



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
Campus Experimental de Itapeva

**DIEGO ALBA COLLINETTI**

**ESTUDO DE CASO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE DOIS  
SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM MADEIRA: CLT E WOOD FRAME**

**ITAPEVA - SP**

**2016**

**DIEGO ALBA COLLINETTI**

**ESTUDO DE CASO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE DOIS  
SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM MADEIRA: CLT E WOOD FRAME**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Estadual Paulista "Júlio De Mesquita Filho" – Campus de Itapeva, como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elen Aparecida Martines Morales

**ITAPEVA - SP**

**2016**

Collinetti, Diego Alba.  
C699e Estudo de caso da eficiência energética de dois sistemas  
construtivos em madeira: CLT e Wood Frame / Diego Alba Colinetti. --  
Itapeva, SP, 2016  
62 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado – Engenharia  
Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de  
Mesquita Filho”, Campus de Itapeva, 2016

Orientadora: Elen Aparecida Martines Morales

Banca examinadora: Juliana Cortez Barbosa, Julio Cesar Molina

#### Bibliografia

1. Construção de madeira. 2. Eficiência energética. 3. Conforto  
térmico. I. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,  
Campus Experimental de Itapeva. II. Título.

CDD 691.1

“Aquilo que não se pode medir, não se pode melhorar”

William Thomson (Lord Kelvin)

## RESUMO

O presente trabalho é um estudo de caso acerca da eficiência energética dos sistemas construtivos em madeira Cross-Laminated Timber e *Wood Frame*. A pesquisa para se alcançar tais resultados se deu de forma bibliográfica por meio de consulta e análise de vários autores e artigos, além de uma simulação comparativa entre os métodos estudados. Esse estudo se dá num formato de pesquisa de natureza causal, uma vez que investiga a causa da aplicação de um fenômeno no decorrer de um processo. Ao final do mesmo, esse ensaio irá elucidar a problemática central levantada em seu início a fim de dar o devido crédito aos métodos construtivos investigados, no que tangem suas eficiências energéticas. Na simulação termoenergetica realizada, ambos os sistemas apresentaram uma demanda de energia térmica para o aquecimento muito baixa, e para a refrigeração de 16,41 GJ para o CLT e 19,00 GJ para o *Wood Frame*, demonstrando uma maior eficiência energética da construção em CLT.

**Palavras-chave:** *Wood Frame*; CLT; Eficiência energética; Conforto térmico.

## ABSTRACT

This paper is a case study about the energy efficiency of building systems in wood Cross-Laminated Timber and *Wood Frame*. The research to achieve these results was given bibliographic form through consultation and analysis of several authors and articles, as well as a comparative simulation between the studied methods. This study gives a survey format causal nature, since it investigates the cause of applying a course of a process phenomena. At the end of it, this trial will elucidate the central issue raised in the beginning in order to give due credit to the construction methods investigated in that concern their energy efficiencies. In the thermo-energetic simulation performed both systems had a very low thermal energy demand for heating, and for cooling of 16,41 GJ for the CLT and 19,00 GJ for the *Wood frame* , showing a greater energy efficiency of the CLT construction.

**Key-words:** *Wood frame*; CLT; Energy efficiency; Thermal comfort.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparativo de performance ambiental dos principais materiais de construção.....	17
Figura 2 – Representação de um painel de CLT.....	19
Figura 3 – Prensa a vácuo para CLT. ....	23
Figura 4 – Construção em <i>Wood Frame</i> . ....	24
Figura 5 – Planta.....	32
Figura 6 - Início do desenho da planta da edificação. ....	33
Figura 7 - Ambientes.....	34
Figura 8 - Telhado.....	34
Figura 9 - Beirais.....	35
Figura 10 - Esquadrias.....	35
Figura 11 – Esquadrias projetadas.....	36
Figura 12 – Tela do software <i>Openstudio</i> . ....	37
Figura 13 – Schedule.....	38
Figura 14 – Tela “Horário de funcionamento”.....	39
Figura 15 – Tela “tipos de ambientes”.....	45
Figura 16 – Tela “loads”.....	45
Figura 17 – Tela de associação.....	46
Figura 18 – Tela “definições de climatização”.....	47
Figura 19 – Estrutura de uma parede em <i>Wood Frame</i> . ....	55

