



**Centro Universitário de Brasília – UniCEUB**  
**Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais**  
**Aplicadas - FATECS**

RAFAEL BARBOSA RIOS

**AS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE  
FACHADAS E OS IMPACTOS AO DESEMPENHO TÉRMICO DO EDIFÍCIO**

Brasília  
2016

**RAFAEL BARBOSA RIOS**

**AS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE  
FACHADAS E OS IMPACTOS AO DESEMPENHO TÉRMICO DO EDIFÍCIO.**

Monografia apresentada como requisito para conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Civil pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas do Centro Universitário de Brasília – UniCEUB.

Orientador: Eng. Civil Flavio de Queiroz Costa, M.Sc.

Brasília  
2016

**RAFAEL BARBOSA RIOS**

**AS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE FACHADAS E OS IMPACTOS AO DESEMPENHO TÉRMICO DO EDIFÍCIO.**

Monografia apresentada como requisito para conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Civil pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas do Centro Universitário de Brasília – UniCEUB.

Orientador: Eng. Civil Flavio de Queiroz Costa, M.Sc.

Brasília, 24 de Junho de 2016.

**Banca Examinadora**

---

Eng.Civil: Flavio de Queiroz Costa, M.Sc..  
Orientador

---

Eng<sup>a</sup>. Civil: Irene Joffily, M.Sc..  
Examinador Interno

---

Eng. Mecânico: George Raulino, M.Sc..  
Examinador Externo

O graduando Rafael Barbosa Rios participou do Programa Ciência Sem Fronteiras, financiado pela CAPES nos anos de 2013 e 2014, estudando na Universidade de Toronto, no Canadá.

*The undergraduate student Rafael Barbosa Rios was enrolled in the program Science Without Borders, funded by CAPES in 2013 and 2014, studying at the University of Toronto, in Canada.*

## RESUMO

A preocupação com o desenvolvimento sustentável é cada vez mais abordada, tanto em escalas regionais quanto globais, o que não é diferente no âmbito da construção civil. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo o estudo do impacto das propriedades dos sistemas construtivos de fachadas no desempenho térmico de um edifício, com ênfase na melhoria da eficiência energética. A metodologia adotada compreende o estudo de diferentes composições de fachada e a padronização de outros fatores relacionados à envoltória, por meio de simulação computacional. Para as simulações e análises foram utilizados o programa *Simergy* e dados bioclimáticos de Brasília - DF, juntamente com as Normas Brasileiras. A partir destas simulações foram obtidos dados a respeito das temperaturas dos ambientes e das faces internas e externas; da absorção da radiação solar pela face externa e do fluxo de energia conduzida por cada tipo de parede externa. Assim, com base nos resultados obtidos nos diferentes sistemas, houve a análise e comparação, destacando-se os impactos provenientes das propriedades de cada um. Nas simulações foram considerados diferentes composições das paredes externas, com variação de suas tipologias construtivas, cores e materiais de revestimentos utilizados. Os resultados permitiram concluir sobre os diferentes considerações entre combinações e elementos, identificando-se aqueles geradores de impactos capazes de alterar a performance do sistema. Os sistemas de maior transmitância térmica permitiram uma maior troca de calor entre os meios, e sistemas de alta absorvidade, sofreram um aquecimento maior que sistemas similares. Há que se considerar que para efeito da simulação realizada foram fixados parâmetros e desconsideradas cargas de ocupação para padronizar uma mesma situação em todas as simulações, que potencializem o efeito comparativo. Por fim, conforme exposto ao longo da revisão bibliográfica e confirmado nos resultados das simulações, este estudo reitera a necessidade de consideração do desempenho térmico na escolha do sistema construtivo de fachada, associando-o às condições do meio no qual o sistema está inserido, como elemento de suporte às decisões de projeto.

**Palavras-Chave:** Desenvolvimento Sustentável. Fachadas. Desempenho Térmico.

## ABSTRACT

The sustainable development concern has been continuously increasing, from a regional to a global scale, not differently from it, it has been increasing in the civil engineering site as well. Thus, this paper presents a study about relationships between the external walls properties and the thermal performance, focusing on the energy efficiency increase. The methodology considers the study of different facade systems combinations and the standardization of other factors related to the building envelope performance, applying it to a computer simulation process. For the simulation and analysis procedures, it was used the Simergy software and weather data from Brasília-DF, also considering Brazilian Standards Manuals. The simulation process emitted data about the wall surfaces and zones temperatures; the solar radiation absorptance from the external surface and the conduction heat flow for each external wall combination. So, based on the results from each system, it was made analysis and comparison, presenting the impacts from each system properties. On the simulation process it were considered different external wall compositions, by varying constructive typology, colors and coat materials. Since that, it is possible to conclude about different results acquired by each combination and elements that compose it, identifying the motivators to interfere in the system performance. The systems with elevated conductivity allowed more thermal exchanges between ambients, and the use of high absorptivity coats, increased the temperature gain comparing to similar systems. It must be considered that was used some fixed parameters and that were not considered occupation loads to standard the simulation process and increase the comparative process. In conclusion, as it was presented in the literature review and evidenced on the simulation results, this paper reclaim the importance of thermal performance, considering the environmental conditions, on decision process of the facade system definition.

**Keywords:** Sustainable Development. Facade. Thermal Performance.

# SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	I
<b>ABSTRACT</b> .....	II
<b>SUMÁRIO</b> .....	III
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	3
2.1. Objetivo Geral .....	3
2.2. Objetivos Específicos .....	3
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
3.1. Desenvolvimento Sustentável .....	4
3.2. Desempenho Térmico .....	4
3.2.1. Ambiente Climático .....	5
3.2.2. Conforto Térmico .....	8
3.2.3. Balanço Energético .....	9
3.2.4. Transferência Térmica .....	11
3.3. Eficiência Energética .....	13
3.3.1. Otimização da Eficiência Energética por meio de Desempenho Térmico. ....	14
3.4. Desempenho Térmico em Sistemas de Fachada .....	18
3.4.1. Absortividade, Refletividade e Transmissividade .....	20
3.4.2. Emissividade .....	21
3.4.3. Condutividade Térmica .....	22
3.4.4. Fluxo de Calor .....	23
3.4.5. Inércia Térmica .....	23

3.4.6.	Etiquetagem .....	25
3.4.7.	Métodos de Análise do Desempenho Térmico .....	26
4.	<b><u>METODOLOGIA</u></b> .....	29
4.1.	Descrição da Projeção de Estudo .....	29
4.2.	Sistemas Construtivos de Fachada .....	35
4.2.1.	Bloco Cerâmico de 6 furos com Pintura Branca .....	38
4.2.2.	Bloco Cerâmico de 12 furos com Pintura Branca .....	38
4.2.3.	Bloco Cerâmico de 12 Furos com Pintura Preta .....	39
4.2.4.	Bloco Cerâmico de 6 Furos com Revestimento em Alumínio Composto sem Isolamento Térmico .....	39
4.2.5.	Bloco Cerâmico de 6 Furos com Revestimento em Alumínio Composto com Isolamento Térmico .....	40
5.	<b><u>APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E ANÁLISE</u></b> .....	42
6.	<b><u>CONCLUSÃO</u></b> .....	53
6.1.	Limitações do Trabalho .....	55
6.2.	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	55
7.	<b><u>BIBLIOGRAFIA</u></b> .....	56
8.	<b><u>APÊNDICES</u></b> .....	59
	APÊNDICE A - Temperatura em Cada Sistema Construtivo e Temperatura Externa.....	59
	APÊNDICE B - Temperaturas das Faces Internas e Externas da Fachada Sudeste, e Ambientes Internos e Externos do 2º Pavimento por Sistema Construtivo. ....	62

APÊNDICE C - Temperaturas de Zonas Periféricas e Centrais do 2º Pavimento por Sistema Construtivo. ....	65
APÊNDICE D – Cálculo das Propriedades do Bloco Cerâmico de 6 Furos (9X14X24cm) com Argamassa de Assentamento de 1,5cm. ....	67
APÊNDICE E - Cálculo das Propriedades do Bloco Cerâmico de 12 Furos (19X19X24cm) com Argamassa de Assentamento de 1,5cm. ..	69
9. <b>ANEXOS</b> .....	71
ANEXO 1 – Tabela A.1 da NBR 15220-2 (ABNT, 2004b), Resistência Térmica Superficial Interna e Externa. ....	71
ANEXO 2 - Tabela B.1 da NBR 15220-2 (ABNT, 2004b), Resistência Térmica de Câmaras de Ar Não Ventiladas, com Largura Maior que Espessura. ....	71
ANEXO 3 - Tabela B.2 da NBR 15220-2 (ABNT,2004b), Absortância para Radiação Solar e Emissividade para radiações a temperaturas comuns. ....	72
ANEXO 4 - Tabela B.3 da NBR 15220-2(ABNT, 2004b), Densidade de Massa Aparente, Condutividade Térmica e Calor Específicos de Materiais . ....	73

## 1. INTRODUÇÃO

O termo sustentabilidade apesar de possuir diversas interpretações, tomou forma no campo do desenvolvimento em 1987, apresentado na publicação *Our Common Future* (BRUNDTLAND, 1987), produzida pela *World Commission on Environment and Development* (WCED), organização desenvolvida pelas Nações Unidas. A publicação define desenvolvimento sustentável como preocupação em atender à população em suas necessidades, sem comprometer os recursos do meio ambiente para as gerações futuras, respeitando-se limites.

Além dessa preocupação apresentada no documento da WCED sobre o desenvolvimento e uma possível forma de abordagem, há também Lamberts *et al.* (2004) que contribuem na descrição da situação energética brasileira. Eles apresentam a distribuição de consumo, e quais decisões em projetos podem otimizar o desempenho térmico, o consumo e a geração de energia, tanto para edifícios isoladamente estudados, quanto para o cenário nacional.

Além da abordagem da publicação de Lamberts *et al.* (2004), diversos outros artigos e publicações (PEDRINI; SZOKOLAY, 2005; PEREIRA, 2009; ASTE *et al.*, 2009; WONG; LI, 2007; FERRER; GARRIDO, 2013) apontam para a preocupação com estudos a serem realizados no desenvolvimento de um projeto que gere um melhor desempenho energético, seja pelo melhor aproveitamento do ambiente, por especificações de materiais com diferentes propriedades térmicas na composição do edifício, ou uso de diferentes equipamentos e soluções que busquem melhor desempenho térmico.

Aste *et al.* (2009) apresentam o controle de características termo físicas de componentes de envoltória de um edifício como um dos fatores primordiais para consideração durante o seu desenvolvimento, e mostram como as propriedades térmicas influenciam na redução do consumo energético, ao se considerar diferentes sistemas construtivos e suas respectivas consequências.

Ferrer e Garrido (2013) defendem que ao focar no sistema de envoltória do edifício, podemos influenciar na eficiência energética não apenas pelo controle de captação de energia térmica do meio externo, mas também por sua influência na iluminação, no desempenho de equipamentos internos e até mesmo na produção de energias renováveis.

Devido a importância e a complexidade da análise de edifícios sob a ótica energética, Pedrini e Szokolay (2005) consideram que a simulação se apresenta como uma ótima opção, especialmente durante o desenvolvimento e detalhamento do projeto, por potencializar soluções e decisões mais precisas. Com uma perspectiva similar Ferrer e Garrido (2013, p.60), descrevem essa opção de simulação *“como um excelente apoio ao usuário, especialmente nas fases iniciais do desenho, ao permitir avaliar do ponto de vista energético as diferentes possibilidades para um problema concreto”*. Portanto, a simulação se mostra como um método efetivo para análise de envoltórias, e uma excelente opção para análise de diferentes sistemas construtivos e suas possíveis combinações.

Com base nestes princípios, este trabalho desenvolve uma análise das propriedades térmicas de diferentes sistemas de envoltória em relação à transmissão de energia térmica do meio externo para o interno, a partir de simulações feitas, com o uso de *software*. Para efeito da análise do objeto de estudo, em função da estreita relação com o meio físico, suas inúmeras possibilidades de variações e complexidade e dos elementos afins envolvidos na temática abordada, serão aprofundados e considerados nas simulações apenas os elementos componentes dos sistemas de envoltória. Neste contexto, os aspectos relativos a iluminação, a ventilação e aos sistemas de condicionamentos mecanizados e aos demais fatores correlatos à edificação restringem-se a uma abordagem superficial. Isto se justifica apenas pelo caráter didático do estudo, que busca enfatizar os resultados relativos ao desempenho térmico de diferentes sistemas de fachadas relacionados aos seus elementos componentes.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo desenvolver simulações e analisar resultados de diferentes sistemas de fachada no âmbito da construção civil, com foco nas propriedades térmicas e suas influências no desempenho térmico de edificação.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Elaboração de simulações térmicas simplificadas de uma edificação comercial por meio de dados fornecidos pelo INMET na cidade de Brasília.
- Utilização das simulações térmicas para a análise de uma edificação comercial em Brasília, que considerem as seguintes variações:
  - composição da fachada
  - cor da superfície
  - tipologia dos materiais
- Apresentação e verificação dos resultados alcançados pela simulação, a partir dos estudos iniciais.
- Comparação dos resultados alcançados em diferentes sistemas construtivos de fachadas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Desenvolvimento Sustentável

A publicação *Our Common Future* (BRUNDTLAND, 1987, p.41, traduzido) define desenvolvimento sustentável como “[...]um desenvolvimento que atende as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade de gerações futuras de atender suas próprias necessidades”.

Segundo Mebratu (1998), há evidências históricas de que fatores ecológicos proporcionaram a ascensão e queda de impérios, seja por consequências originadas tanto na indústria quanto na agricultura; assim, a preocupação com a forma que a sociedade se desenvolvia, e as consequências ambientais já eram relevantes. No âmbito da construção civil, Yilmaz (2007) expõe os problemas energéticos e o aquecimento global como fatores que estimularam o desenvolvimento sustentável, a fim de reduzir problemas futuros.

Na construção civil devemos estar conscientes da ocorrência de impactos provocados pelos materiais ao ambiente onde estão inseridos. Há um ciclo de extração, produção, transporte e construção, utilização do produto final, seguido da desconstrução e deposição ou reaproveitamento de materiais. Este ciclo é denominado ciclo de vida; portanto, durante o ciclo de vida devemos buscar soluções para reduzir o impacto ambiental em cada etapa (SCHEUER *et al.*, 2003).

#### 3.2. Desempenho Térmico

Perreira (2006, p. 6) define desempenho térmico como “[...]o comportamento térmico do edifício frente às condições climáticas externas e cargas internas”. E a busca de um melhor desempenho térmico se dá por meio da otimização deste comportamento, a partir da associação de técnicas como ventilação natural, sombreamento, paisagismo, técnicas evaporativas, entre outras descritas por Aste *et al.* (2009), Lamberts *et al.* (2016), Ferrer e Garrido (2013) e por diversos outros artigos (YILMAZ, 2007; WONG; LI, 2007; PEDRINI; SZOKOLAY, 2005) os quais

descrevem a importância da associação das técnicas citadas anteriormente junto a escolha adequada de sistemas construtivos.

### 3.2.1. Ambiente Climático

Conhecer os fatores inerentes ao ambiente no qual a edificação se localiza é fundamental, pois ao analisarmos o consideraremos como um sistema termodinâmico aberto, no qual sempre haverá troca de energia e massas entre o ambiente interno e artificial, seja por radiação solar, visível ou não, temperatura, umidade e por outros fatores que nele podem interferir, como árvores e edifícios próximos (FERRER; GARRIDO, 2013).

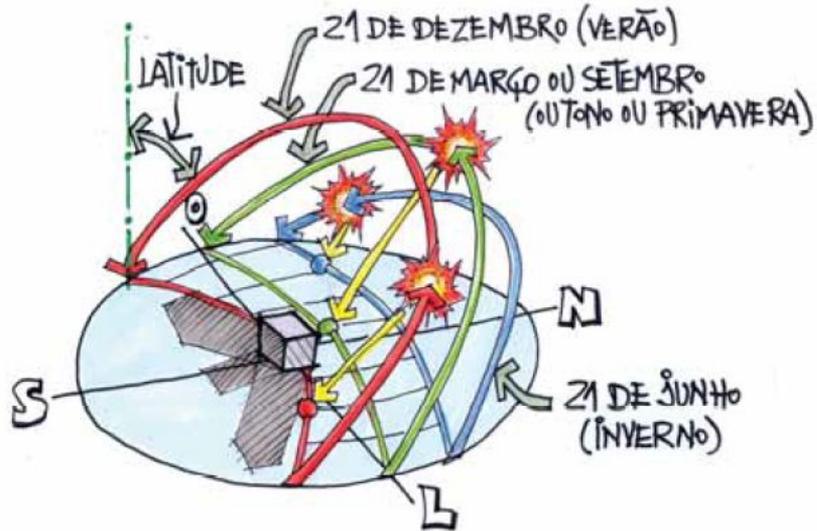
Estas trocas de energia ocorrem de diferentes formas de acordo com a localização, como foi apresentado na publicação de Sorgato *et al.* (2014), onde um mesmo modelo de edificação apresenta diferentes resultados em relação ao desempenho térmico, devido a mudança de local. A NBR 15220-3 (ABNT, 2004c) determina diferentes diretrizes bioclimáticas para diferentes zonas, sendo oito zonas de estudo, como é citado por Triana e Lamberts (2007), que trata da importância do ambiente para a avaliação térmica.

#### 3.2.1.1. Radiação Solar

A radiação solar é um elemento relevante para o estudo da eficiência energética, e se atribui prioridade ao estudo da luz e da carga calorífica gerada (LAMBERTS *et al.*, 2004). Na medida em que a radiação interage com a atmosfera, ela afeta a quantidade de energia que chega diretamente ao edifício e, juntamente a outros fatores, determina a temperatura do ar atmosférico, pois, a atmosfera reflete, absorve e transmite a energia enviada pelo Sol (FERRER; GARRIDO, 2013).

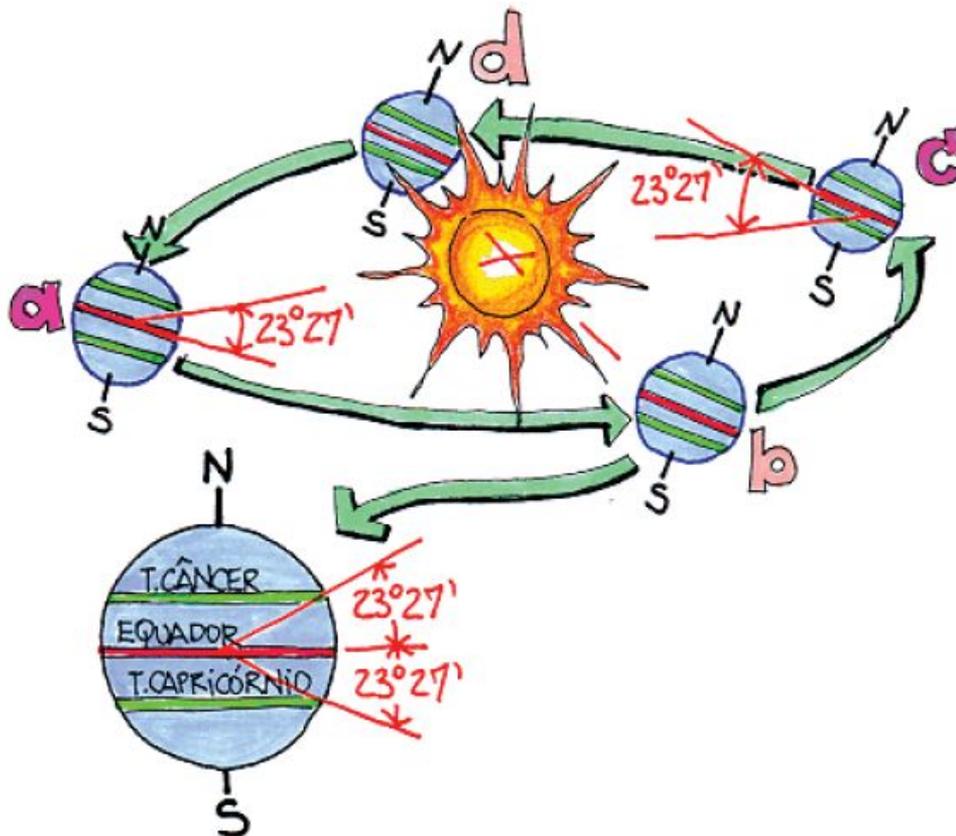
### 3.2.1.1.1. Movimentação Solar

**Figura 1** - Trajetória Solar nos Solstícios e Equinócios.



Fonte: Eficiência Energética na Arquitetura, Lamberts et al. (2004, p.73).

**Figura 2** - Translação da Terra e localização dos trópicos.



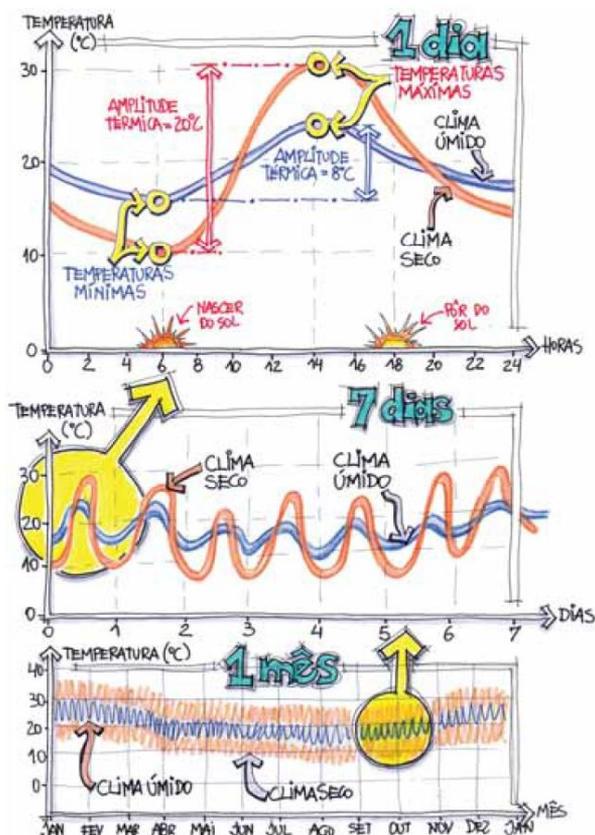
Fonte: Eficiência Energética na Arquitetura, Lamberts et al. (2004, p.73).

É indispensável a referência solar para a análise do edifício em relação a radiação, a trajetória solar (Figura 1) e a translação terrestre (Figura 2). O livro Eficiência Energética na Arquitetura (LAMBERTS *et al.*, 2004) coloca a radiação solar como um dos comportamentos mais conhecidos, pois por meio de simplificações como as apresentadas nas Figuras 1 e 2, podemos definir o posicionamento solar, em relação a uma latitude e uma hora do dia, e até mesmo podemos determinar a duração do dia para uma localização específica.

### 3.2.1.2. Temperatura

A temperatura de determinado ambiente é resultado de fluxos de massas, condução de energia térmica e radiação solar. Facilmente medida, é uma variável bem conhecida, onde sua variação, quando estudada em um período curto de tempo, como em um dia, apresenta uma amplitude considerável. Porém, ao ampliarmos esse período de tempo veremos um certo padrão, como apresentado na Figura 3 (LAMBERTS *et al.*, 2004).

