propostas que estão em diversos acordos mundiais, tais como a Diretiva Europeia 2010/31 EU (com seus objetivos “20-20-20”), que estabelece limites para as emissões de CO₂, redução do consumo de energia nas edificações e investimento na produção de energias renováveis. Os edifícios, portanto, representam um elemento chave para as estratégias de mitigação. Dentro dessa perspectiva, este estudo tem como objetivo analisar, sob os âmbitos energético e ambiental, o desempenho de soluções de fachada para edifícios de escritórios no Brasil.

INTRODUÇÃO

Os edifícios e as atividades relacionadas a eles são responsáveis por grande parte das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Mundialmente este setor é responsável pela utilização de cerca de 40% do total da energia final produzida e pela liberação de aproximadamente 40% das emissões totais de CO₂ (Diakaki, Grigoroudis and Kolokotsa, 2008).

Os acordos mundiais, como por exemplo, o Protocolo de Kyoto, tem como objetivo reduzir a emissão de gases que causam o efeito estufa. A Diretiva Europeia 2010/31/EU (UNIÃO EUROPEIA, 2010), com os renomados objetivos “20-20-20”, visa assegurar que até 2020 haja uma redução de 20% nas emissões de gases de efeito estufa e que a produção de energias renováveis aumente em 20%, melhorando também a eficiência energética em 20% (em relação aos índices avaliados em 1990). Esta Diretiva também estabelece que, a partir de 2020, todos os edifícios novos deverão ser concebidos para terem um balanço energético nulo, isto é, deverão produzir toda a energia que consomem.

De acordo com IPCC (2014), os edifícios representam uma parte crítica do futuro de baixo carbono e um desafio global para a integração com o desenvolvimento sustentável, mas ao mesmo tempo eles são a chave para as estratégias de mitigação. Assim, a eficiência energética dos edifícios tem protagonizado os debates políticos devido aos altos preços da energia e preocupações com as alterações climáticas. (Bueno, 2010; Kneifel, 2010). Melhorar a eficiência energética das edificações pode ser uma opção simples e de custo reduzido para diminuir o consumo energético e consequentemente, os custos operacionais e as emissões de CO₂.

No Brasil, mais de 40% do consumo de energia elétrica advém do setor de edificações, sendo parte desse consumo atribuído aos edifícios de escritórios. Nesse tipo de edificação, com grandes fachadas envidraçadas e praticamente nenhuma opção de abertura para o exterior, o consumo de energia tem aumentado significativamente, fazendo com que tais edificações sejam totalmente dependentes de sistemas de condicionamento artificial de ar (CBCS, 2014).

Dessa forma, esse estudo tem como objetivo analisar, sob os âmbitos energético e ambiental, o desempenho de soluções de fachada para edifícios de escritórios no Brasil. Com a hierarquização dos resultados em faixas de desempenho será possível gerar indicações para que os projetistas promovam escolhas mais conscientes, no sentido de se criar edifícios energética e ambientalmente eficientes.

CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

Para este estudo foi selecionado um modelo de edifício de escritórios de planta livre com fachada totalmente revestida por vidro (denominada Fachada-cortina, com sistema do tipo *structural glazing*). Este modelo de edificação representa o que atualmente é construído nas grandes cidades do Brasil, como por exemplo, na cidade de São Paulo.

O modelo de edifício é apresentado na Figura 1 (a). Foi selecionado para análise um pavimento da edificação, de modelo retangular, que contém uma área total de 800m² (20m x 40m), um núcleo de 300m² (10m x 30m) e pé-direito de 2,70m (3,75m no total). A distância entre a fachada e o núcleo é de 5 metros - região de influência da radiação sobre o ambiente interno para definição de uma zona térmica (ASHRAE, 2013, p. 260). Apenas a área pertencente aos escritórios é condicionada termicamente e todo o perímetro da fachada é composto por área envidraçada. O núcleo é uma área destinada a elevadores, banheiros e escada.



Figura 1 (a) Modelo de estudo e (b) Detalhe da Fachada Cortina.

Na Figura 1 (b) é apresentado o detalhe da Fachada-cortina, selecionada para este estudo. Esse tipo de fachada constitui-se por um sistema de vedação composto por uma estrutura de caixilhos metálicos que formam um sistema de vedação contínuo. Esse sistema recebe um fechamento em placas de vidro, que são colados aos montantes metálicos com silicone estrutural (Souza, 2008). A parte opaca da estrutura interna (peitoril em alvenaria e viga de concreto) é revestida por um vidro com película PVB (*polivinil butiral*) branca, com aspecto translúcido.