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Propriedades térmicas e físicas dos materiais .....	41
Tabela 2 – Camadas dos elementos construtivos .....	42
Tabela 3 – Potência dos equipamentos .....	43
Tabela 4 - Potência das impressoras .....	44
Tabela 5 - Consumo de energia por finalidade de uso .....	48
Tabela 6 – Transmitância térmica e densidade superficial.....	49

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Temperaturas no inverno .....	50
Gráfico 2 – Temperaturas no verão .....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>CLT</b>	<b>Cross-Laminated Timber</b>
<b>ANSI</b>	<b>American National Standards Institute</b>
<b>IVALSA</b>	<b>Instituto para a valorização da madeira e de espécies arbóreas</b>
<b>FSC</b>	<b>Forest Stewardship Council</b>
<b>SFI</b>	<b>Sustainable Forestry Initiative</b>
<b>LEED</b>	<b>Leadership in Energy and Environmental Design</b>
<b>BTU</b>	<b>British thermal unit</b>
<b>IDF</b>	<b>Instrument Definition Format</b>
<b>HVAC</b>	<b>heating, ventilating and air conditioning</b>
<b>EPW</b>	<b><i>EnergyPlus</i> Weather</b>
<b>FDE</b>	<b>Fundação para o desenvolvimento da educação</b>
<b>INMET</b>	<b>Instituto nacional de meteorologia</b>
<b>NBR</b>	<b>Norma Brasileira</b>
<b>ABNT</b>	<b>Associação Brasileira de Normas Técnicas</b>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>15</b>
1.1.1 Objetivo principal .....	15
1.1.1 Objetivos específicos .....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 A Madeira</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2 CLT</b> .....	<b>18</b>
2.2.1 História .....	18
2.2.2 Definições .....	18
2.2.3 Motivações para o uso .....	19
2.2.4 Normas .....	20
2.2.5 Manufatura .....	22
<b>2.3 Wood Frame</b> .....	<b>23</b>
2.3.1 História .....	23
2.3.2 Definições .....	24
2.3.3 Motivações para o uso .....	25
2.3.4 Normas .....	26
<b>2.4. Eficiência energética</b> .....	<b>26</b>
2.4.1 Importância da eficiência energética .....	26
2.4.2 Meios para atingir a eficiência energética em edificações .....	26
2.4.3 Importância da aferição da eficiência energética .....	28
<b>2.5. EnergyPlus</b> .....	<b>29</b>
2.5.1 História do <i>EnergyPlus</i> .....	29
2.5.3 Funcionamento .....	30
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1 Definição da planta</b> .....	<b>31</b>
<b>3.2 Modelagem em 3D no <i>Sketchup / Openstudio</i></b> .....	<b>33</b>
<b>3.3 Definições no <i>Openstudio</i></b> .....	<b>36</b>
3.3.1 Local (site) .....	37
3.3.2 Cronogramas (Schedule) .....	38
3.3.3 Construções (Constructions) .....	40
3.3.3.1 Materiais .....	40
3.3.3.2 Elementos Construtivos .....	41

3.3.3.3 Conjuntos de elementos construtivos .....	42
3.3.4 Cargas (Loads) .....	42
3.3.5 Tipos de ambientes (Space types) .....	44
3.3.6 Edificação (Facility) .....	46
3.3.7 Ambientes (Spaces) .....	46
3.3.8 Zonas térmicas (Thermal zone) .....	46
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
<b>4.1 Consumo de energia total .....</b>	<b>48</b>
<b>4.2 Consumo de energia para climatização.....</b>	<b>48</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>52</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>53</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Esse trabalho discorre sobre um estudo de caso acerca da eficiência energética de dois sistemas construtivos em madeira, sendo eles, o *Cross-Laminated Timber*<sup>1</sup> – CLT – e o *Wood Frame*<sup>2</sup>.

No século XX, as estratégias econômicas que foram desenvolvidas com o objetivo de promover um maior bem-estar para a sociedade, causa a reflexão em relação aos seus resultados com o decorrer dos anos. Além de não promover o crescimento esperado nos indicadores sociais, todo esse processo acarretou em impactos ao meio ambiente que, por fim, acabam atingindo a população de forma direta ou indireta.

Isso leva a revisar alguns conceitos fundamentais da economia que antes não haviam sido diagnosticados. A relação entre o homem e a natureza passa a ser reavaliada com uma nova visão das economias capitalistas que passam a dar maior ênfase a novas dinâmicas de funcionamento que priorizem a manutenção do meio ambiente e, conseqüentemente, da sociedade.

