

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA
ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

RAMI SANTOS BEZERRA DA SILVA

**Influência do sistema de envoltória no desempenho
termoenergético de uma edificação comercial**

SÃO PAULO - SP

2022

RAMI SANTOS BEZERRA DA SILVA

Influência do sistema de envoltória no desempenho termoenergético de uma edificação comercial

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética, sob a orientação do Prof. Eduardo Yamada.

SÃO PAULO - SP

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

AGRADECIMENTOS

Tenho orgulho em expressar meus sinceros agradecimentos:

A Deus, por minha vida, saúde e por tudo que sou e construí.

A Universidade de São Paulo, por sua respeitosa equipe de docentes e funcionários, que direta e indiretamente contribuíram com o resultado da minha evolução acadêmica.

Aos meus amigos e colegas de curso, que compartilharam momentos de dedicação e concentração, em busca de nossos objetivos acadêmicos, tornando-os memoravelmente especiais, recompensadores, alegres e inesquecíveis.

Aos meus familiares, um agradecimento especial. Quero agradecer pelo carinho, paciência e compreensão, pelo incentivo e amor despendido. Dedico a vocês, toda minha conquista e sucesso.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Matriz Elétrica brasileira em 2002

Figura 2.1 - Partes da edificação que compõem a envoltória

Figura 2.2 - Característica da transmitância térmica em diferentes estações do ano

Figura 2.3 - Ilustração e fórmula da transmitância térmica

Figura 2.4 - Parede de concreto maciço de 12cm de largura, sem revestimento externo

Figura 2.5 - Parede com 14cm de bloco de concreto, com revestimento interno e externo

Figura 2.6 - Parede com 14cm de bloco cerâmico, com revestimento interno e externo

Figura 2.7 - Ilustração e fórmula da capacidade térmica

Figura 2.8 - Perfil diário da temperatura do ar exterior em relação ao do ar interior, típico de um ambiente com alta inércia térmica

Figura 2.9 - Perfil horário da temperatura do ar exterior em relação ao do ar interior, típico de um ambiente com alta inércia térmica

Figura 2.10 - Perfil horário da temperatura do ar exterior em relação ao do ar interior, típico de um ambiente com baixa inércia térmica

Figura 2.11 – Zona 08

Figura 2.12 - Parede de concreto maciço de 12cm de largura, sem revestimento externo

Figura 2.13 - Parede com 14cm de bloco de concreto, com revestimento interno e externo

Figura 2.14 - Parede com 14cm de bloco cerâmico, com revestimento interno e externo

Figura 2.15 - Edificação com alta absorptância

Figura 2.16 - Edificação com baixa absorptância

Figura 2.17 - Diferenças de temperaturas superficiais entre as cores

Figura 2.18 - Taxa de metabolismo por atividade

Figura 2.19 - Fator de vestimenta térmica

Figura 3.1 - Exemplo de composição de um tipo de telhado verde

Figura 3.2 - Contribuição na temperatura do ambiente interno por tipo de cobertura

Figura 3.3 - Exemplo de telhado intensivo com plantações mais densas

Figura 3.4 - Exemplo de telhado extensivo com plantações de menor porte

Figura 3.5 – Brises verticais

Figura 3.6 – Brises horizontais

Figura 3.7 – Comportamento do vidro comum quando incide radiação solar

Figura 3.8 – Local de instalação do vidro low-e de acordo com a região

Figura 4.1 – Bloco administrativo de uma instituição de ensino

Figura 4.2 – Simulação através de software de modelagem

Figura 4.3 – Simulação através de software de modelagem

Figura 4.4 – Simulação através de software de modelagem com brise (1)

Figura 4.5 – Simulação através de software de modelagem com brise (2)

Figura 4.6 – Simulação através de software de modelagem com brise (3)

Figura 4.7 – Laje maciça de 10cm de espessura, sem telhamento

Figura 4.8 – Telhado vegetado intensivo

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Transmitância térmica admissível para cada tipo de vedação externa

Tabela 2.2 – Requisitos mínimos de capacidade térmica para paredes externas

Tabela 2.3 – Conforto térmico com os parâmetros da ASHRAE 55-2017

Tabela 3.1 – Catálogos de propriedades térmicas de vidros

Tabela 4.1 – Numeração dos cenários conforme envoltória

Tabela 4.2 – Parâmetros dos vidros externos

Tabela 4.3 – Numeração dos cenários conforme cobertura da envoltória

Tabela 5.1 – Numeração dos cenários conforme cobertura da envoltória

Tabela 5.2 – Consumo em kWh mensal e anual com o sistema de envoltória - cenário 01

Tabela 5.3 – Consumo em kWh mensal e anual com o sistema de envoltória - cenário 06

Tabela 5.4 – Redução de consumo médio em kWh anual separado por local

Tabela 5.5 – Custo de energia mensal e anual com o sistema de envoltória - cenário 01

Tabela 5.6 – Custo de energia mensal e anual com o sistema de envoltória - cenário 06

Tabela 5.7 – Custo de energia anual e projeção de caixa

Tabela 5.8 – Custo de energia anual e projeção de caixa

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Indicação de *time lag* devido inércia térmica

Gráfico 2.2 – Diferenças de temperaturas superficiais entre as cores

Gráfico 2.3 – Conforto térmico com os parâmetros da ASHRAE 55

Gráfico 4.1 – Temperatura de bulbo seco externo ao longo do dia

Gráfico 4.2 – Temperatura de bulbo seco externo e temperatura interna do ambiente de acordo com cenário 01

Gráfico 4.3 – Temperatura de bulbo seco externo e temperaturas internas com: vidro comum sem brise e vidro comum com brise.

Gráfico 4.4 – Temperatura de bulbo seco externo mais cenários 01,02 e 03

Gráfico 4.5 – Temperatura de bulbo seco externo e temperatura interna do ambiente com a laje sem proteção

Gráfico 4.6 – Temperatura de bulbo seco externo e temperatura interna do ambiente com a laje sem proteção

Gráfico 5.1 – Investimento inicial considerando os seis andares

Gráfico 5.2 – Payback simples considerando toda a edificação

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAVA - Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

CLO - Clothing insulation

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

ESG - Environmental, social and governance

FS – Fator Solar

GBC Brasil – Green Building Council Brasil

kWh – kilowatt hora

LEED - Leadership in Energy and Environmental Design

MET – Metabolic rate

NBR – Norma Brasileira

PMV – Predicted Mean Vote

TE – Tarifa de Energia

TCU - Tribunal de Contas da União

TUSD – Tarifa do uso do sistema de distribuição

USGBC – United States Green Building Council

Ilo – Investimento inicial

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia

MME – Ministério de Minas e Energia

ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

AQUA – Alta Qualidade Ambiental

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	11
1.2 OBJETIVO	12
1.3 METODOLOGIA	12
1.4 ESTADO DA ARTE	13
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	15
2. ENVOLTÓRIA E SUAS CARACTERÍSTICAS	16
2.1 INTRODUÇÃO	16
2.2 TRANSMITÂNCIA TÉRMICA.....	17
2.3 CAPACIDADE TÉRMICA	20
2.4 ABSORTÂNCIA	25
2.5 CONFORTO TÉRMICO.....	26
3. AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA ENVOLTÓRIA E SUAS TECNOLOGIAS	29
3.1 INTRODUÇÃO	29
3.2 TELHADO VERDE	30
3.3 BRISES	32
3.4 VIDROS LOW-E	34
4. ESTUDO DE CASO E SIMULAÇÃO ENERGÉTICA	35
4.1 INTRODUÇÃO	35
4.2 PAREDES	38
4.3 COBERTURA.....	43
5. ANÁLISE ENERGÉTICA E ECONÔMICA DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA.....	46
5.1 ANÁLISE ENERGÉTICA	46
5.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	49
6. CONCLUSÕES FINAIS	52
6.1 INTRODUÇÃO.	52

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Em um país localizado próximo a linha do Equador, como o Brasil, encontra-se altíssima incidência de irradiação solar, se posicionando no topo e sendo mundialmente reconhecido como um dos melhores países para implantação e geração de usinas fotovoltaicas. A localização do país e aliado ao movimento de translação do planeta, favorecem este clima tropical que atinge grandes temperaturas ao longo do ano. Recentemente, a energia solar centralizada ultrapassou as pequenas centrais hidrelétricas e se tornou a quarta maior fonte de geração de eletricidade, sendo responsável por 3% da matriz elétrica. Lembrando que a primeira usina centralizada foi apenas instalada em 2017 (ANEEL, 2022). Referente as gerações distribuídas, fontes com geração próximo a carga, o crescimento é ainda maior já que desde 2020 vem crescendo impressionantes 230% ao ano no Brasil (CANAL SOLAR, 2020).

Se por um lado a alta incidência de irradiação solar é tido como excelente oportunidade para a composição de uma matriz elétrica limpa e renovável, por outro lado é motivo de preocupação. O Brasil, pelas mesmas razões de ser um excelente gerador de energia fotovoltaica, é um país tropical e consequentemente com altas temperaturas predominando na maioria de seu território durante o ano. Estudos mostram que o consumo de energia elétrica por condicionadores de ar no setor residencial mais que triplicou nos últimos 12 anos, e a compra de novos aparelhos por residências subiu 9% ao ano entre 2005 e 2017, duplicando o número de aparelhos na casa dos brasileiros. (EPE, 2022). Segundo relatórios, sabe-se que a energia utilizada para o conforto térmico é o uso final em edifícios que mais cresce no mundo (EPE, 2018). Esta crescente demanda por climatização artificial gera grande impacto sobre o sistema elétrico brasileiro, não só na geração de energia mas também em todo o conjunto que deve ser capaz de atender a demanda via sistemas de distribuição ainda mais robustos que impactam diretamente no custo do sistema energético brasileiro. As edificações comerciais também solicitam grandes

demandas de energia do sistema elétrico. Estima-se que o uso de ar-condicionado seja responsável por 30% a 40% do consumo total de energia neste tipo de empreendimento (ABRAVA, 2017).

1.2 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo realizar estudos e pesquisas sobre o sistema de envoltória, entender os fenômenos térmicos relacionados e buscar a melhor solução para, em seguida realizar, um estudo de caso de um bloco de edificação de ensino (colégio), analisando sua envoltória e propondo soluções e estratégias passivas na redução da demanda, de modo a trazer conforme térmico para o ambiente interno e consequentemente maior eficiência energética a operação da edificação.

Serão realizados estudos, focados na envoltória do empreendimento, a fim de verificar as tecnologias disponíveis no mercado que possam trazer conforto térmico para os ambientes, com a redução na utilização de climatização artificial e consequentemente gerando reduções significativas no consumo de energia total. *Softwares* de simulações energéticas serão utilizados com o intuito de comparar os resultados obtidos entre a situação atual (*status quo*) e as possíveis soluções de eficiência que poderiam ser implementadas.

1.3 Metodologia

O presente trabalho foi realizado seguindo as etapas conforme abaixo.

Inicialmente efetuou-se uma pesquisa focada na engenharia sustentável e bioclimática, para melhor entendimento do conforto de ambiente e funcionamento da condutividade e isolamento térmico, direcionada as envoltórias de edificações.

Após maior conhecimento do tema, verificou-se no mercado as tecnologias atuais disponíveis utilizadas como ações de eficiência energética relacionadas a conforto térmico e proteção solar como brises, vidros de controle solar low-e e telhado verde.

Para concluir o trabalho foram realizadas simulações energéticas através de software específico, utilizando, como estudo de caso, um bloco de edificação de uma instituição de ensino para comparar cada uma das tecnologias atuais disponíveis e seus respectivos resultados.

1.4 Estado da Arte

Em um passado não tão distante tivemos a “crise do apagão” entre 2001 e 2002. Na época, 89,6% da energia elétrica gerada em nosso país era proveniente de fontes hídricas (MME, 2002).

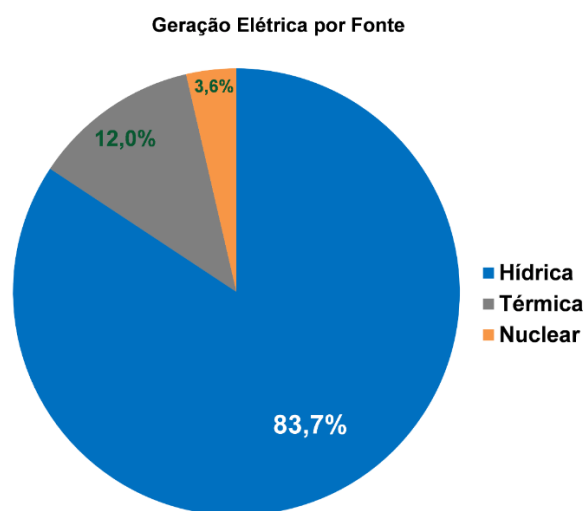


Figura 1.1 – Matriz Elétrica brasileira em 2002.

Fonte: MME, 2002.

Previam-se consideráveis possibilidades de cortes de grandes dimensões no país, sobretudo nos grandes centros urbanos, obrigando o governo federal a criar diversas medidas e campanhas de racionamento para que a população fizesse o uso consciente deste importante insumo. O bom resultado foi alcançado e maiores cortes foram evitados, porém deixando grandes sequelas ao país. De acordo com o TCU, esta crise gerou um prejuízo de R\$45,2 bilhões aos cofres públicos (Portal TCU, 2009).