**Figura 3- Variação de Temperatura.**



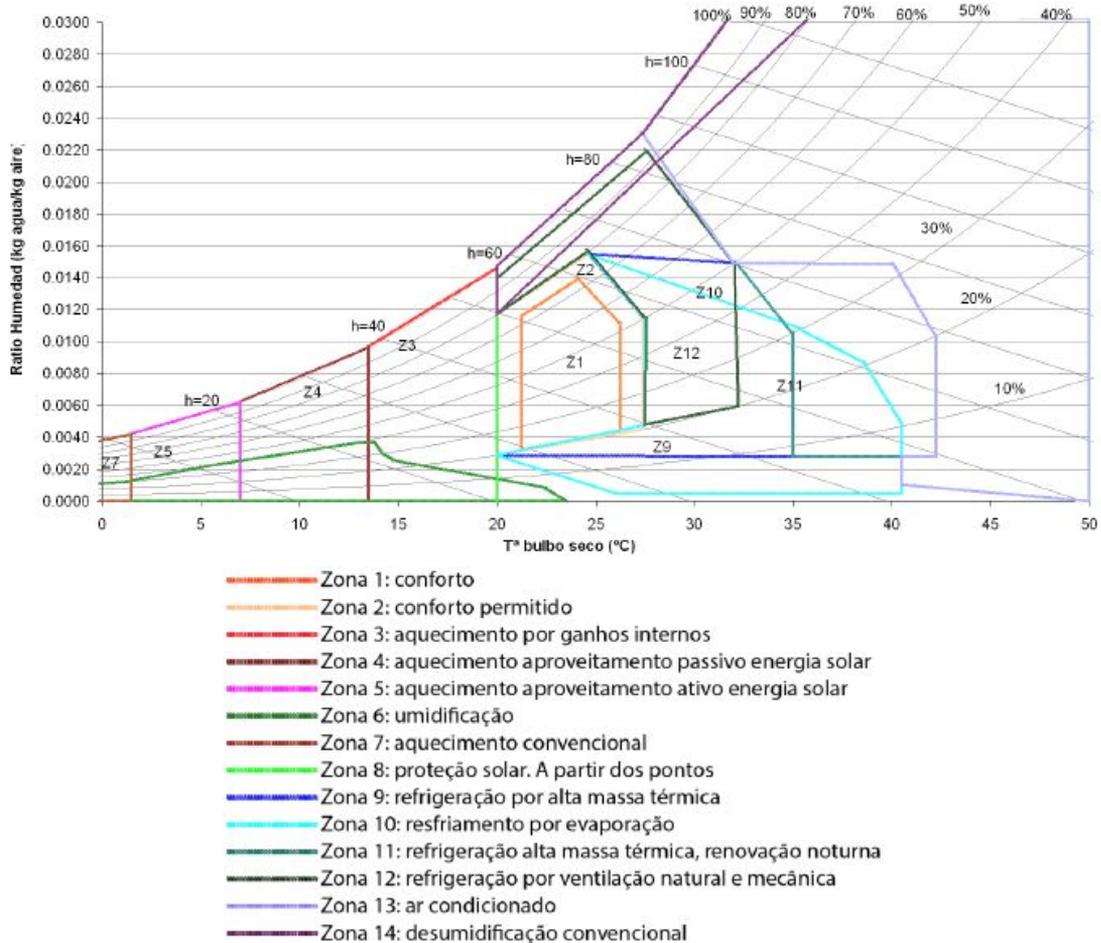
Fonte: Eficiência Energética na Arquitetura, Lamberts *et al.* (2004, p.78).

### 3.2.1.3. Umidade

A umidade é determinada pela quantidade de água no ar, e esta quantidade está ligada à temperatura, quanto mais quente mais água o ar é capaz de conter em estado saturado. Entretanto, a umidade relativa é a porcentagem de água absorvida pelo ar, em relação ao máximo que pode ser absorvido em determinada temperatura, o que tende a aumentar com a diminuição da temperatura (LAMBERTS *et al.*, 2004). Há uma maior amplitude térmica diária como visto na Figura 3, devido às propriedades térmicas da água em relação à radiação, por esse motivo as soluções se diversificam em ambientes com essas variações (YILMAZ, 2007; LAMBERTS *et al.*, 2004).

### 3.2.2. Conforto Térmico

**Figura 4- Carta Psicrometria de Givoni ou Carta Bioclimática de Givoni.**



Fonte: *Eficiência Energética em Edifícios, Ferrer e Garrido (2013, p.34).*

*“A zona de conforto é definida como uma gama de condições climáticas na qual a maioria das pessoas não sentiriam desconforto térmico, tanto calor ou frio”. (GIVONI, 1992, p.11)*

O conforto térmico para um indivíduo está relacionado não apenas as condições de temperatura, umidade e velocidade do ar; mas, ao balanço térmico que envolve o indivíduo, onde as trocas de calor com o ambiente devem ser feitas dentro de certos limites. (ASHRAE, 2009)

O conforto térmico pode ser analisado pelo diagrama (Figura 4) de Givoni (1992) desenvolvido em seu estudo sobre conforto térmico, onde ele relaciona os fatores estatísticos de conforto como umidade relativa, razão de umidade e temperatura, a fim de definir zonas de conforto e soluções a serem adotadas. Para considerações de projeto, são considerados também o vestuário e atividades dos usuários (WONG; LI, 2007).

### 3.2.3. Balanço Energético

O intercâmbio térmico entre componentes de um sistema deve ser estudado, e tem como objetivo reduzir perdas caloríficas nas estações frias e evitar o aumento da temperatura do ambiente, com vistas ao conforto térmico e à redução do consumo de energia nas estações quentes (FERRER; GARRIDO, 2013). Segundo a publicação de Lamberts *et al.* (2016) o balanço térmico não é uma condição estável, devido à constante variação dos fatores que o envolvem, como a incidência solar, a temperatura e umidade exterior e a ocupação do ambiente.

#### 3.2.3.1. Ganho Solar

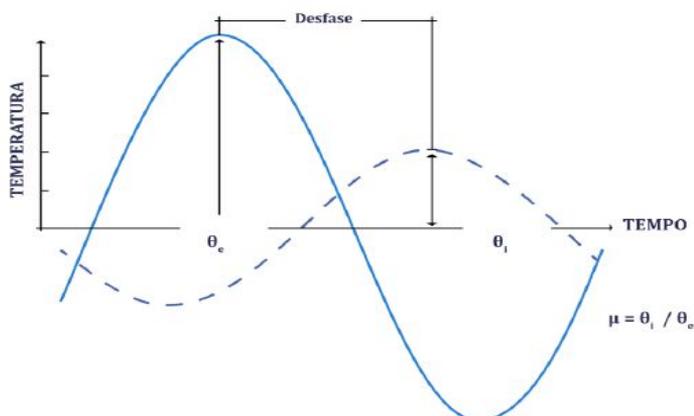
Fator diretamente ligado às propriedades térmicas da envoltória do edifício, onde será captada a energia emitida pelo Sol, ou através de radiação direta dos componentes de fachada, que serão transmitidos para o interior do edifício, ou por

meio do aquecimento do ar do interior do edifício. Pode-se reduzir o ganho solar por meio de técnicas de sombreamento, ou naturais como árvores ou pelo aproveitamento do ambiente urbano (FERRER; GARRIDO, 2013).

### 3.2.3.2. Inércia Térmica

A inércia térmica é a capacidade de armazenar e devolver, ou transmitir, energia térmica com uma defasagem de tempo; um regime dinâmico, situação real, o elemento estará sujeito a oscilações de temperatura e radiação externas, em função das suas propriedades térmicas, que estão especificadas na NBR 15220-2 (ABNT, 2004b) e no *ASHRAE Handbook Fundamentals* (ASHRAE, 2009). Essa energia térmica será absorvida, onde a temperatura interna irá ser modificada com defasagem de tempo em relação ao ambiente externo. Isto pode ser observado na Figura 5, onde, por meio de propriedades como transmitância, densidade, capacidade térmica e espessura, serão controladas a influência do meio externo e o tempo de defasagem (FERRER; GARRIDO, 2013).

**Figura 5-** Defasagem térmica de um elemento térmico.



Fonte: *Eficiência Energética em Edifícios*, Ferrer e Garrido (2013, p.27)

Segundo Aste *et al.* (2009) devemos considerar a importância do entendimento de diversas propriedades térmicas, não apenas do índice de condução do material, atribuindo a devida importância a fatores da dinâmica térmica que influenciam na eficiência do sistema quando combinados com outras soluções.

### 3.2.3.3. Ocupação

As cargas de ocupação são formadas pela energia emitida pelas pessoas que compõem o ambiente e por equipamentos. Há uma variação entre a emissão de energia pelos equipamentos, que podem ser consultadas com os fabricantes, e em relação à condição que as pessoas se encontram, são apresentadas aproximações na ISO 7730 (ISO, 2006), como as vestimentas e atividades, que por sua vez alteram as condições de ambiente por meio da sudoração e da respiração (LAMBERTS *et al.*, 2016).

### 3.2.4. Transferência Térmica

A transferência térmica é causada por um gradiente de temperatura, onde a energia se move da região com temperatura mais elevada para a região com menos energia térmica. Este processo pode ocorrer por condução, convecção e radiação (ASHRAE, 2009). Ferrer e Garrido (2013) ainda complementam com o fenômeno de transferência de massa, que pode ser analisado pelos processos anteriores, ou como um processo separado.

O controle e entendimento desses processos é fundamental para atingirmos um melhor desempenho térmico, que pode ser potencializado pela combinação das propriedades térmicas dos materiais que compõem a edificação e das soluções de desenho adotadas (ASTE *et al.*, 2009).

#### 3.2.4.1. Condução

A condução é a única transferência de energia térmica que ocorre dentro de sólidos, como uma parede maciça ou uma laje. A dinâmica em que essa transferência térmica ocorre depende de propriedades como condutividade, densidade e capacidade calorífica dos materiais que compõem o elemento. Essa análise ocorre de forma similar a modelos de circuitos de resistência elétrica (ASHRAE, 2009; FERRER; GARRIDO, 2013).

#### 3.2.4.2. Convecção

*“A convecção se verifica quando os corpos estão em contato molecular e um deles, pelo menos, é um fluido. O processo possui duas fases: na primeira o calor se transmite por condução, na segunda, a alteração sofrida pela temperatura do fluido modifica sua densidade provocando o movimento convectivo.”*

*(LAMBERTS et al., 2016, p.90).*

A ASHRAE (2009) divide a convecção em dois tipos forçado e natural ou livre. O primeiro tipo gerado por forças externas (bombas, ventiladores e vento); e o segundo, a convecção natural ou livre, se dá quando o movimento convectivo é gerado pelo contato do fluido com uma superfície de temperatura diferente. O coeficiente de transmissão térmica por convecção será determinado pelo tipo de ocorrência.

Ferrer e Garrido (2013) afirmam que devido à complexidade das condições de contorno, como velocidade do fluido, rugosidade do sólido e temperatura de ambos, os coeficientes de convecção normalmente não são confiáveis.

#### 3.2.4.3. Radiação

Toda massa acima da temperatura de zero absoluto emite radiação, formada por fótons em diferentes frequências, do infra ao ultra vermelho. A transmissão por radiação ocorre entre dois corpos sem a necessidade de conexão material. A emissividade é a capacidade de emitir carga térmica de ondas longas, a partir de corpos de baixa temperatura, por meio de uma superfície, cuja emissão varia de acordo com a composição do material. Já as ondas curtas, como as emitidas pelo Sol, têm sua captação determinada pela propriedade de absorvidade, que varia principalmente de acordo com a cor do material. (ASHRAE, 2009; LAMBERTS et al., 2004).

#### 3.2.4.4. Transmissão por Massa

Essa transmissão é a difusão de massa, que pode ser líquida, sólida ou gasosa, por uma zona, onde a massa inserida sob diferentes pressões, irá se movimentar do ponto de maior ao de menor pressão; portanto, através desta movimentação é estimulada a convecção entre o ambiente que a cerca.

Esse processo apresenta uma complexidade matemática entre suas relações, especialmente no que tange aos volumes estudados, o que demanda o uso de computadores para os cálculos. Neste fenômeno se insere a ventilação e ar-condicionado, onde diferentes massas de ar com diferentes pressões, resultam em uma movimentação dessas massas de ar, capazes de alterar a temperatura, velocidade do ar e até mesmo as condições de conforto do ambiente. (FERRER; GARRIDO, 2013; ASHRAE, 2009)

### 3.3. Eficiência Energética

A eficiência energética na construção civil pode ser definida como:

*“[...]um atributo inerente à edificação representante de seu potencial em possibilitar conforto térmico, visual e acústico aos usuários com baixo consumo de energia. Portanto, um edifício é mais eficiente energeticamente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia.”*

*(LAMBERTS et al., 2004, p.5).*

Na publicação *Eficiência Energética em Edifícios* do Observatório de Energia Renováveis para a América Latina e o Caribe (FERRER; GARRIDO, 2013), a redução de consumo é o foco da eficiência energética; cuja redução decorre da adoção de técnicas construtivas mais eficientes para cada região climática. Segundo Yilmaz (2007), a motivação para a redução de consumo não foi apenas ambiental, mas também devido à incapacidade energética.

### 3.3.1. Otimização da Eficiência Energética por meio de Desempenho Térmico

Para um desenvolvimento sustentável, a utilização consciente dos recursos que dispomos é fundamental para a prosperidade do desenvolvimento (MEBRATU, 1998) e a energia que consumimos é um destes recursos. Nele as técnicas para a redução do consumo energético em relação ao desempenho térmico visa a otimização do uso desta energia. Podemos dividir as técnicas em condicionamentos naturais, que por sua vez podem ser limitados por condições ambientais, desde o clima à composição urbana, e em técnicas de condicionamento artificial, que suprem as necessidades de conforto térmico dos usuários quando soluções naturais são insuficientes, ou por escolha do usuário. A aplicação destas técnicas são bem aceitas pela sociedade e pelos governos, especialmente após tratados internacionais sobre o ambiente (FERRER; GARRIDO, 2013; YILMAZ, 2007; LAMBERTS *et al.*, 2004).

As arquiteturas vernácula e bioclimática adotam soluções naturais e são propulsoras de muitas técnicas atualmente adotadas, como sombreamento, ventilação natural, orientação do edifício, aplicação de técnicas construtivas tradicionais, entre outras. É baseada no aproveitamento de condições climáticas do local e em atores socioculturais característicos, que resultam na redução dos efeitos indesejáveis das condições bioclimáticas. Ao mesmo tempo, soluções em relação à mecanização do controle térmico e desempenho de materiais de fachada, têm sua eficiência potencializada por decisões tomadas no projeto arquitetônico. (LAMBERTS *et al.*, 2004; LAMBERTS *et al.*, 2016; FERRER; GARRIDO, 2013).

#### 3.3.1.1. Condições Ambientais

As condições ambientais são afetadas pela composição do ambiente e suas condições climáticas. Pode haver tanto uma análise geral sobre a inserção em ambientes rurais ou urbanos, quanto considerações sobre microclimas nestas zonas, de forma mais específica, que considerem sua composição, como árvores, lagos, prédios, tipo de cobertura, dentre outros (ROMERO, 2007)

A melhor utilização do relevo, a orientação das edificações e a composição do ambiente podem alterar a incidência solar e propiciar ventos na edificação ou na área de estudo. Além disso, o uso de sistemas evaporativos ou propostas paisagísticas para a melhoria no conforto térmico e para o aumento da umidade relativa no ar, possibilita a redução da influência da radiação solar sobre o edifício (ROMERO, 2007, 2011).

Entretanto, há condições bioclimáticas nas quais essas soluções abordadas para combater o desconforto térmico são insuficientes ou inviáveis, devido a limitações físicas e socioeconômicas, induzindo a outras soluções como a utilização de diferentes materiais e os sistemas mecanizados (LAMBERTS *et al.*, 2016).

A análise de dados climáticos do ambiente serve como guia para o desenvolvimento de edifícios, especialmente na fase de projeto, na qual, decisões arquitetônicas serão tomadas, como definição de dimensões, orientação do edifício, o uso da ventilação natural ou mecânica, intervenções paisagísticas, utilização de sistemas evaporativos e de sombreamento, entre outras soluções (GIVONI, 1992; PEDRINI; SZOKOLAY, 2005; ASHRAE, 2009). O Brasil é dividido em 8 (oito) zonas bioclimáticas pela NBR 15220-3 (ABNT, 2004c), cada uma delas possuem características específicas em relação a condições ambientais, como incidência solar, vegetação, umidade, vento e relevo. A norma define diretrizes para soluções térmicas correspondentes à cada zona, e especificam abertura para ventilação, tipo de vedação, e outras estratégias viáveis para condicionamento, tendo em conta a estação do ano. Porém, as escolhas feitas em projeto devem basear-se também em uma análise específica do microclima estudado.

#### 3.3.1.2. Ventilação e Condicionamento

A ventilação e o condicionamento ambiental podem ser natural ou mecanizado, e suas soluções são definidas de acordo com o conforto térmico dos usuários, conforme descrito por Givoni (1992). Para tanto, o autor define zonas relacionadas a umidade, temperatura e pressão em função do condicionamento térmico desejado. Além da importância do conforto térmico, há que se considerar também a ventilação que atua no balanço térmico, na qual os fluxos de

transferências de calor são influenciados, dentre outros aspectos, pela velocidade do vento (LAMBERTS *et al.*, 2016; ASHRAE, 2009).

O conforto térmico está diretamente ligado às condições do ar do ambiente pela difusão de massas de ar que oscilam em função do balanço térmico, gradiente de pressão, velocidade, volume e composição do ar (ASHRAE, 2009).

Nas situações que se fazem necessárias intervenções em ambientes as soluções para condicionamento mecânico, meios evaporativos e ventilação natural estão ligadas principalmente às propriedades das massas de ar que serão submetidas a variações de temperatura, velocidade e umidade. Nos condicionamentos mecanizados as interferências nestas variáveis se dão a partir de sua combinação e da regulação dos níveis, que utilizam energia elétrica ou água, para atender as condições de conforto estabelecidas. (ASHRAE, 2009)

Para as situações de ventilação natural a utilização de aberturas em paredes externas, como janelas e fachadas ventiladas, são mecanismos que permitem a movimentação de ar entre o interior e o exterior do edifício. Nestes casos, para se atingir os níveis de conforto térmico desejáveis, é recomendável o estudo relativo às condições do entorno, que interagem e permitem modificar as condições do ambiente. Entretanto, quando há a intenção no aumento da temperatura interna do edifício, restringir o uso da ventilação natural pela vedação dos ambientes, tem o intuito de reduzir a perda de energia térmica para o meio externo, evitando a perda de calor. Contudo, deve-se respeitar um fluxo de ar mínimo para higienização do ambiente. (FERRER; GARRIDO, 2013; LAMBERTS *et al.*, 2016).

Wong e Li (2007), a partir de análise realizada em Singapura, apresentam soluções que devem ser consideradas durante o desenvolvimento de uma edificação em regiões de clima quente. Dentre elas, a utilização de sombreamento em zonas de captação de ar, a escolha dos materiais que irão compor a edificação, a orientação e disposição de janelas e elementos de captação de ar, e por fim o tempo e horário para captação de ar. Para Roucoult *et al.* (1999) esta captação no período noturno é tida como uma solução favorável para a redução do consumo de sistemas

mecanizados, como o de ar condicionados, embora devam ser considerados os impactos provocados à inércia térmica do edifício.

### 3.3.1.3. Desempenho Térmico dos Componentes de Edificações

O controle das propriedades térmicas dos componentes das edificações é um dos principais meios para alcançar um melhor desempenho térmico, especialmente quando se consideram as condições bioclimáticas do entorno. O estudo de cada elemento que compõe a edificação, inclui elementos em desde sistemas de cobertura a elementos em contato com o solo, como paredes de contenção, e podem ser utilizados de forma a gerar benefícios ao desempenho térmico. Entretanto, devido a uma maior extensão dos elementos de fachada e cobertura em edificações elevadas, estes componentes produzem impacto, mesmo assim não se deve desconsiderar o impacto dos demais elementos. (ASTE *et al.*, 2009; PEREIRA, 2009)

As propriedades térmicas são consideradas ao se analisar cada um destes elementos. As principais propriedades consideradas são: transmitância, fator solar ou absorvância, e capacidade térmica. Elas variam de acordo com os materiais aplicados, que podem ser translúcidos ou não; podem ser homogêneas ou compostas por diversas camadas, cujas composição e coloração dos elementos serão determinantes nas propriedades citadas (ASHRAE, 2009; LAMBERTS *et al.*, 2016).

As soluções adotadas em relação ao desempenho térmico dos componentes são diretamente ligadas às propriedades anteriormente mencionadas, e devem considerar o fator estético e econômico. Sua aplicação deve ser discutida juntamente com os outros profissionais responsáveis, especialmente com o arquiteto. A escolha dos materiais e dos sistemas construtivos deve levar em conta o balanço energético da edificação e diversas outras propriedades descritas nas normas, que apresentam variações significativas entre diferentes zonas bioclimáticas, conforme verificado na NBR 15220-3 (ABNT, 2004c) e na NBR

15575-4 (ABNT, 2013a). É em função das condições bioclimáticas que será definido o gradiente térmico, e com isso o sentido do fluxo de energia térmica (FERRER; GARRIDO, 2013).

Em regiões frias deve-se conter o calor e evitar perdas térmicas para o ambiente externo. Para isto deve-se reter a energia térmica nos elementos componentes, utilizar materiais de baixo coeficiente de transmitância e reduzir ao máximo as aberturas para ventilação. Ao mesmo tempo deve-se otimizar o uso dos fatores solares, como a iluminação e o aproveitamento da energia térmica emitida, na forma direta e imediata, e também pelo uso da inércia térmica.

Já nas regiões quentes as soluções visam dissipar energia térmica para o meio externo, e reduzir os efeitos da radiação solar, com a escolha preferencialmente de cores claras ou materiais reflexivos no intuito de reduzir a absorção da radiação solar. Para ambas as regiões recomenda-se o aproveitamento máximo da iluminação; e que a escolha e composição dos materiais vise reduzir a troca térmica com o ambiente. (LAMBERTS *et al.*, 2004; ASTE *et al.*, 2009; ASHRAE, 2009)

### 3.4. Desempenho Térmico em Sistemas de Fachada

O desempenho térmico da fachada de um edifício deve ser estudado e especificado a fim de reduzir o consumo energético, respeitadas as condições ambientais do entorno pela relação de impacto mútuo entre o meio e a edificação (ROMERO, 2011; ASTE *et al.*, 2009). Segundo a ASHRAE (2009), a preocupação com elementos que delimitam fisicamente o ambiente interno, demandam um monitoramento ou análise das cargas térmicas que nelas incidem, como radiação solar, trocas de calor e considerações sobre umidade e entrada de água, que interferem diretamente na eficiência energética. Todavia, a análise normalmente é feita a partir das piores condições para um determinado período. Em climas quentes, por exemplo, a chuva e outras cargas tendem a reduzir desconfortos térmicos, embora a entrada de água ou umidade interfira na transferência de energia de

massas de ar. Já, em climas frios, o estudo destes agentes tem maior impacto, pois além da água aumentar o consumo energético para garantir o condicionamento adequado, podem gerar deficiências para certas soluções, como na utilização da radiação solar para aquecimento, que pode sofrer interferência até pelo orvalho formado nas fachadas. Portanto, para estas soluções devem ser considerados estes fatores. As propriedades mínimas de desempenho de fachadas para edificações habitacionais são tratadas na NBR 15575-4 (ABNT, 2013a), e abordam as propriedades térmicas, a entrada de luz e umidade, assim como as propriedades de resistência física de sua composição.

Aste *et al.* (2009) defendem que o estudo de outras propriedades térmicas, além da transmitância, sejam considerados para certificação, como é o caso do uso da inércia térmica, adotada junto a outras soluções para potencializar o desempenho térmico. A própria norma brasileira NBR 15220-3 (ABNT, 2004c) já apresenta propriedades de atraso térmico, junto a transmitância e capacidade térmica para algumas configurações possíveis para os elementos construtivos elencados.

Também as cores produzem influência direta na absorvância solar. A emissividade dos elementos de composição da fachada podem reduzir a captação e transmissão da energia térmica de ondas curtas, provindas da radiação solar. Cabe a aplicação dessas propriedades e estudos a outros elementos construtivos como telhados, que tem uma maior incidência solar. Na escolha de elementos de fachada, também deve-se considerar a influência da iluminação, onde o uso de aberturas deve ser avaliado em relação ao desempenho térmico, pois ao se utilizar elementos translúcidos, normalmente vidros, tem-se o ganho térmico por transmissividade, embora o mesmo não ocorra em elementos opacos (LAMBERTS *et al.*, 2016; ASHRAE, 2009; REAGEN; ACKLAM, 1979).