Atualmente a questão ambiental está inserida na realidade em que o ser humano vive e sua intensidade pode variar de acordo com grupos sociais, culturais e idade.

A cultura de fabricação em massa, e conseqüentemente o consumismo, que foi desenvolvida pelo modelo do Fordismo tem que ser revertida, assim como tem ocorrido nas empresas que estão passando por uma fase de readequação ao desenvolvimento sustentável. A natureza possui recursos limitados e estes não podem ser explorados de forma descontrolada pelas indústrias.

As novas tecnologias desenvolvidas na intenção de frear a deterioração de recursos, contam com um desenvolvimento no setor de transporte e comunicação que foi capaz de disseminar o conhecimento sobre sustentabilidade para a população. Além disso, a produção da economia moderna gera uma significativa contenção de recursos que vem em parte de processos de reciclagem dentro das indústrias, e a outra parte, vem da criação de serviços terciários e quaternários que causam mudanças na estrutura produtiva e resultam em saldo de recursos ambientais.

---

<sup>1</sup> Termo em inglês para “madeira laminada cruzada”;

<sup>2</sup> Termo em inglês para “perfis de madeira”.

Ecoeficiência é, portanto, o estilo gerencial que busca produzir mais com menos insumos e menos poluição, mantendo preços de produtos e serviços, melhorando a qualidade de vida da sociedade, e progressivamente levando os impactos ambientais e o uso de recursos a situar-se dentro dos limites da capacidade de sustentação ambiental do planeta. (Pereira, R.2002, p.29:30)

Nesse interim, o esforço de pesquisa e desenvolvimento por parte do setor de construção civil para otimizar a eficiência energética nas edificações se faz de grande importância. É importante contar com métodos comprovados para assegurar que as edificações sejam projetadas para maximizar a eficiência energética durante a construção e ao longo da vida útil, e que eles realmente funcionem como pretendido.

Uma edificação eficiente do ponto de vista energético não é apenas boa para o ambiente. É boa para toda a cadeia produtiva também. A eficiência energética economiza dinheiro, reduz o risco financeiro do aumento dos custos de energia, e é uma das melhores práticas para a geração de negócios sustentáveis.

Outra questão a ser levantada é que edifícios energeticamente eficientes só são eficazes quando seus ocupantes estão confortáveis do ponto de vista térmico. A quantificação do conforto térmico é de difícil obtenção, visto que este conceito é altamente subjetivo. Ele depende da temperatura do ar, da humidade, da temperatura radiante, da velocidade do ar, e das taxas metabólicas e níveis de vestuário, sendo assim, cada indivíduo experimenta essas sensações um pouco diferente com base em sua fisiologia e estado.

De acordo com o ANSI / ASHRAE 55-2010, conforto térmico é definido como "a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico e é avaliado por avaliação subjetiva." Também conhecido como o conforto humano, conforto térmico é a satisfação dos ocupantes às condições térmicas circundantes e é essencial ao projetar uma estrutura que irá ser ocupada por pessoas. Nesse contexto, os materiais utilizados para a construção das edificações são altamente importantes. Esse estudo contempla a análise de dois desses sistemas construtivos.

Os dois sistemas construtivos utilizados neste estudo apresentam bom desempenho em atividades sísmicas, e uma grande relação resistência peso. Os elementos construtivos do sistema *Wood Frame* são compostos por montantes de madeira horizontais e verticais revestidos com painéis de madeira para uso estrutural, como o OSB ou compensado. Os elementos construtivos do sistema CLT são compostos por tabuas de madeira coladas em camadas com direções

alternadas das fibras, formando painéis maciços de grandes dimensões e mais pesados quando comparados ao *Wood Frame*. Ambos podem ser usados em muitos casos como alternativa à alvenaria e ao aço.

Diante do exposto, formula-se o seguinte problema de pesquisa: Como se apresenta a eficiência energética em edificações construídas por meio dos sistemas construtivos CLT e *Wood Frame*?