Após a crise, ficou claro a importância não só da diversificação da geração de energia elétrica, bem como seu uso consciente e de forma energeticamente eficiente. Referente ao primeiro ponto, conquistamos passos importantes pois

atualmente a fonte hídrica representa “apenas” 60% da matriz elétrica brasileira, devido ao grande crescimento de fontes, também renováveis, como eólica e solar. Em contrapartida, no assunto de eficiência energética ainda estamos caminhando paulatinamente. De acordo com o United States Green Building Council, criador do sistema LEED de classificação de edifícios sustentáveis, o Brasil ocupa a quarta posição, sem considerar os EUA, com mais de 530 projetos certificados pelo LEED, totalizando mais de 16,74 milhões de metros quadrados brutos de espaço certificado (GBC Brasil, 2018). Apesar do país figurar entre os cinco do mundo, quando se compara a metragem quadrada certificada com a metragem quadrada total do país, constata-se que representa um percentual ínfimo. Analisando os dados mais a fundo, nota-se ainda que as certificações LEED são predominantemente em edificações novas, ou seja, já construídas com esta característica. Portanto, entende-se que há uma quantidade descomunal de empreendimentos já construídos que estão sendo esquecidos quando o assunto é eficiência energética. Estas edificações, passíveis de diversas ações simples e de custo acessível que trarão grandes impactos positivos no consumo, podem ser um passo importante para o melhor gerenciamento da demanda de energia elétrica. No Brasil também há o PROCEL, criado em dezembro de 1985 pelo Governo Federal (MME), com o objetivo de promover a utilização da energia elétrica de forma consciente e combater seu desperdício. Dentro deste programa há a ENCE que, após instrução normativa em 2014, passou a ser obrigatória em edifícios públicos federais novos ou então edificações em retrofit. Basicamente as etapas de implementação são divididas em duas partes, sendo que a primeira consiste na avaliação do projeto de engenharia, que será analisada por laboratório credenciado, e a segunda refere-se a avaliação da edificação já construída que também será realizada por auditor credenciado. A envoltória, objeto de estudo desta monografia, possui participação importante na certificação sendo responsável por 30% de peso da avaliação dos sistemas (os outros 30% são de iluminação e 40% referente a condicionamento de ar). Outra certificação internacional com considerável participação no país é a AQUA, oriunda da francesa *Démarche HQE – Haute Qualité Environnementale*, que é aplicada exclusivamente pela Fundação Vanzolini no Brasil. A estrutura de análise é

dividida em catorze categorias que são segregadas em quatro temas principais, são eles: Meio ambiente, saúde, conforto e energia. Cada um dos quatro temas é avaliado com notas de um a cinco estrelas e de acordo com o resultado final o nível de certificação irá variar entre “passa, bom, muito bom, excelente e excepcional”. Além da economia e uso eficiente dos recursos da edificação em si, como presente nas demais certificações, na AQUA é levado em consideração aspectos como conforto acústico, visual e olfativo.

Conforme comentado anteriormente, um alto percentual de consumo do país é destinado a climatização artificial, responsável pelo conforme térmico nos ambientes. Porém com medidas de proteção solar, que dispensam o uso de energia elétrica, e consequentemente melhor isolamento, traremos o mesmo conforto para os usuários todavia com menor consumo de energia, a chamada eficiência energética.

1.5 Organização do trabalho

O trabalho foi organizado e dividido em cinco capítulos distintos facilitando o entendimento de cada parte do trabalho. A seguir estão descritos cada assunto com suas respectivas propriedades.

Foi descrito no capítulo 2 o conceito de envoltória, elementos que a compõem e suas características térmicas, além da importância e impacto da mesma sobre a edificação.

No capítulo 3, verificou-se as tecnologias disponíveis no mercado focado nas paredes e coberturas, que poderiam contribuir como ações de eficiência energética para melhor operação da edificação.

No capítulo 4 foi descrito o estudo de caso e apresentado as simulações energéticas efetuadas através do software de desempenho termoenergético.

O capítulo 5 finda o estudo desenvolvido e apresenta os resultados obtidos durante a realização do mesmo. Concluindo assim o projeto em questão e todos os assuntos aqui apresentado.

2. ENVOLTÓRIA E SUAS CARACTERÍSTICAS

2.1 Introdução

A eficiência energética em edificações está diretamente conectada à arquitetura sustentável adaptada ao clima ou então, mais comumente conhecida como, arquitetura bioclimática (adequação das características construtivas de uma edificação para melhor aproveitamento das especificidades do clima local). Em outras palavras, é a arquitetura capaz de se beneficiar das condições climáticas locais em prol do conforto do ambiente interno da edificação, com pouco ou até nenhum consumo energético. Possuindo a envoltória como principal protagonista e conseqüentemente considerável influência no desempenho termoenergético do empreendimento.

Conceitualmente, a envoltória pode ser definida como o conjunto de elementos construtivos que estão em contato com o meio exterior, ou seja, que compõem os fechamentos dos ambientes internos em relação ao ambiente externo (PROCEL, 2013). Em outras palavras, a envoltória pode ser considerada a pele da edificação, com a ressalva que estes elementos que a compõe estão acima do nível do solo. Enquanto as partes construídas no subsolo, devem ser desconsideradas.

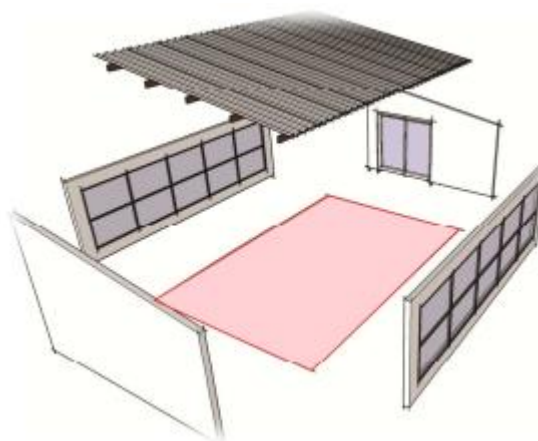


Figura 2.1 – Partes da edificação que compõem a envoltória. O piso pode ser considerado envoltória quando está em contato com o meio exterior. Fonte: Manual para Aplicação do RTQ-C (PROCEL, 2013).

Como estes elementos estão em contato com o meio exterior, e consequentemente a irradiação solar incide sobre os mesmos, é imprescindível conhecer os índices de especificação de desempenho térmico destes materiais pois possuem grande importância e, portanto, trarão impactos significativos para o conforto interno dos ambientes.

2.2 Transmitância Térmica

A transmitância térmica ou coeficiente global de transferência de calor, também globalmente conhecida como *U value*, é um dos índices mais importantes para correta definição dos elementos da envoltória em relação ao conforto térmico. Por definição, de acordo com a norma de desempenho brasileira ABNT NBR 15.575-2013, “é a transmissão de calor em unidade de tempo e através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo”. Simplificando o entendimento, é o quanto um determinado material conduz de calor de uma face da parede até a outra. Em termos práticos, as paredes externas estão expostas ao sol e consequentemente absorvem esta radiação, fazendo com que este calor penetre e aumente a temperatura do interior do ambiente. Lembrando que a transferência de calor ocorre pelo fenômeno chamado de condução, toda vez que houver diferença de temperatura entre um lado mais quente e outro lado mais frio. O objetivo de materiais com alta transmitância térmica é evitar perdas e ganhos de calor excessivo entre o meio externo e interno através da envoltória.

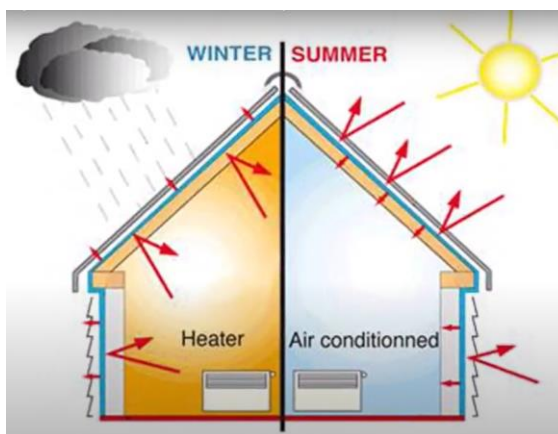


Figura 2.2 – Característica da transmitância térmica em diferentes estações do ano.

Fonte: (Happho, 2022).

Quanto menor o *U value* deste material, melhor será seu desempenho como isolante e consequentemente um alto *U value*, entende-se que o elemento é um mau isolante.



Figura 2.3 – Ilustração e fórmula da transmitância térmica. Fonte: (CA2, 2019).

A norma de desempenho brasileira ABNT NBR 15.220-3, em seu anexo C, traz recomendações e diretrizes referente a transmitância térmica para paredes e coberturas.

Tabela C.2 — Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa

Vedações externas		Transmitância térmica – U W/m².K	Atraso térmico - φ h	Fator solar - FS _o %
Paredes	Leve	$U \leq 3,00$	$\varphi \leq 4,3$	FS _o $\leq 5,0$
	Leve refletora	$U \leq 3,60$	$\varphi \leq 4,3$	FS _o $\leq 4,0$
	Pesada	$U \leq 2,20$	$\varphi \geq 6,5$	FS _o $\leq 3,5$
Coberturas	Leve isolada	$U \leq 2,00$	$\varphi \leq 3,3$	FS _o $\leq 6,5$
	Leve refletora	$U \leq 2,30.FT$	$\varphi \leq 3,3$	FS _o $\leq 6,5$
	Pesada	$U \leq 2,00$	$\varphi \geq 6,5$	FS _o $\leq 6,5$

Tabela 2.1 – Transmitância térmica admissível para cada tipo de vedação externa.

Fonte: (NBR 15220-3, 2005).

Seguem abaixo exemplos de materiais comumente encontrados nas construções brasileiras com alto, médio e baixo valor de transmitância térmica, respectivamente.

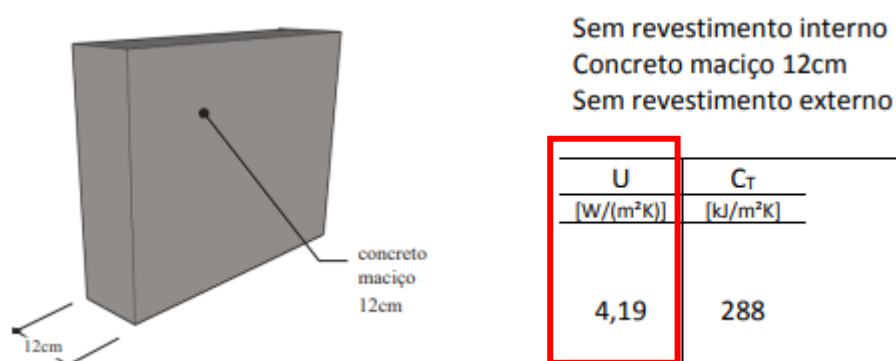


Figura 2.4 – Parede de concreto maciço de 12cm de largura, sem revestimento externo. Fonte: ANEXO GERAL V – CATÁLOGO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE PAREDES (INMETRO, 2013).

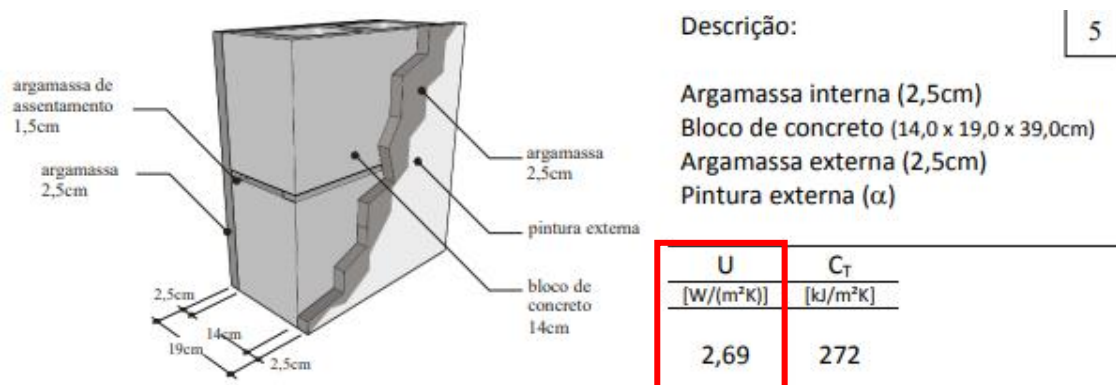


Figura 2.5 – Parede com 14cm de bloco de concreto, com revestimento interno e externo. Fonte: ANEXO GERAL V – CATÁLOGO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE PAREDES (INMETRO, 2013).

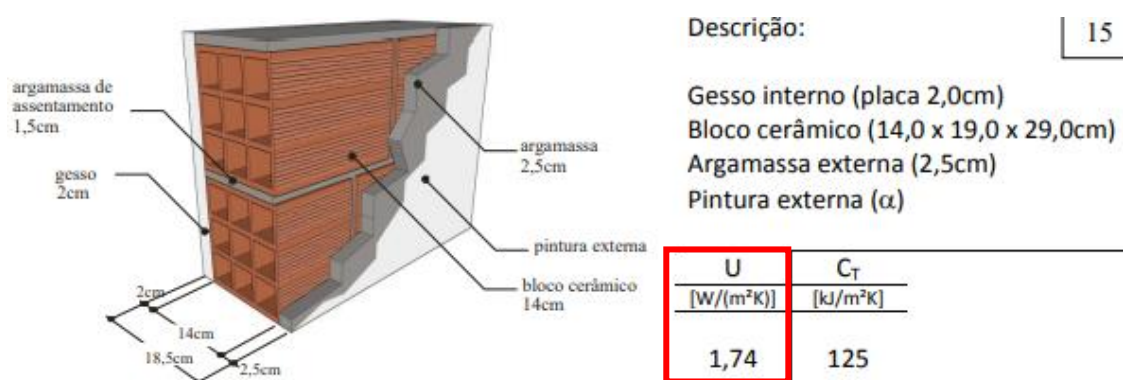


Figura 2.6 – Parede com 14cm de bloco cerâmico, com revestimento interno e externo. Fonte: ANEXO GERAL V – CATÁLOGO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE PAREDES (INMETRO, 2013).

2.3 Capacidade Térmica

Outro índice de extrema importância e também mencionado nas normas de desempenho energético é a capacidade térmica ou também conhecida como inércia térmica. Por definição, de acordo com a norma de desempenho brasileira ABNT NBR 15.575-2013, “é a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema”. Sua unidade é em $\text{kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Em outras palavras é a quantidade de calor que deve ser absorvido ou cedido por um corpo para que ocorra variação de um grau Celsius, ou seja, quanto calor o sistema “rouba” do ar interno.

Materiais de inércia térmica elevada são conhecidos pela alta capacidade de armazenar calor, também popularmente conhecido como bateria térmica. Sua principal característica é a capacidade de contrariar as variações de temperatura no seu interior, ou seja, de reduzir a transferência ou transmissão de calor. Isto acontece devido à sua capacidade de acumular calor nos elementos construtivos. A alta inércia térmica é particularmente benéfica em regiões de clima mais seco onde há uma grande diferença entre as temperaturas diurnas e noturnas externas.



Figura 2.7 – Ilustração e fórmula da capacidade térmica. Fonte: (CA2, 2019)

Uma importante característica de materiais de alta inércia térmica é o *damping ratio* ou achatamento da amplitude da temperatura do ar interior conforme ilustrado no gráfico abaixo. Com esta amplitude reduzida, podemos manter a temperatura interna dentro de um *range* de conforto térmico, reduzindo ou até eliminando a necessidade de climatizadores artificiais. Durante o dia o

elemento com alta inércia térmica absorverá calor do ambiente, fazendo com que reduza a temperatura interna do local e consequentemente seu pico.