ANÁLISE DE DESEMPENHO ENERGÉTICO

A análise de desempenho energético do modelo de edifício foi realizada por meio de simulação computacional no programa EnergyPlus (EERE, 2013a). A modelagem da edificação foi realizada no programa *SketchUp* (GOOGLE, 2008), por meio do *plugin Legacy OpenStutio* (EERE, 2013b).

Características da Modelagem da Edificação

Para as simulações foram utilizados arquivos climáticos (epw) desenvolvidos por RORIZ (LABEEE, 2015). A cidade de São Paulo foi selecionada para esta pesquisa por ser o local mais representativo da ocorrência desse tipo de edificação no Brasil.

Na classificação de Köppen-Geiger (KÖPPEN, 1936), o clima da cidade de São Paulo é denominado como Cwa (Clima subtropical/ tropical de altitude, com verão quente e inverno seco). A Tabela 1 apresenta a localização, juntamente com a temperatura do ar e a radiação solar (difusa e direta) da cidade de São Paulo.

Tabela 1. Localização e Detalhes do Clima da Cidade de São Paulo (Brasil)

| Localização | Clima de São Paulo |
|-------------|---|
| | <p>Temperatura Mensal Mínima, Média e Máxima (°C) de São Paulo</p> <p>Umidade Relativa (%)</p> <p>Temp. Mínima</p> <p>Temp. Média</p> <p>Temp. Máxima</p> |

A cidade de São Paulo possui um clima intermediário, em que as temperaturas médias variam de 17°C a 22°C, enquanto a umidade relativa do ar fica em torno de 70%.

O detalhamento dos materiais utilizados na modelagem do edifício (apresentado na Figura 1), no programa EnergyPlus, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Detalhe dos Componentes Construtivos Opacos da Fachada

| Componentes Construtivos | Materiais | Espessura (m) | U (W/m ² .K) ¹ | C.T. (KJ/m ² .K) ¹ | α ² |
|-----------------------------------|-------------------|---------------|--------------------------------------|--|-----------------------|
| Piso | Laje de concreto | 0,15 | 1,19 | 330 | 0,75 |
| | Espaço de ar | 0,10 | | | |
| | Carpete de nylon | 0,05 | | | |
| Teto | Laje de concreto | 0,15 | 1,05 | 341 | 0,50 |
| | Espaço de ar | 0,75 | | | |
| | Forro de gesso | 0,015 | | | |
| Parede Interna (núcleo) | Gesso | 0,015 | 1,60 | 22 | 0,50 |
| | Espaço de ar | 0,05 | | | |
| | Gesso | 0,015 | | | |
| Parede Externa (alvenaria) | Argamassa reboco | 0,025 | 2,88 | 221 | 0,30 |
| | Bloco de concreto | 0,14 | | | |
| | Argamassa gesso | 0,005 | | | |
| Vedação Externa (fachada cortina) | Vidro translúcido | 0,008 | 1,90 | 237 | 0,62 |

¹ A transmitância térmica (U) e a capacidade térmica (C.T.) foram calculadas com base na norma NBR 15220-2: Desempenho Térmico de Edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações (ABNT, 2005).

² α = Absortância

A área envidraçada na fachada é representada pelo WWR (*window-to-wall ratio*), que é calculado em relação à área útil da fachada (considerando um pé-direito interno do ambiente de 2,70m). Para a análise deste parâmetro foram definidas duas dimensões de WWR (55% e 80%), que representam um

tamanho de janela médio mais comum e uma janela grande, respectivamente.

Para a análise da área do vão-luz (área transparente da fachada correspondente ao WWR), foram selecionados dois tipos de vidros: incolor e duplo. As características destes vidros e do vidro translúcido são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades Térmicas dos Tipos de Vidro

| | Vidro Incolor | Vidro Duplo | Vidro Translúcido (PVB branco) |
|---|---------------|-------------|--------------------------------|
| Espessura (mm) | 6,00 | 24,00 | 8,00 |
| Transmitância à luz visível (%) | 0,88 | 0,39 | 0,65 |
| Transmitância térmica (W/m ²) | 5,70 | 2,79 | 5,50 |
| Fator Solar (SHGC) | 0,82 | 0,28 | 0,62 |

Dados obtidos dos catálogos das empresas CEBRACE (2016), GUARDIAN (2010) e GLASSEC-VIRACON (2016).