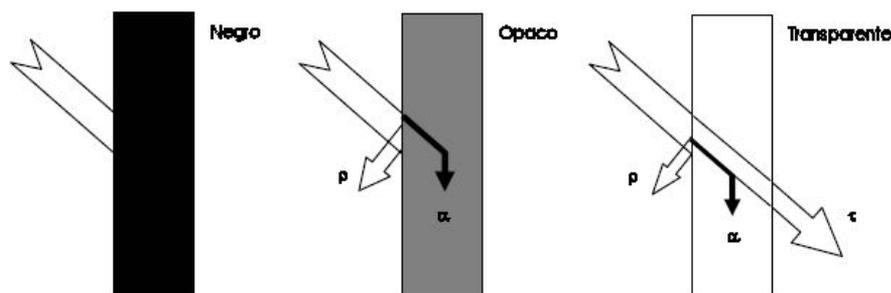
### 3.4.1. Absortividade, Refletividade e Transmissividade

A incidência de radiação sobre um elemento possui uma parcela refletida, uma absorvida e possivelmente uma outra transmitida diretamente ao ambiente, caso o material seja translúcido. Essas proporções estão relacionadas abaixo (Equação 1):

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (\text{Eq.1})$$

Onde  $\alpha$  é o coeficiente de absorvidade,  $\rho$  é o coeficiente de reflexão e  $\tau$  é o coeficiente de transmissão. Os dois primeiros estão ligados diretamente à cor e ao acabamento da superfície do elemento, enquanto o terceiro à composição; para elementos opacos  $\tau = 0$ , enquanto para corpos negros  $\alpha = 1$ .

A Figura 6 apresenta o fluxo de energia solar em elementos negros, opacos e translúcidos ou transparentes (MENDONÇA, 2005).



**Figura 6-** Fluxo de energia solar em elementos negros, opacos e transparentes.

Fonte: Anexo 1- *Propriedades dos Materiais e Sistemas de Fachada*, Tese de doutorado "Habitar sob uma segunda pele", Mendonça (2005, p.13).

#### 3.4.1.1. Fator Solar

O fator solar representa a razão entre a radiação incidente e a radiação que atravessa, aquela absorvida pelo ambiente interno. Normalmente este fator é definido para janelas e peles de vidro, onde por meio do uso de diferentes tipos de vidros e películas é possível reduzir o fator solar, reduzindo ao mínimo a perda em iluminação natural, entretanto ainda pode ser utilizado para elementos opacos

(ASHRAE, 2009). A Equação 2 representa matematicamente o fator solar, fator adimensional, e a Equação 3 descreve a temperatura sol-ar,  $t_{SOL-AR}$  (K). (LAMBERTS *et al.*, 2016)

$$F_s = U \cdot \alpha \cdot R_{se} + \tau \quad (\text{Eq.2})$$

$$t_{SOL-AR} = F_s * RS \quad (\text{Eq.3})$$

Nestas equações  $U$  (W/m<sup>2</sup>.K) é a transmitância térmica e  $R_{se}$  (m<sup>2</sup>.K/W) é a resistência superficial externa, que serão discutidos no tópico 3.4.3.1;  $\alpha$  é o coeficiente de absortividade solar,  $\tau$  é o coeficiente de transmissão solar, e por fim  $RS$  (W) é a radiação solar incidente.

#### 3.4.2. Emissividade

A emissividade é uma propriedade da superfície do elemento, e função da temperatura, do comprimento de onda de radiação e das condições da superfície. A emissividade atua em câmaras de ar, onde a resistividade térmica da câmara estará ligada a emissividade das camadas que a contornam; Também atua na dissipação de calor por radiação, onde quanto mais emissivo é o sistema, maior sua capacidade de dissipar calor por radiação. (ASHRAE, 2009; ABNT, 2004b).

*“Um corpo pode ser resfriado se troca radiação com outro corpo a temperatura menor. Esta troca de calor tem valores significativos quando a diferença de temperatura entre superfícies é elevada, exemplificando a troca de calor noturna entre coberturas de edificações e o céu noturno sem nuvens, e atmosfera limpa. O céu noturno pode ser considerado uma superfície a zero grau absoluto daí a capacidade de existirem altas trocas de calor, principalmente quando as coberturas tem alta emissividade”.*

(RAULINO, 2016)

### 3.4.3. Condutividade Térmica

A condutividade térmica,  $\lambda$ , é definida pela NBR 15220-1 (ABNT, 2004a, p.2) como “propriedade física de um material homogêneo e isótropo, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de  $1\text{W/m}^2$ , quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro”. Através da condutividade encontramos propriedades de elementos construtivos como resistência e capacidade térmicas (LAMBERTS et al., 2004; ABNT, 2004a).

#### 3.4.3.1. Resistência Térmica e Transmitância Térmica

A ASHRAE (2009) entende o cálculo da transmissão de energia térmica de forma similar a condução com a transmissão de energia elétrica, onde os materiais que compõem os elementos construtivos funcionaram como resistências, e o valor da resistência térmica de um elemento,  $R(\text{m}^2.\text{K}/\text{W})$ , é dado pela espessura do elemento,  $e(\text{m})$ , dividido pela condutividade dos materiais que o compõem,  $\lambda (\text{W}/\text{m}.\text{K})$ . (Equação 4).

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (\text{Eq.4})$$

Enquanto a transmitância térmica ou coeficiente de condutividade global,  $U(\text{W}/\text{m}^2.\text{K})$ , é o inverso da resistência térmica total (Equação 5), que é encontrada pelo somatório das resistências das camadas que compõem o elemento (Equação 6), ou pela relação expressa na Equação 7(ABNT, 2004b).

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (\text{Eq.5})$$

$$R_t = \sum R_n \quad (\text{Eq.6})$$

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (\text{Eq.7})$$

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (\text{Eq.8})$$

Onde  $R_n$  (m<sup>2</sup>.K/W) são as resistências de cada superfície,  $R_t$  (m<sup>2</sup>.K/W) é resistência total de superfície a superfície do componente e  $R_T$  (m<sup>2</sup>.K/W) é a resistência de ambiente a ambiente, as resistências  $R_{se}$  e  $R_{si}$  (m<sup>2</sup>.K/W), são as resistências superficiais externas e internas e  $A_n$  (m<sup>2</sup>) são as áreas de cada componente.

Apesar da NBR 15220-2 (ABNT, 2004b) estimar valores médios recomendados, para as resistências internas e externas superficiais serem propostas de acordo com o fluxo de calor, a norma deixa claro sua relação com emissividade das superfícies, velocidade do ar incidente e temperaturas de massas de ar e de superfícies.

#### 3.4.4. Fluxo de Calor

O fluxo de calor,  $Q$  (W), é determinado por sua densidade,  $q$  (W/m<sup>2</sup>), multiplicado pela área,  $A$  (m<sup>2</sup>) (Equação 10). Portanto, deve ser estudado de modo a reduzir perdas de calor em climas e estações frias, e evitar ganhos elevados em climas e regiões quentes. Está diretamente ligado à transmitância térmica,  $U$  (W/m<sup>2</sup>.K) como podemos ver na Equação 9 (LAMBERTS *et al.*, 2004).

$$q = U * (\Delta t + t_{SOL-AR}) \quad (\text{Eq.9})$$

$$Q = q * A \quad (\text{Eq.10})$$

Onde  $\Delta t$  (K) é a diferença de temperatura entre os ambientes internos e externos, e a temperatura SOL-AR (Equação 3),  $t_{SOL-AR}$  (K), que é consequência do fator solar do elemento.

#### 3.4.5. Inércia Térmica

A inércia térmica é baseada na capacidade térmica, na massa dos elementos e na condutividade dos materiais, ou de elementos construtivos que compõem a edificação. As flutuações térmicas que ocorrem durante o dia, ou até mesmo em períodos mais longos, produzem efeitos no desempenho térmico do edifício. Podem ser reduzidas pela energia acumulada ou a ser captada nos

elementos construtivos, ou terem os níveis de eficiência energética elevados. Além desta capacidade de reter energia, devemos considerar o tempo no qual ela será transmitida para o ambiente interno ou externo, denominado atraso térmico (MENDONÇA, 2005; ASTE et al., 2009).

Um exemplo dado pelo o Engenheiro George Raulino durante a análise de alguns resultados, foi o da capacidade da cobertura em ser resfriada durante a noite, em função da temperatura externa baixa e da emissão de radiação para o espaço. Neste caso, quanto maior a inércia térmica da massa da cobertura maior será a perda de calor. Ao amanhecer, tanto no ambiente externo quanto no interno, haverá transferência de calor para a massa da cobertura o que tornará o ambiente interno mais agradável e nos casos de ambientes condicionados, este processo retardará o início da operação e reduzirá a utilização de energia. (RAULINO, 2016)

#### 3.4.5.1. Capacidade Térmica

A capacidade térmica é definida pela NBR 15220-1 (ABNT,2004a, p.2) como “quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura”. Seguindo o mesmo princípio Lamberts *et al.* (2004) definem que é a capacidade de reter calor em um respectivo material ou elemento construtivo. Esta relação matemática é representada pela Equação 11, para os elementos homogêneos e para elementos não homogêneos tem relação semelhante à resistência conforme Equação 12 e 13.

$$C_{Ta} = \sum e * c * \rho \quad (\text{Eq.11})$$

$$C_T = \sum C_{Tn} \quad (\text{Eq.12})$$

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \quad (\text{Eq.13})$$

Onde  $C_{Ta}$  (kJ/m<sup>2</sup>.K) é a capacidade térmica da camada e  $C_T$  (kJ/m<sup>2</sup>.K) a capacidade térmica total do elemento,  $c$  (kJ/kg.K) é a capacidade térmica específica ou calor específico de um material homogêneo,  $e$  (m) é a espessura da

camada e  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>), diferentemente da Equação 1, é a densidade; e novamente  $A_n$  são as áreas de cada componente.

#### 3.4.5.2. Atraso Térmico

A NBR 15220-1 (ABNT, 2004a) define atraso térmico como “tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor”.

A oscilação térmica no interior do edifício sofrerá um amortecimento e um atraso, como consequência da capacidade térmica, da composição das paredes e de outros componentes. Sua manipulação juntamente a outras propriedades otimizam a eficiência energética (ASTE *et al.*, 2009; MENDONÇA, 2009). A norma brasileira estima o atraso térmico,  $\phi$  (h), pelas Equação 14 e 15 (ABNT, 2004b).

$$\phi = 1.382 * e * \sqrt{\frac{\rho * c}{3.6 * \lambda}} \quad (\text{Eq.14})$$

$$\phi = 0.7284 \sqrt{R_t * C_T} \quad (\text{Eq.15})$$

Onde,  $e$ (m) é a espessura,  $\lambda$ (W/m.K) é a condutividade térmica do material,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) é a densidade do material,  $c$ (kJ/kg.K) é o calor específico,  $R_t$  (m<sup>2</sup>.K/W) é resistência total de superfície a superfície do componente, e  $C_T$  (kJ/m<sup>2</sup>.K) a capacidade térmica total do elemento.

#### 3.4.6. Etiquetagem

Juntamente com o desenvolvimento de associações e instituições para o estudo energético como a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) e o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (LABEEE), são desenvolvidas etiquetas para regulamentar, classificar e facilitar a visualização dos estudos nos quais são aplicados.

O desenvolvimento destas etiquetas de eficiência energética portanto tornou-se uma tendência mundial, na qual o Brasil se integra através do INMETRO e do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), os quais desenvolveram normas juntamente com a ABNT, o Regulamento Técnico de Qualidade (RTQ) que possui diferentes diretrizes para edifícios comerciais e governamentais ou públicos (RTQ-C) e outra para espaços residenciais (RTQ-R). (LAMBERTS *et al.*, 2016, CARLO; LAMBERTS, 2010)

Dentro destes regulamentos são apresentados parâmetros mínimos de desempenho, recomendações para otimização do sistema e a importância de cada elemento em relação a etiquetagem do edifício, em consonância com a zona bioclimática de implementação. Portanto, baseado nessas regulamentações e recomendações há uma vasta produção de artigos nos quais se avaliam estes sistemas, ou com intuito de criticar a metodologia, ou de comprovar sua eficiência (SORGATO *et al.*, 2014; FOSSATI *et al.*, 2014). Muitas destas publicações nacionais e internacionais, como as publicações de ASTE *et al.* (2009), Wong e Li (2007), são contrárias à generalização sobre o impacto de uma propriedade em relação à eficiência energética, quando desconsiderados fatores paralelos. Portanto, a etiquetagem deve ser desenvolvida de modo a atender diferentes situações, sem que tais relativizações comprometam a análise.

#### 3.4.7. Métodos de Análise do Desempenho Térmico

A análise de uma edificação existente tem como objetivo determinar ou estimar o atual desempenho térmico para um certo momento, ou, no caso do desenvolvimento de um projeto, estimar o desempenho térmico por meio de variações na entrada de dados, que futuramente podem ser comparados com dados tirados *in loco*. É bom ressaltar que os resultados não são uma imagem fidedigna do ambiente estudado, pois a complexidade dos dados que envolvem esta análise não permitem tal precisão. Os métodos de análise podem ser divididos entre monitoramento e simulação. (FERRER; GARRIDO, 2013)

### 3.4.7.1. Monitoramento

O monitoramento consiste na coleta de dados *in loco*. Usualmente é realizada por meio de sensores, porém é necessário um conhecimento prévio sobre o clima, características construtivas, geométricas e térmicas do elemento em análise. Para estudos em elementos construtivos, especialmente em fachadas são utilizadas imagens térmicas. As Figuras de 7 a 10 são alguns exemplos de uso, onde se observa o impacto do acabamento e orientação das paredes em suas temperaturas de superfície. Esta é apenas uma técnica utilizada, diversos outros sensores para medições de vento, umidade, temperatura, refletividade, dentre outros são utilizados para entender o desempenho térmico e o impacto de cada propriedade. (FERRER; GARRIDO, 2013; LAMBERTS *et al.*, 2016)

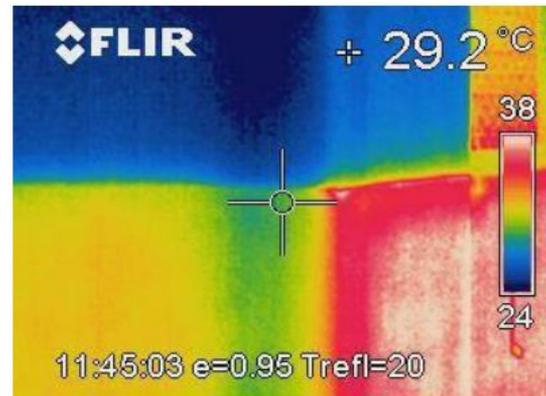
**Figura 7-** Diferentes Orientações.



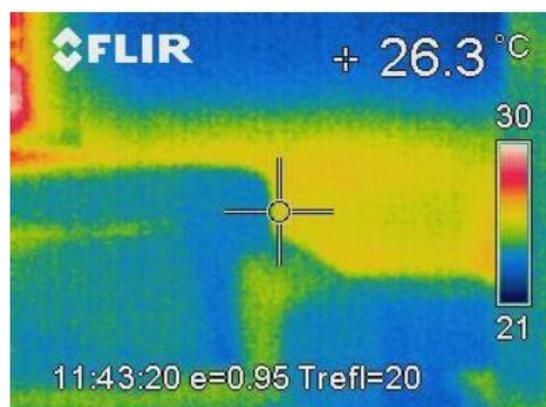
**Figura 9-** Diferentes Acabamentos.



**Figura 8-** Termografia de Diferentes Orientações.



**Figura 10-** Termografia de Diferentes Acabamentos.



Fonte: Desempenho Térmico em Edificações, Lamberts *et al.* (2016, p.96).

#### 3.4.7.2. Simulação

A simulação tem como objetivo estimar as condições e o desempenho térmicos a partir de uma análise feita por *software* ou algoritmos, com o intuito de que os resultados sirvam como orientação para decisões de projetos e não como representações fidedignas do ambiente de estudo. Os dados de entrada são desde estimativas estatísticas das propriedades térmicas de cada material que compõem a construção, às condições climáticas, utilização da edificação, locação e orientações. As simulações podem ser classificadas em métodos estáticos, onde adotam-se condições mais restritivas e uma menor variedade de dados de saída, com uma menor precisão; métodos de correlação, no qual são relacionados diversos fenômenos, porém com menor nível de detalhe, por exemplo excluindo o efeito da inércia térmica e simplificando a ventilação, devido sua complexidade. (FERRER; GARRIDO, 2013)

Por fim, há o método dinâmico, onde há uma grande entrada de dados para determinação de diversos fatores de análise e uma saída de dados mais precisa que nos métodos anteriores. Apresenta diversas opções de análise, entretanto, com certa dificuldade em manipular *softwares* mais complexos, como cita Pedrini e Szokolay (2005) ao manipular o Visual DOE, um programa similar ao *Simergy* (DIGITAL ALCHEMY, 2015), que será o *software* utilizado. Estes dois são ferramentas que aprimoram a interface gráfica de algoritmos, como o *Energy Plus* (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2013).

## 4. METODOLOGIA

Este estudo de desempenho térmico de sistemas de fachadas utiliza o método de simulação computacional dinâmico, procedente à análise da variação de sistemas construtivos de fachadas em uma edificação comercial - Jardim Acropolis (2016) (Figura 11) -, com localização e orientação definidas com base em uma proposta de projeção existente. Os dados de entrada na simulação de cada material estão na NBR 15220-2 (ABNT, 2004b) e no *ASHRAE Handbook Fundamentals* (ASHRAE, 2009), e para elementos não homogêneos o cálculo de suas propriedades é feito de acordo com a mesma norma, e sua memória de cálculo está disponível nos apêndices D e E deste documento.

A variação entre sistemas de fachadas analisa o impacto de variações relacionadas exclusivamente aos sistemas construtivos, portanto, padroniza outros fatores como composição de lajes e ambientes internos, ventilação natural, ocupação e janelas. A padronização e a escolha destes elementos visam permitir a comparação entre sistemas, para potencializar os resultados.

### 4.1. Descrição da Projeção de Estudo

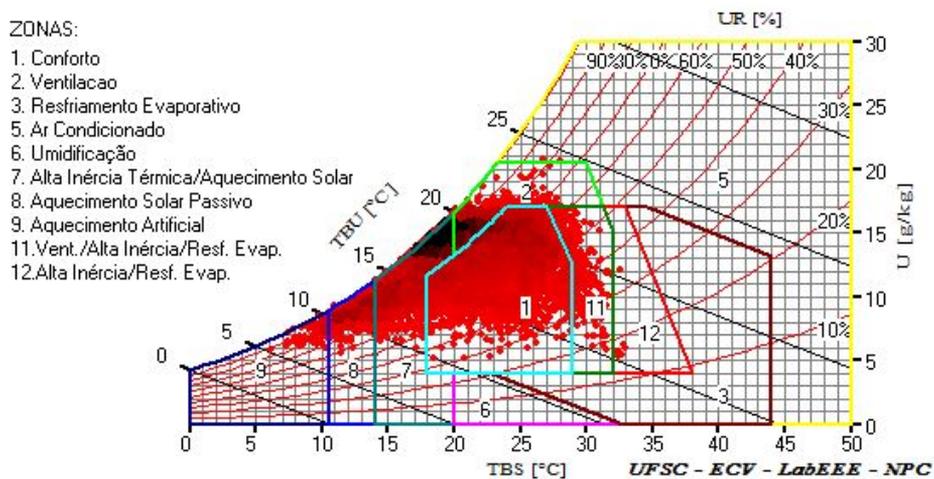
A projeção estudada é uma edificação comercial construída na cidade de Brasília, Distrito Federal, no bairro do Mangueiral (Figura 11), localizada na Zona Bioclimática 4, segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2004c). A carta bioclimática desenvolvida a partir dos dados do BioAnalysis (LABEEE, 2016) pode ser vista na Figura 11, com a sobreposição das zonas definidas por Givoni (1992). Os dados apresentados são similares, se não idênticos, aos apresentados por Lamberts *et al.* (2004), entretanto, a concentração dos pontos em uma zona de alta umidade é controversa devido ao clima extremamente seco da região, conforme pode ser visto nos dados do INMET (2015) de 2001 a 2010, Figura 12.

O prédio é composto por um pavimento térreo com pé direito duplo de 6 metros de altura, forro de gesso a 5,50m do piso e área interna de 730m<sup>2</sup>, além de outros dois pavimentos superiores com pé direito simples de 3,00 metros de altura,

forro a 2,70m do piso e 1458 m<sup>2</sup> de área em cada piso. Os pavimentos subterrâneos foram desconsiderados, por não trazerem um acréscimo significativo à comparação e análise de sistemas construtivos de fachada adotados.

É possível visualizar a representação da edificação na Figura 14. Todos os pavimentos foram considerados desocupados, e não se considera a geração de energia térmica interna devido à ocupação. Entretanto, ressalta-se a capacidade das cargas internas de inverterem o gradiente térmico de um edifício, e tornar o ambiente interno mais quente que o ambiente externo, o que exige por vezes que o edifício dissipe calor através de sua envoltória ou utilize sistemas de condicionamentos mecânicos.

**Figura 11 - Carta Bioclimática de Brasília.**



Fonte: *Software BioAnalysis*, desenvolvido pelo LABEEE(2016), UFSC.

**Figura 12 - Umidade Relativa de Brasília, Ano 2015.**



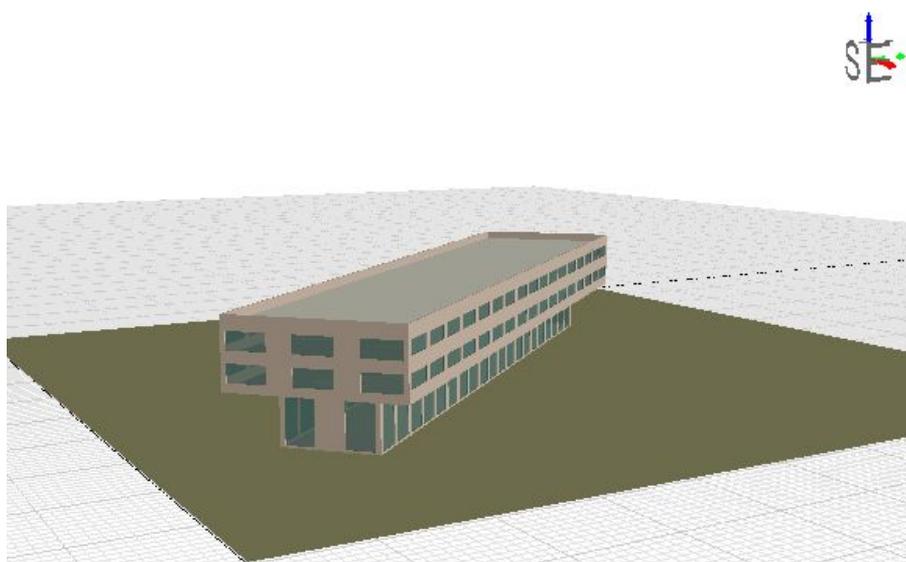
Fonte: INMET (2016).

**Figura 13** - Imagem de Satélite da Projeção Estudada.



Fonte: Google Maps (DigitalGlobe 2016).

**Figura 14** - Representação Gráfica Tridimensional da Edificação em Estudo.



Fonte: Autor Próprio.

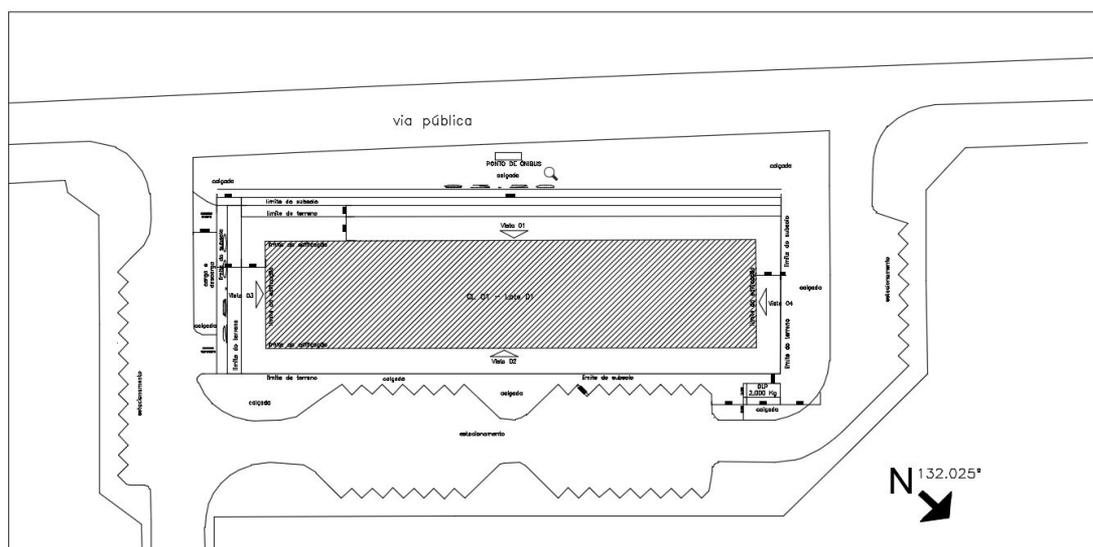
As coordenadas geográficas, dados climáticos e ambientação da edificação são relevantes para a análise energética, assim como para diversos outros fatores como ventilação, incidência solar, iluminação e principalmente para análise das condições climáticas. (ROMERO, 2007)

As coordenadas geográficas relativas à longitude e à latitude da edificação são inseridas junto aos dados climáticos da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia de Brasília (INMET, 2015). Apesar de identificada uma diferença em relação a posição exata da edificação, a mesma não possui impacto significativo na análise. Entretanto, a orientação do edifício deve ser inserida com precisão, pois afeta diretamente a leitura da incidência solar e por sua vez todo o desempenho térmico relacionado a cada face, de acordo com sua orientação (Figura 16). Está informação é retirada do projeto de aprovação (Figura 15).