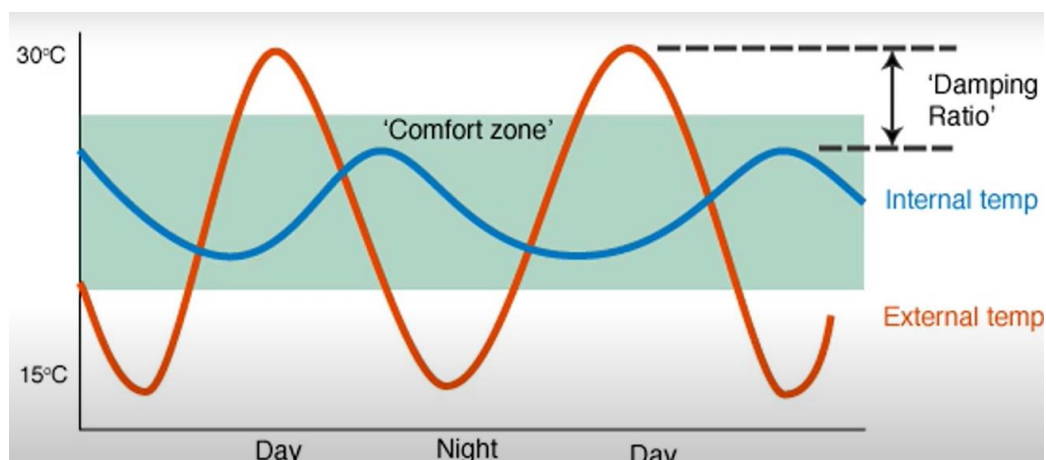


Figura 2.8 – Perfil diário da temperatura do ar exterior em relação ao do ar interior, típico de um ambiente com **alta inércia térmica**. Fonte: Contribuição da inércia térmica na eficiência energética (BRITO, 2015).

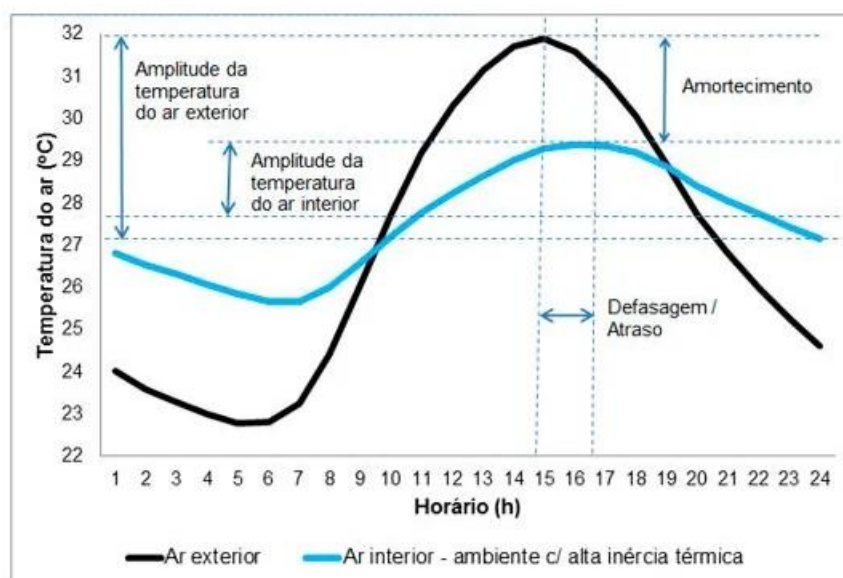


Figura 2.9 – Perfil horário da temperatura do ar exterior em relação ao do ar interior, típico de um ambiente com **alta inércia térmica**. Fonte: Contribuição da inércia térmica na eficiência energética (BRITO, 2015).

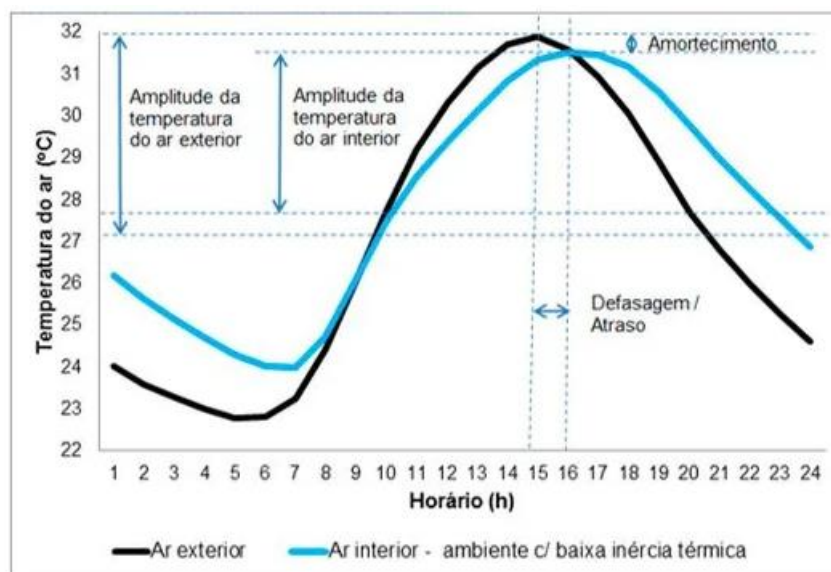


Figura 2.10 - Perfil horário da temperatura do ar exterior em relação ao do ar interior, típico de um ambiente com **baixa inércia térmica**. Fonte: Contribuição da inércia térmica na eficiência energética (BRITO, 2015).

Outra propriedade importante de elementos com alta inércia térmica é o *Time lag* ou atraso das temperaturas máximas, que pode ser exemplificado conforme gráfico abaixo.

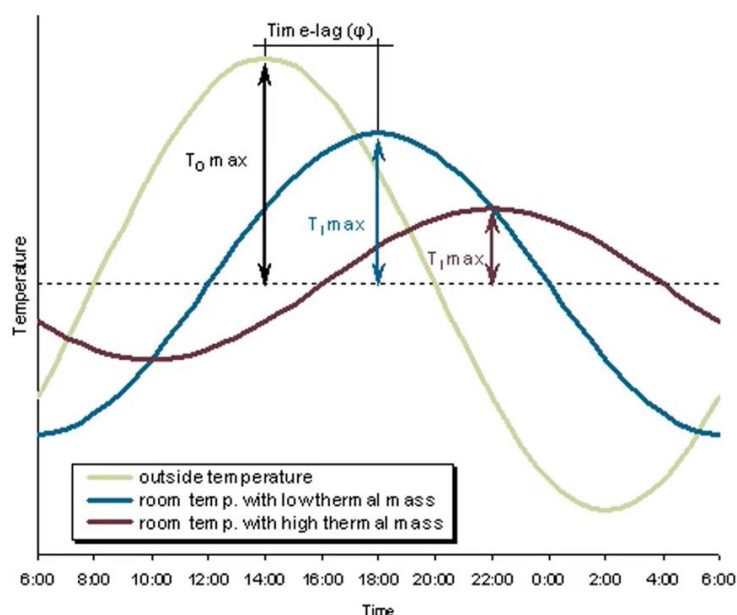


Gráfico 2.1 – Indicação de *time lag* devido inércia térmica. Fonte: (DavidDarling, 2016).

A linha verde representa a variação de temperatura do ar externo ao longo do dia, a linha azul representa um ambiente com baixa inércia térmica e a linha

marrom representa um local com alta inércia térmica. Pelo gráfico é possível constatar que o ambiente representado pela linha marrom possui seu pico de temperatura muito mais tarde, 22:00, contra 18:00 e 14:00 dos demais. Isto ocorre justamente pela propriedade de armazenar calor durante o dia, reter por algumas horas e liberar calor para o ambiente horas depois, já quando o ambiente externo está mais frio.

De acordo com a norma de desempenho ABNT NBR 15.575, calculando pelo método simplificado, é exigido paredes externas que devem ter capacidade térmica maior ou igual a 130 kJ/m².K, exceto na zona 8 onde não há requisito.

Tabela 14 – Capacidade térmica de paredes externas

Capacidade térmica (CT) kJ/m ² .K	
Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7	Zona 8
≥ 130	Sem requisito

Tabela 2.2 – Requisitos mínimos de capacidade térmica para paredes externas. Fonte: (NBR 15575-1, 2010).



Figura 2.11 – Zona 08. Fonte: (NBR 15575-1, 2010).

Seguem abaixo exemplos de materiais comumente encontrados nas construções brasileiras com alto, médio e baixo valor de capacidade térmica, respectivamente.

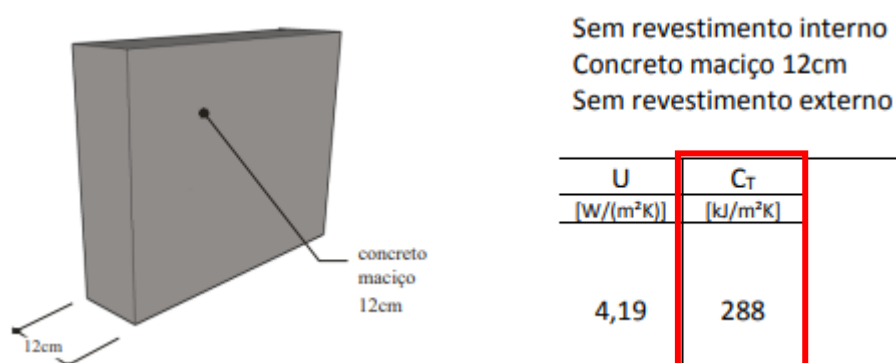


Figura 2.12 – Parede de concreto maciço de 12cm de largura, sem revestimento externo. Fonte: ANEXO GERAL V – CATÁLOGO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE PAREDES (INMETRO, 2013).

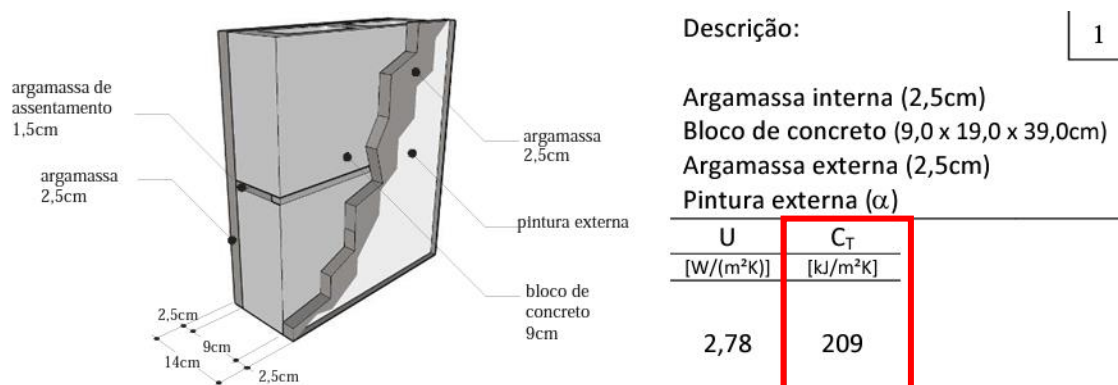


Figura 2.13 – Parede com 14cm de bloco de concreto, com revestimento interno e externo. Fonte: ANEXO GERAL V – CATÁLOGO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE PAREDES (INMETRO, 2013).

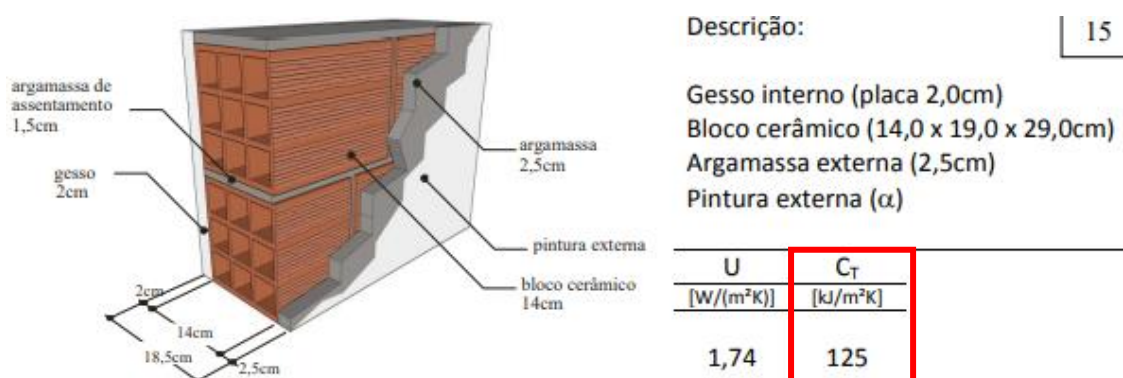


Figura 2.14 – Parede com 14cm de bloco cerâmico, com revestimento interno e externo. Fonte: ANEXO GERAL V – CATÁLOGO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE PAREDES (INMETRO, 2013).

2.4 Absortância

Assim como a transmitância e inércia térmica, a absortância também possui papel importante no desempenho termoenergético de uma edificação. Sua definição, de acordo com a norma ABNT NBT 15575, “é o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície”. Ou seja, o fator que define a razão entre a energia solar absorvida por uma superfície e a energia total incidente sobre a mesma.

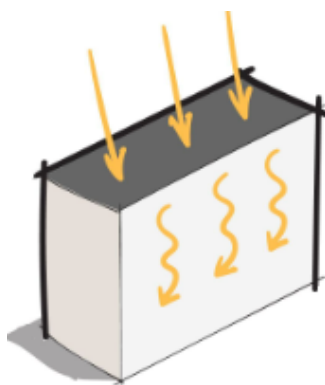


Figura 2.15 – Edificação com alta absortância (cor escura).

Fonte: (UGREEN, 2021)

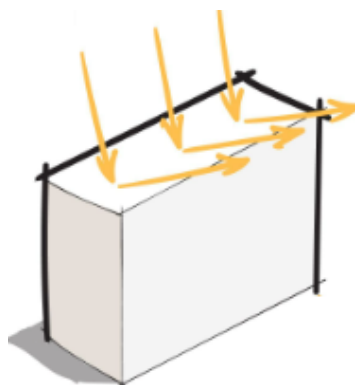


Figura 2.16 – Edificação com baixa absortância (cor clara).

Fonte: (UGREEN, 2021)

As cores têm impacto extremamente significativos no índice de absortância, sendo as cores claras que possuem o menor fator e consequentemente mais recomendadas para ambientes quentes no qual não é

desejado absorver este calor. As cores mais escuras, por sua vez, possuem alto fator e, portanto, maior transferência de calor para o ambiente interno.