A densidade de carga térmica abrange os ganhos de calor advindo das pessoas, equipamentos e iluminação artificial. O modelo de edificação possui uma área climatizada, referente aos escritórios e uma área não climatizada, pertencente às áreas de serviços, escadas, elevadores, etc. Tais ganhos são considerados apenas para a área dos escritórios (Tabela 4). O padrão horário de ocupação é de segunda à sexta-feira, das 8h às 19h.

Tabela 4. Características das cargas internas

| Tipo de Carga | Características | Referências |
|-----------------------|---------------------------------------|--|
| Pessoas | 8m ² /pessoa; 117W | NBR 16401 (ABNT, 2008); ASHRAE Fundamentals (ASHRAE, 2009) |
| Equipamentos* | 16,2 W/m ² (média/alta) | NBR 16401-1(ABNT, 2008) |
| Iluminação Artificial | Tipo: on-off; DPI=9,7W/m ² | RTQ-C (INMETRO, 2013) |

*A densidade de carga por equipamentos refere-se à cada posto de trabalho que contenha computador e monitor, além de impressora e fax.

O sistema de ar condicionado selecionado para o estudo é do tipo VRF (*Variable Refrigerant Flow*), cujo sistema é do tipo central de expansão direta com múltiplas unidades evaporadoras. O sistema, classificado como *Multi-split VRF*, possui um COP de 3,11, calculado de acordo com a capacidade de utilização por meio de tabelas do RTQ-C (INMETRO, 2013) e ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2013). O sistema foi simulado para aquecimento e resfriamento, com temperaturas de setpoint de 18°C e 25°C, respectivamente.

Caracterização das Soluções de Fachada

De acordo com a combinação dos parâmetros apresentados previamente, foram estabelecidas quatro soluções de análise. Tais soluções são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Cenários de Análise

| Soluções | WWR (%) | Tipo de Vidro (vão luz) |
|----------|---------|-------------------------|
| S 1 | 55 | Incolor |
| S 2 | 55 | Duplo |
| S 3 | 80 | Incolor |
| S 4 | 80 | Duplo |

Dessa forma, as simulações computacionais foram realizadas no sentido de se obter os consumos energéticos anuais (em kWh/m²/ano) e verificar qual seria a combinação de parâmetros com menor consumo energético.

ANÁLISE DE DESEMPENHO AMBIENTAL

A análise de desempenho ambiental foi realizada por meio do método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), através do qual foi possível obter os potenciais impactos ambientais provenientes de cada cenário de fachada para o modelo de edifício estudado.

Função e Unidade Declarada

A função a ser avaliada pelo estudo é a de vedação não-estrutural de um edifício de escritórios, o qual possui as mesmas densidades de carga de equipamentos e iluminação, tipo, COP e *setpoint* do sistema de ar condicionado para manter a temperatura de 25°C ao longo do ano, nos dias e horários de ocupação do edifício (de segunda à sexta, das 8h às 19h).

Segundo a norma NBR 15575-4 (ABNT, 2013), a vida útil de projeto (VUP) dos sistemas construtivos de vedação externa para edifícios residenciais é de, no mínimo 40 anos e máxima de 60 anos. Para este estudo foi considerado o tempo máximo de 60 anos por se tratar de um edifício de escritórios.

Foi considerado como unidade declarada para o presente estudo: 1m² da área útil condicionada do edifício de escritórios, que satisfaz a condição apresentada anteriormente para os 60 anos de vida útil do edifício. Essa determinação advém do fato de que os consumos de energia são contabilizados em kWh/m²/ano.

Análise de inventário

Para o Inventário do Ciclo de Vida (ICV), foi necessária a realização da quantificação dos materiais provenientes de cada cenário de fachada, apresentados na Tabela 6. A quantificação foi realizada com base em um projeto executivo, e os materiais referentes à estrutura interna (peitoril em alvenaria e viga de concreto) foram calculados com base na norma brasileira NBR 15220-3 (ABNT, 2005), com dados de fabricantes e com dados do documento do Laboratório Nacional de Engenharia Civil ITE-50 (Santos and Matias, 2006).