Esse trabalho procura comparar a eficiência energética de dois sistemas construtivos em madeira, sendo eles, o Cross-Laminated Timber – CLT – e o *Wood Frame*, e se justifica a partir do atual quadro ambiental do planeta no qual os indivíduos e instituições procuram continuamente maneiras e processos para minimizar, atenuar e reverter na maior escala possível, os danos ao meio ambiente causados pelas práticas contemporâneas. A compreensão do real impacto que as técnicas construtivas aqui estudadas poderão fornecer aos profissionais da construção civil possui um valor muito importante para o planeta e as futuras gerações. Espera-se que por meio desse novo estudo, possa-se aprofundar esse campo de pesquisa.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo principal

Comparar a eficiência energética de uma edificação para uso de escritórios com sistema de climatização (ar-condicionado) construída com o sistema *Wood Frame*, e o CLT, por meio de uma simulação computacional termoenergética.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para tanto, o presente instrumento de estudo irá:

- Avaliar os dados disponíveis do meio acadêmico;
- Levantar informações históricas e contemporâneas acerca das origens e utilizações de cada um dos sistemas construtivos;
- Obter as principais características técnicas dos mesmos;
- Sistematizar como funcionam os métodos e ferramentas de aferição da eficiência dos sistemas construtivos; e
- Realizar o estudo simulado comparativo entre as técnicas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A Madeira

A madeira tem sido utilizada em edifícios, desde o início da civilização e, devido à sua boa relação de resistência e peso, tem provado ser um excelente material para as aplicações estruturais. Os dados sobre as propriedades mecânicas da madeira, do aço e do concreto confirmam a relação favorável resistência-peso da madeira (Bodig e Jayne, 1982).

A madeira é um recurso renovável, enquanto as florestas nas quais está sendo colhida são geridas de forma sustentável, ou ainda, enquanto áreas são reservadas para tratar árvores como cultura, como pode ser visto em práticas florestais.

Existem dois padrões de certificação que reconhecem florestas geridas de forma sustentável para satisfazer critérios específicos. Os dois grupos de certificação são o *Forest Stewardship Council* – FSC e *Sustainable Forestry Initiative* – SFI. A certificação FSC tem cinco áreas diferentes para os seus padrões que incluem uma área geral, o manejo florestal, além da cadeia de custódia de madeira controlada. A certificação SFI, assim como FSC tem diferentes padrões e certificações, dependendo do estágio do processo de fabricação.

Embora ambos os programas sejam destinados para o resultado final de manejo florestal responsável, o FSC é o único padrão de certificação reconhecido nas classificações LEED - *Leadership in Energy and Environmental Design*<sup>3</sup>. Esses programas procuram assegurar que as florestas continuem a contribuir com seus benefícios ambientais para o planeta.

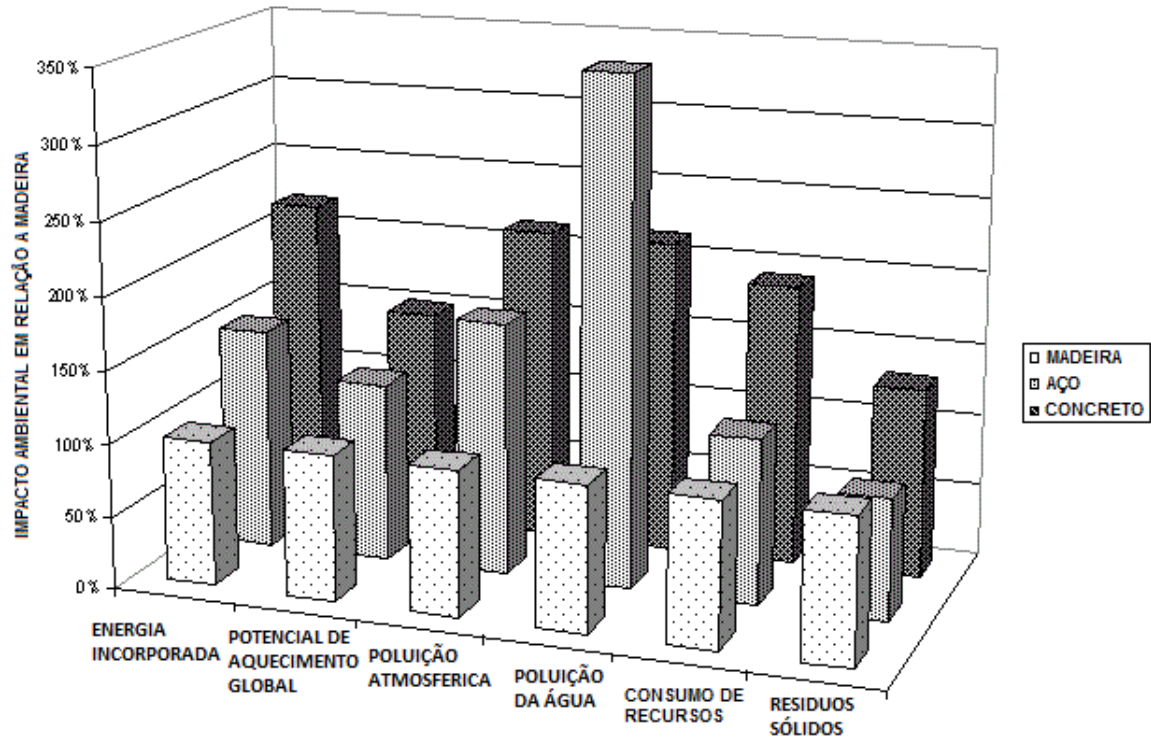
O consumo de recursos naturais, interrupção dos ecossistemas, poluição do ar e da água e geração de resíduos são apenas alguns dos efeitos colaterais indesejáveis da construção. Muitas decisões de *design* têm uma influência sobre o total da pegada ambiental de um edifício. Construções de edifícios representam 10% da atividade econômica global, consomem 40% de materiais e produção de energia do mundo, é são responsáveis por 17% do consumo mundial de água doce. (Falk, 2002)