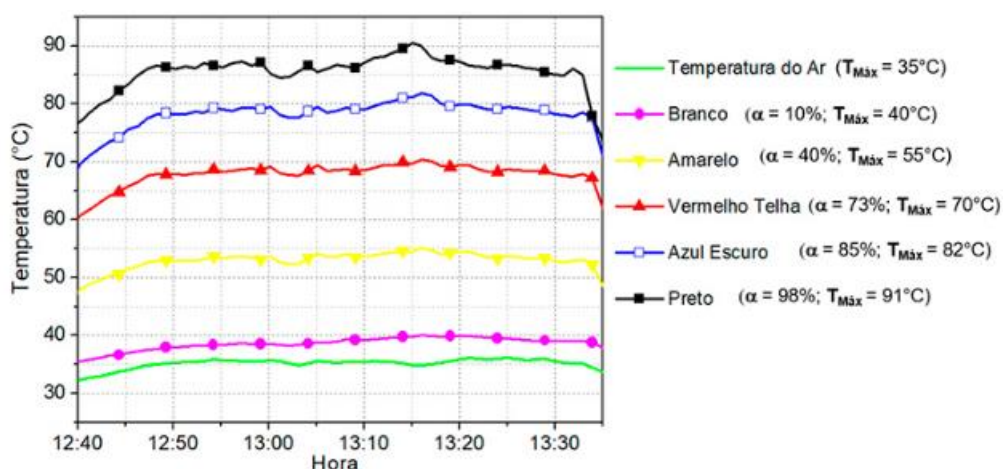


Gráfico 2.2 – Representação de absorção de cores

Fonte: KA Dornelles (USP, 2008)



Figura 2.17 – Diferenças de temperaturas superficiais entre as cores

Fonte: KA Dornelles (USP, 2008)

2.5 Conforto Térmico

De acordo com a norma americana ASHRAE 55-2017, o conforto térmico é definido como o estado mental que expressa satisfação do homem com o ambiente que o circunda. Esta busca pelo conforto ideal traz diversas melhorias para a qualidade de vida humana como, além da satisfação já mencionada acima, a performance em atividades perceptivas, intelectuais e manuais, resultando em melhor rendimento. Outro impacto importante é referente a conservação de energia. Quando são conhecidas as condições e os parâmetros

relativos ao conforto térmico dos ocupantes do ambiente, evitam-se desperdícios como calefação e refrigeração, muitas vezes desnecessários.

Para atingirmos este conforto térmico, temos diversas variáveis dependentes do ser humano, como:

1. MET – *metabolic rate*: Devido a diferença de calor produzido pelo corpo a cada respectiva atividade em andamento.



Figura 2.18 – Taxa de metabolismo por atividade de acordo com a ASHRAE 55-2017.

Fonte: (Simscale, 2022)

2. CLO – *clothing insulation*: Isolação devido a vestimenta da pessoa no local. Unidade de medição da resistência térmica da roupa. (1 clo= 0,155 m² °C/W)

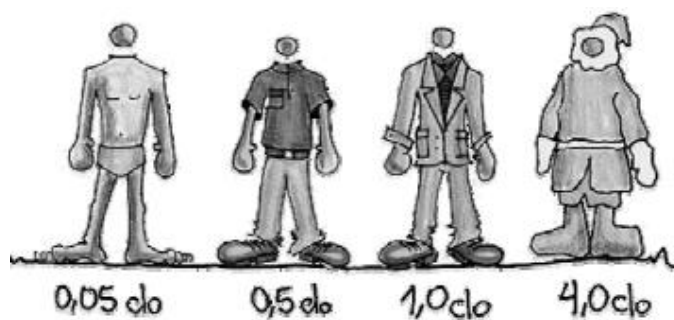


Figura 2.19 – Fator de vestimenta térmica de acordo com a ASHRAE 55-2017.

Fonte: (Universidade Federal de Santa Catarina, 2018)

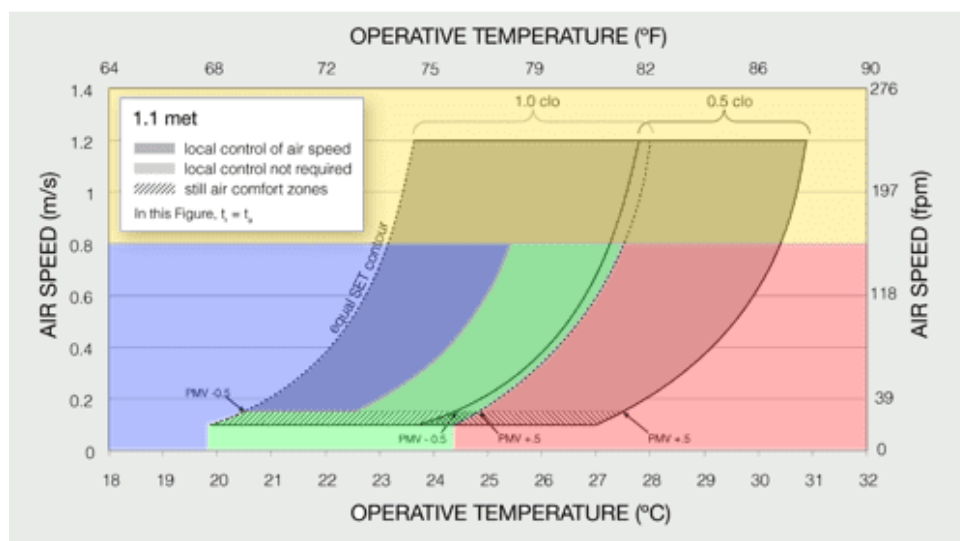
3. PMV – *Predicted Mean Vote*: Traduzido como voto médio estimado. É o fator que indica o valor médio de sensação de conforto térmico de um grupo de pessoas situadas no ambiente, segundo a escala de sensações de 7 pontos.

+3	• Muito quente
+2	• Quente
+1	• Levemente quente
0	• Neutro
-1	• Levemente frio
-2	• Frio
-3	• Muito frio

Tabela 2.3 – Conforto térmico com os parâmetros da ASHRAE 55-2017.

Fonte: (Universidade Federal de Santa Catarina, 2018)

Com estes dados em mãos, é possível ter um resultado mais assertivo referente a temperatura de operação ideal para o ambiente proposto:



Comfortable | Too Hot | Too Cold | Too Drafty

Gráfico 2.3 – Conforto térmico com os parâmetros da ASHRAE 55-2017.

Fonte: (Simscale, 2022)

A insatisfação com o ambiente térmico pode ser causada pela sensação de desconforto causado pelo frio ou calor. Quando há diferenças entre o calor gerado pelo corpo humano e o calor cedido para o ambiente, ou seja, quando o balanço térmico não é estável.

3. AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA ENVOLTÓRIA E SUAS TECNOLOGIAS

3.1 Introdução

Conforme comentado anteriormente, a envoltória é considerada a pele da edificação e consequentemente possui elevada relevância em seu desempenho térmico. Antigamente, com a democratização de aparelhos de ar-condicionado e outras tecnologias para aquecer e resfriar, a engenharia bioclimática foi deixada em segundo plano já que estas máquinas eram capazes de trazer o tão esperado conformo térmico.

Hoje em dia, com o alto custo de energia elétrica e a busca constante pelo uso consciente de recursos, as certificações sustentáveis como LEED, AQUA e BREEM estão ganhando cada vez mais força, impulsionados também pela Governança ambiental, social e corporativa ESG (*environmental, social and governance*). “De acordo com a GBC Brasil, responsável pelo LEED no país, a média de reduções é de 40% no consumo de água, 30% no de energia e de 65% em resíduos” (GBC Brasil, 2020).

As estratégias passivas têm se tornado protagonistas pois com o seu correto dimensionamento é possível alcançar a chamada eficiência energética, ou seja, produzir mais ou então igual condição com recurso reduzido, sem perder a qualidade e conforto.

Faz parte das estratégias passivas o uso adequado de elementos com o intuito de otimizar a envoltória referente a inércia térmica, transmitância térmica, absorvância e etc.

3.2 Telhado verde

Os tipos de cobertura possuem papel importante, trazendo grande impacto, principalmente, no andar logo abaixo que recebe esta radiação. De acordo com sua composição de elementos, os telhados verdes reduzem a carga térmica incidente através da cobertura, otimizando o conforto térmico e aumentando a eficiência energética do edifício.

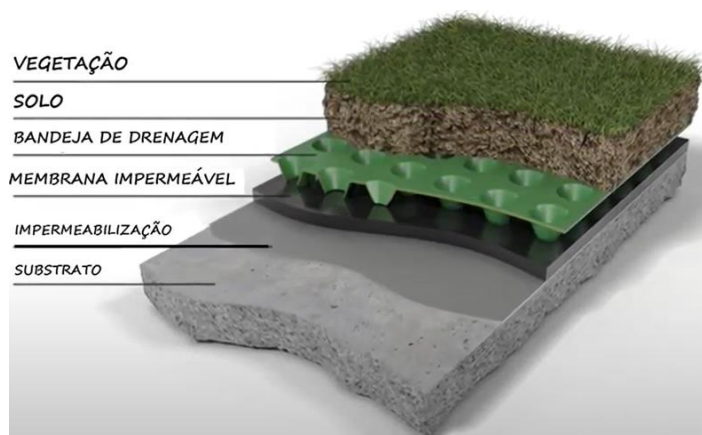


Figura 3.1 – Exemplo de composição de um tipo de telhado verde.

Fonte: (CA-2 Consultores, 2020)

Possuem por característica principal o seu alto índice de inércia térmica, fazendo com que a amplitude térmica diária do ambiente seja achatada e o pico de temperatura seja atrasado. Além disso, possuem boas propriedades insulativas, pois são bons isolantes térmicos e resistem a passagem de calor do meio externo para o interno.

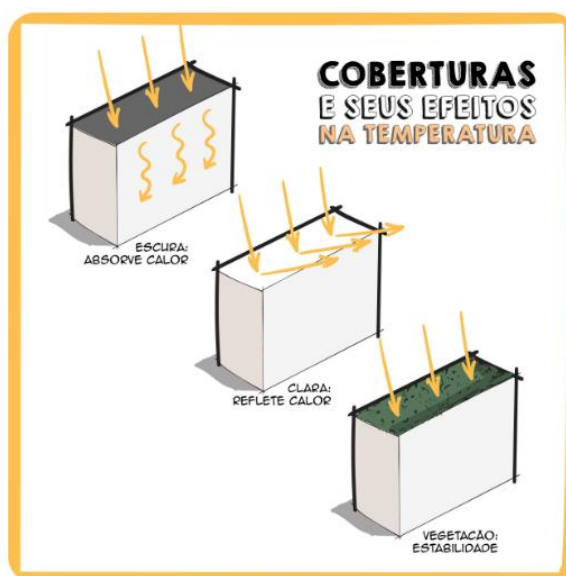


Figura 3.2 – Contribuição na temperatura do ambiente interno por tipo de cobertura.

Fonte: (UGREEN, 2021)

O telhado verde intensivo possui uma camada mais espessa de solo. Este tipo de tecnologia é recomendado para edificações que além do maior conforto térmico, queiram se beneficiar de plantações na cobertura com maior densidade, as chamadas “fazendas urbanas”.



Figura 3.3 – Exemplo de telhado intensivo com plantações mais densas.

Fonte: (CA2, 2019)

Em contrapartida, o telhado verde extensivo possui uma profundidade menor de solo, sendo uma camada mais rasa.



Figura 3.4 – Exemplo de telhado extensivo com plantações de menor porte.

Fonte: (CA2, 2019)

O telhado verde, além de seus benefícios térmicos já mencionados, também trazem outras melhorias como, aproveitamento do espaço que seria inutilizável no caso de cobertura por telhado, retardo de lançamento das águas pluviais à rede pública e benefício psicológico dos ocupantes, melhorando a saúde, bem estar e produtividade, devido ao contato próximo com a natureza.

3.3 Brises

Estes elementos construtivos são excelentes para conforto térmico pois bloqueiam a incidência de radiação solar antes mesmo de atingir a envoltória da edificação, diminuindo de forma considerável o calor recebido no ambiente interno. Por outro lado, pelo mesmo motivo, ele não é recomendado para climas frios. A palavra brise tem origem na língua francesa, pois é a abreviatura de *brise-soleil* que, ao pé da letra, possui o significado de “quebra-sol”.

Por ser um elemento de uso externo às fachadas, sua utilização tem de estar alinhada com a arquitetura da edificação. Um ponto de atenção do brise é que dependendo do seu modelo pode afetar a entrada de iluminação natural no ambiente.

Os brises verticais são indicados para as fachadas leste ou oeste pois recebem radiação, respectivamente, no nascer do sol na parte da manhã e no pôr do sol no período da tarde. Por outro lado, os brises horizontais são recomendados em fachadas com a orientação norte, devido incidência solar na maior parte do dia.



Figura 3.5 – Brises verticais.

Fonte: Fonte: (CA2, 2019)

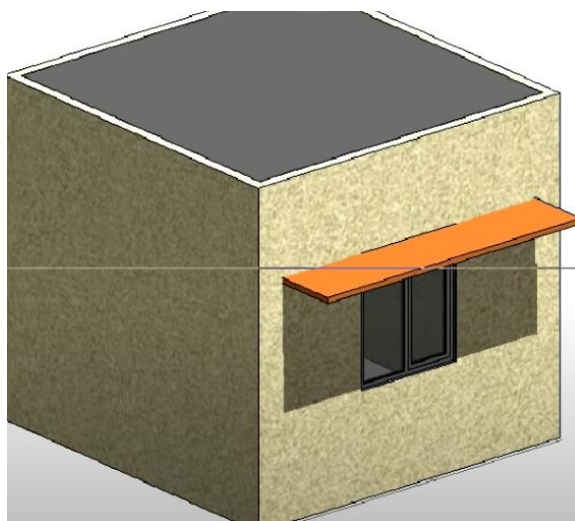


Figura 3.6 – Brises horizontais.

Fonte: (Vivadecora, 2018)

3.4 Vidros Low-E

Também conhecidos como vidro de baixa emissividade (do inglês, *low emissivity*), possuem em uma de suas faces um revestimento metalizado (invisíveis a olho nu, pois são partículas nanométricas) capaz de refletir grande parte dos raios solares que entraria num ambiente. Devido a esta característica, o vidro consegue reduzir a incidência da luz IV e UV porém ainda permitindo a entrada de luz visível e natural que está sendo transmitida para o ambiente. Seu principal objetivo é controlar a transferência de energia de um ambiente para outro e aumentar o isolamento térmico. Em comparação ao brise, os vidros low-e possuem o diferencial estético pois aumentam o conforto térmico sem necessitar de alterações nas fachadas das edificações. A intuito de comparação, uma placa de vidro comum possui emissividade de $0,40 \text{ W/m}^2$, já uma placa de vidro low-e, com as mesmas dimensões, possui emissividade por volta de $0,03 \text{ W/m}^2$.