Tabela 6. Quantificação dos Materiais de Cada Solução de Fachada

| Materiais | S1 (kg/m²) | S2(kg/m²) | S3 (kg/m²) | S4 (kg/m²) |
|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Aço inox | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 |
| Alumínio | 11,817 | 11,817 | 11,817 | 11,817 |
| E.P.D.M. | 0,669 | 0,669 | 0,669 | 0,669 |
| Nylon | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Polietileno expandido | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 |
| Silicone | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0,025 |
| Vidro vão-luz (incolor/duplo) | 4,863 | 9,727 | 7,101 | 14,202 |
| Vidro (opaco) | 21,626 | 21,626 | 18,901 | 18,901 |
| Argamassa (assent./reboco) | 67,520 | 67,520 | 38,342 | 38,342 |
| Argamassa (gesso) | 1,986 | 1,986 | 1,128 | 1,128 |
| Bloco de concreto | 42,431 | 42,431 | 24,095 | 24,095 |
| Pintura | 0,445 | 0,445 | 0,253 | 0,253 |
| Argamassa reboco externo | 9,887 | 9,887 | 9,887 | 9,887 |
| Argamassa (gesso) | 1,217 | 1,217 | 1,217 | 1,217 |
| Pintura | 0,273 | 0,273 | 0,273 | 0,273 |
| Viga de concreto | 192,247 | 192,247 | 192,247 | 192,247 |

Após a quantificação dos materiais das fachadas, o inventário de ciclo de vida foi realizado com o auxílio do programa SimaPro® (PRÉ-CONSULTANTS, v. 8.4, 2017). Como no Brasil, até o presente momento, não há bases de dados consolidadas para modelagem do ICV, este estudo adotou, assim como em vários trabalhos (BUENO, 2014; SAADE, SILVA e GOMES, 2013; SANSÃO, 2011) bases de dados internacionais, tais como o *Ecoinvent* (Frischknecht *et al.*, 2005). Quando possível, os inventários de cada um dos processos foram editados, substituindo-se o processo da energia elétrica consumida pelo correspondente ao mix energético brasileiro, contido nessa mesma base de dados.

As distâncias do transporte das empresas produtoras dos materiais até a localidade do edifício foram contabilizadas. Esse aspecto demonstra-se importante devido ao fato de que o tipo de transporte e combustível utilizado podem influenciar nas emissões de gases que causam os impactos ambientais.

Foi considerado que a edificação está localizada na cidade de São Paulo. Desta forma, para a contabilização dos dados de transporte, foram avaliadas as distâncias das empresas fornecedoras dos materiais que estivessem mais próximas à este local.

Avaliação de Impacto Ambiental

Para a fase de Avaliação de Impacto Ambiental de Ciclo de Vida (AICV) foi selecionado o método CML para a caracterização dos impactos ambientais. Atualmente, as normas europeias exigem que se utilize os fatores de caracterização do método CML para as análises ambientais. Por outro lado, de acordo com Mendes, Bueno e Ometto (2016), para o Brasil é recomendado que se utilize métodos que tenham uma abrangência global para as suas categorias de impacto, e o CML é um deles. Para este estudo, foi selecionado para análise a categoria de impacto de Potencial de aquecimento global (GWP), que é expressa em Kg CO₂ equivalentes.

RESULTADOS

Os resultados são aqui divididos em três partes: a primeira refere-se aos dados de consumo energético proveniente (Desempenho energético) das soluções de fachadas estabelecidas anteriormente. A segunda parte apresenta, para as mesmas soluções, os impactos ambientais (Desempenho ambiental). E a terceira parte integra as duas avaliações (Classificação geral dos âmbitos energético e ambiental).

Desempenho energético

Para este estudo, são apresentados na Tabela 7, a classificação das soluções de fachada (do menor para o maior valor) de acordo com os consumos de energia anuais do sistema de ar condicionado. Atendendo ao clima da localização estudada, não houve consumo significativo para aquecimento em nenhum dos casos avaliados. Logo, o ar condicionado foi acionado apenas no modo de arrefecimento.

Tabela 7. Classificação das Soluções de Fachada de acordo com o Consumo do Ar Condicionado

| | Soluções | Consumo do AC (kWh/m²/ano) |
|----|-----------------|--|
| 1º | S 2 | 26,1 |
| 2º | S 1 | 28,4 |
| 3º | S 4 | 34,2 |
| 4º | S 3 | 37,6 |

Nota-se na Tabela 7 que as soluções com WWR de 80% (S3 e S4) são as que apresentam os maiores consumos de energia. O vidro incolor (S3) é o que possui a maior permeabilidade quanto aos ganhos de calor por radiação solar, tanto pela espessura (6mm), quanto por ter um índice de transmissão de luz visível de 88%.