---

<sup>3</sup> O LEED se caracteriza como um sistema de certificação e orientação ambiental de construções.

Quando se examina o perfil ambiental dos três principais materiais de construção, os sistemas de madeira superam o aço e o concreto em questões ambientais (Figura 1) (Canadian Wood Council, 1999).

**Figura 1 – Comparativo de performance ambiental dos principais materiais de construção**



Adaptado de: (Falk, 2002)

As árvores não exigem o uso de um combustível fóssil para a sua criação, já que usam a energia do sol para converter dióxido de carbono em oxigênio ao armazenar o carbono. O uso de combustíveis fósseis se inicia quando as árvores são colhidas para serem utilizados como produtos de madeira. Depois de uma árvore ter sido colhida, 50% do peso da madeira é carbono (Woodworks, 2012). A madeira armazena carbono até o ponto em que começa a se decompor, ou seja, quanto mais estruturas construídas em madeira, mais carbono é armazenado que por sua vez reduz os gases de efeito estufa na atmosfera.

Outra vantagem ambiental é que a madeira também pode ser recuperada de edifícios desativados e reutilizada diretamente. Este é um nicho de atividade que

aumenta devido ao interesse do mercado de madeiras de grandes dimensões (Falk, 2002).

## **2.2 CLT**

### **2.2.1 História**

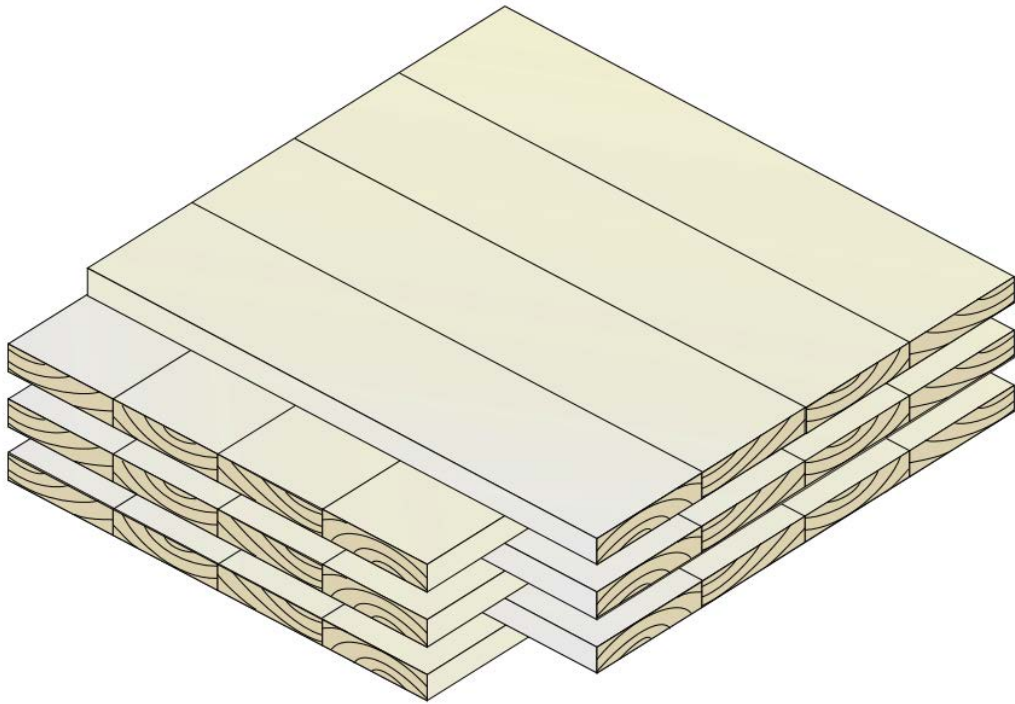
O CLT (*Cross-Laminated Timber*), ou Madeira Laminada Cruzada é um sistema construtivo relativamente novo, de interesse da construção que está ajudando a definir uma nova classe de produtos de madeira. É uma solução à base de madeira que complementa o quadro de opções existente, e é um sistema construtivo adequado para algumas aplicações que atualmente usam concreto, alvenaria e aço. CLT é um produto inovador de que foi introduzido no início de 1990 na Áustria e Alemanha, e tem ganhado popularidade nas aplicações residenciais e não-residenciais na Europa. Existem atualmente mais de uma centena de projetos em CLT na Europa (Crespell & Gagnon, 2010).