Os vidros comuns possuem fator solar por volta de 0,86 ou 86%. Este valor é a soma da transmissão primária com a transmissão secundária.

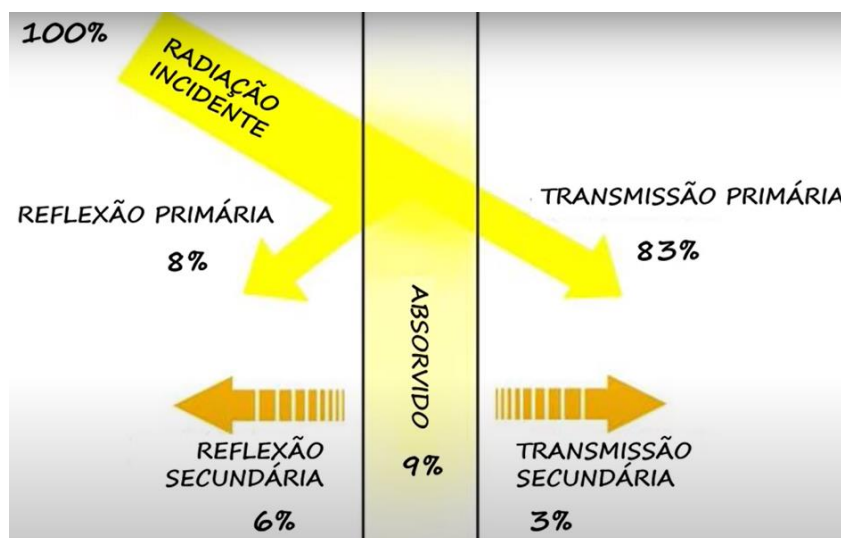


Figura 3.7 – Comportamento do vidro comum quando incide radiação solar.

Fonte: Fonte: (CA2, 2019)

Já os vidros Low-e podem chegar ao fator solar de 0,16 ou 16%.

c) Vidros:

Vidro (ID)	Fabricante	Produto	Esp. (mm)	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Emis1	Emis2	Condutividade (W/mK)	Processo	U (W/m²)	FS
1	CEBRACE	Cool Lite 114 PN	8,000	0,110	0,240	0,310	0,130	0,280	0,380	0,840	0,840	1,000	laminado com incolor	5,700	0,270
2	CEBRACE	Cool Lite KNT Azul	8,000	0,220	0,120	0,180	0,360	0,120	0,100	0,840	0,840	1,000	laminado com incolor	5,700	0,290
3	CEBRACE	Cool Lite KNT Incolor	8,000	0,310	0,200	0,180	0,480	0,170	0,110	0,840	0,840	1,000	laminado com incolor	5,700	0,430
4	CEBRACE	Cool Lite KNT Verde	8,000	0,130	0,110	0,180	0,420	0,140	0,100	0,840	0,840	1,000	laminado com incolor	5,700	0,390
5	CEBRACE	Cool Lite SKN	8,000	0,240	0,370	0,360	0,510	0,170	0,180	0,840	0,840	1,000	laminado com incolor	5,700	0,340
6	CEBRACE	Cool Lite SKN Cinza	8,000	0,150	0,360	0,360	0,310	0,170	0,100	0,840	0,840	1,000	laminado com incolor	5,700	0,280
7	CEBRACE	Cool Lite SKN Verde	8,000	0,200	0,360	0,160	0,460	0,180	0,170	0,840	0,840	1,000	laminado com incolor	5,700	0,310
8	CEBRACE	COOL-LITE KBT 140 6mm	6,000	0,270	0,200	0,305	0,401	0,229	0,111	0,837	0,120	1,000	monolítico	3,516	0,359
9	CEBRACE	COOL-LITE KNT 140 6mm	6,000	0,257	0,241	0,287	0,411	0,212	0,051	0,837	0,111	1,000	monolítico	3,485	0,340
10	CEBRACE	COOL-LITE KNT 155 6mm	6,000	0,346	0,183	0,219	0,528	0,146	0,030	0,837	0,156	1,000	monolítico	3,639	0,428
11	CEBRACE	COOL-LITE KNT 164 6mm	6,000	0,447	0,151	0,184	0,647	0,103	0,026	0,837	0,153	1,000	monolítico	3,629	0,517
12	CEBRACE	COOL-LITE SKN 144 II 6mm	6,000	0,196	0,323	0,465	0,446	0,184	0,049	0,837	0,037	1,000	monolítico	3,225	0,267
13	CEBRACE	COOL-LITE SKN 154 6mm	6,000	0,233	0,360	0,526	0,552	0,155	0,185	0,837	0,013	1,000	monolítico	3,139	0,290
14	CEBRACE	COOL-LITE SKN 165 6mm	6,000	0,295	0,331	0,500	0,666	0,124	0,111	0,837	0,037	1,000	monolítico	3,225	0,349
15	CEBRACE	COOL-LITE SKN 174 6mm	6,000	0,384	0,296	0,431	0,759	0,063	0,049	0,837	0,037	1,000	monolítico	3,225	0,430

Tabela 3.1 – Catálogos de propriedades térmicas de vidros.

Fonte: ANEXO GERAL V – CATÁLOGO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE PAREDES (INMETRO, 2013).

Estes vidros podem ser utilizados tanto para o verão, como filtro de radiação solar, quanto para o inverno já que podem manter os ambientes interno aquecidos.



Figura 3.8 – Local de instalação do vidro low-e de acordo com a região.

Fonte: (CA-2 Consultores, 2020)

4. ESTUDO DE CASO E SIMULAÇÃO ENERGÉTICA

4.1 Introdução

Neste capítulo efetuou-se um estudo de caso em um bloco administrativo de uma instituição de ensino localizada na cidade de Santos, estado de São

Paulo, para verificar o impacto na temperatura interna do ambiente de acordo com diferentes soluções aplicadas em sua envoltória. Devido a edificação ter mais de seis pavimentos, este estudo focou o último andar pois o mesmo também terá influência significativa das medidas de eficiência energética realizadas na cobertura.



Figura 4.1 – Bloco administrativo de uma instituição de ensino.

Fonte: (Google Maps, 2022)

Para melhor entendimento de cada situação a ser estudada, os cenários e suas especificidades são numerados conforme tabela abaixo. Os resultados ilustrados em gráficos a seguir, item 4.2, sempre serão a comparação da temperatura interna do ambiente de acordo com cada solução de envoltória proposta.

Envoltória	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Cobertura	Laje exposta	Laje exposta	Laje exposta
Janela	Sem Proteção	Com Brise	Sem Proteção
Vidro	Comum	Comum	FS 0,32

Tabela 4.1 – Numeração dos cenários conforme envoltória.

Fonte: Próprio autor.

Com a utilização do *software* Energyplus foi realizado uma simulação energética que, por definição, “é a utilização de técnicas matemáticas, empregadas em computadores, as quais permitem imitar o funcionamento de qualquer tipo de operação ou processo do mundo real”.

O primeiro passo foi executar a modelagem 3D da arquitetura do prédio em questão.

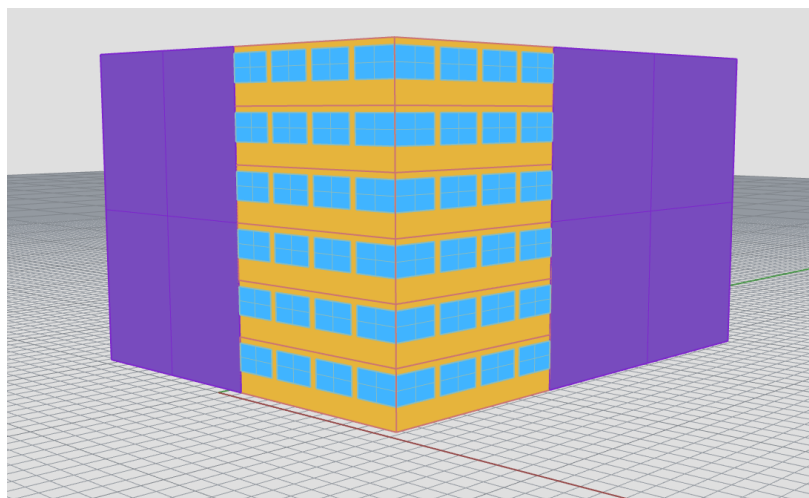


Figura 4.2 – Simulação através de software de modelagem (Rhinceros 7 – Grasshopper / Plugin: LadyBug tools).

Fonte: Próprio autor.

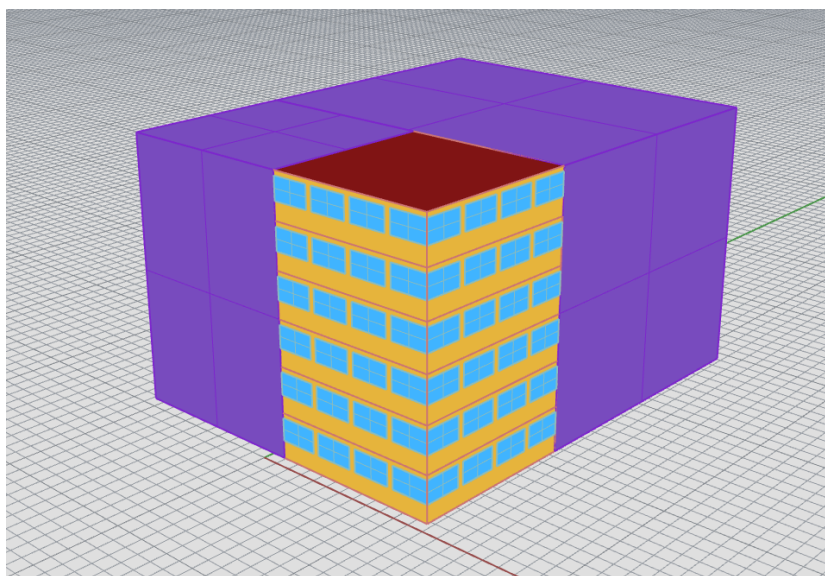


Figura 4.3 – Simulação através de software de modelagem (Rhinceros 7 – Grasshopper / Plugin: LadyBug tools). Fonte: Próprio autor.

Em seguida efetuou-se a inclusão dos dados de entrada para a simulação energética, como:

- Arquivo climático: BRA_SP_Sao.Paulo-Congonhas.AP.837800_TMYx.2007-2021.epw

- Número de pessoas= 12
- Densidade de potência de iluminação = DPI:14,1 W/m²
- Densidade de potência dos equipamentos = DPE:15,0 14,1 W/m²
- Nível de atividade:108 W/pessoa
- Parede, valor U = 2,69 [W/(m²k)]. Absortância - cor Branco Gelo
- Cobertura de laje, valor U = 3,73. Absortância 0,5
- Cobertura vegetado intensivo, valor U = 0,96. Absortância – cor Verde Musgo

Vidro comum

WindowMaterial:SimpleGlazingSystem,			
Vidro_comum,	!-	name	
5.7,	!-	u-factor	{W/m2-K}
0.87,	!-	shgc	

Vidro FS_0,32

WindowMaterial:SimpleGlazingSystem,			
Vidro_FS0.32,	!-	name	
5.228,	!-	u-factor	{W/m2-K}
0.322,	!-	shgc	

Tabela 4.2 – Parâmetros dos vidros.

Fonte: Próprio autor.

4.2 Paredes

Inicialmente efetuou-se estudos com foco nas paredes da edificação, a fim de identificar, comparar e simular possíveis melhorias em ações de eficiência energética.

No gráfico abaixo é possível verificar a variação da temperatura de bulbo seco externa da edificação ao longo do dia, que é a temperatura indicada por um termômetro comum. Pelo gráfico é possível verificar que a máxima chega aos 28 graus Celsius por volta das 15:30.

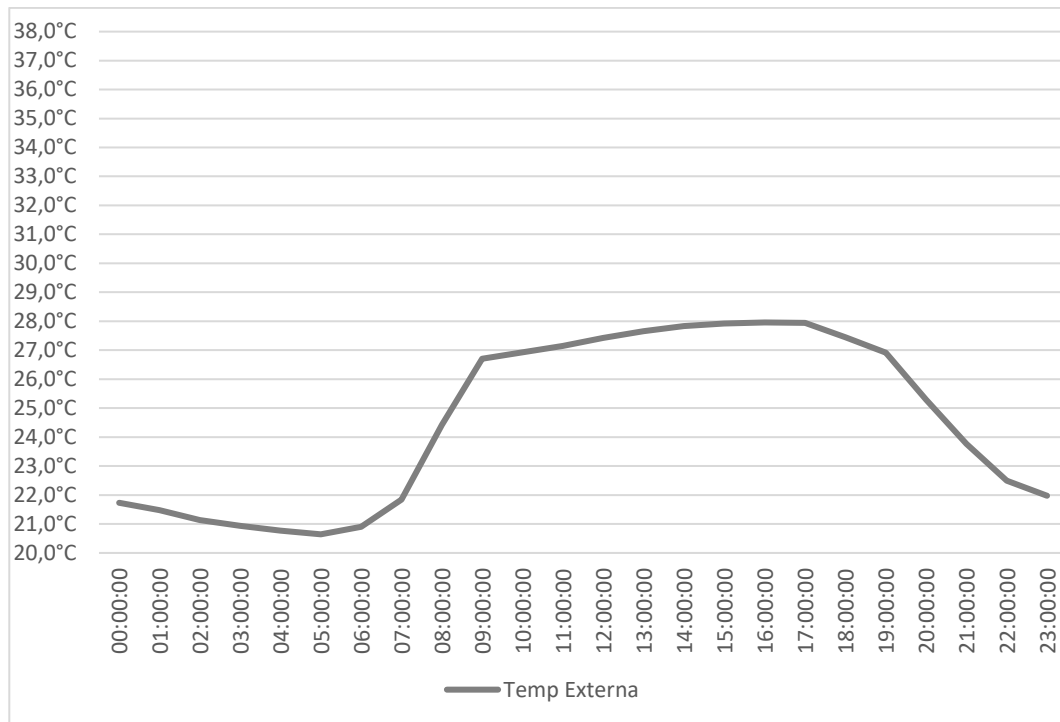


Gráfico 4.1 – Temperatura de bulbo seco externo ao longo do dia.

Fonte: Próprio autor

Em seguida simulou-se o cenário 01 (laje exposta, janela sem brise e vidro com fator solar comum de 0,87) para verificar a temperatura interna do ambiente da situação atual da edificação (*status quo*).