Para o mesmo tipo de vidro, quando se altera de uma janela média para grande (WWR de 55% para 80%), o aumento no consumo de energia do ar condicionado aumenta em cerca de 32,7% no caso do vidro incolor (S1 e S3) e 31,3% no caso do vidro duplo (S2 e S4). O aumento do consumo com ar condicionado não é proporcional ao aumento do WWR, fato também observado nos estudos de Westphal e Andreis (2016).

Para o mesmo WWR, quando se altera o tipo de vidro (de incolor para duplo), a economia de energia alcançada é em torno de 8,8% para a janela média (WWR=55%) e 9,9% para a janela grande (WWR=80%), fato também observado por Neves e Marques (2017) que, para o clima de São Paulo, a utilização de uma fachada com maior isolamento (no caso da utilização do vidro duplo) pode não ter uma economia de energia muito expressiva.

Portanto, para o tipo de edifício e clima avaliado, a melhor solução de fachada (considerando o menor

consumo energético) é a S2, que possui uma janela de tamanho médio (WWR=55%) e vidro duplo.

Desempenho ambiental

Para a análise de desempenho ambiental, foi utilizado o mesmo modelo de edificação, com os materiais calculados para um pavimento e dispostos em kg/m², conforme explicitado anteriormente. Para esta análise, a categoria de impacto ambiental selecionada é o de Potencial de Aquecimento Global (GWP), métrica relativa à emissão de gases de efeito estufa, apresentada no relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) e muito utilizada por vários estudos que tem como base as emissões de CO₂. Desta forma, a Tabela 8 apresenta as emissões de CO₂ para cada solução de fachada para a fase de pré-uso, que compreende as fases de extração das matérias-primas, produção dos materiais e componentes, transporte até a obra e a execução do edifício.

Tabela 8. Emissões de CO₂ para a Fase de Pré-uso

| Soluções | GWP (Kg.CO ₂ .eq/m ²) |
|----------|--|
| S 1 | 164,49 |
| S 2 | 181,54 |
| S 3 | 158,14 |
| S 4 | 180,99 |

Nota-se na Tabela 8 que as soluções com vidro incolor (S1 e S3) são as que emitem menos CO₂ durante a fase de pré-uso da edificação.

Para o mesmo tipo de vidro (S1 e S3 / S2 e S4), quando se altera de uma janela média para grande (WWR de 55% para 80%), as emissões de CO₂ reduzem em cerca de 3,9% no caso do vidro incolor e 0,3% no caso do vidro duplo. Nestes casos, a quantidade de material da área opaca presente no WWR de 55% representou um impacto maior e fez as emissões serem maiores que os casos com WWR de 80%.

Para o mesmo WWR (S1 e S2/ S3 e S4), quando se altera o tipo de vidro (de incolor para duplo), as emissões de CO₂ aumentam em cerca de 9,4% para a janela média (WWR=55%) e 12,6% para a janela grande (WWR=80%).

Assim, para identificar a contribuição dos materiais para as emissões de CO₂, a Figura 2 apresenta a solução S2, que possui as maiores emissões de CO₂ na fase de pré-uso (as demais soluções apresentam a mesma tendência de resultados).