Apesar de já haver edificações no entorno do edifício de estudo, estas não foram incluídas a simulação. Elas atuariam no sombreamento da edificação de estudo, porém isto iria gerar a mesma sombra em todas as simulações, do modo que reduziria o efeito da radiação solar no efeito comparativo.

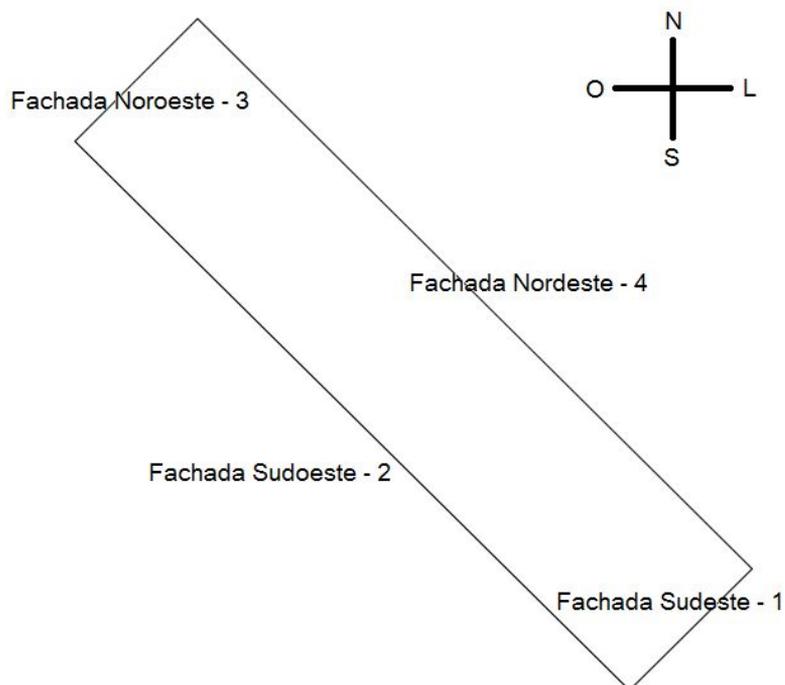
- Latitude:  $-15,52^{\circ}$  (Sul)
- Longitude:  $-47,55^{\circ}$
- Altitude: 1061,0 m
- Azimute:  $132,025^{\circ}$  da Fachada Sudoeste em relação ao Norte
- Arquivo de dados climáticos: BRA\_Brasilia.833780\_IWEC.epw

**Figura 15** - Localização - Projeto de Alvará do Edifício Jardim Acropolis.



Fonte: Projetos Jardim Acropolis.

**Figura 16** - Identificação das Fachadas de Acordo com a Orientação.



Fonte: Autor Próprio

Conforme descrito acima, foram parametrizados os elementos construtivos que não compõem a fachada, como laje e cobertura, bem como a área interna e as janelas, pelas propriedades de ventilação e de transmissão térmicas. As propriedades térmicas dos materiais que compõem cada um destes elementos são retiradas do *ASHRAE Handbook Fundamentals* (ASHRAE, 2009), e da NBR 15220-2 (ABNT, 2004b), e estão disponíveis, respectivamente, nas Tabela 1 e Tabela 2, nas páginas 36 e 37, com dados relativos à emissividade de cada componente.

A laje de cobertura adotada é de concreto, impermeabilizada com manta asfáltica e com as devidas proteções mecânicas pintadas de branca, e no ambiente interno forro de gesso cartonado. Este sistema atende ao padrão A do selo Procel Edifica RQT-C (INMETRO, 2010); com coeficiente de condutividade global de  $U < 2 \text{ m}^2\text{K/W}$  para zonas sem condicionamento mecânico ou  $U < 1 \text{ m}^2\text{K/W}$  para zonas com condicionamento mecânico.

A cobertura é composta por uma laje de concreto de 20cm, com sistema de impermeabilização de 2cm, 3cm de proteção mecânica feita com isopor e coberto com 5cm de argamassa comum pintada de branco, com um forro de gesso interno a 20cm do fundo da laje. Como resultado obteve-se as seguintes propriedades globais:

- $U = 0,934 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  (consideradas as camadas de ar superficiais)
- $\rho = 1445 \text{ kg/m}^3$
- $\varepsilon = 0.9$  (Argamassa e Gesso)
- $\alpha = 0,2$  (Pintura Branca)

E para lajes internas serão utilizadas lajes de concreto de 20cm com um forro de gesso, porém sem pintura ou revestimento, com as seguintes propriedades:

- $U = 1,77 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  (consideradas as camadas de ar superficiais)
- $\rho = 1572 \text{ kg/m}^3$
- $\varepsilon = 0.9$  (Concreto e Gesso)

E para laje do Térreo será utilizada laje de concreto de 20cm, com revestimento em granito claro, sobre uma camada de solo de 1m de espessura, com as seguintes propriedades:

- $U = 0,525 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  (consideradas as camadas de ar superficiais e o solo abaixo)
- $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$
- $\alpha = 0,7$  (Granito)
- $\varepsilon = 0.9$  (Concreto e Gesso)

A recomendação da NBR 15220-3 para zona bioclimática 4, na tabela C.1 (ABNT, 2004c, página 17), estabelece de 15% a 25% de aberturas em relação a área de piso voltados para a zona bioclimática de estudo. Deste modo, utilizou-se o limite mínimo recomendado de 15%, para reduzir o impacto de elementos translúcidos que não são focos do estudo.

Para essas aberturas, a ventilação é padronizada e simplificada. As aberturas são uniformemente distribuídas, a fim de simplificar o sistema. Porém, para estudos mais precisos é necessário o estudo sobre a distribuição destas aberturas e seu funcionamento durante o dia.

As janelas adotadas são módulos de 10m<sup>2</sup> nos pavimentos superiores, e de 15m<sup>2</sup> para o térreo. Para a ventilação apenas 7m<sup>2</sup> por módulo será utilizado, nos períodos de 00:00h às 6:00h e de 20:00h às 23:00h. A ventilação proposta atua de forma similar à captação de ar noturna, na qual é captado o ar frio no período da noite e confinado durante as horas nas quais o ambiente externo possui temperaturas mais quentes que o meio interno. E este ar será renovado novamente ao fim do dia, ao dissipar a energia acumulada.

A composição das janelas utilizadas são de alto desempenho para impedir a entrada de calor, interferindo o mínimo possível nos resultados apresentados. Para isto, se utiliza uma película metálica de alta refletividade, e vidro comum. Ambos os dados dos componentes são retirados da *ASHRAE Fundamentals Handbook* (ASHRAE, 2009, p. 15.20), e resultam nas seguintes propriedades:

- $U = 5,787 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  (consideradas as camadas de ar superficiais)
- Fator Solar (FS) = 0,192
- Transmissividade ( $\tau$ ) = 0.08

#### 4.2. Sistemas Construtivos de Fachada

A análise proposta, calcada na variação entre diferentes sistemas construtivos de fachadas, com diferentes composições e revestimentos, permite verificar as diferentes propriedades a partir dos resultados encontrados. Os resultados e definição destes materiais se baseiam no material acadêmico e normas desenvolvidos por diversos autores conforme apresentado na revisão bibliográfica. (LAMBERTS *et. al*, 2016; ASTE *et. al*, 2009; ASHRAE, 2009; ABNT, 2004).

Serão analisados cinco sistemas construtivos de fachadas, os quais suas composições estarão descritas nos tópicos subsequentes:

- Bloco Cerâmico de de 6 furos (9x14x24cm) com Pintura Branca
- Bloco Cerâmico de 12 furos (19x19x24cm) com Pintura Branca
- Bloco Cerâmico de 12 furos (19x19x24cm) com Pintura Preta
- Bloco Cerâmico de 6 (9x14x24cm) furos com Alumínio Composto (ACM) sem Isolamento Térmico
- Bloco Cerâmico de 6 (9x14x24cm) furos com Alumínio Composto (ACM) com Isolamento Térmico

Os dados e propriedades de cada material sobre os elementos que compõem os sistemas construtivos estudados estão descritos nas Tabelas 1 e 2, e foram retirados da NBR 15220-2 (ABNT, 2004b), disponíveis nos anexos, juntamente aos dados sobre resistências superficiais, contidos no Anexo 1. Para os cálculos de elementos de composição não homogênea se utilizam as equações apresentadas no tópico 3.4 e no memorial de cálculo nos Apêndices D e E.

**Tabela 1** - Absortância para Radiação Solar e Emissividade dos Materiais Utilizados.

Material	Absortância ( $\alpha$ )	Emissividade ( $\epsilon$ )
Chapa de Alumínio	0,05	0,05
Concreto Aparente	0,7	0,9
Reboco com Pintura Branca	0,2	0,9
Reboco com Pintura Preta	0,97	0,9

Fonte: Tabela B.2 da NBR 15220-2 (ABNT, 2004b), modificada.

**Tabela 2 - Propriedades dos Materiais Utilizados na Simulação Computacional.**

Material	Condutividade Térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor Específico [J/kg.K]	Resistência Térmica [m <sup>2</sup> .K/W]
Tijolo Cerâmico de 6 furos (9x14x24cm) (Anexo 4)	0,5848	1077,04	100	0,1539
Tijolo Cerâmico de 12 furos (19x19x24cm) (Anexo 5)	0,5801	1094,34	134,07	0,3275
Argamassa de Emboço e=2,5cm (Pintura Branca)	1,15	2000	1000	0,0217
Argamassa de Emboço e=2,5cm (Pintura Preta)	1,15	2000	1000	0,0217
Concreto Laje 20 cm	1,75	2400	1000	0,1143
Gesso Cartonado e=1cm (Pintura Branca)	0,35	800	840	0,0286
Placa de Alumínio Composto (ACM) e=0,3cm	0,0069*	1500	528	0,434
Poliestileno de Impermeabilização e=2cm	0,40	1000	-	0,05
Isopor e=3cm	0,040	30	1420	0,75
Lã de Rocha e=5cm	0,045	100	750	1,111
Câmara de Ar de Alta emissividade, e> 5cm Fluxo Descendente	-	-	-	0,21
Câmara de Ar de Baixa emissividade, e= 5cm Fluxo Horizontal	-	-	-	0,35
Câmara de Ar de Alta emissividade, e= 5cm Fluxo Horizontal	-	-	-	0,17

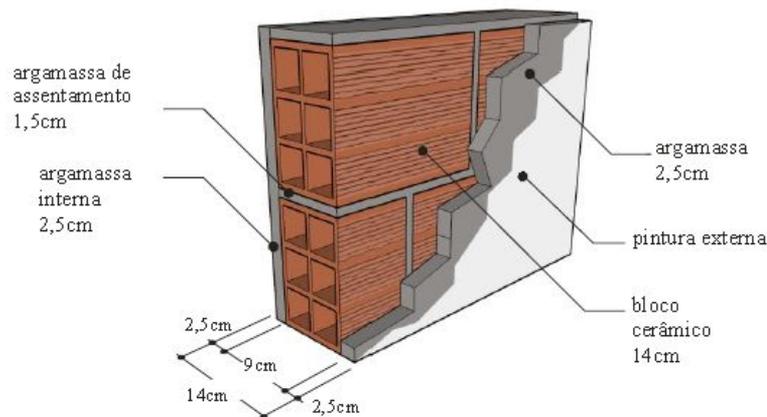
Fonte: Dados retirados da Tabela B.3 da NBR 15220-2 (ABNT, 2004b), e (\*) da Apostila Técnica da Belmetal (2016).

#### 4.2.1. Bloco Cerâmico de 6 furos com Pintura Branca

Este sistema é convencionalmente usado em ambientes internos, já para paredes externas não se dá com a mesma frequência de uso. Sua composição permite maior condutividade térmica, ou seja maior interação entre ambientes externos e internos. Na NBR 15220-2 (ABNT, 2004b) há recomendações de uso de sistema leves como este, voltadas a residências unifamiliares, com ventilação natural e em climas específicos, o que não se aplica a este estudo.

O sistema é composto, conforme mostra a Figura 17, por uma camada interna de reboco com pintura branca; uma camada de bloco cerâmico de 6 furos com 1,5cm de argamassa de assentamento entre os blocos, e a face externa composta por uma camada de reboco de 2,5 cm com pintura branca. As propriedades térmicas equivalentes a este bloco cerâmico estão descritas no Apêndice D.

**Figura 17 - Sistema de Fachada com Bloco Cerâmico de 6 furos com Reboco.**



Fonte: Anexo V do INMETRO (2013).

#### 4.2.2. Bloco Cerâmico de 12 furos com Pintura Branca

Há uma variação na composição desse sistema de fachadas que se utiliza de blocos cerâmicos de 8 furos (9x19x24cm), ou de blocos cerâmicos de maior espessura como o de 12 furos (19x19x24cm). Trata-se de um sistema amplamente utilizado.

Este sistema construtivo de fachada é composto de forma similar ao da Figura 17, porém, ao invés de se usar o bloco cerâmico de 6 furos (9x14x24cm), se

utiliza o bloco cerâmico de 12 furos (19x19x24cm), e leva em conta o cálculo das propriedades físicas e térmicas contidas no Apêndice E. O sistema conta com reboco de 2,5 cm e pintura branca em ambos os lados.

O intuito desta variação é a comparação de resultados entre um sistema com materiais similares, porém com espessuras e massas diferentes, o que deve gerar um aumento no atraso térmico (ASTE et al., 2009). Também será comparada a alteração da coloração da superfície externa, com objetivo de estudar os impactos à absorvidade.

#### 4.2.3. Bloco Cerâmico de 12 Furos com Pintura Preta

A utilização de um sistema com superfície externa de alta absorvidade, tem como objetivo avaliar o impacto de tal propriedade, e também a comparar a relação entre outras propriedades do desempenho térmico. Lamberts *et al.*(2016) afirmam que com o aumento da absorvidade, se espera um aumento da temperatura no ambiente interno, comparado a outro sistema de menor absorvância.

Na simulação é também utilizado o bloco cerâmico de 12 furos (19x19x24cm), o mesmo utilizado no sistema descrito no tópico 4.2.2, com revestimentos nas duas faces de reboco, porém com pintura preta na face externa. Isto permite analisar o impacto da coloração da face externa em um sistema de fachada, em função de fatores que afetam a absorvidade à radiação solar.

#### 4.2.4. Bloco Cerâmico de 6 Furos com Revestimento em Alumínio Composto sem Isolamento Térmico

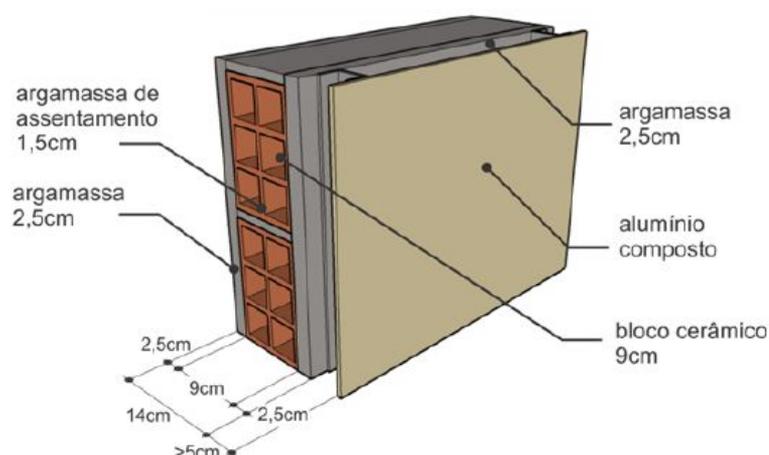
A utilização do alumínio como material componente de um sistema de fachada apresenta vantagens por sua baixa emissividade. O desempenho de câmaras de ar do sistema é influenciado por esta emissividade, e, de acordo com o acabamento utilizado pode possuir baixíssima absorvidade da radiação solar, conforme identificado na Tabela 2.

O uso de materiais específicos como o alumínio pode gerar ganho no desempenho térmico, desde que utilizado de forma coesa com suas propriedades. A

utilização destas propriedades e a composição do sistema construtivo, combinadas com a utilização da câmara de ar, tende a otimizar o isolamento térmico do sistema.

O uso do bloco cerâmico de 6 furos, é o mesmo adotado no tópico 4.2.1, cujas propriedades encontram-se calculadas no Apêndice D. Contudo, conforme mostrado na Figura 18, sua tipologia de materiais se difere. A face interna, igualmente aos sistemas anteriores, é de reboco com pintura branca; uma camada de bloco cerâmico de 6 furos com uma camada de reboco, seguida de uma câmara de ar de 5cm. Não foi considerada a estrutura de fixação da chapa de alumínio composto. Por fim, utilizam-se placas de alumínio composto - poliestireno revestido com finas camadas de alumínio com acabamento metálico -, para que haja redução na absorção da camada superficial.

**Figura 18 - Sistema de Fachada com Bloco Cerâmico de 6 Furos com Revestimento em Alumínio Composto**



Fonte: Anexo V do INMETRO (2013)

#### 4.2.5. Bloco Cerâmico de 6 Furos com Revestimento em Alumínio Composto com Isolamento Térmico

A utilização de materiais para o isolamento térmico visa reduzir a transmissão de calor através do sistema, embora as câmaras de ar já produzam um impacto positivo nesta redução. Este uso permite o aumento do isolamento térmico ou a redução da espessura de paredes externas para uma mesma resistividade térmica.

São adotados materiais de baixa condutividade térmica, e normalmente de baixa densidade, para isolar o ambiente sem sobrecarregar a estrutura.

A composição é similar ao sistema descrito no tópico 4.2.4, composto por uma camada de bloco cerâmico de 6 furos, revestido por reboco em ambos os lados, mas, ao invés de utilizar uma câmara de ar, o vazio entre as placas de alumínio composto e alvenaria será preenchido por uma camada de 5cm de lã de rocha, que funcionará como um isolante térmico. Deste modo poderemos avaliar o impacto da utilização de uma camada de isolante térmico, tanto em relação às propriedades térmicas, quanto aos resultados.

## 5. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E ANÁLISE

Os resultados apresentadas são obtidas a partir de dados processados pelo programa *Simergy* (DIGITAL ALCHEMY, 2016), por meio de algoritmos baseados no *Energy Plus* (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2013), pela complexidade das relações entre diversos fatores internos e externos, e as propriedades dos materiais analisados. O presente trabalho se propõe a proceder à análise comparativa de sistemas para oferecer suporte às decisões de projeto, como elemento para planejamento, não se atendo à análise das condições térmicas após sua execução.

**Tabela 3 - Propriedades Térmicas Calculadas.**

Sistema Construtivo de Fachada	Transmitância (U) [W/m <sup>2</sup> .K]	Espessura [cm]	Absortividade	Classificação RQT-C
Bloco Cerâmico de 6 Furos (9cm) (Pintura Branca)	2,88	14	0,2	A
Bloco Cerâmico de 12 Furos (19cm) (Pintura Branca)	1,92	24	0,2	A
Bloco Cerâmico de 12 Furos (19cm) (Pintura Preta)	1,92	24	0,97	C ou D
Bloco Cerâmico de 6 Furos c/ Alumínio Composto(ACM) s/Isolamento	0,868	19,3	0,05	A
Bloco Cerâmico de 6 Furos c/Alumínio Composto (ACM) c/ Isolamento	0,523	19,3	0,05	A

Fonte: Autor Próprio.

Os resultados das propriedades térmicas apresentados na Tabela 3 são calculados pelo *software Simergy* (DIGITAL ALCHEMY, 2016), alimentado com dados das Tabelas 1 e 2 sobre cada camada que compõe os sistema construtivos.

Apesar de serem consideradas para efeito de alimentação do *software* apenas a absorvidade, o coeficiente de condutividade global e a espessura, no processamento consideram-se outras propriedades como a capacidade térmica, o atraso térmico, a emissividade entre outros fatores, por meio do uso de algoritmos de análise.

A última coluna da Tabela 3 é o selo alcançado, segundo o selo PROCEL Edifica RQT-C (INMETRO, 2010), para zona bioclimática 4, na qual Brasília está localizada. Mas, para uma certificação são consideradas as propriedades obtidas por meio de medição no local.

Dentre os resultados da simulação, estão as temperaturas médias dos ambientes internos piso a piso, contidos no Apêndice A. É possível observar um padrão nas temperaturas por pavimento independentemente do sistema construtivo adotado. O pavimento térreo, por sua maior área de aberturas nas paredes externas, permite maior variação térmica ao longo do dia, devido aos impactos de cargas externas, principalmente pela radiação solar decorrente da transmissividade dos elementos translúcidos.

O comportamento dos 1º e 2º pavimentos são similares, porém, nota-se na maioria dos sistemas estudados, que o 2º pavimento apresenta menor variação de temperatura. Apesar da influência da cobertura e da radiação incidente, as temperaturas variam de forma similar. Um possível fator responsável por estes resultados é a influência da inércia térmica da cobertura, que ao esfriar durante o período noturno, permite a transferência de calor durante o dia, ao retirar calor do ambiente interno, tornando-o mais agradável. Outra fato observado é a influência do pavimento térreo sobre o 1º pavimento pela alta transmitância térmica da laje entre os pavimentos, pode-se inferir que há um maior impacto do térreo, comparado com a cobertura no ganho térmico.

Portanto o desempenho térmico desejado estará relacionado à menor entrada de energia térmica no sistema. O que pode se associar a um melhor isolamento

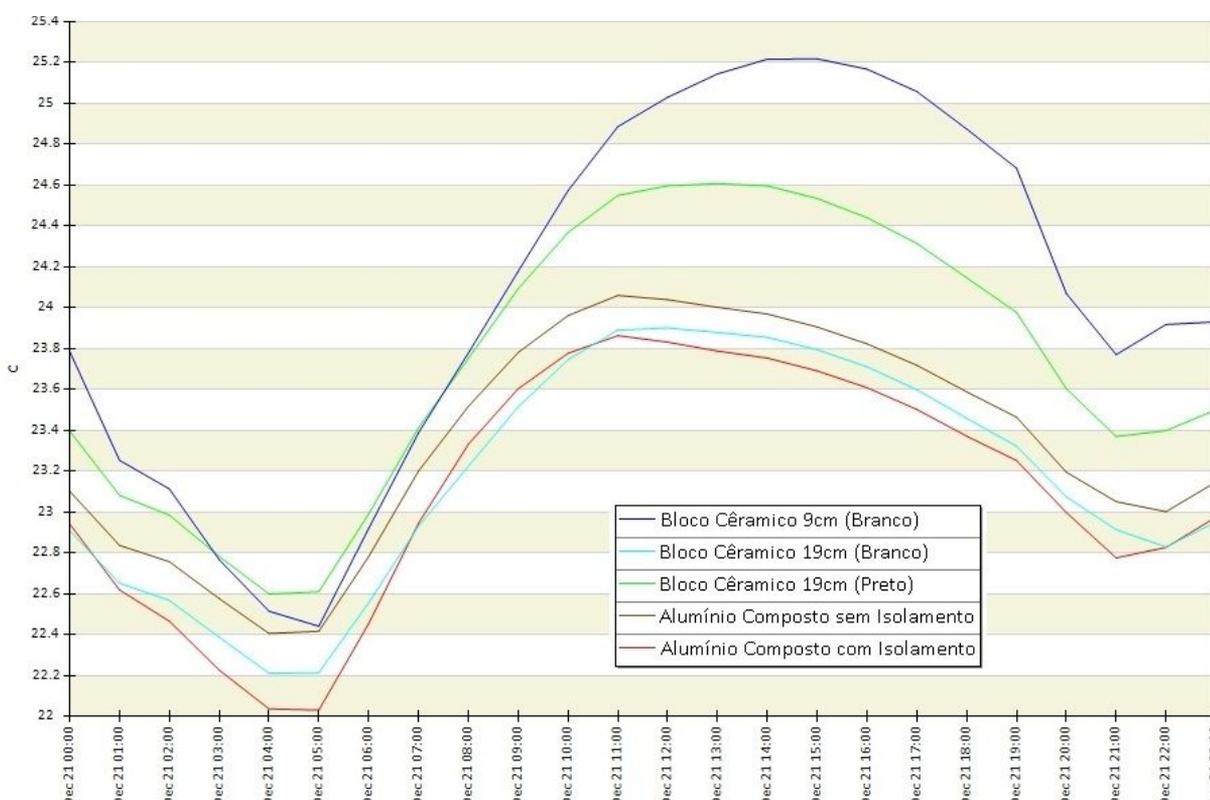
térmico, ou menor interferência de condições do entorno, por não serem consideradas cargas internas de ocupação.