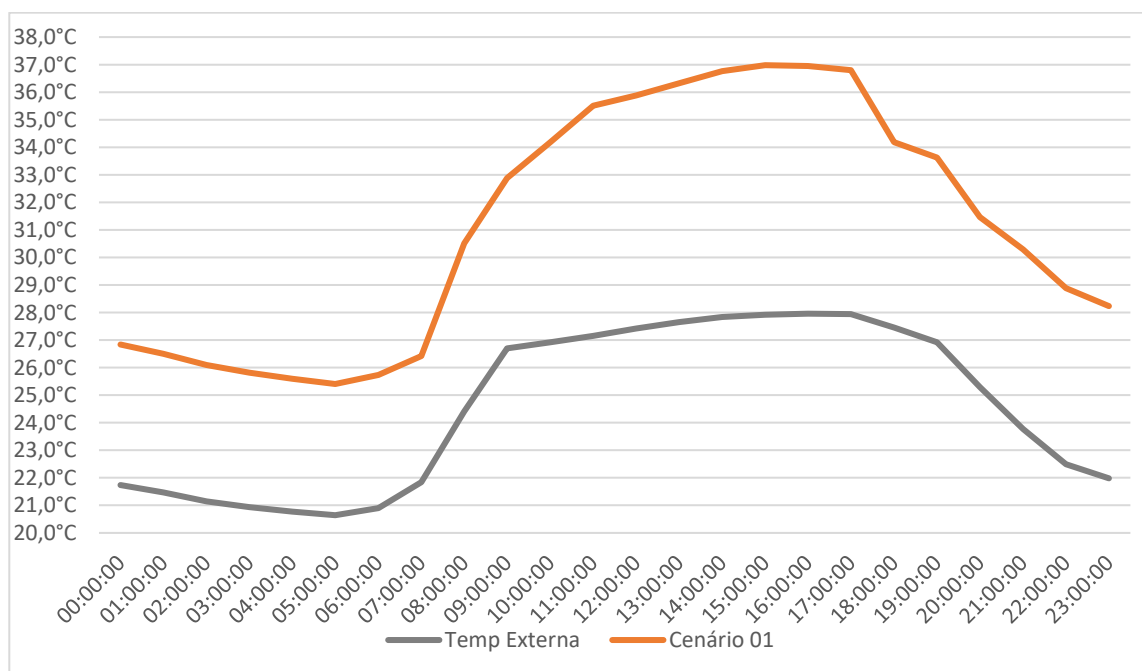


Gráfico 4.2 – Temperatura de bulbo seco externo e temperatura interna do ambiente de acordo com cenário 01. Fonte: Próprio autor

Pelo gráfico acima é possível verificar que a temperatura interna do ambiente, sem qualquer medida de eficiência energética, chega a expressivos 37°C, no pico, por volta das 16:00.

No gráfico abaixo, além dos resultados do cenário 01, incluiu-se o resultado da simulação considerando a temperatura interna do ambiente com a alteração da envoltória, utilizando brise porém mantendo o vidro comum de fator solar 0,87 (cenário 02).

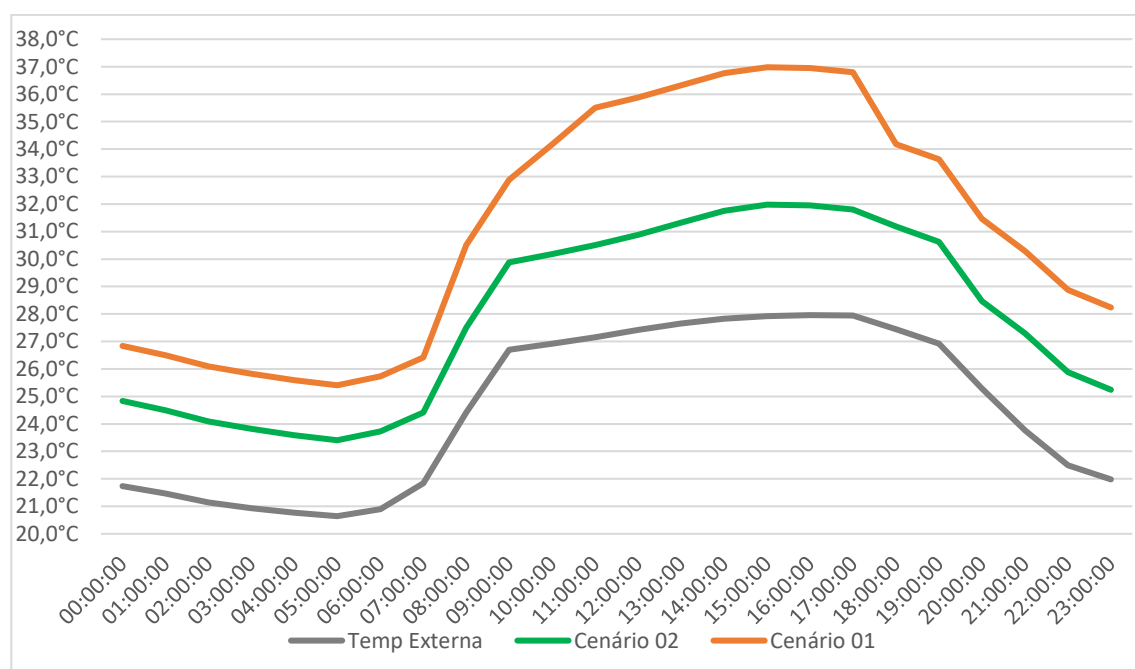


Gráfico 4.3 – Temperatura de bulbo seco externo e temperaturas internas com: vidro comum sem brise e vidro comum com brise. Fonte: Próprio autor

É possível constatar que o cenário com brise, destacado em verde no gráfico acima, traz uma redução considerável quando comparado ao cenário sem brise. Em ambos os casos, o pico de temperatura interna do ambiente ocorre por volta das 16:00, porém é possível verificar que no cenário em verde a maior temperatura encontrada é de 32°C enquanto na linha em laranja chegamos a 37°C. Um delta muito significativo de 5°C.

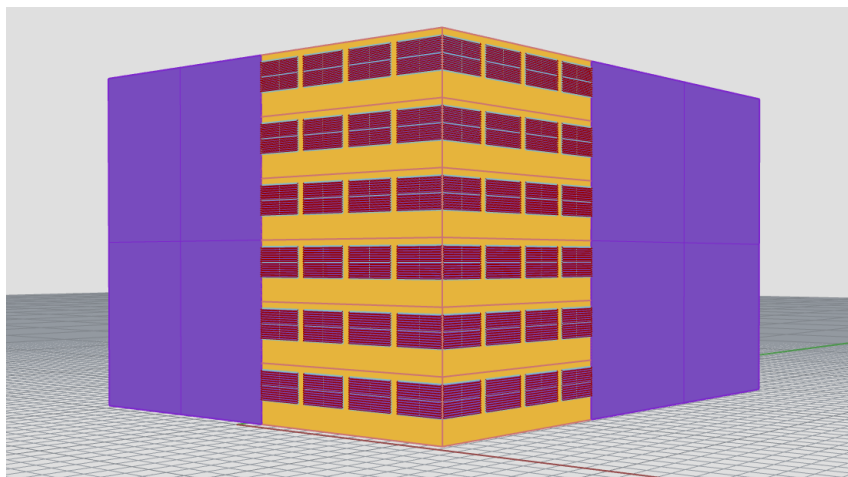


Figura 4.4 – Simulação através de software de modelagem com brise (1).

Fonte: Próprio autor

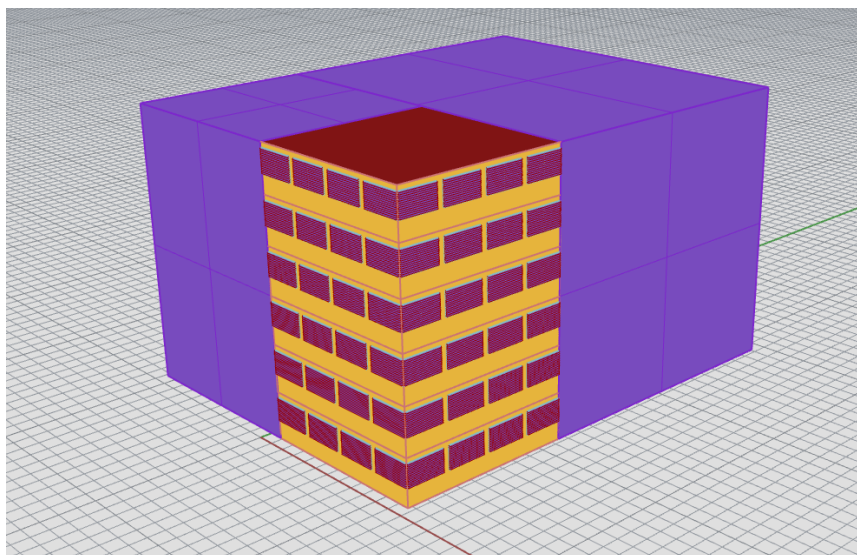


Figura 4.5 – Simulação através de software de modelagem com brise (2).

Fonte: Próprio autor

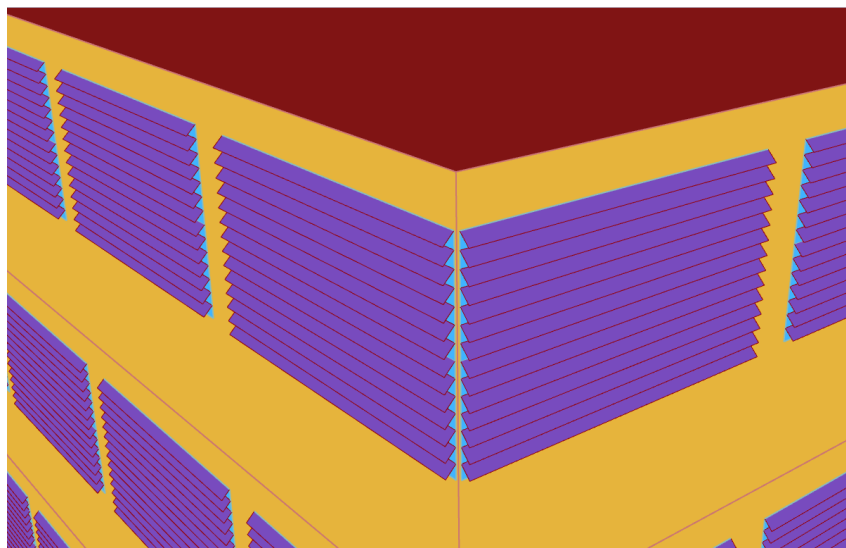


Figura 4.6 – Simulação através de software de modelagem com brise (3).

Fonte: Próprio

Por último, incluiu-se no gráfico abaixo o cenário 03, de remoção do brise porém com a instalação de um vidro com fator solar de 0,32. Esta linha está destacada no gráfico na cor amarela.

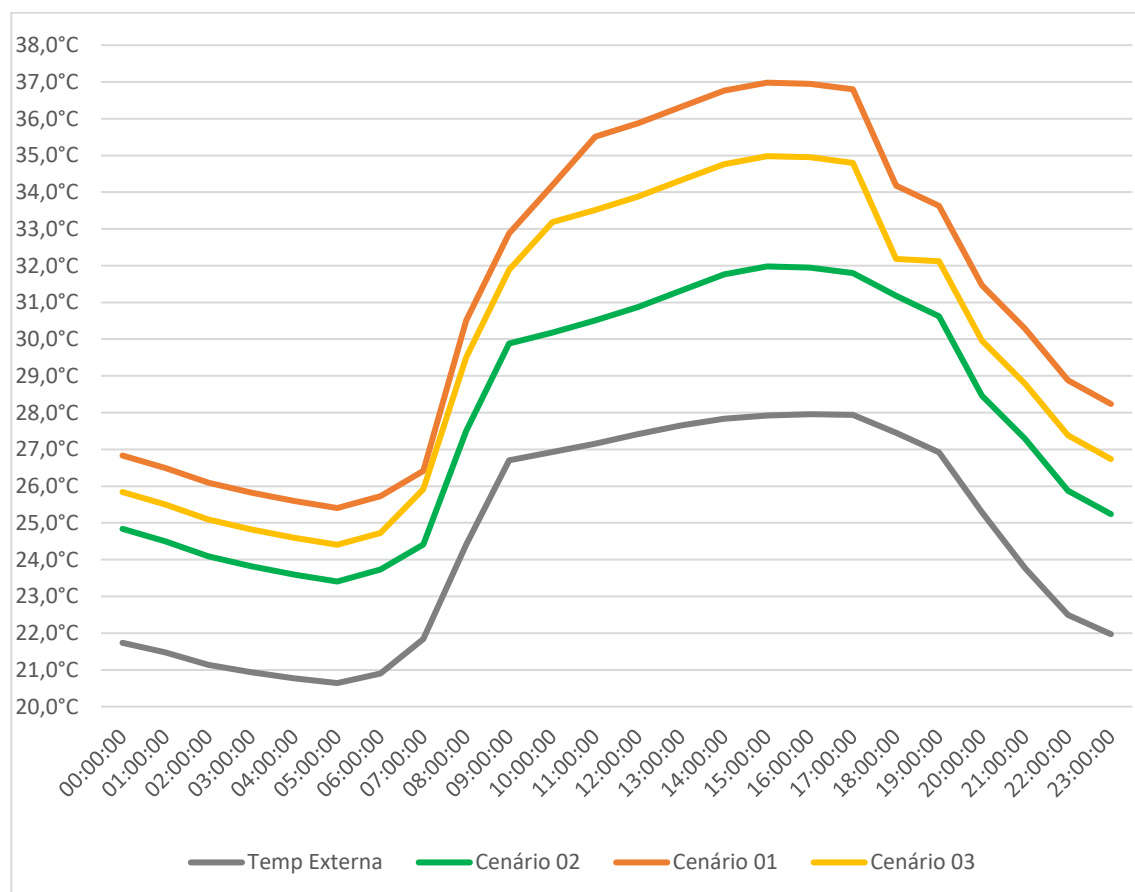


Gráfico 4.4 – Temperatura de bulbo seco externo mais cenários 01,02 e 03.

Fonte: Próprio autor

Mesmo com um vidro de altíssimo desempenho, como é o vidro de fator solar 0,32, a instalação do brise possui melhor resultado, mantendo a temperatura interna 3°C a menos, quando comparado ao cenário 03 e 5°C mais frio quando comparado ao status atual (envoltória original da edificação), cenário 01. Apesar de parecer pouco, esta diferença é extremamente significativa.