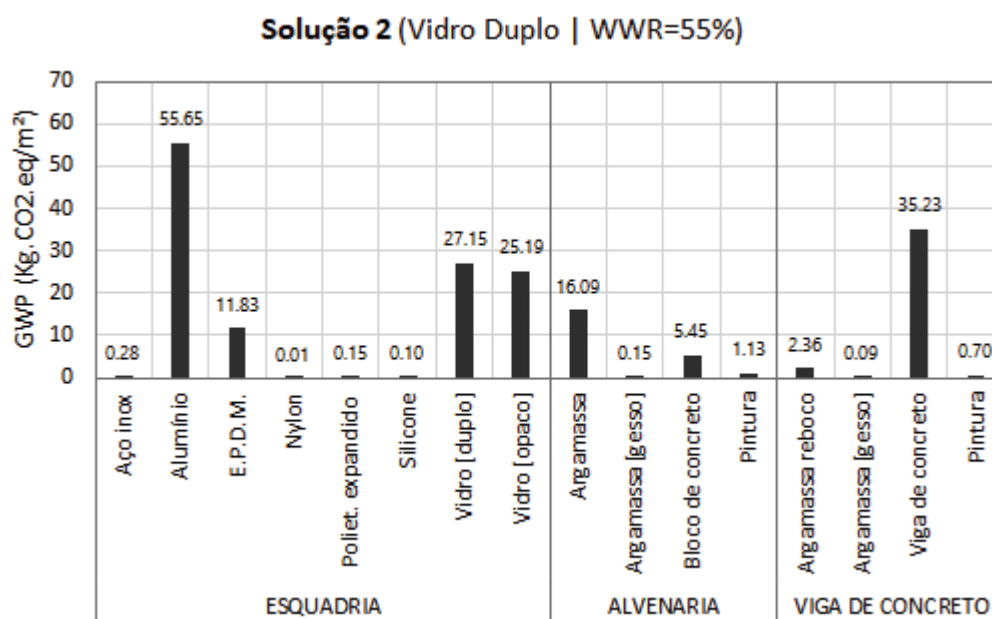


Figura 2 Contribuição dos materiais nas emissões de CO₂ incorporadas no edifício (solução 2).

A Figura 2 mostra que as maiores emissões deste tipo de solução de fachada advém em grande parte do tipo de vidro, do concreto (viga), mas principalmente do alumínio, fato também observado nos estudos de Taborianski e Prado (2012).

Muitos trabalhos afirmam que a fase de uso da edificação é a que mais emite CO₂ ao longo do ciclo de vida das edificações (Scheuer, Keoleian e Reppe, 2003; Kofoworola e Gheewala, 2008; Zabalza Bribián, Aranda Usón e Scarpellini, 2009; Azari, 2014; Komerska, Kwiatkowski e Rucińska, 2015). Para este estudo, foi realizada uma análise comparativa das emissões de CO₂ advindas do primeiro ano de uso da edificação e depois de 60 anos de utilização, conforme apresentado na Figura 3.

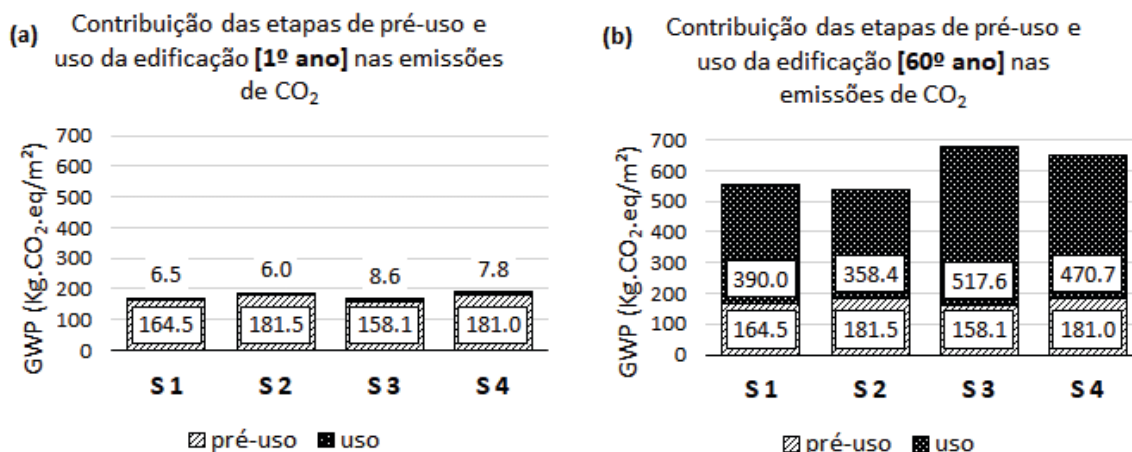


Figura 3 (a) Emissões de CO₂ no primeiro ano de uso da edificação e (b) Emissões de CO₂ após 60 anos de utilização.

Nota-se na Figura 3 (a) que durante o primeiro ano de utilização da edificação, a fase de pré-uso (produção dos materiais e construção do edifício) é a principal responsável pelas emissões de CO₂. Os processos industriais no Brasil consomem muita energia, causando grande impacto nas emissões de CO₂ (Taborianski and Prado, 2012), o que pode explicar o impacto dos materiais nesta fase do ciclo de vida do edifício.