O controle do desempenho térmico visa o conforto térmico dos usuários, preferencialmente sem a necessidade de ventilação ou condicionamento mecânico. Caso as condições de conforto não sejam atingidas naturalmente, o objetivo passa a ser o de redução do processo de condicionamento mecanizado.

Segundo o INMET (2016), a umidade relativa para dezembro de 2015, período na qual será executada a simulação, era próxima a 60%. Para estas condições, a faixa de temperatura para o conforto térmico, segundo a carta de Givoni (1992), fica entre os 18° e os 21°, desde que outros fatores como vento se mantenham em condições agradáveis. Assim, tem-se como objetivo garantir esta temperatura de conforto dentro da edificação.

Conforme observado no Apêndice A, o 2° pavimento apresenta a menor variação térmica ao longo do dia, o que o torna base para análise dos próximos resultados. Segundo este raciocínio, o Gráfico 1 apresenta as temperaturas médias internas do 2° Pavimento para cada sistema construtivo.

**Gráfico 1 - Temperatura do Média do Ambiente Interno do 2° Pavimento por Sistema Construtivo.**



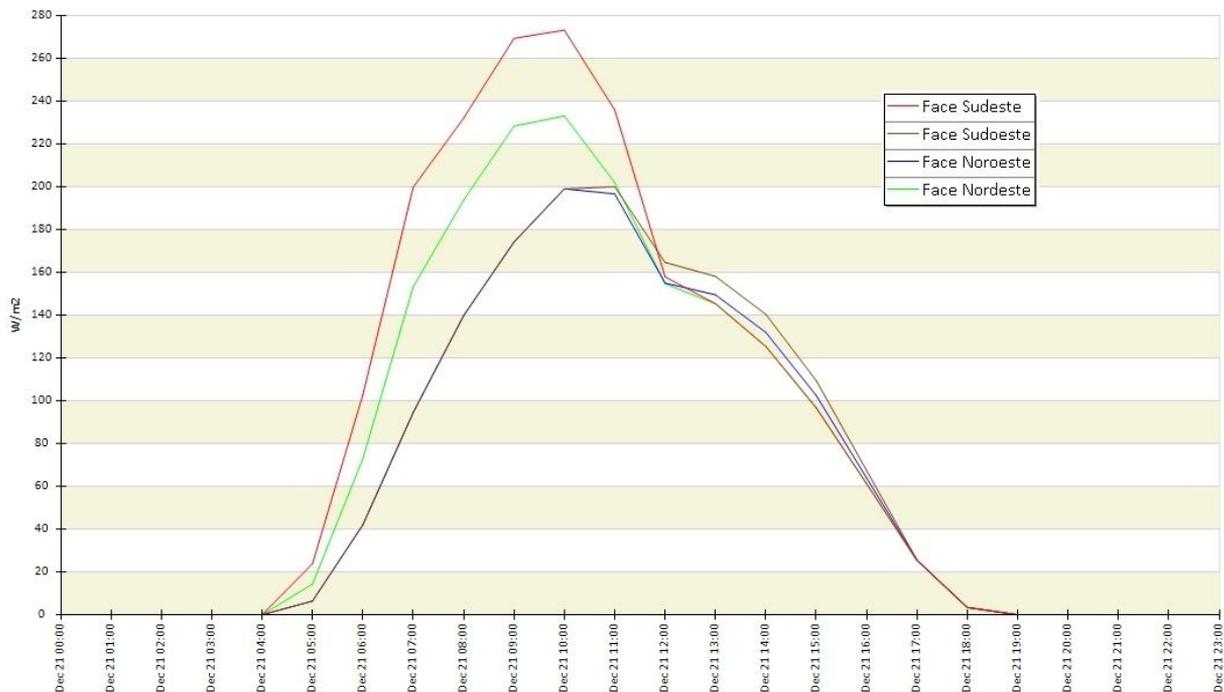
Pode-se observar no Gráfico 1, que a maior temperatura interna e oscilação térmica foram encontradas pelo bloco cerâmico de 6 furos (9x14x24cm) com pintura branca, embora o sistema de bloco cerâmico de 12 furos com pintura preta, apresente maior fator solar. Para estas condições apresentadas na simulação o impacto do coeficiente de condutividade global tem um impacto maior do que o fator solar. No 1º pavimento, observa-se que o sistema com maior temperatura durante o período de uso é o bloco cerâmico de 12 furos com pintura preta, conforme dados do Apêndice A. Também constata-se que há interferência de outros componentes e condições do sistema além das propriedades de transmitância e fator solar.

Para os sistemas de alumínio composto e de bloco cerâmico de 12 furos (19x19x24cm) com pintura branca, os resultados atingidos foram similares. Entretanto, as pequenas variações térmicas encontradas nos sistemas com o uso de alumínio composto, representam ganhos para o desempenho térmico desejado. Porém, estes dados são resultados das condições adotadas conforme disposto na metodologia (Tópico 4). Assim, tais resultados não devem ser assumidos para outros casos, pois em outras condições, as cargas ocupacionais, podem alterar o gradiente térmico entre o ambiente interno e externo, o que permite que um sistema com maior transmitância tenha temperaturas mais baixas que sistemas com maior resistência térmica, pela maior dissipação de calor.

Verifica-se que o funcionamento da ventilação ocorre nos períodos onde há quedas acentuadas das temperaturas internas, em função da captação de ar feita nos horários em que a temperatura externa é menor que a interna. Ao se manter as janelas fechadas, entre 6h e 19h é possível garantir uma menor oscilação térmica pela redução na transmissão de massa entre os meios.

No Gráfico 2, que trata da absorção pela utilização de pintura preta, pode-se ter a leitura da radiação solar absorvida pela face externa por metro quadrado. Como exposto no gráfico será utilizada a fachada sudeste como referência, devido a sua maior insolação para as condições apresentadas. Deve-se ressaltar que devido ao movimento translacional do planeta, as face de maior insolação se alternam entre sudeste e nordeste, mas para o dia 21 de dezembro, data adotada pela simulação, este índice será maior na face sudeste.

**Gráfico 2 - Radiação Absorvida por Face Externa com Pintura Preta.**



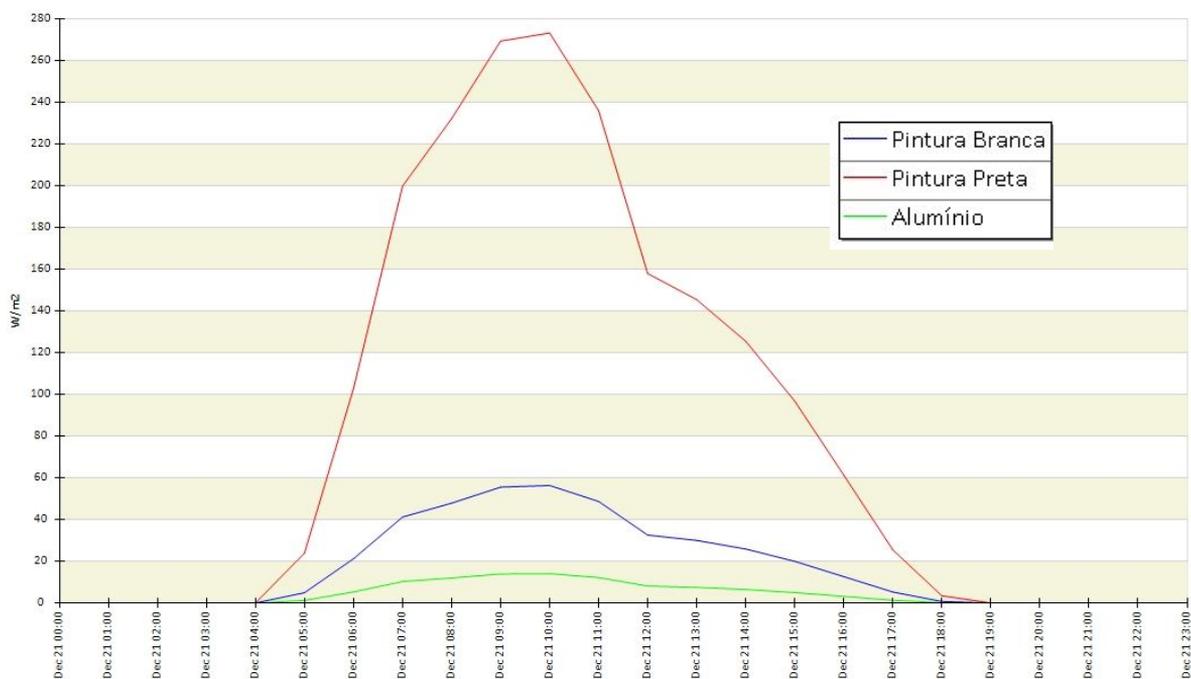
Há uma distorção no efeito da radiação, iniciado às 4h da manhã, o que indica que até para radiação difusa é muito cedo. Foram conferidos todos os dados de entrada e não foram encontrados erros, porém pode-se ter uma majoração da carga de radiação solar pelo *software* utilizado.

Conforme apresentado acima, os pavimentos de melhor desempenho térmico e faces com maior insolação são o 2º Pavimento e a fachada Sudeste

respectivamente, portanto as análises de dados mais específicos estarão relacionadas a essas zonas.

O gráfico 3 descreve a quantidade de radiação solar absorvida pela face externa em cada tipologia que está ligada à absorvidade. A utilização do alumínio com acabamento metálico é a superfície externa que possui menor absorvidade dentre os sistemas, cujos resultados são os de menor absorção de radiação solar.

**Gráfico 3 - Comparativo de Quantidade de Energia Absorvida por metro quadrado, pela Face Sudeste do 2º Pavimento, para cada Superfície Externa.**

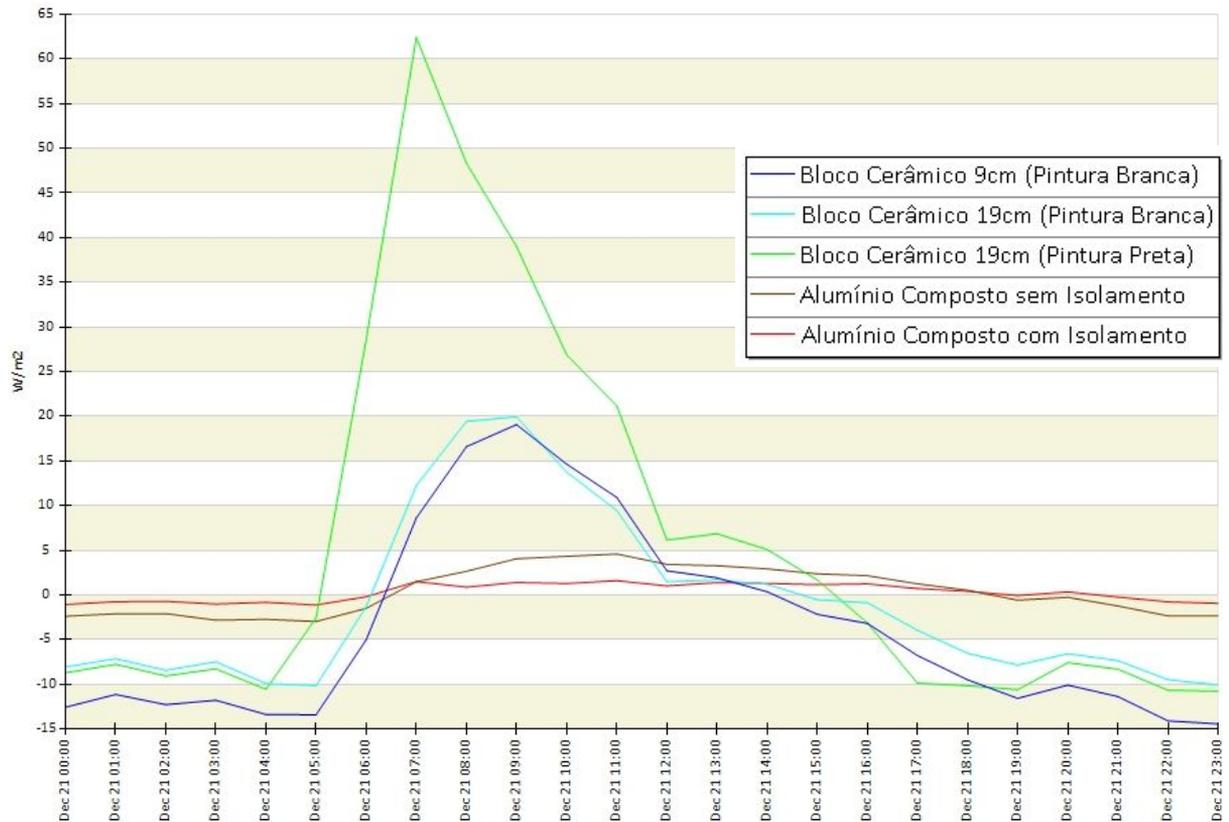


Já o uso da pintura preta apresenta um aumento significativo nesta absorvidade. Isto a demonstra a importância da coloração e composição da superfície externa no desempenho térmico do edifício.

Além da radiação solar, outro ganho energético significativo é o ganho por condução térmica, que corresponde à entrada de calor conduzido pelas paredes externas para o meio interno e é influenciado pelas condições de contorno, dentre elas a energia absorvida pela superfície externa e o gradiente térmico entre os meios.

O gráfico 4 apresenta o fluxo térmico por condução para cada sistema construtivo, no qual o positivo representa a transmissão de energia do meio externo para o interno e o negativo o fluxo inverso - a dissipação de calor.

**Gráfico 4 - Comparativo de Condução Térmica por Sistema Construtivo, para a Fachada Sudeste do 2º Pavimento.**



A transmitância térmica ou coeficiente de condutividade global, descrito na revisão bibliográfica, é a capacidade do elemento em permitir a passagem de energia térmica através dele. Portanto, observa-se no gráfico 4 que elementos com menor transmitância, como os sistemas de Alumínio Composto, apresentam uma transmissão de energia próxima ao zero, enquanto sistemas de maior coeficiente de condutividade global, permitem uma maior transmissão de calor, tanto para a entrada de energia no sistema, como para a dissipação de calor. É importante ressaltar que a menor transmitância do sistema de bloco de 12 furos (19x19x24cm) com pintura preta em relação ao bloco de 6 furos (9x14x24cm), gera maior entrada

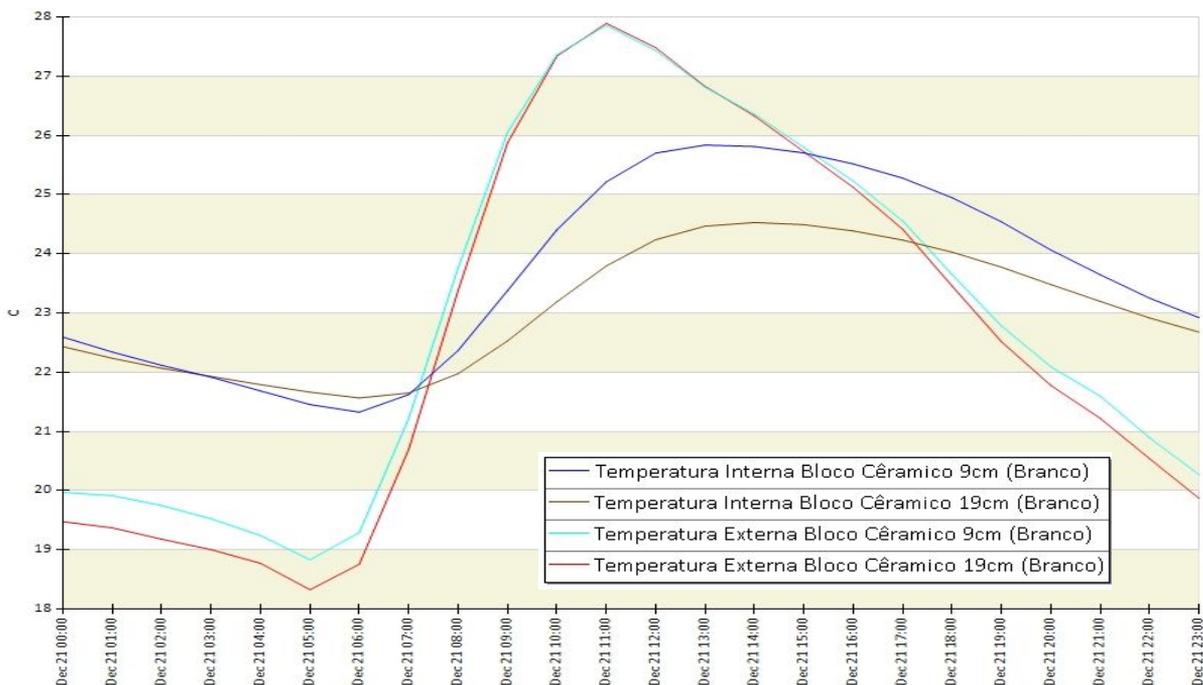
de energia pelo impacto da absorção de sua superfície externa nos períodos de maior insolação.

A variação de temperatura dentro do sistema é consequência das condições propostas e da reação das propriedades térmicas em relação a essas condições. Essas propriedades atuaram de forma diferente nos componentes do sistema interferindo no ar do ambiente interno, e nas faces internas e externas da fachada.

O Apêndice B mostra as temperaturas determinadas para as faces internas e externas, juntamente às temperaturas internas e externas para a fachada sudeste no segundo pavimento. É por meio da comparação destes resultados que serão analisados os impactos das propriedades para cada parte do sistema.

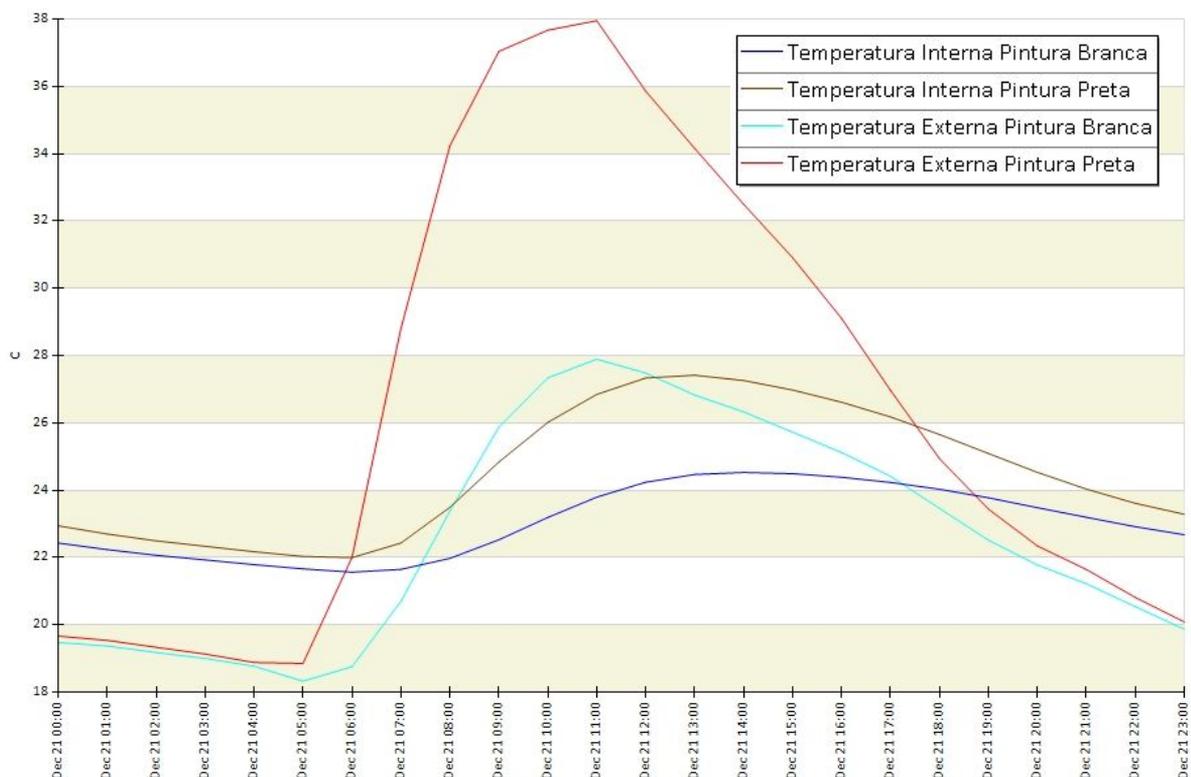
Os Gráficos 5, 6 e 7 comparam os dados apresentados no Apêndice B, das temperaturas de face externa e interna entre sistemas, para realizar a análise das consequências de diferentes propriedades no desempenho térmico.

**Gráfico 5 - Comparativo de Temperaturas de Faces Interna e Externa de Bloco Cerâmico de 12 Furos e 6 Furos, com pintura Branca na Fachada Sudeste (2º Pavimento).**



Conforme o Gráfico 5, verifica-se a utilização de um mesmo acabamento na superfície externa, a pintura branca, que resulta em temperaturas similares, porém não iguais, devido a incidência de outros fatores relacionados, porém, em menor escala. Apesar da temperatura da face externa ser a mesma para ambos os sistemas, a temperatura das faces internas se diferem consideravelmente, como consequência da diferença transmitância. Por último, o sistema com bloco de 12 furos (19x19x24cm) que possui uma inércia térmica mais elevada, por sua massa mais elevada, possui uma maior defasagem entre o pico de temperatura entre as faces.

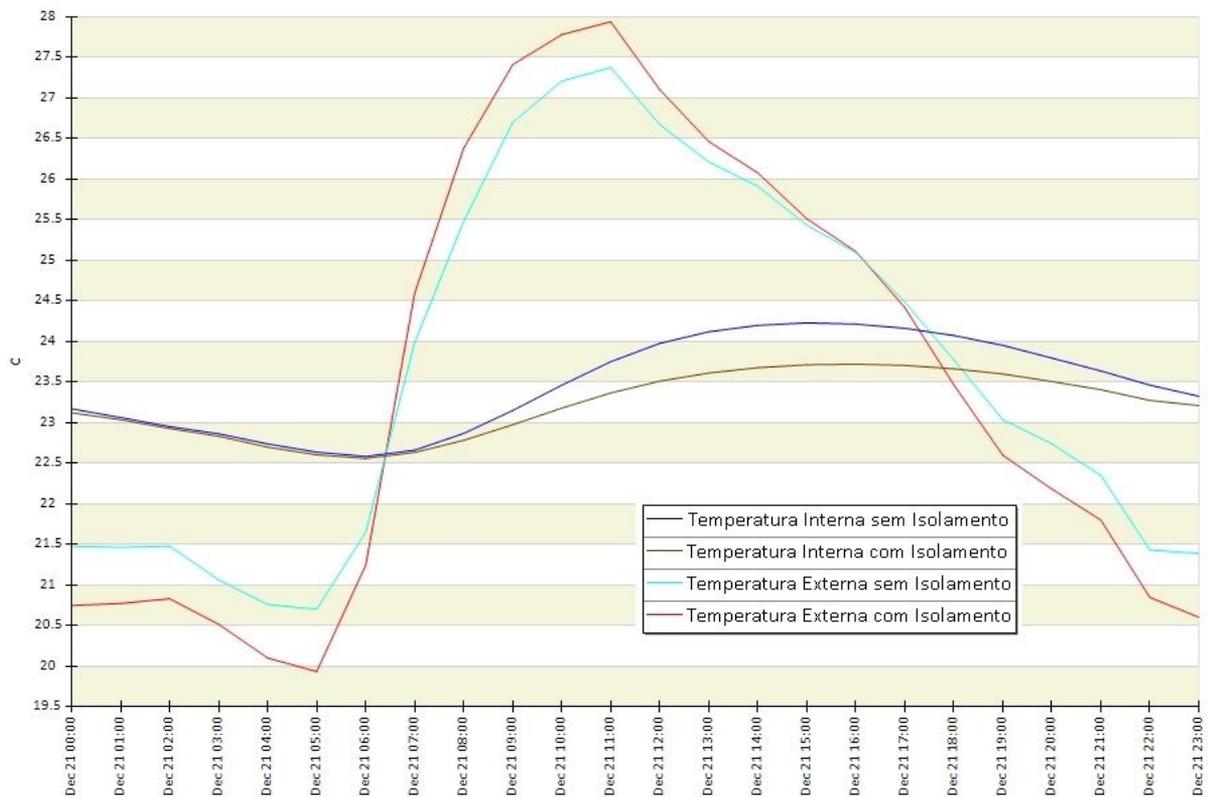
**Gráfico 6 - Comparativo de Temperaturas de Faces Interna e Externa de Reboco com Pintura Branca e Preta, em Bloco Cerâmico de 12 Furos na Fachada Sudeste (2º Pavimento).**



No Gráfico 6 pode ser observado novamente o impacto da absorvância, e por consequência o do fator solar. É visível o impacto desta propriedade ao compararmos os sistemas com a composições internas idênticas, porém uma variação na coloração da superfície externa. E, devido a igualdade nos materiais que

as compõem, podemos observar que o atraso térmico entre as faces externas e internas é muito próximo, se não igual.