A grande vantagem do brise é que ele bloqueia a radiação solar sem a possibilidade da mesma chegar no vidro, ou seja, evita-se a radiação direta. No caso do vidro solar fator 0,32, a radiação direta ocorre e é filtrada pelo vidro, porém acaba ocorrendo o efeito estufa pois o calor que passa pelo vidro não consegue sair e fica represado no ambiente.

4.3 Cobertura

Nesta seção do trabalho efetuaremos simulações alterando somente o tipo de cobertura da edificação. Mantendo os demais itens da envoltória conforme arquitetura original do empreendimento (vidro comum e sem brise).

Envoltória	Cenário 4	Cenário 5
Cobertura	Laje exposta	Telhado Verde

Tabela 4.3 – Numeração dos cenários conforme cobertura da envoltória.

Fonte: Próprio autor.

O estado atual é com a utilização de laje exposta, sem telhamento, conforme dados abaixo:

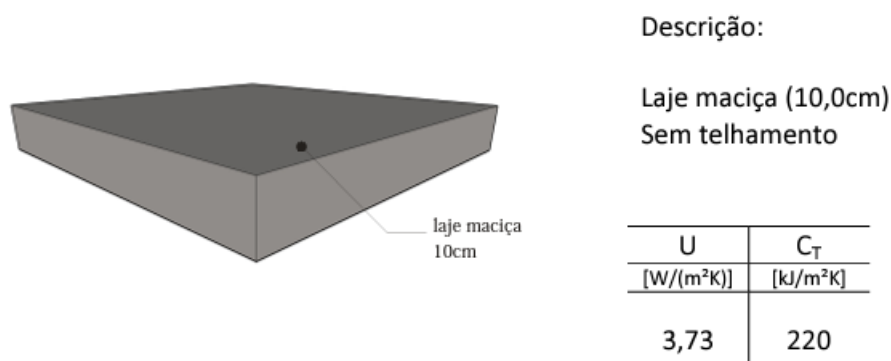


Figura 4.7 – Laje maciça de 10cm de espessura, sem telhamento.

Fonte: ANEXO GERAL V – CATÁLOGO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE PAREDES (INMETRO, 2013).

Segue abaixo gráfico que representa a temperatura externa e a temperatura interna do ambiente considerando a laje maciça, recebendo radiação direta.



Gráfico 4.5 – Temperatura de bulbo seco externo e temperatura interna do ambiente com a laje sem proteção. Fonte: Próprio autor.

Como medida de eficiência energética, optou-se por simular a utilização de telhado verde intensivo acima da laje existente a fim de obter possíveis

melhorias de eficiência energética principalmente referente ao desempenho térmico.

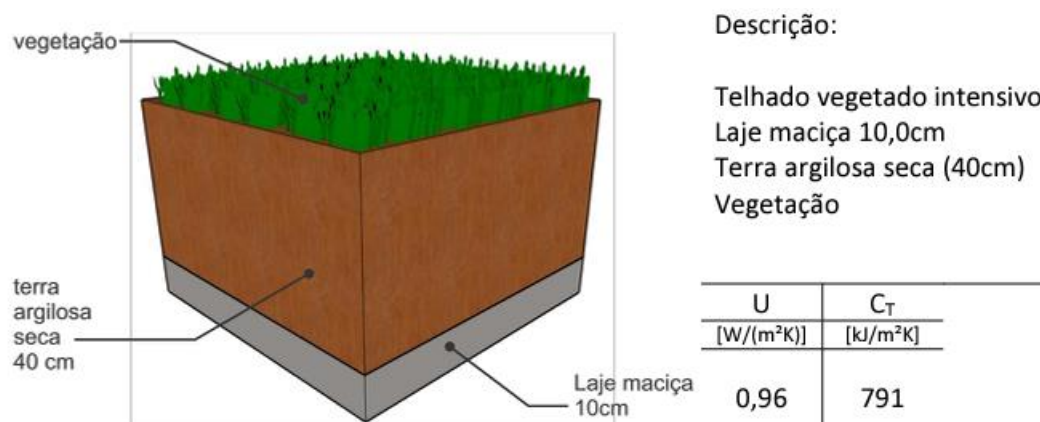


Figura 4.8 – Telhado vegetado intensivo.

Fonte: ANEXO GERAL V – CATÁLOGO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE PAREDES (INMETRO, 2013).

Como pode ser verificado no gráfico abaixo, a laje exposta (sem o telhado verde) e sofrendo radiação direta faz com que o ambiente interno tenha um pico de temperatura de 39°C por volta das 13:00. Já com o telhado verde, o pico de temperatura cai drasticamente, por volta de 30°C, porém podemos ver claramente a alta inércia térmica em ação quando esta temperatura é deslocada somente para às 19:00.

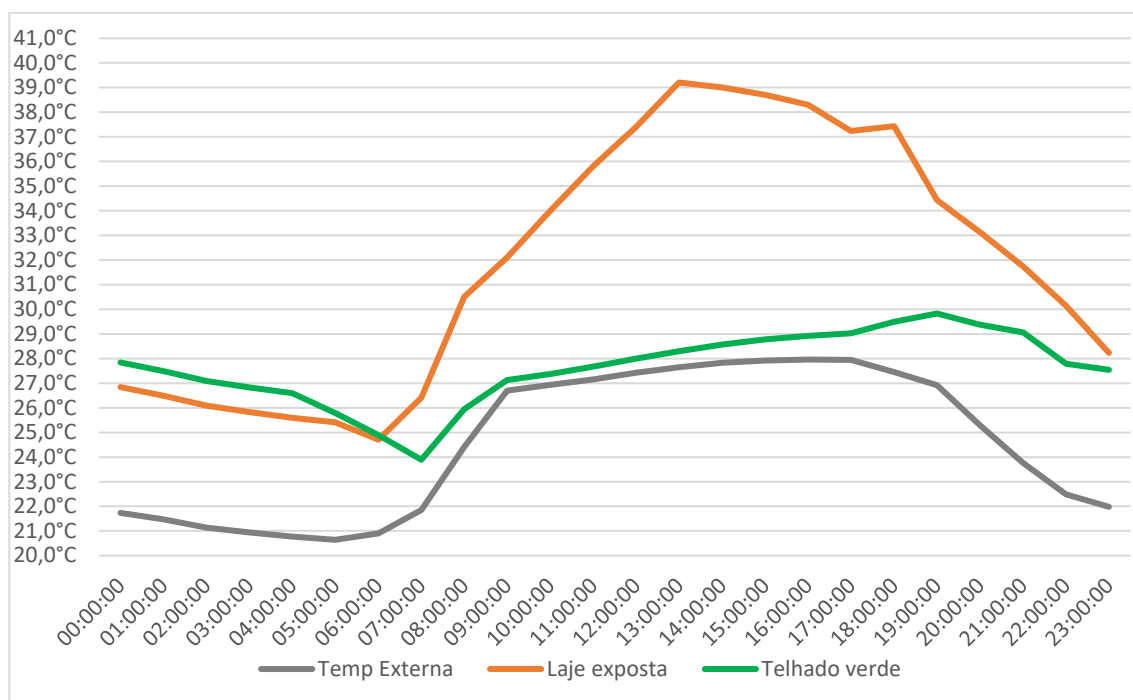


Gráfico 4.6 – Temperatura de bulbo seco externo e temperatura interna do ambiente com a laje sem proteção. Fonte: Próprio autor.

5. ANÁLISE ENERGÉTICA E ECONÔMICA DAS AÇÕES DE EFICIÊNCIA

5.1 Análise Energética

Para a análise referente ao consumo de energia da edificação, simulou-se as ações de eficiência energética combinadas do capítulo anterior, ou seja, utilizando melhorias nas janelas, com proteção por brise, e na cobertura aplicando o telhado verde intensivo. Para melhor entendimento, os cenários são numerados e ilustrados conforme tabela abaixo.

Envoltória	Cenário 1	Cenário 6
Cobertura	Laje exposta	Telhado Verde
Janela	Sem Proteção	Com Brise
Vidro	Comum	Comum

Tabela 5.1 – Numeração dos cenários conforme cobertura da envoltória.

Fonte: Próprio autor.

Inicialmente foi verificado o cenário 01 a fim de obter conhecimento do seu consumo em kWh por mês e anual, separado por pavimento, resultando na tabela abaixo.

	Cen_01- Pav_01	Cen_01- Pav_02	Cen_01- Pav_03	Cen_01- Pav_04	Cen_01- Pav_05	Cen_01- Pav_06
Consumo anual (kWh)	427.155,76	472.969,49	484.277,96	486.549,17	487.309,46	489.033,87
Janeiro	36.325,99	40.240,26	41.204,54	41.398,82	41.467,60	41.635,87
Fevereiro	32.824,43	36.386,62	37.266,94	37.451,30	37.542,41	37.833,41
Março	36.274,93	40.170,46	41.133,45	41.329,86	41.408,31	41.623,06
Abril	35.030,72	38.753,13	39.675,36	39.858,56	39.909,84	39.996,59
Maiο	36.239,85	40.099,98	41.055,37	41.245,73	41.300,82	41.396,14
Junho	34.909,46	38.551,67	39.457,52	39.631,27	39.647,06	39.554,04
Julho	36.154,98	39.965,89	40.911,63	41.095,30	41.123,24	41.083,05
Agosto	36.271,13	40.153,27	41.111,71	41.300,95	41.347,27	41.399,08
Setembro	35.174,93	38.978,37	39.913,25	40.101,56	40.171,83	40.355,31
Outubro	36.406,20	40.371,10	41.343,50	41.540,57	41.621,07	41.853,00
Novembro	35.232,18	39.076,35	40.019,98	40.214,88	40.309,48	40.616,16
Dezembro	36.310,97	40.222,40	41.184,71	41.380,36	41.460,52	41.688,15

Tabela 5.2 – Consumo em kWh mensal e anual com o sistema de envoltória - cenário

01. Fonte: Próprio autor.

Pela tabela acima é possível verificar que quanto mais alto o pavimento, maior é seu consumo energético. Isto ocorre pois andares mais altos possuem maior exposição direta de radiação solar devido estarem menos suscetíveis a sombreamento por elementos externos como casas, árvores e etc, quando comparados a andares mais baixos.

Após as ações de melhoria energética implantadas com telhado verde e brise, o consumo anual e mensal da edificação foi reduzido conforme tabela abaixo.

	Cen_06- Pav_01	Cen_06- Pav_02	Cen_06- Pav_03	Cen_06- Pav_04	Cen_06- Pav_05	Cen_06- Pav_06
Consumo anual (kWh)	426.527,84	469.901,34	479.857,62	481.261,37	479.711,12	471.176,61
Janeiro	36.235,19	39.899,90	40.745,16	40.870,12	40.759,24	40.122,49
Fevereiro	32.765,68	36.132,64	36.912,99	37.040,93	36.993,31	36.674,91
Março	36.198,59	39.876,68	40.723,08	40.848,73	40.748,76	40.175,78
Abril	34.935,96	38.444,96	39.252,99	39.360,08	39.202,53	38.357,93
Maiο	36.222,13	39.920,37	40.765,70	40.879,01	40.719,51	39.840,71
Junho	34.732,83	38.097,05	38.878,97	38.967,06	38.733,16	37.534,66
Julho	36.074,96	39.680,78	40.511,50	40.611,31	40.390,71	39.236,73

Agosto	36.276,73	40.009,22	40.861,22	40.971,91	40.790,10	39.821,43
Setembro	35.214,09	38.862,34	39.691,34	39.808,68	39.693,71	39.062,10
Outubro	36.439,01	40.230,52	41.092,51	41.223,41	41.146,31	40.687,12
Novembro	35.240,63	38.904,16	39.740,37	39.873,86	39.829,16	39.544,72
Dezembro	36.192,04	39.842,73	40.681,79	40.806,25	40.704,60	40.118,04

Tabela 5.3 – Consumo em kWh mensal e anual com o sistema de envoltória - cenário

06. Fonte: Próprio autor.

Analisando os resultados, por local, encontram-se as reduções conforme tabela abaixo:

Item:	Cenário 01	Cenário 06	Delta	Redução (%)	Local:
Consumo de energia (kWh/ano)	489.033,87	471.176,61	-17.857,26	-3,65%	Pavimento 06
	487.309,46	479.711,12	-7.598,34	-1,56%	Pavimento 05
	486.549,17	481.261,37	-5.287,80	-1,09%	Pavimento 04
	484.277,96	479.857,62	-4.420,34	-0,91%	Pavimento 03
	472.969,49	469.901,34	-3.068,15	-0,65%	Pavimento 02
	427.155,76	426.527,84	-627,92	-0,15%	Pavimento 01
	474.549,29	468.072,65	-6.476,64	-1,33%	Edifício (Valores Médio)

Tabela 5.4 – Redução de consumo médio em kWh anual separado por local.

Fonte: Próprio autor.

Quando analisa-se a edificação como um todo, encontra-se uma diminuição média de 1,33% no consumo. Porém há uma grande diferença entre a maior e menor redução, pavimento 06 e 01, respectivamente.

Como esperado o pavimento 06, mais alto, possui a maior redução de consumo. Totalizando 489.033,87 kWh/ano no cenário 01 e diminuindo para 471.176,61 kWh/ano (cenário 06), redução de 3,65% por ano.

Por outro lado, o pavimento 01 praticamente manteve seu consumo mesmo sendo simuladas ações de eficiência energética em sua envoltória, redução de consumo anual de 627,92 kWh ou desprezíveis 0,15%. Como comentado anteriormente, andares mais baixos tendem a estar menos expostos ao sol do

que os mais altos e as ações já não surtem efeitos significativos. Adicionalmente, o telhado verde da cobertura já não traz qualquer impacto no pavimento térreo.

5.2 Análise de viabilidade econômica

Referente ao telhado verde, verificou-se no mercado o custo aproximado de R\$250/m². Contando que a laje da edificação possui 116,64m² de área, teremos um investimento inicial de R\$29.160,00 referente a cobertura. Em relação ao brise, temos uma área de 26,88m² (por andar) de vidro e após levantamento de custo, encontrou-se o valor de R\$400/m², adicionando mais R\$64.512,00 por andar e totalizando o investimento inicial em R\$93.672,00 para os seis andares.