Entretanto, passados 60 anos de utilização (Figura 3 (b)), as emissões de CO₂ advindas da fase de uso superam aqueles oriundos da produção dos materiais, o que significa que as emissões de CO₂ da fase de uso possuem um maior impacto do que a fase de pré-uso, confirmando o resultado dos estudos explicitados anteriormente. Ao mesmo tempo, é possível notar que emissões de CO₂, ao longo de 60 anos, tem seu impacto ampliado de acordo com o aumento do WWR, fato também verificado por Komerska, Kwiatkowski e Rucińska (2015).

A Tabela 9 apresenta a classificação dos casos de acordo com as emissões de CO₂ ao longo de 60 anos de vida útil, considerando as fases de pré-uso e uso.

Tabela 9. Classificação das Soluções de acordo com o GWP (Kg.CO₂.eq/m²) no Total de 60 anos

| | Soluções | GWP (Total 60 anos) |
|----|----------|---------------------|
| 1º | S 2 | 539,91 |
| 2º | S 1 | 554,51 |
| 3º | S 4 | 651,72 |
| 4º | S 3 | 675,69 |

Verifica-se, nesse sentido, que a solução com menor emissão de CO₂ ao longo de 60 anos é a que possui janela de tamanho médio (WWR=55%) e vidro duplo (S2), enquanto que a de maior emissão é a que possui uma janela grande (WWR=80%) e vidro incolor (S3).

Classificação geral dos âmbitos energético e ambiental

A Tabela 10 apresenta a classificação geral, de acordo com os âmbitos analisados neste trabalho. A classificação energética se deu em função do menor consumo energético e, a ambiental, de acordo com as menores emissões de CO₂ ao longo de 60 anos de vida útil da edificação.

Tabela 10. Classificação das Soluções de Acordo com os Âmbitos Energéticos e Ambientais

| | Classificação Energética (kWh/m ² /ano) | Classificação Ambiental (Kg.CO ₂ .eq/m ²) |
|----|---|---|
| 1° | S 2 | S 2 |
| 2° | S 1 | S 1 |
| 3° | S 4 | S 4 |
| 4° | S 3 | S 3 |

CONCLUSÃO

Este presente estudo teve como objetivo avaliar, sob os âmbitos energéticos e ambientais, soluções de fachada para edifícios de escritórios em São Paulo, no Brasil. Com a hierarquização dos resultados de acordo com as melhores soluções para cada aspecto, buscou-se gerar informações que possam auxiliar na tomada de decisão por parte dos projetistas.

De acordo com a classificação apresentada, o consumo de energia na fase de utilização demonstrou ter maior peso nos resultados deste estudo. E esse impacto fez com que as classificações nos dois âmbitos fossem idênticas. Sabe-se que o consumo energético advindo do sistema de ar condicionado influencia de sobremaneira as emissões de CO₂ durante a fase de utilização do edifício. Assim, como se pode verificar neste estudo, o consumo de energia ao longo da vida útil da edificação ultrapassou os impactos advindo dos materiais empregados na solução de fachada. Para se obter a melhor classificação energética (menor consumo com o ar condicionado) e ambiental (menores emissões de CO₂) para esse edifício, na cidade de São Paulo, é possível ter uma janela média e utilizar-se do vidro duplo.

Portanto, de acordo com o que foi avaliado neste estudo, investir em eficiência energética (para reduzir o consumo do ar condicionado) e selecionar de materiais que emitam menos CO₂ ao longo da vida útil da edificação pode ser um caminho para a obtenção de melhores projetos que, a longo prazo, causem menos impactos negativos ao meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro fornecido para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2005) NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ABNT (2008) NBR 16401-1: Instalações de ar-condicionado — Sistemas centrais e unitários Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ABNT (2013) NBR 15575-4: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ASHRAE (2009) ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta, USA.
- ASHRAE (2013) Standard 90.1-2013: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.
- Azari, R. (2014) 'Integrated energy and environmental life cycle assessment of office building envelopes', Energy and Buildings. Elsevier B.V., 82, pp. 156–162.
- Bueno, C. (2010) Avaliação de desempenho ambiental de edificações habitacionais: Análise comparativa dos sistemas de certificação no contexto brasileiro. Universidade de São Paulo.
- Bueno, C. (2014) Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil: Análise de Sensibilidade. Universidade de São Paulo.
- CEBRACE (2016) 'Características do Vidro Laminado Incolor', p. 1.
- Diakaki, C., Grigoroudis, E. and Kolokotsa, D. (2008) 'Towards a multi-objective optimization approach