**Gráfico 7 - Comparativo de Temperaturas de Faces Interna e Externa do uso de Isolante Térmico, em paredes de Bloco Cerâmico de 6 Furos com Alumínio Composto na Fachada Sudeste (2º Pavimento).**



Como mostra o Gráfico 7, infere-se o impacto do isolamento térmico, ter sido decorrente pelo uso da lã de rocha, dentro de sistemas com bom isolamento. Para a face interna, podemos perceber que o isolamento térmico gera uma redução da temperatura, isso se dá pelo aumento da resistividade térmica do sistema. Este aumento se traduz pela transmissão de energia por meio do elemento, e em

consequência reduz a oscilação térmica e aumenta o desempenho térmico nesta análise.

Já para as faces externas, apesar de possuírem a mesma composição de superfícies externas, há uma variação mais acentuada entre suas temperaturas. Porém devido ao grande número de fatores que envolvem o sistema não podemos afirmar ao certo o real fator motivador. Uma das possibilidades é o acúmulo de energia térmica na face exterior, pelo baixo fluxo de calor permitido no sistema com isolamento.

No Apêndice C estão identificadas as zonas de maior impacto, divididas em 5 (cinco) zonas, uma central e 4 (quatro) periféricas definidas a 5,00 metros de suas respectivas fachadas. Pelos resultados encontrados observa-se que as zonas periféricas sofrem maior oscilação térmica, e suas temperaturas oscilam de forma similar às identificadas sem a consideração de zonas. Deste modo, o sistema de maior condutividade térmica obteve as temperaturas mais altas, mesmo não possuindo o maior fator solar entre os sistemas analisados e a zona sudeste apresentou as temperaturas mais elevadas.

## 6. CONCLUSÃO

No âmbito da construção civil a escolha de sistemas construtivos de fachada permite estabelecer uma relação direta com o desempenho térmico. Porém nesta escolha se apresentam diversos fatores sociais, econômicos, culturais e até mesmo políticos, e o desempenho térmico é intrínseco a todos eles. Deste modo, deve-se ressaltar que os estudos e análises térmicas de fachadas devem ser feitos para cada cenário possível, pois os resultados sobre o comportamento e desempenho térmico se alteram em diferentes localidades e condições. Associados a outras soluções utilizadas, como ventilação e sombreamento, a escolha da fachada também sofrerá impactos em seus desempenhos, que podem ter os efeitos potencializados ou retardados de acordo com a relação entre o sistema e a solução adotada.

Os resultados obtidos no estudo reiteram os pressupostos da revisão bibliográfica. Contudo, pela complexidade das condições envolvidas no estudo há interferências que vão além das propriedades específicas estabelecidas, como resultado da relação entre diferentes elementos e propriedades; que mesmo em situações parametrizadas, produzem diferentes impactos decorrentes das interações às quais estão expostos.

Observou-se no estudo que a influência de algumas propriedades prevaleceram sobre outras, a exemplo da utilização de um sistema de alta absorvidade com um valor inferior de transmitância. O sistema de bloco cerâmico de 12 furos com pintura preta obteve uma temperatura interior inferior à de um outro com maior transmitância, porém com menor absorvidade, que foi o bloco de 6 furos com pintura branca. Estes resultados inferem que, para as condições propostas, a transmitância tem maior influência no desempenho térmico, ou na capacidade de isolar o ambiente de cargas externas. Porém não se deve considerar esta como uma condição absoluta, pois sempre deve se vincular aos dados inseridos.

O isolamento térmico apesar de contribuir para a otimização de alguns sistemas de condicionamento, pode ter efeito negativo em diversas soluções. Sendo assim, quando a utilização de um sistema construtivo visa a dissipação térmica, um sistema de menor resistividade se torna mais atrativo, como o caso do bloco cerâmico de 6 furos, que pode reduzir o efeito estufa eventualmente gerado pelas paredes externas. Do mesmo modo, a utilização de um sistema com maior absorvância pode ser adotada para o aquecimento natural de uma edificação, o que não se deve descartar para as situações de climas frios. Entretanto, para a zona bioclimática na qual o estudo foi realizado, sua utilização deve ser evitada não apenas pelo impacto negativo na redução do consumo energético, mas também pelo significativo rebaixamento na classificação para certificação.

A implantação conjunta de diferentes matérias, como alumínio junto a câmaras de ar ou isolamentos térmicos, obtiveram excelentes resultados. Em função destas composições, são alcançadas propriedades térmicas favoráveis tanto para o isolamento térmico, quanto para a redução da absorção de radiação solar. Pela propriedade de baixa emissividade do alumínio, as câmaras de ar tem sua resistividade térmica amplificada, adicionada à alta resistividade do alumínio composto, o que resulta em um sistema de baixa transmitância. Assim, ao se amplificar a resistividade do sistema, com o preenchimento das câmaras de ar com lã de rocha, material isolante térmico, há um impacto positivo na redução da temperatura interna para simulação.

A entrada de dados para alimentar o processamento pelo *software* foi feita e revisada. Entretanto os resultados são obtidos a partir de algoritmos propostos pelo programa, e estão sujeitos a majorações e a considerações adotadas. Como o exemplo observado pela majoração das horas de radiação solar. Mesmo com essa majoração não se inviabilizou a análise, visto que os resultados suprimam as expectativas em geral. Alguns fatores que podem ter influenciado os resultados finais da simulação, como a majoração da radiação solar; simplificações a respeito da composição dos ambientes internos e desconsideração das cargas internas possui caráter didático do estudo, que busca enfatizar os resultados relativos ao

desempenho térmico de sistemas construtivos de fachadas, reduzindo o número de influências.

#### 6.1. Limitações do Trabalho

Os resultados obtidos estão ligados à localização de Brasília e às condições descritas na metodologia aplicada. Porém a simulação pode ser aplicada em outro contexto, desde que haja as devidas alterações na entrada de dados.

Em virtude da complexidade das relações que influenciam o desempenho térmico, foi necessário o uso de simulação computacional, sujeitas aos algoritmos do programa, os quais podem apresentar imprecisões e considerações específicas. Do mesmo modo, os dados utilizados a respeito das condições climáticas e dos materiais que compõem os sistemas construtivos apresentado por organizações capacitadas, estão sujeitos a considerações e falhas. Deste modo, para uma maior precisão é recomendada a utilização de dados medidos *in loco* ou por meio de ensaios.

#### 6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Sugere-se para trabalhos futuros relacionados ao desempenho térmico em edifícios:

- A comparação entre os resultados obtidos em simulação e a mediação *in loco*, e a calibração de sistemas de simulações.
- O uso de diferentes tipologias construtivas de fachadas para a otimização dos sistemas de condicionamento térmico .
- A relação das diferentes soluções para condicionamento do ambiente em função da influência das cargas internas para o desempenho térmico do edifício.
- O estudo das propriedades de permeabilidade hídrica dos materiais utilizados em paredes externas, e as consequências ao desempenho térmico do edifício.
- A utilização de sistemas translúcidos em fachadas, e seu impacto nas condições de conforto.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- ABNT** – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2004a.
- ABNT**. 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. Rio de Janeiro, 2004b.
- ABNT**. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2004c.
- ABNT**. NBR 15575: Edificações habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Rio de Janeiro, 2008.
- ASTE**, Niccolò; **ANGELOTTI**, Adriana; **BUZZETTI**, Michela. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. *Energy and Buildings*, v. 41, n. 11, p. 1181-1187, 2009.
- ASHRAE** - American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. *ASHRAE 2009 Handbook Fundamentals*. 2009
- BELMETAL**. Apostila sobre Alumínio Composto. Disponível em: <[http://www.belmetalplasticos.com.br/app/webroot/uploads/files/Apostila\\_ACM.pdf](http://www.belmetalplasticos.com.br/app/webroot/uploads/files/Apostila_ACM.pdf)>. Acesso em: 16 de Maio, 2016.
- BRUNDTLAND**, Gru et al. WCED. Our Common Future ('Brundtland report'). 1987.
- CARLO**, Joyce Correna; **LAMBERTS**, Roberto. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios—parte 1: método prescritivo. *Ambiente Construído*, v. 10, n. 2, p. 7-26, 2010.
- FOSSATI**, Michele; **CRUZ**, Juliana; **LAMBERTS**, Roberto. Eficiência energética de diferentes sistemas construtivos avaliados segundo o método prescritivo do RTQ-R. *Laboratório de eficiência energética em edificações*, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. 2014.
- Digital Alchemy**; DOE - United States Department of Energy; Lawrence Berkeley National Laboratory; TRANE; Hydro-Québec; NEEA - Northwest *Energy* Efficiency Alliance; Infosys. *Simergy Software*. Disponível em: <<http://simergy.lbl.com>> Acesso em: 18 de Maio, 2016.
- FERRER, J.A.**; **GARRIDO, A.** Eficiência Energética em Edifícios. Curso do Observatório de Energias Renováveis para a América Latina e o Caribe. 2013.
- GIVONI**, Baruch. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and buildings*, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992.
- INMET**. Arquivo EPW da Estação 867150 dos Dados do INMET de 2001 a 2010. Brasília. INMET. Brasil. 2015.

**INMET.** Estações Automáticas - Gráficos, Estação A0001 - Brasília. Umidade Relativa, Ano 2015. INMET. Brasil. 2016. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede\\_estacoes\\_auto\\_graf](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf)>. Acesso em 09 de Jun. 2016.

**INMETRO.** Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros. ANEXO V DA PORTARIA INMETRO Nº 50/2013. INMETRO. Brasil. 2013.

**INMETRO.** Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RQT-C). ANEXO DA PORTARIA INMETRO nº 372 / 2010. INMETRO. Brasil. 2010.

**ISO,** En. 7730: 2005. Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2006.

**JARDIM ACROPOLIS.** Projetos de Arquitetura. Brasília, 2016.

**LABEEE** – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina. Programa Computacional Analysis Bio, Versão: 2.2. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/software/analysisBIO.html>>. Acesso em Maio. 2016.

**LAMBERTS,** Roberto; GHISI, Enedir; PAPST, Ana L. Carlo, J.C. Batista, J.O. Marinoski, D.L. Naranjo, A. Duarte, V. C. P. Desempenho térmico de edificações. 8ªed. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

**LAMBERTS,** R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência Energética na Arquitetura. 2ª edição. São Paulo: ProLivros, 2004.

**MEBRATU,** Desta. SUSTAINABILITY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT: HISTORICAL AND CONCEPTUAL REVIEW. Environmental Impact Assessment Review, Lund University, Volume 18, Edição 6, Pag. 493–520. Nov. 1998.

**MEBRATU,** Desta. Sustainability and sustainable development: historical and conceptual review. Environmental impact assessment review, v. 18, n. 6, p. 493-520, 1998.

**MENDONÇA,** Paulo. Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados. Dissertação de Doutorado, Universidade do Minho, Portugal, 2005.

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

**PEREIRA,** Cláudia D. A influência do envelope no desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ocupadas e ventiladas naturalmente. 2009. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. 2009.

**RAULINO,** George. Reuniões para aconselhamento sobre desempenho térmico de envoltórias. Engenheiro Mecânico, M.Sc., Membro Vitalício da ASHRAE e Ex-Professor da Universidade de Brasília, feitas em mai./jun. 2016.

**REAGAN**, John A.; **ACKLAM**, D. M. Solar reflectivity of common building materials and its influence on the roof heat gain of typical southwestern USA residences. *Energy and Buildings*, v. 2, n. 3, p. 237-248, 1979.

**ROMERO**, Marta Adriana Bustos. A arquitetura bioclimática do espaço público. Editora UnB, Brasília, v.3, 2007.

**ROMERO**, Marta Adriana Bustos. Arquitetura do lugar: uma visão bioclimática da sustentabilidade em Brasília. São Paulo: Ed. Nova Técnica Editorial, 2011.

**ROUCOULT**, J.-M.; **DOUZANE**, O.; **LANGLET**, T. Incorporation of thermal inertia in the aim of installing a natural nighttime ventilation system in buildings. *Energy and Buildings*, v. 29, n. 2, p. 129-133, 1999.

**SCHEUER**, Chris; **KEOLEIAN**, Gregory A.; **REPPE**, Peter. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy and buildings*, v. 35, n. 10, p. 1049-1064, 2003.

**SORGATO**, Marcio José et al. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 4, p. 83-101, 2014.

**TRIANA**, Maria Andrea; **LAMBERTS**, Roberto. Metodologia de avaliação ambiental brasileira para o setor residencial: eficiência energética. IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2007.

**U.S. DEPARTMENT OF ENERGY**. *Energy Plus Software*. versão 8.1.0 Disponível em: <<https://energyplus.net/downloads>> Acesso em: 01 de Maio, 2016.

**WONG**, N. H.; **LI**, S. A study of the effectiveness of passive climate control in naturally ventilated residential buildings in Singapore. *Building and Environment*, v. 42, n. 3, p. 1395-1405, 2007.

**YILMAZ**, Z. Evaluation of energy efficient design strategies for different climatic zones: Comparison of thermal performance of buildings in temperate-humid and hot-dry climate. *Energy and Buildings*, v. 39, n. 3, p. 306-316, 2007.

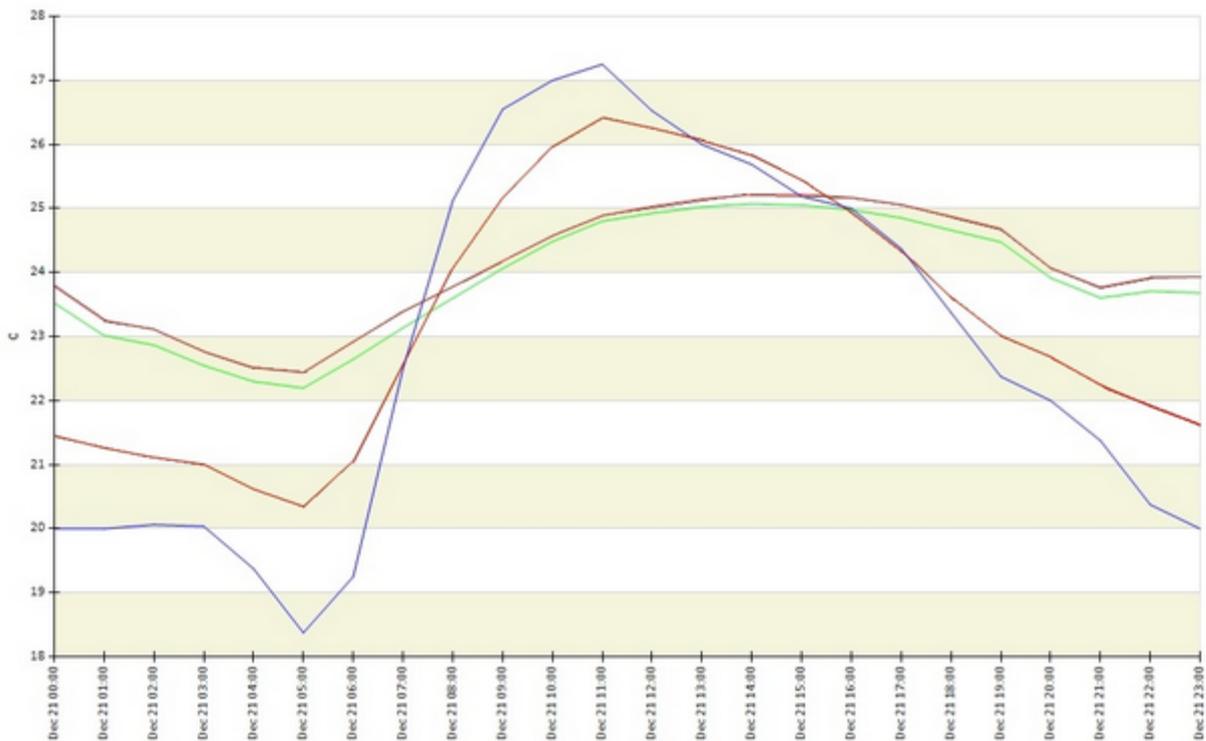
## 8. APÊNDICES

### Apêndice A - Temperatura em Cada Sistema Construtivo por Pavimento e Temperatura Externa.

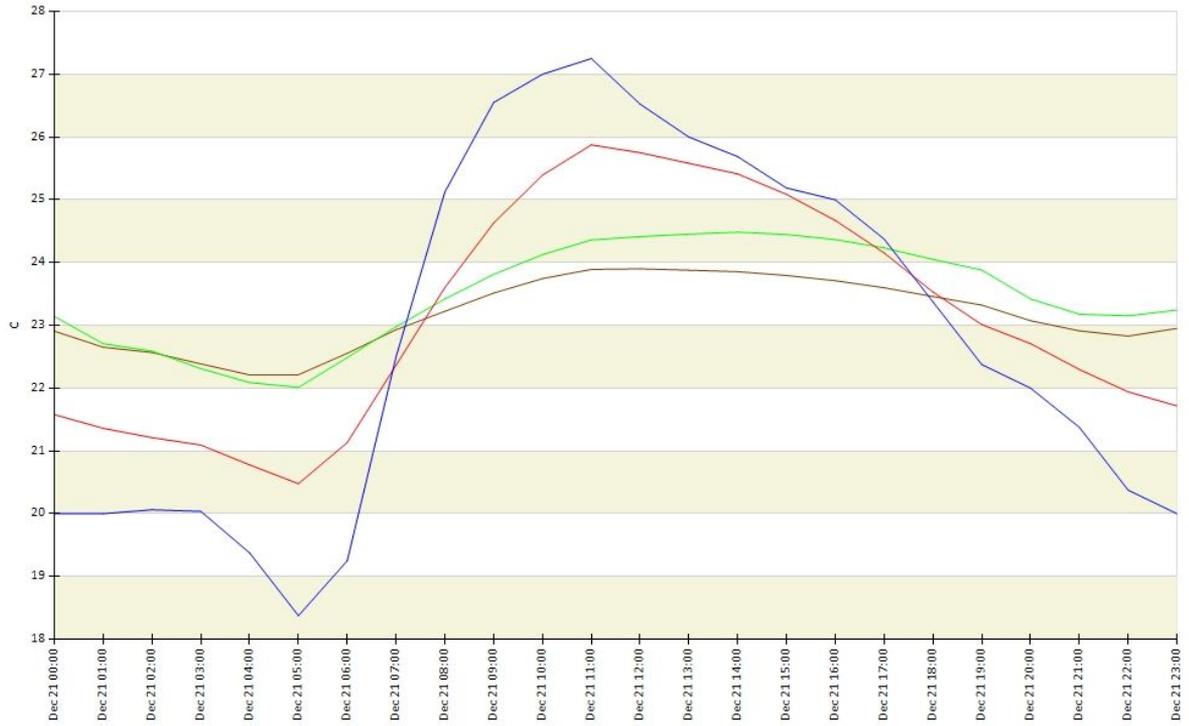
Figura 19 - Legenda dos Gráficos 1 ao 5.



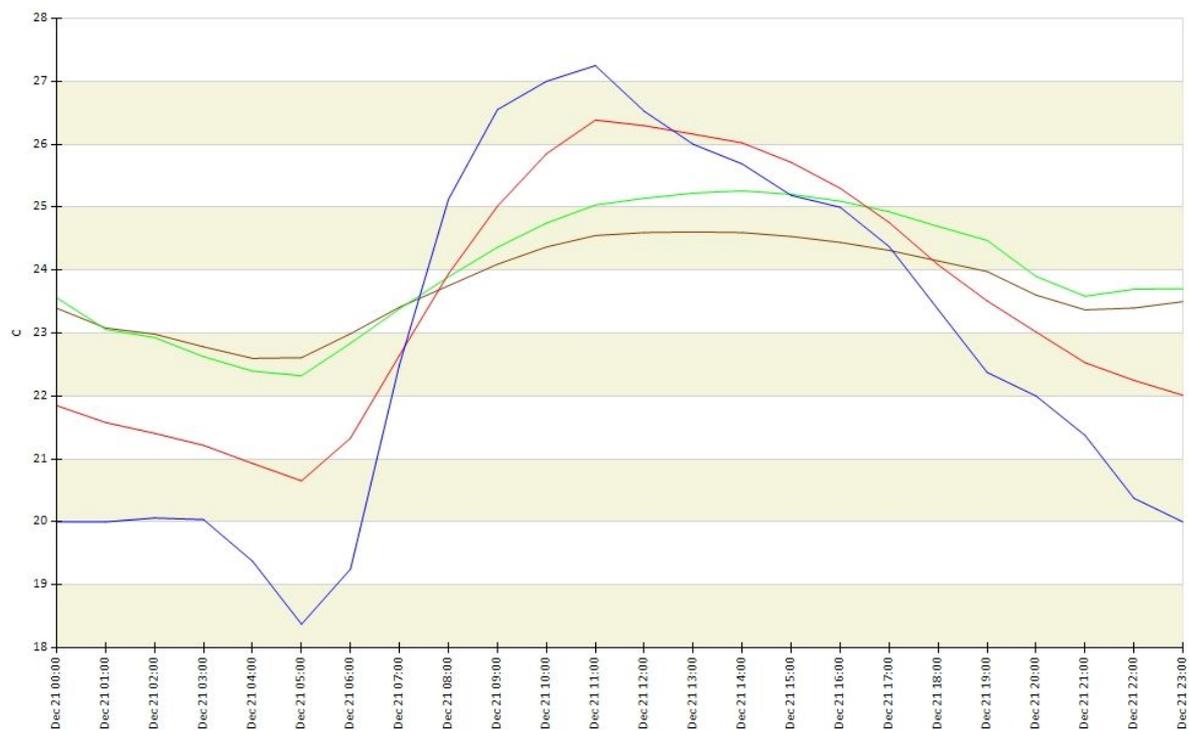
Gráfico 8 - Temperatura por Pavimento, Bloco Cerâmico de 6 Furos com Pintura Branca