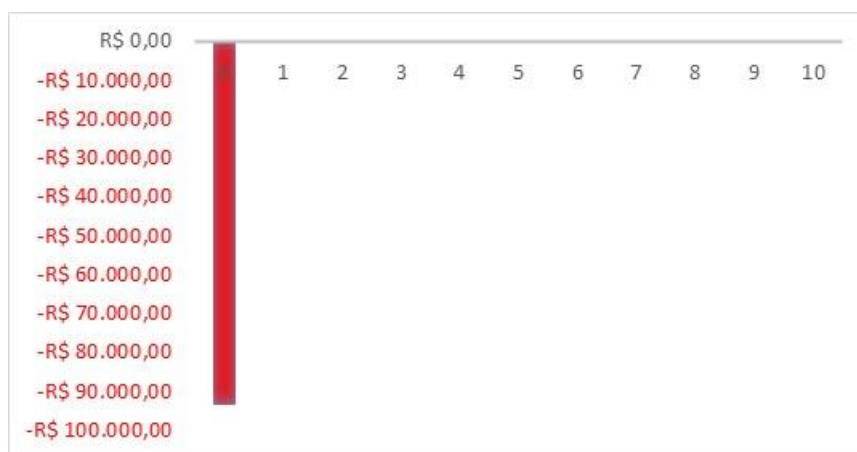


Gráfico 5.1 – Investimento inicial considerando os seis andares.

Fonte: Próprio autor.

Verificando a conta de energia da edificação, constatou-se uma tarifa média de R\$ 0,5078/kWh (incluindo TUSD ponta, TUSD fora ponta, TE ponta, TE fora ponta). Transformando as tabelas de consumo em tabelas de valores em reais, as mesmas resultam conforme abaixo para o cenário 01 e cenário 06, respectivamente:

	Cen_01- Pav_01	Cen_01- Pav_02	Cen_01- Pav_03	Cen_01- Pav_04	Cen_01- Pav_05	Cen_01- Pav_06
Custo anual Total	R\$ 216.910	R\$ 240.174	R\$ 245.916	R\$ 247.070	R\$ 247.456	R\$ 248.331
Janeiro	R\$ 18.446	R\$ 20.434	R\$ 20.924	R\$ 21.022	R\$ 21.057	R\$ 21.143
Fevereiro	R\$ 16.668	R\$ 18.477	R\$ 18.924	R\$ 19.018	R\$ 19.064	R\$ 19.212
Março	R\$ 18.420	R\$ 20.399	R\$ 20.888	R\$ 20.987	R\$ 21.027	R\$ 21.136
Abril	R\$ 17.789	R\$ 19.679	R\$ 20.147	R\$ 20.240	R\$ 20.266	R\$ 20.310
Maiο	R\$ 18.403	R\$ 20.363	R\$ 20.848	R\$ 20.945	R\$ 20.973	R\$ 21.021
Junho	R\$ 17.727	R\$ 19.577	R\$ 20.037	R\$ 20.125	R\$ 20.133	R\$ 20.086
Julho	R\$ 18.359	R\$ 20.295	R\$ 20.775	R\$ 20.868	R\$ 20.882	R\$ 20.862
Agosto	R\$ 18.418	R\$ 20.390	R\$ 20.877	R\$ 20.973	R\$ 20.996	R\$ 21.022
Setembro	R\$ 17.862	R\$ 19.793	R\$ 20.268	R\$ 20.364	R\$ 20.399	R\$ 20.492
Outubro	R\$ 18.487	R\$ 20.500	R\$ 20.994	R\$ 21.094	R\$ 21.135	R\$ 21.253
Novembro	R\$ 17.891	R\$ 19.843	R\$ 20.322	R\$ 20.421	R\$ 20.469	R\$ 20.625
Dezembro	R\$ 18.439	R\$ 20.425	R\$ 20.914	R\$ 21.013	R\$ 21.054	R\$ 21.169

Tabela 5.5 – Custo de energia mensal e anual com o sistema de envoltória – cenário

01. Fonte: Próprio autor.

	Cen_06- Pav_01	Cen_06- Pav_02	Cen_06- Pav_03	Cen_06- Pav_04	Cen_06- Pav_05	Cen_06- Pav_06
Consumo anual (kWh)	R\$ 216.591	R\$ 238.616	R\$ 243.672	R\$ 244.385	R\$ 243.597	R\$ 239.263
Janeiro	R\$ 18.400	R\$ 20.261	R\$ 20.690	R\$ 20.754	R\$ 20.698	R\$ 20.374
Fevereiro	R\$ 16.638	R\$ 18.348	R\$ 18.744	R\$ 18.809	R\$ 18.785	R\$ 18.624
Março	R\$ 18.382	R\$ 20.249	R\$ 20.679	R\$ 20.743	R\$ 20.692	R\$ 20.401
Abril	R\$ 17.740	R\$ 19.522	R\$ 19.933	R\$ 19.987	R\$ 19.907	R\$ 19.478
Maiο	R\$ 18.394	R\$ 20.272	R\$ 20.701	R\$ 20.758	R\$ 20.677	R\$ 20.231
Junho	R\$ 17.637	R\$ 19.346	R\$ 19.743	R\$ 19.787	R\$ 19.669	R\$ 19.060
Julho	R\$ 18.319	R\$ 20.150	R\$ 20.572	R\$ 20.622	R\$ 20.510	R\$ 19.924
Agosto	R\$ 18.421	R\$ 20.317	R\$ 20.749	R\$ 20.806	R\$ 20.713	R\$ 20.221
Setembro	R\$ 17.882	R\$ 19.734	R\$ 20.155	R\$ 20.215	R\$ 20.156	R\$ 19.836
Outubro	R\$ 18.504	R\$ 20.429	R\$ 20.867	R\$ 20.933	R\$ 20.894	R\$ 20.661
Novembro	R\$ 17.895	R\$ 19.756	R\$ 20.180	R\$ 20.248	R\$ 20.225	R\$ 20.081
Dezembro	R\$ 18.378	R\$ 20.232	R\$ 20.658	R\$ 20.721	R\$ 20.670	R\$ 20.372

Tabela 5.6 – Custo de energia mensal e anual com o sistema de envoltória - cenário

06. Fonte: Próprio autor.

Com estes dados em mãos é possível verificar a projeção de caixa, por local, de acordo com a tabela abaixo:

Item:	Cenário 01	Cenário 06	Projeção de Caixa	Redução (%)	Local:
Custo de Energia	R\$ 248.331,40	R\$ 239.263,48	-R\$ 9.067,92	-3,65%	Pavimento 6
	R\$ 247.455,74	R\$ 243.597,30	-R\$ 3.858,44	-1,56%	Pavimento 5
	R\$ 247.069,67	R\$ 244.384,52	-R\$ 2.685,15	-1,09%	Pavimento 4
	R\$ 245.916,35	R\$ 243.671,70	-R\$ 2.244,65	-0,91%	Pavimento 3
	R\$ 240.173,91	R\$ 238.615,90	-R\$ 1.558,01	-0,65%	Pavimento 2
	R\$ 216.909,70	R\$ 216.590,84	-R\$ 318,86	-0,15%	Pavimento 1

Tabela 5.7 – Custo de energia anual e projeção de caixa.

Fonte: Próprio autor.

Com o conhecimento do valor de investimento inicial e as projeções de caixa, é possível verificar o payback simples considerando todos os pavimentos conforme tabela abaixo e gráfico na sequência:

Item:	Projeção de Caixa (R\$)	Local:	Ilo (R\$)	Payback Simples (anos)
Custo de Energia	-R\$ 9.067,92	Pavimento 6	R\$ 39.912,00	4,40
	-R\$ 12.926,36	Pavimentos 6 e 5	R\$ 50.664,00	3,92
	-R\$ 15.611,50	Pavimentos 6,5,4	R\$ 61.416,00	3,93
	-R\$ 17.856,15	Pavimentos 6,5,4,3	R\$ 72.168,00	4,04
	-R\$ 19.414,16	Pavimentos 6,5,4,3,2	R\$ 82.920,00	4,27
	-R\$ 19.733,02	Pavimentos 6,5,4,3,2,1	R\$ 93.672,00	4,75

Tabela 5.8 – Custo de energia anual e projeção de caixa.

Fonte: Próprio autor.

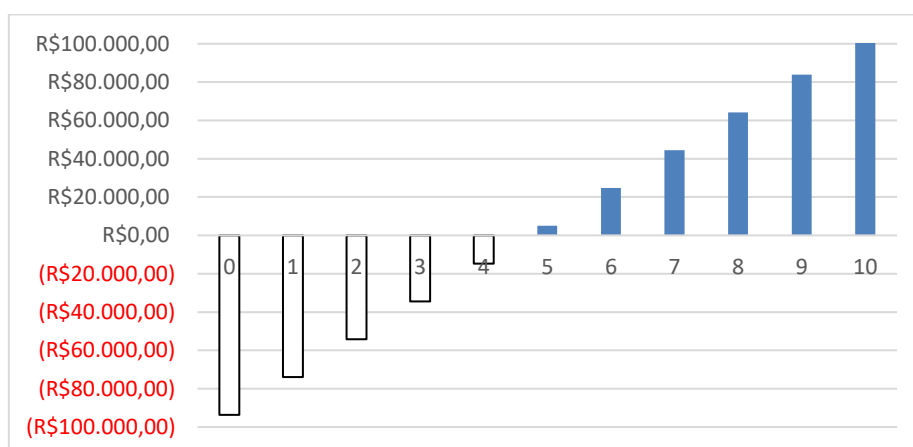


Gráfico 5.2 – Payback simples considerando toda a edificação.

Fonte: Próprio autor.

Devido ao payback simples de aproximadamente 4,7 anos, o investimento pode ser considerado atrativo. Pelo gráfico acima também é possível verificar que os andares mais altos, em conjunto, possuem um payback ainda melhor de 3,92 anos. Isto ocorre pois com o mesmo valor de investimento por andar, os andares mais altos possuem maior redução no consumo e consequentemente melhor custo-benefício.

6. CONCLUSÕES FINAIS

6.1 Introdução.

Pelos resultados apresentados no estudo de caso, foi possível constatar a importância da envoltória no desempenho termoenergético da edificação e o impacto nas diferenças de temperaturas internas de acordo com a utilização de cada elemento. De acordo com a ABRAVA, a cada grau que se reduz no controle remoto do aparelho de ar-condicionado, são cerca de 3,5% de aumento no consumo de energia.

Tecnologias mais antigas como o brise, ainda se mostra extremamente eficiente e competitivo quando comparado com as tecnologias novas de vidro com fator solar. O telhado verde, além do ganho em conformo térmico, pode ser um grande aliado e prover melhorias como aproveitamento de maior área no imóvel, ampliar o contato com a natureza e auxiliar nas drenagens da edificação. Pela diferença nos resultados dos andares mais baixos quando comparados aos mais altos, é possível constatar a importância de analisar o comportamento do sombreamento na edificação em cada período do dia. É o mesmo raciocínio para a implantação de geração distribuída solar, que pode ter seu payback prolongado ou até seu investimento inviabilizado em situações dessas.

Com o auxílio dos gráficos, na cobertura, foi possível visualizar claramente o fenômeno da inércia térmica em ação, achatando a amplitude térmica e deslocando o pico de temperatura do ambiente interno para horários mais frios e já sem utilização por pessoas.

Por mais que o Brasil tenha um potencial eólico e solar gigantescos, e com certeza temos de aproveitar esta característica do país, não se pode pensar

que esta energia em abundância é para ser utilizada de forma negligente. Apesar do grande número de usinas sendo implantadas no país, o sistema de transmissão não consegue acompanhar a velocidade das implantações da geração devido maior prazo de licenciamento ambiental e etc. O mundo está focado mais em aumentar a geração de energia elétrica do que usar este insumo de forma mais eficiente e consciente. No lugar de expandir a oferta, temos de aprender a gerenciar a demanda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A seguir, estão dispostas as referências utilizadas para desenvolvimento do trabalho em questão, conforme mencionadas nos textos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO. Disponível em <https://abrava.com.br/>.

CENTRO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – PROCEL INFO. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp>

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br>.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt>.

CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SERGIO DE S. BRITO. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/>.

LABREN – LABORATÓRIO DE MODELAGEM E ESTUDOS DE RECURSOS RENOVÁVEIS DE ENERGIA (INPE). Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/>.

SONDA – SISTEMA NACIONAL DE ORGANIZAÇÃO DE DADOS AMBIENTAIS (INPE). Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/>.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Disponível em: <https://www.ashrae.org>

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL. Disponível em: <https://www.gbcbrasil.org.br/brasil-ocupa-o-4o-lugar-no-ranking-mundial-de-construcoes-sustentaveis-certificadas-pela-ferramenta-internacional-leed/#:~:text=O%20Brasil%20ficou%20em%204%C2%BA,quadrados%20brutos%20de%20espa%C3%A7o%20certificado>

SIGA ANEEL – SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>

PBE EDIFICA – Disponível em: http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/manualv02_1.pdf

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/estrategia/inercia-termica-para-aquecimento/>

ARCH GLASS – Disponível em: <https://archglassbrasil.com.br/artigos/vidro-low-e/>

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO – Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/data/pages/8A81881E77D527270177D58578A47A0E.htm>

HAPPHO – Disponível em: <https://happho.com/insulate-house-thermally/>

CA-2 Consultores – Disponível em:

<https://ca-2.com/>

DAVID DARLING – Disponível em:

https://www.daviddarling.info/encyclopedia/T/AE_thermal_mass.html

SIMSCALE – Disponível em:

<https://www.simscale.com/blog/what-is-ashrae-55-thermal-comfort/>

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – Disponível em:

<https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV%205161%20Aula%20%20-%20Conforto%20termico.pdf>

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL – Disponível em:

<https://www.gbcbrasil.org.br/conheca-as-vantagens-que-a-certificacao-leed-proporciona-as-construcoes/#:~:text=De%20acordo%20com%20a%20GBC,falamos%20de%20um%20empreendimento%20LEED.>

Brito, Adriana Camargo de – Tese de Doutorado USP. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-13062016-102613/pt-br.php>

UGREEN – Disponível em:

<https://www.ugreen.com.br/telhadoverde/#:~:text=O%20Custo,telhados%20convencionais%20ou%20lajes%20impermeabilizadas.>

VIVA DECORA – Disponível em:

<https://www.vivadecora.com.br/pro/o-que-e-brise/>

CLIMATE ONE BUILDING – Disponível em: <https://climate.onebuilding.org/>:

Nome: BRA_SP_Sao.Paulo-Congonhas.AP.837800_TMYx.2007-2021.epw

ECLONIQ – Disponível em:

<https://ecloniq.com/quanto-custa-um-brise-confira-isto-brise-madeira-preco-m2/>

UGREEN – Disponível em:

<https://www.ugreen.com.br/telhado-verde/>

CARLUC Engenharia – Disponível em:

<https://carluc.com.br/arquitetura/telhado-verde/>