- for improving energy efficiency in buildings', *Energy and Buildings*, 40(9), pp. 1747–1754.
- EERE, D. O. E. E. A. R. E.- (2013a) 'EnergyPlus'. Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies. Available at: www.energyplus.gov.
- EERE, D. O. E. E. A. R. E.- (2013b) 'Legacy Open Studio'. Developed by the National Renewable Energy Laboratory For the United States Department of Energy. Available at: www.energyplus.gov.
- Frischknecht, R. et al. (2005) 'The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(1), pp. 112–122.
- Google (2008) 'Google SketchUp'.
- Guardian (2010) 'Manual técnico Guardian - SunGuard: Vidros de Controle Solar e Eficiência Energética', p. 36. Available at: www.sunguardglass.com.
- INMETRO (2013) Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C). Brasil.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: Cambridge University Press. Available at: http://report.mitigation2014.org/spm/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers_approved.pdf.
- Kneifel, J. (2010) 'Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings', *Energy and Buildings*, 42(3), pp. 333–340.
- Kofoworola, O. F. and Gheewala, S. H. (2008) 'Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(6), pp. 498–511.
- Komerska, A., Kwiatkowski, J. and Rucińska, J. (2015) 'Integrated Evaluation of Co2eq Emission and Thermal Dynamic Simulation for Different Façade Solutions for a Typical Office Building', *Energy Procedia*, 78, pp. 3216–3221.
- Köppen, W. (1936) 'Das geographische System der Klimate', in KÖPPEN, W. . and GEIGER, R. (eds) *Handbuch der Klimatologie*. Berlin, Germany: Gebruder Borntrager, pp. 1–44.
- LABEEE (2015) Arquivos climáticos INMET 2015. Available at: <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2015>.
- Mendes, N. C., Bueno, C. and Ometto, A. R. (2016) 'Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos', *Production*, 26(1), pp. 160–175.
- Neves, L. de O. and Marques, T. H. T. (2017) 'Building envelope energy performance of high-rise office buildings in Sao Paulo city , Brazil', *Procedia Environmental Sciences*, 0.
- PRÉ-CONSULTANTS (2017) 'SimaPro, Software'. Amersfoort, Netherlands: Pré Consultants. Available at: <http://www.simapro.co.uk/aboutsimapro.html>.
- Saade, M. R. M., Silva, M. G. and Gomes, V. (2013) 'Methodological discussion and piloting of LCA-based environmental indicators for Brazilian building materials', in *CIB WORLD BUILDING CONGRESS*. Brisbane, Austrália, p. 12.
- Sansão, júlia H. (2011) *ANÁLISE AMBIENTAL DE ALVENARIAS EM BLOCOS: UMA DISCUSSÃO BASEADA NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E NO DESEMPENHO TÉRMICO DE ENVOLTÓRIAS*. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Santos, C. A. P. dos and Matias, L. (2006) *ITE50: Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. Lisboa, Portugal: Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC. Available at: www.lnec.pt.
- Scheuer, C., Keoleian, G. A. and Reppe, P. (2003) 'Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications', *Energy and Buildings*, 35(10), pp. 1049–1064.
- Souza, J. (2008) *Alternativas tecnológicas para edificações*. Vol.1. São Paulo, SP, Brasil: Editora Pini.
- Taborianski, V. M. and Prado, R. T. a (2012) 'Methodology of CO 2 emission evaluation in the life cycle of office building façades', *Environmental Impact Assessment Review*. Elsevier Inc., 33(1), pp. 41–47.
- UNIÃO EUROPEIA (2010) Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council: on the energy performance of buildings (EPBD recast), Official Journal of the European Union. Estrasburgo, França.
- Viracon, G. (2016) 'Características do Vidro Opaco', p. 1.
- Westphal, F. S. and Andreis, C. (2016) 'Influence of Glazed Façades on Energy Consumption for Air Conditioning of Office Buildings in Brazilian Climates', *Journal of Engineering Research and Application*, 6(11), pp. 54–60.
- Zabalza Bribián, I., Aranda Usón, A. and Scarpellini, S. (2009) 'Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification', *Building and Environment*, 44(12), pp. 2510–2520.