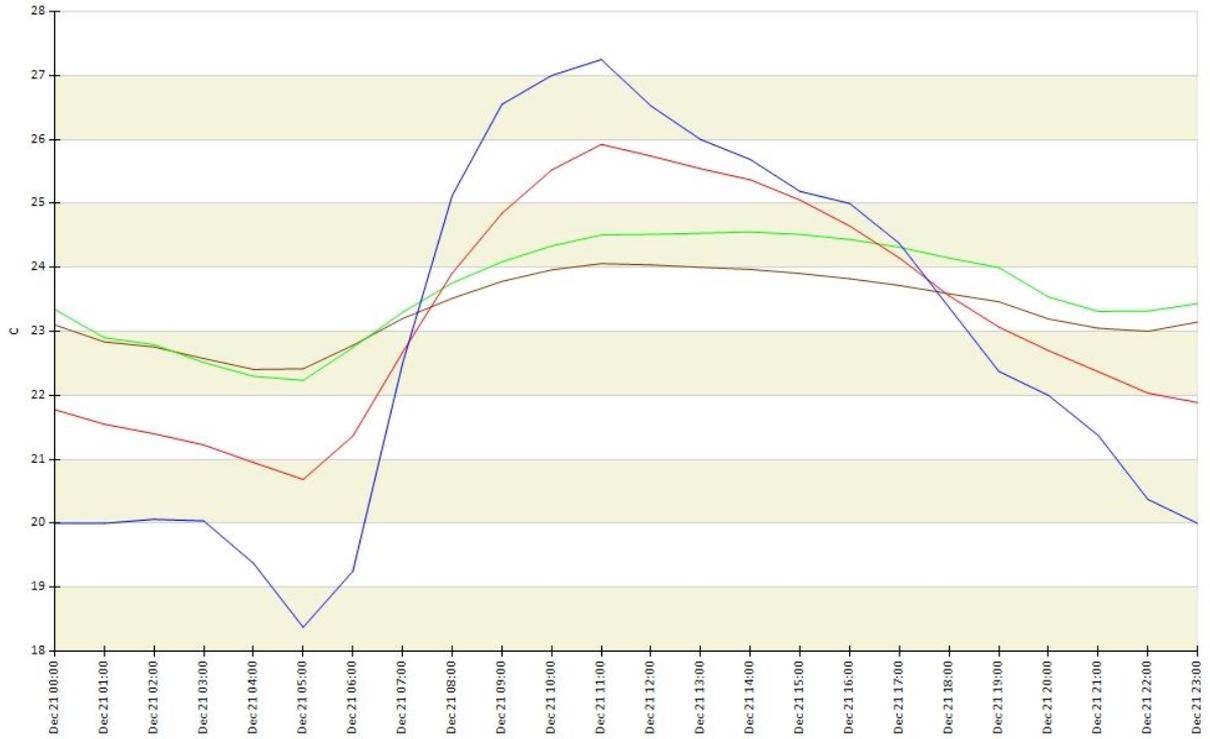
**Gráfico 9 - Temperatura por Pavimento, Bloco Cerâmico de 12 furos com Pintura Branca**



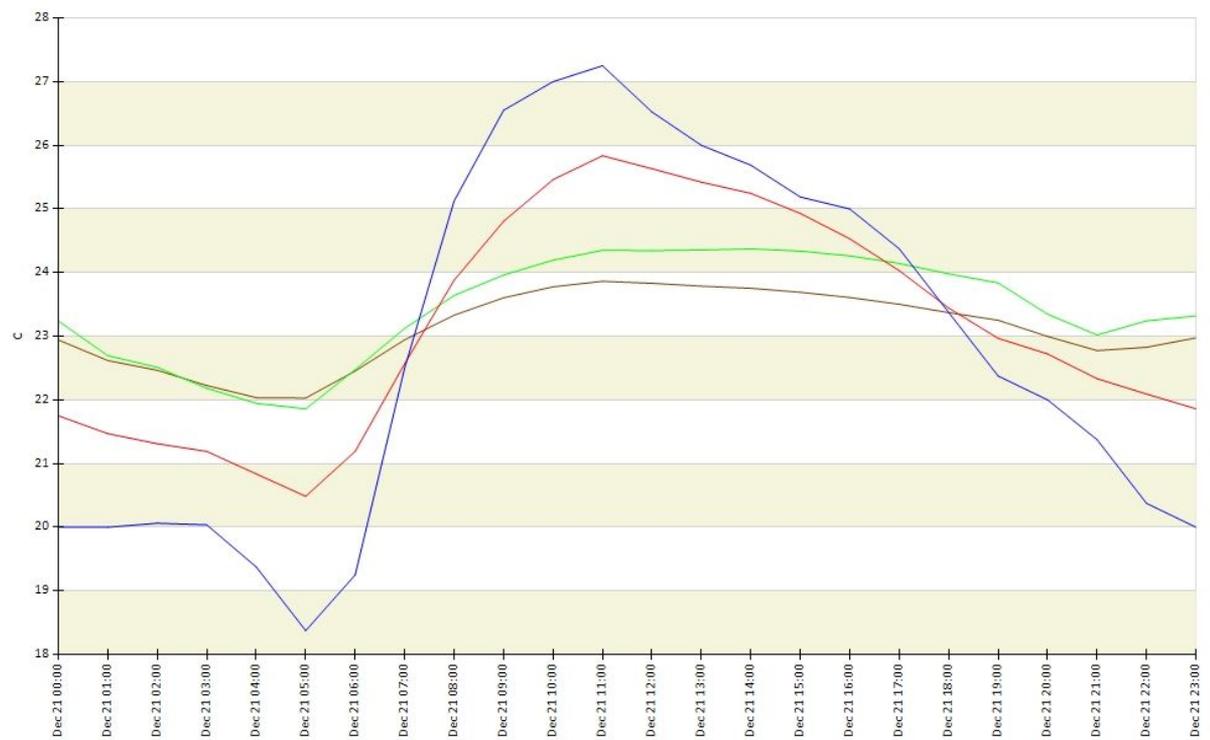
**Gráfico 10 - Temperatura por Pavimento, Bloco Cerâmico de 12 Furos com Pintura Preta**



**Gráfico 11 - Temperatura por Pavimento, Bloco Cerâmico de 6 Furos com Alumínio Composto sem Isolamento**



**Gráfico 12 - Temperatura por Pavimento, Bloco Cerâmico de 6 Furos com Alumínio Composto com Isolamento**

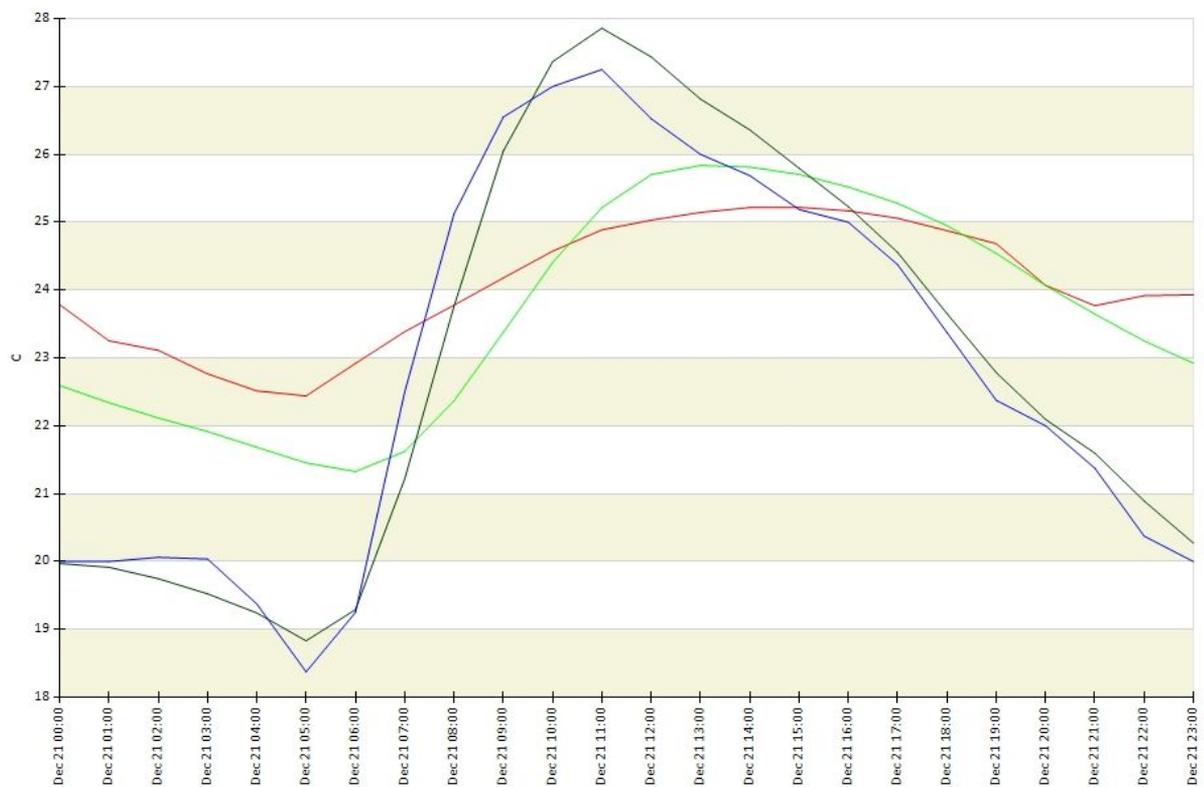


## Apêndice B - Temperaturas das Faces Internas e Externas da Fachada Sudoeste, e Ambientes Internos e Externos do 2º Pavimento por Sistema Construtivo.

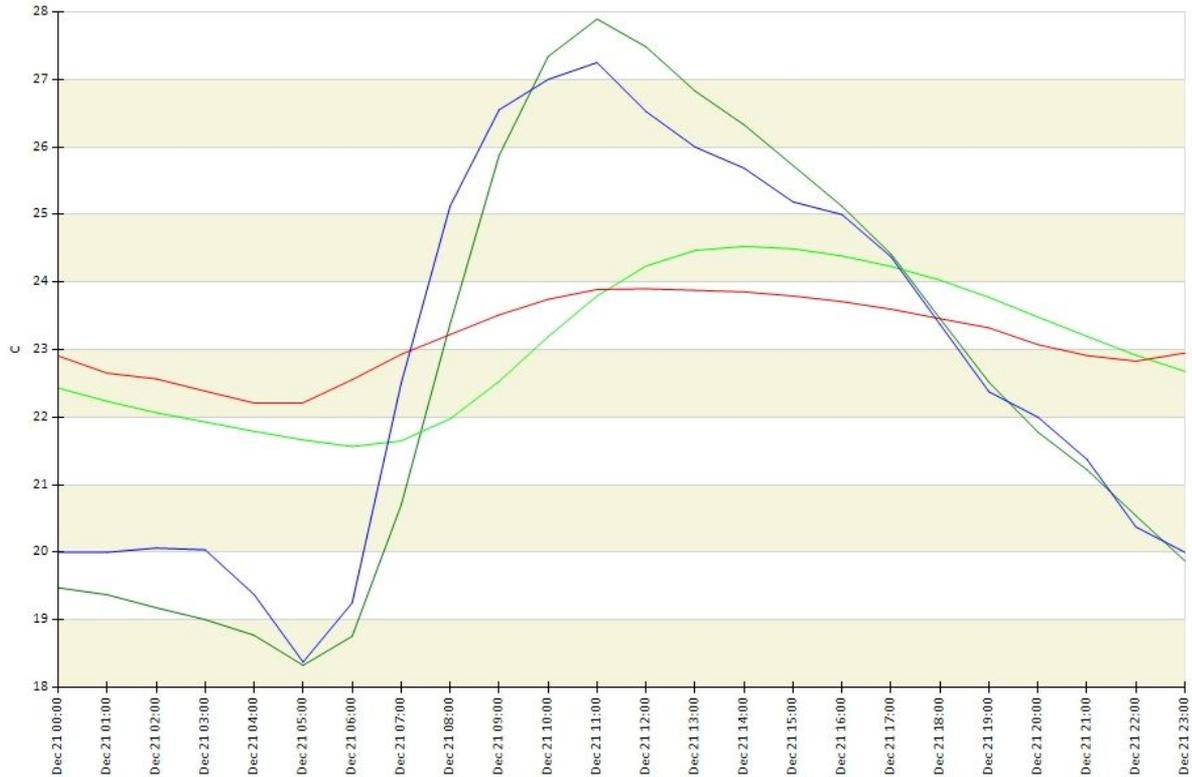
Figura 20 - Legenda dos Gráficos 7 ao 11.

—	Temperatura Ambiente Externo
—	Temperatura Ambiente Interno
—	Temperatura Face Interna (Sudeste)
—	Temperatura Face Externa (Sudeste)

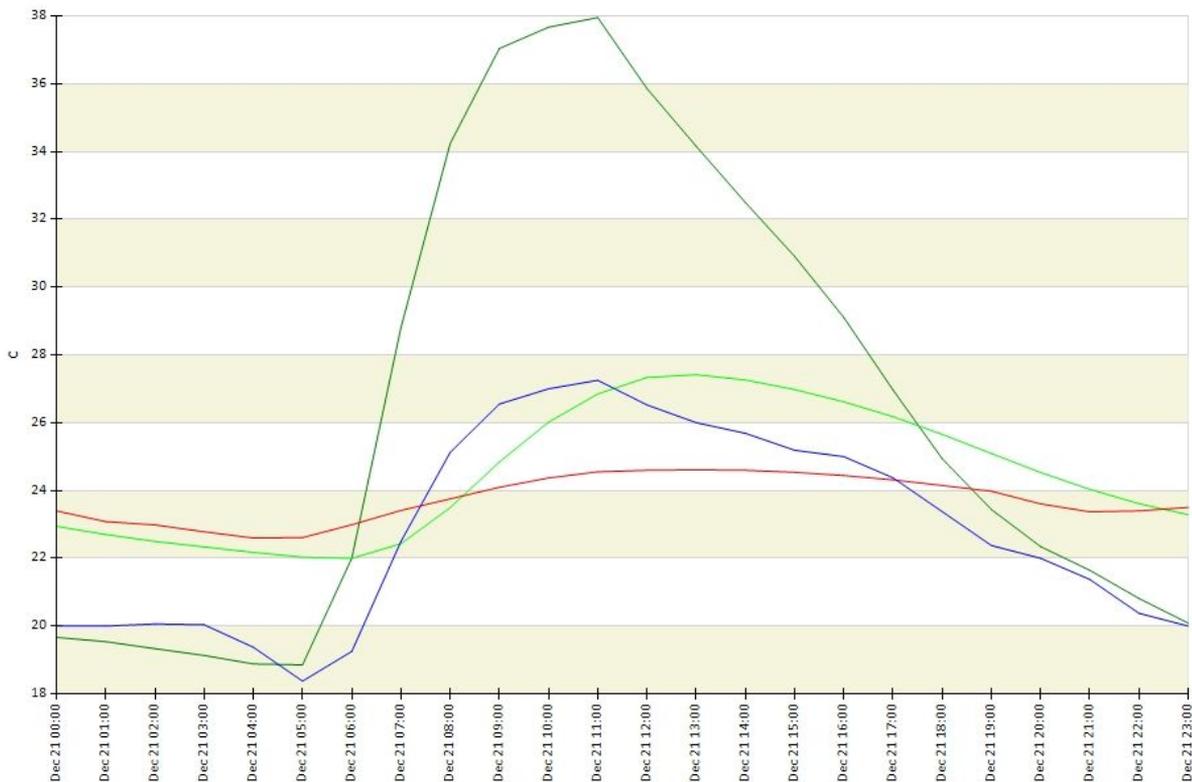
Gráfico 13 - Temperaturas da Face Sudeste para Bloco Cerâmico de 6 Furos com Pintura Branca



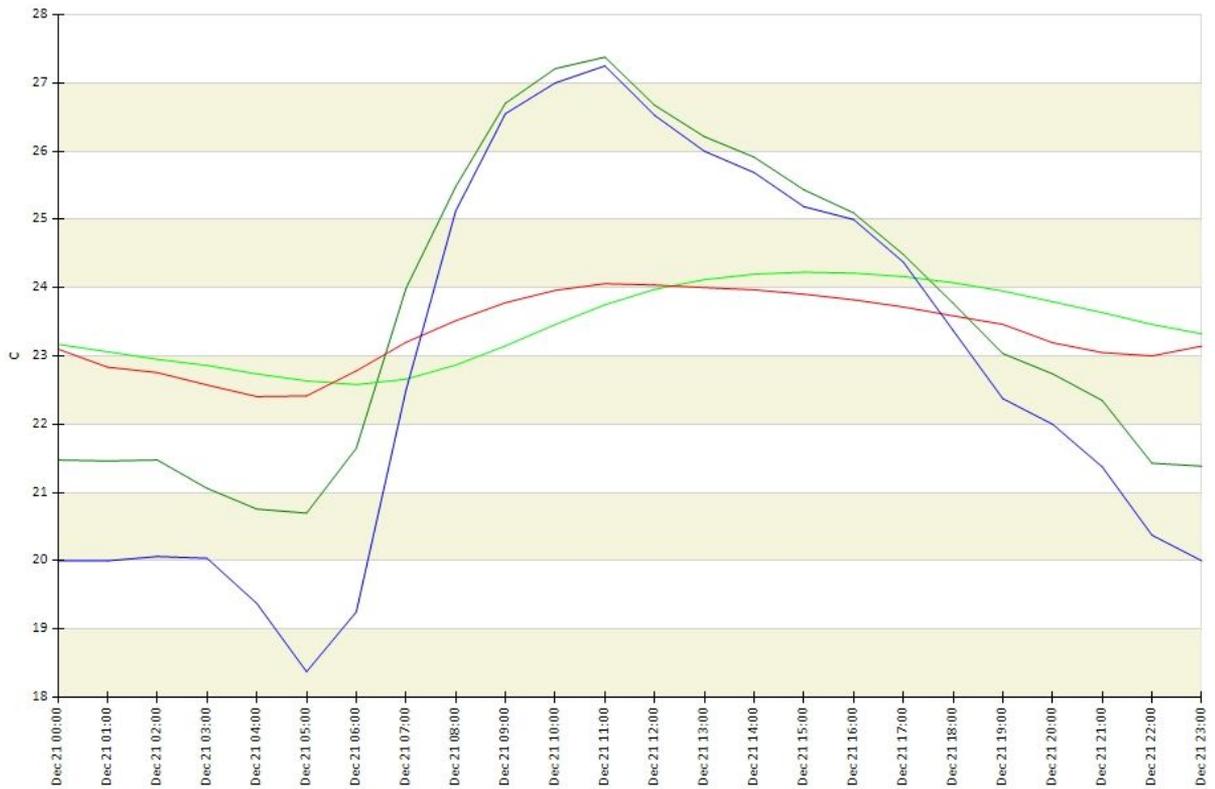
**Gráfico 14 - Temperaturas da Face Sudeste para Bloco Cerâmico de 12 Furos com Pintura Branca**



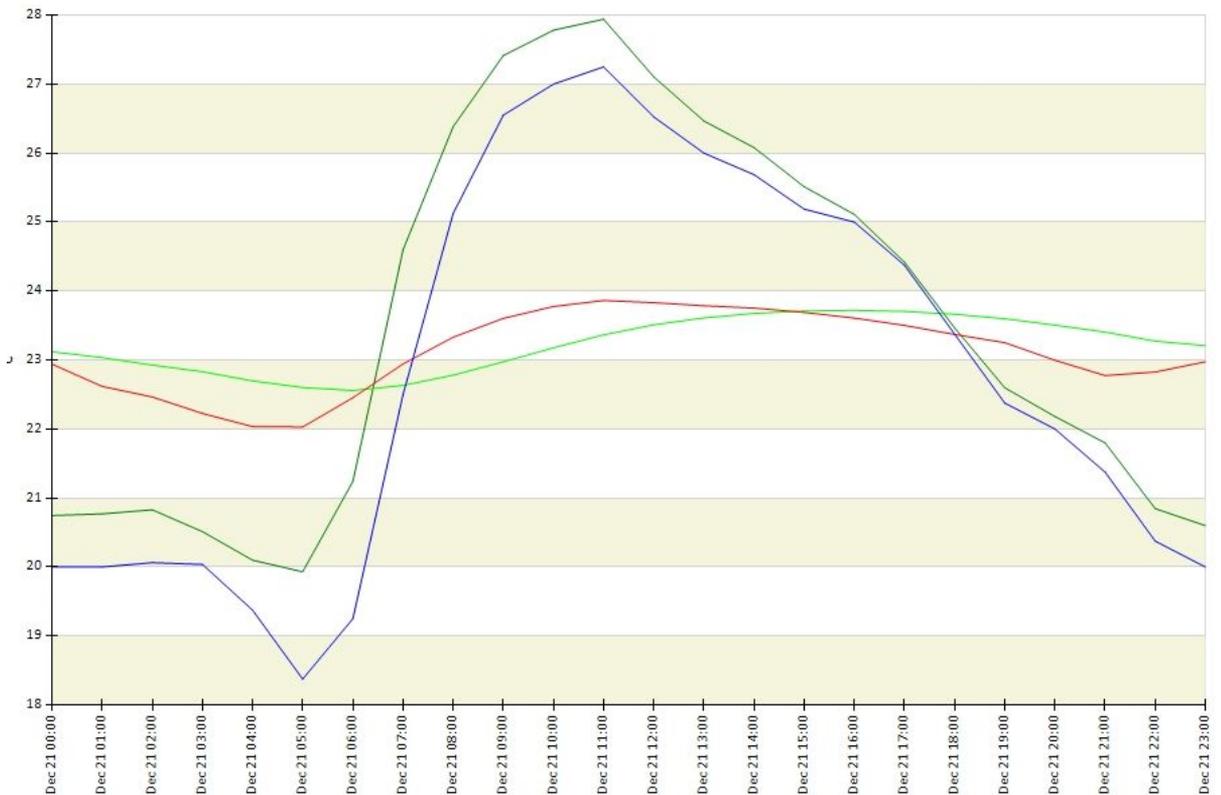
**Gráfico 15 - Temperaturas da Face Sudeste para Bloco Cerâmico de 12 Furos com Pintura Preta**



**Gráfico 16 - Temperaturas da Face Sudeste para Bloco Cerâmico de 6 Furos com Alumínio Composto sem Isolamento**



**Gráfico 17 - Temperaturas da Face Sudeste para Bloco Cerâmico de 6 Furos com Alumínio Composto com Isolamento**



## Apêndice C - Temperaturas de Zonas Periféricas e Central do 2º Pavimento por Sistema Construtivo.

Gráfico 18 - Temperatura das Zonas Periféricas e Central para Paredes de 6 Furos com Pintura Branca.

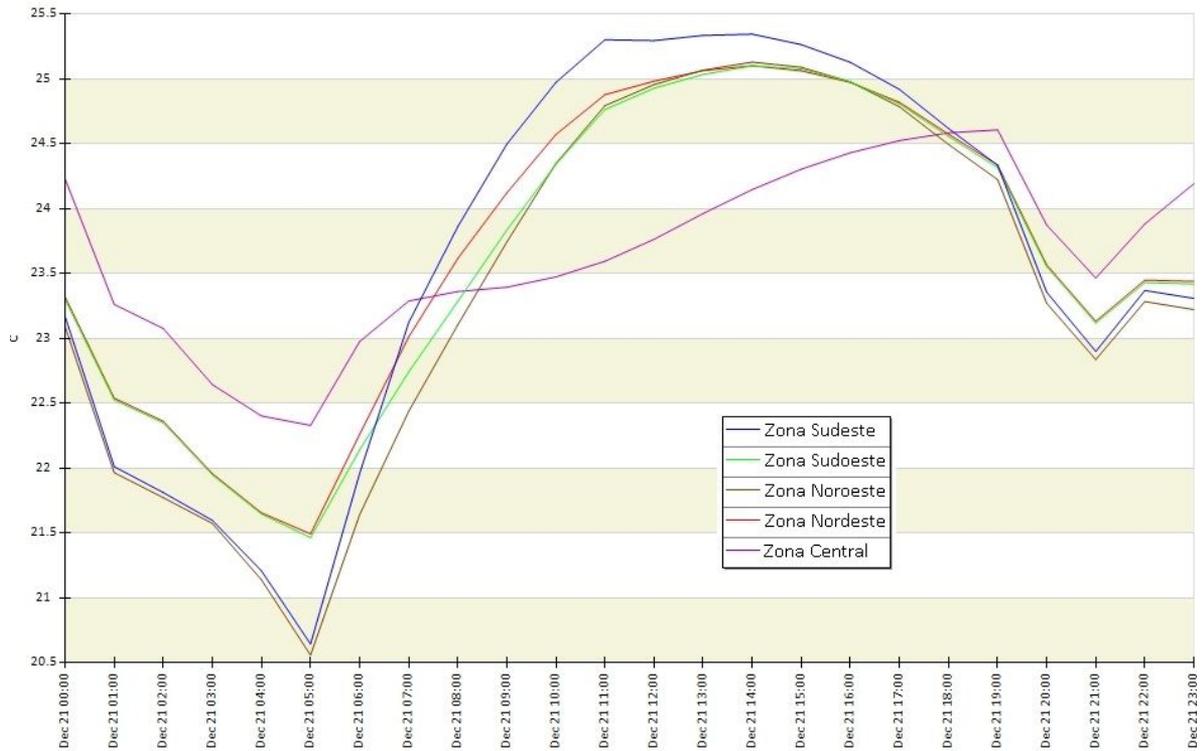
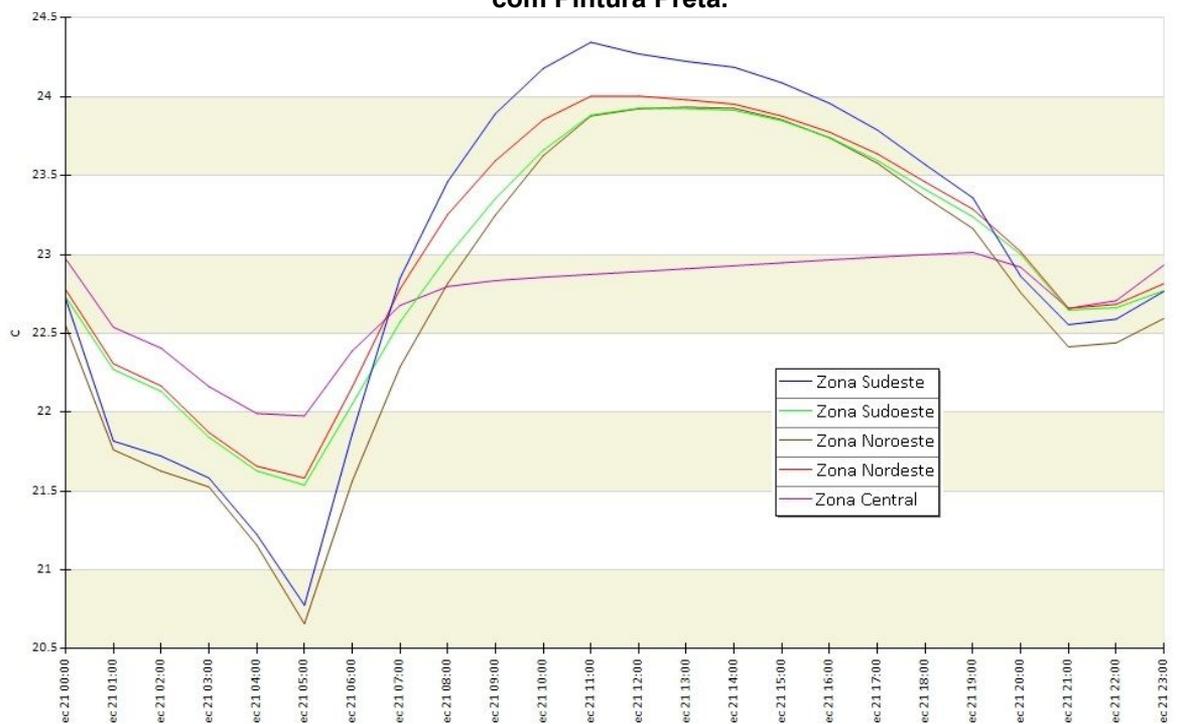
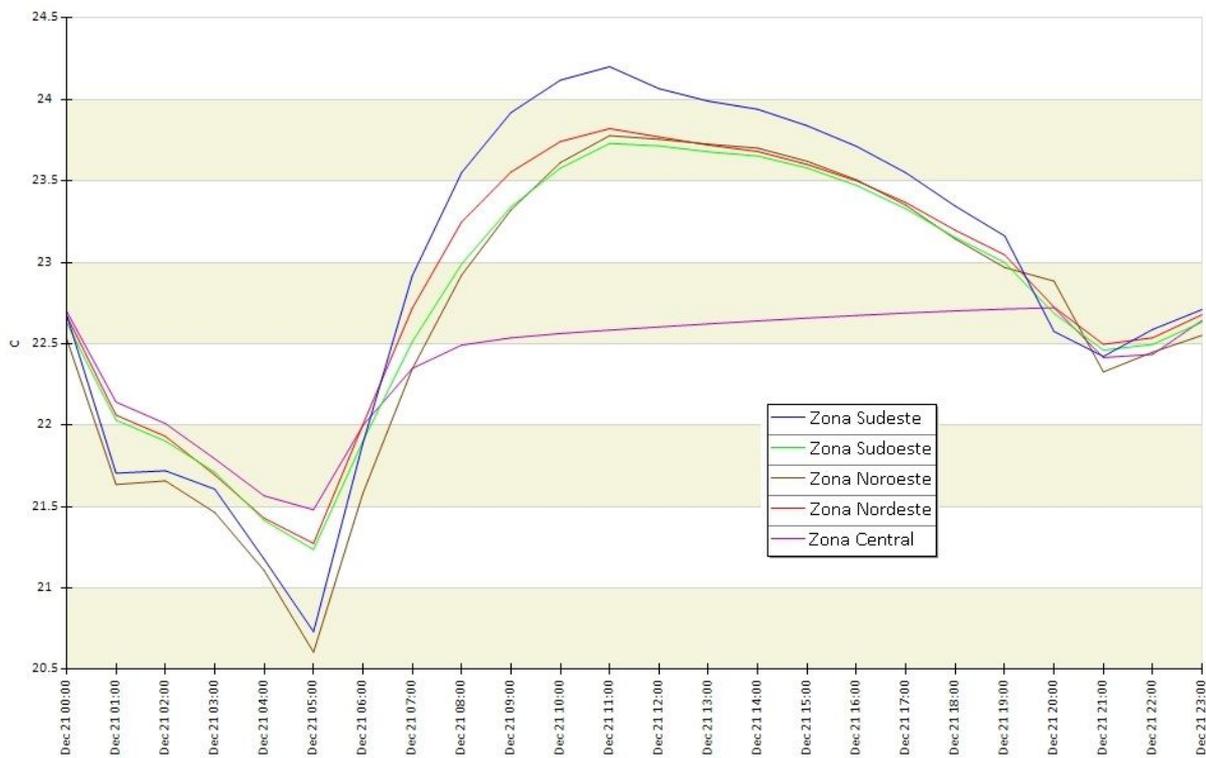


Gráfico 19 - Temperatura das Zonas Periféricas e Central para Paredes de 12 Furos com Pintura Preta.



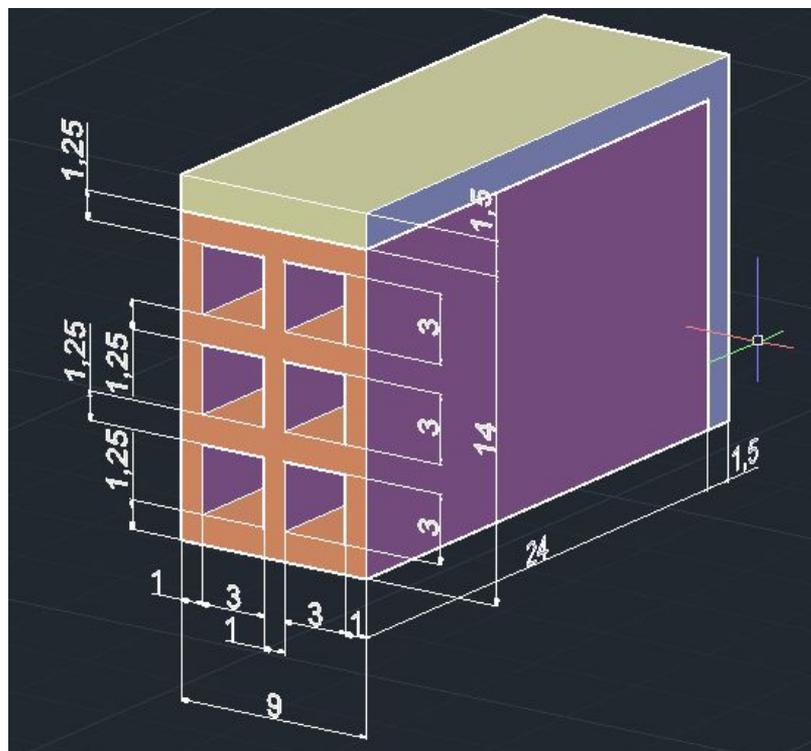
**Gráfico 20 - Temperatura das Zonas Periféricas e Central para Paredes de 6 Furos com Alumínio Composto com Isolamento Térmico.**



## Apêndice D - Cálculo das Propriedades do Bloco Cerâmico de 6 furos (9x14x24cm) com argamassa de assentamento de 1,5cm.

Os dados a respeito de densidade, condutividade e capacidade térmica foram obtidos na NBR 15220-2 (ABNT, 2004b), descritas no anexo 4. As medidas internas adotadas são considerações em função do modo produção de blocos cerâmicos apresentar variações nos produtos finais. O formato adotado e medidas consideradas podem ser vistos na Figura 19.

Figura 21 - Bloco Cerâmico de 6 Furos com Medidas Internas.



### Seção A1 (Cerâmica)

$$A_1 = 0,0125 * 0,24 = 0,003m^2$$

$$R_1 = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,09}{0,9} = 0,1m^2K/W$$

### Seção A2 (Tijolo + Furos)

$$A_2 = 0,03 * 0,24 = 0,0072m^2$$

$$R_2 = \frac{e}{\lambda} + R_{ar} + \frac{e}{\lambda} + R_{ar} + \frac{e}{\lambda} = \frac{0,01}{0,9} + 0,16 + \frac{0,01}{0,9} + 0,16 + \frac{0,01}{0,9} = 0,3533m^2K/W$$

### Seção A3 (Argamassa de Assentamento)

$$A_3 = 0,015 * 0,24 + 0,015 * 0,155 = 0,005925m^2$$

$$R_3 = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,09}{1,15} = 0,0783m^2K/W$$

### Resistência Total e Condutividade Equivalente

$$R_{tijolo\ 6\ furos} = \frac{4A_1+3A_2+A_3}{\frac{4A_1}{R_1}+\frac{3A_2}{R_2}+\frac{A_3}{R_3}} = 0,1539m^2K/W$$

$$\lambda_{equivalente} = \frac{e}{R_{tijolo\ 6\ furos}} = \frac{0,09}{0,1539} = 0,5848W/m^2K$$

### Cálculo da Densidade Equivalente

Material	Volume (m³)	Densidade (kg/m³)	Peso (kg)
Cerâmica	0,001728	1600	2,7648
Argamassa	0,00053325	2000	1,0665
Total	0,00355725	1077,04	3,8313

### Cálculo da capacidade térmica equivalente

$$C_{T1} = e * c * \rho = 0,09 * 0,92 * 1600 = 132,48\ kJ/m^2K$$

$$C_{T2} = \Sigma e * c * \rho = 3 * 0,01 * 0,92 * 1600 + 2 * e * \rho_{ar} = 44,16\ kJ/m^2K$$

$$\rho_{ar} = 0$$

$$C_{T3} = e * c * \rho = 0,09 * 1 * 2100 = 189\ kJ/m^2K$$

$$C_{T\ tijolo\ 6\ furos} = \frac{4A_1+3A_2+A_3}{\frac{4A_1}{C_{T1}}+\frac{3A_2}{C_{T2}}+\frac{A_3}{C_{T3}}} = 64,682\ kJ/m^2K$$

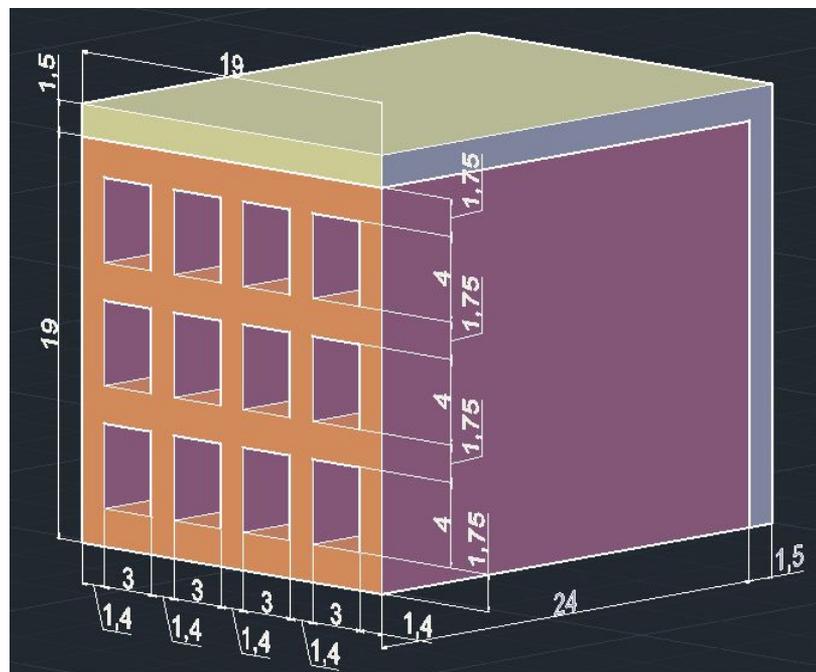
$$c_{Tijolo\ 6\ furos} = \frac{C_T}{\rho_{equivalente}} = 0,060056\ kJ/m^2K = 60,056J/m^2K < 100J/m^2K$$

Devido a limitações no *software* utilizado, será adotado o valor mínimo de 100J/m²K

## Apêndice E - Cálculo das Propriedades do Bloco Cerâmico de 12 furos (19x19x24cm) com argamassa de assentamento de 1,5cm.

Os dados a respeito de densidade, condutividade e capacidade térmica foram obtidos na NBR 15220-2 (ABNT, 2004b), descritos no anexo 4. As medidas internas adotadas são considerações devido ao modo produção de blocos cerâmicos possuir variações nos produtos finais. O formato adotado e medidas consideradas podem ser vistos na Figura 20.

Figura 22 - Bloco Cerâmico de 6 Furos com Medidas Internas.



### Seção A1 (Cerâmica)

$$A_1 = 0,0175 * 0,24 = 0,0042m^2$$

$$R_1 = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,19}{0,9} = 0,2111m^2K/W$$

### Seção A2 (Tijolo + Furos)

$$A_2 = 0,04 * 0,24 = 0,0096m^2$$

$$R_2 = \frac{e}{\lambda} + R_{ar} + \frac{e}{\lambda} + \dots + R_{ar} + \frac{e}{\lambda} = 0,7178m^2K/W$$

### Seção A3 (Argamassa de Assentamento)

$$A_3 = 0,015 * 0,24 + 0,015 * 0,205 = 0,006675m^2$$

$$R_3 = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,19}{1,15} = 0,1652m^2K/W$$

### Resistência Total e Condutividade Equivalente

$$R_{tijolo\ 6\ furos} = \frac{4A_1+3A_2+A_3}{\frac{4A_1}{R_1}+\frac{3A_2}{R_2}+\frac{A_3}{R_3}} = 0,32753m^2K/W$$

$$\lambda_{equivalente} = \frac{e}{R_{tijolo\ 6\ furos}} = \frac{0,19}{0,32753} = 0,5801W/m^2K$$

### Cálculo da Densidade Equivalente

Material	Volume (m³)	Densidade (kg/m³)	Peso (kg)
Cerâmica	0,005208	1600	8,3328
Argamassa	0,001268	2000	2,5365
Total	0,00993225	1094,34	10,8693

### Cálculo da capacidade térmica equivalente

$$C_{T1} = e * c * \rho = 0,19 * 0,92 * 1600 = 279,68\ kJ/m^2K$$

$$C_{T2} = \Sigma e * c * \rho = 5 * 0,014 * 0,92 * 1600 + 3 * e * \rho_{ar} = 103,04\ kJ/m^2K$$

$$\rho_{ar} = 0$$

$$C_{T3} = e * c * \rho = 0,19 * 1 * 2100 = 399\ kJ/m^2K$$

$$C_{T\ tijolo\ 6\ furos} = \frac{4A_1+3A_2+A_3}{\frac{4A_1}{C_{T1}}+\frac{3A_2}{C_{T2}}+\frac{A_3}{C_{T3}}} = 146,716\ kJ/m^2K$$

$$C_{Tijolo\ 6\ furos} = \frac{C_T}{\rho_{equivalente}} = 0,13407\ kJ/m^2K = 134,07J/m^2K > 100J/m^2K$$

## 9. ANEXOS

**Anexo 1** - Tabela A.1 da NBR 15220-2 (ABNT, 2004b), Resistência Térmica de Câmaras de Ar não Ventiladas, com largura maior que espessura.

**Tabela A.1 - Resistência térmica superficial interna e externa.**

$R_{si}$ ( $m^2.K/W$ )			$R_{se}$ ( $m^2.K/W$ )		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
⇒	↑	↓	⇒	↑	↓
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

**Anexo 2** - Tabela B.1 da NBR 15220-2 (ABNT, 2004b), Resistência Térmica de Câmaras de Ar não Ventiladas, com largura maior que espessura.

**Tabela B.1 - Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura.**

Natureza da superfície da câmara de ar	Espessura "e" da câmara de ar cm	Resistência térmica $R_{ar}$ $m^2.K/W$		
		Direção do fluxo de calor		
		Horizontal	Ascendente	Descendente
		⇒	↑	↓
Superfície de alta emissividade $\varepsilon > 0,8$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14	0,13	0,15
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5,0$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade $\varepsilon < 0,2$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29	0,23	0,29
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5,0$	0,34	0,27	0,61

**Notas:**

- $\varepsilon$  é a emissividade hemisférica total.
- Os valores para câmaras de ar com uma superfície refletora só podem ser usados se a emissividade da superfície for controlada e previsto que a superfície continue limpa, sem pó, gordura ou água de condensação.
- Para coberturas, recomenda-se a colocação da superfície refletora paralelamente ao plano das telhas (exemplo C.6 do anexo C); desta forma, garante-se que pelo menos uma das superfícies - a inferior - continuará limpa, sem poeira.
- Caso, no processo de cálculo, existam câmaras de ar com espessura inferior a 1,0 cm, pode-se utilizar o valor mínimo fornecido por esta tabela.

**Anexo 3 - Tabela B.2 da NBR 15220-2 (ABNT,2004b), Absortância para Radiação Solar e Emissividade para radiações a temperaturas comuns.**

**Tabela B.2 - Absortância ( $\alpha$ ) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade ( $\epsilon$ ) para radiações a temperaturas comuns (ondas longas)**

Tipo de superfície		$\alpha$	$\epsilon$
Chapa de alumínio (nova e brilhante)		0,05	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)		0,15	0,12
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)		0,25	0,25
Caiacção nova		0,12 / 0,15	0,90
Concreto aparente		0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Telha de barro		0,75 / 0,80	0,85 / 0,95
Tijolo aparente		0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Reboco claro		0,30 / 0,50	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico		0,85 / 0,98	0,90 / 0,98
Vidro incolor		0,06 / 0,25	0,84
Vidro colorido		0,40 / 0,80	0,84
Vidro metalizado		0,35 / 0,80	0,15 / 0,84
Pintura:	Branca	0,20	0,90
	Amarela	0,30	0,90
	Verde clara	0,40	0,90
	"Alumínio"	0,40	0,50
	Verde escura	0,70	0,90
	Vermelha	0,74	0,90
	Preta	0,97	0,90

## Anexo 4 - Tabela B.3 da NBR 15220-2(ABNT, 2004b), Densidade de Massa Aparente, Condutividade Térmica e Calor Específicos de Materiais

**Tabela B.3 - Densidade de massa aparente ( $\rho$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ) e calor específico ( $c$ ) de materiais**

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/(m.K))	$c$ (kJ/(kg.K))
<b>Argamassas</b>			
argamassa comum	1800-2100	1,15	1,00
argamassa de gesso (ou cal e gesso)	1200	0,70	0,84
argamassa celular	600-1000	0,40	1,00
<b>Cerâmica</b>			
tijolos e telhas de barro	1000-1300	0,70	0,92
	1300-1600	0,90	0,92
	1600-1800	1,00	0,92
	1800-2000	1,05	0,92
<b>Fibro-cimento</b>			
placas de fibro-cimento	1800-2200	0,95	0,84
	1400-1800	0,65	0,84
<b>Concreto (com agregados de pedra)</b>			
concreto normal	2200-2400	1,75	1,00
concreto cavernoso	1700-2100	1,40	1,00
<b>Concreto com pozolana ou escória expandida com estrutura cavernosa (<math>\rho</math> dos inertes ~750 kg/m<sup>3</sup>)</b>			
com finos	1400-1600	0,52	1,00
	1200-1400	0,44	1,00
sem finos	1000-1200	0,35	1,00
<b>Concreto com argila expandida</b>			
dosagem de cimento > 300 kg/m <sup>3</sup> , $\rho$ dos inertes > 350 kg/m <sup>3</sup>	1600-1800	1,05	1,00
	1400-1600	0,85	1,00
	1200-1400	0,70	1,00
	1000-1200	0,46	1,00
dosagem de cimento < 250 kg/m <sup>3</sup> , $\rho$ dos inertes < 350 kg/m <sup>3</sup>	800-1000	0,33	1,00
	600-800	0,25	1,00
	< 600	0,20	1,00
concreto de vermiculite (3 a 6 mm) ou perlite expandida fabricado em obra	600-800	0,31	1,00
	400-600	0,24	1,00
dosagem (cimento/areia) 1:3	700-800	0,29	1,00
dosagem (cimento/areia) 1:6	600-700	0,24	1,00
	500-600	0,20	1,00
concreto celular autoclavado	400-500	0,17	1,00
<b>Gesso</b>			
projetado ou de densidade massa aparente elevada	1100-1300	0,50	0,84
placa de gesso; gesso cartonado	750-1000	0,35	0,84
com agregado leve (vermiculita ou perlita expandida)			
dosagem gesso:agregado = 1:1	700-900	0,30	0,84
dosagem gesso:agregado = 1:2	500-700	0,25	0,84
<b>Granulados</b>			
brita ou seixo	1000-1500	0,70	0,80
argila expandida	< 400	0,16	
areia seca	1500	0,30	2,09
areia (10% de umidade)	1500	0,93	
areia (20% de umidade)	1500	1,33	
areia saturada	2500	1,88	
terra argilosa seca	1700	0,52	0,84

Tabela B.3 (continuação) - Densidade de massa aparente ( $\rho$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ) e calor específico ( $c$ ) de materiais

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/(m.K))	$c$ (kJ/(kg.K))
<b>Impermeabilizantes</b>			
membranas betuminosas	1000-1100	0,23	1,46
asfalto	1600	0,43	0,92
asfalto	2300	1,15	0,92
betume asfáltico	1000	0,17	1,46
<b>Isolantes térmicos</b>			
lã de rocha	20-200	0,045	0,75
lã de vidro	10-100	0,045	0,70
poliestireno expandido moldado	15-35	0,040	1,42
poliestireno estrudado	25-40	0,035	1,42
espuma rígida de poliuretano	30-40	0,030	1,67
<b>Madeiras e derivados</b>			
madeiras com densidade de massa aparente elevada	800-1000	0,29	1,34
carvalho, freijó, pinho, cedro, pinus	600-750	0,23	1,34
	450-600	0,15	1,34
	300-450	0,12	1,34
aglomerado de fibras de madeira (denso)	850-1000	0,20	2,30
aglomerado de fibras de madeira (leve)	200-250	0,058	2,30
aglomerado de partículas de madeira	650-750	0,17	2,30
	550-650	0,14	
placas prensadas	450-550	0,12	2,30
	350-450	0,10	2,30
placas extrudadas	550-650	0,16	2,30
compensado	450-550	0,15	2,30
	350-450	0,12	2,30
aparas de madeira aglomerada com cimento em fábrica	450-550	0,15	2,30
	350-450	0,12	2,30
	250-350	0,10	2,30
palha (capim Santa Fé)	200	0,12	
<b>Metais</b>			
aço, ferro fundido	7800	55	0,46
alumínio	2700	230	0,88
cobre	8900	380	0,38
zinco	7100	112	0,38
<b>Pedras (incluindo junta de assentamento)</b>			
granito, gneisse	2300-2900	3,00	0,84
ardósia, xisto	2000-2800	2,20	0,84
basalto	2700-3000	1,60	0,84
calcários/mármore	> 2600	2,90	0,84
outras	2300-2600	2,40	0,84
	1900-2300	1,40	0,84
	1500-1900	1,00	0,84
	< 1500	0,85	0,84
<b>Plásticos</b>			
borrachas sintéticas, poliamidas, poliésteres, polietilenos polimetacrílicos de metila (acrílicos) policloreto de vinila (PVC)	900-1700	0,40	
	1200-1400	0,20	
<b>Vidro</b>			
vidro comum	2500	1,00	0,84