Em meados da década de 1990, a Áustria realizou um esforço de pesquisa conjunto entre Indústria e universidades que resultou no desenvolvimento do CLT moderno. O número de construções em CLT aumentou significativamente no início dos anos 2000, parcialmente impulsionada pelo movimento de construção verde mas também devido a uma melhor eficiência, a aprovação de produtos e melhora dos canais de comercialização e distribuição. Um outro fator importante foi a percepção de que a CLT, como alvenaria e concreto, é um sistema construtivo que possibilita a construção de edificações de vários andares. A utilização de painéis de CLT em edifícios aumentou ao longo das últimas décadas.

### **2.2.2 Definições**

O CLT, ou madeira laminada cruzada, é um produto de madeira composto por lâminas com cerca de 20mm a 80mm de espessura coladas alternando a direção das lâminas entre as camadas, a fim de que o painel resista cargas em ambas as direções. São normalmente compostos por 3 a 9 camadas. Os painéis de CLT podem ser usados como paredes, lajes ou coberturas. E são conectados entre si através de ligações metálicas.

**Figura 2 – Representação de um painel de CLT**



Fonte: CLT Handbook USA

### 2.2.3 Motivações para o uso

Sistemas construtivos em madeira possibilitam construções mais altas do que se pensava anteriormente, porém as restrições relacionadas ao potencial de incêndio restringiram o uso da madeira como material estrutural primário.

A natureza repetitiva e modular do CLT faz com que o tempo de construção seja menor e exija menos trabalho. Isso ocorre, uma vez que o número de operações necessárias para montar uma estrutura em CLT no canteiro de obras é muito menor quando comparado, por exemplo, ao sistema de concreto armado tradicional. Essa diferença conduz a menos processos no local e uma montagem rápida, o que em alguns casos reduz o cronograma de construção em 50% (Crespell & Gagnon, 2010).

*Designers* escolhem madeira por uma variedade de razões, incluindo a estética, relação custo-eficácia, ambientais e de desempenho estrutural. Essas características também se aplicam ao CLT. No entanto, o CLT fornece um alto nível desses benefícios.

- Velocidade e eficiência da instalação: Painéis de CLT são fabricados para aplicações específicas. Estes são pré-fabricados com aberturas pré-cortadas

para portas, janelas, escadas, canais para distribuição elétrica e hidráulica, e são enviados diretamente do fabricante para o local de trabalho, onde eles podem ser instalados de forma rápida e simples. O que pode levar a uma economia substancial de tempo no cronograma da construção. Muitos fabricantes enviam os painéis com cintas de elevação instaladas, para que no canteiro de obras os painéis possam ser descarregados dos caminhões e instalados com o uso de guindastes. Os painéis são frequentemente entregues e montados usando um sistema "*just-in-time*", tornando o CLT ideal para projetos com limitações na capacidade de armazenamento do local.

- Flexibilidade de design: O CLT pode ser utilizado para todo um edifício ou qualquer combinação de aplicações de paredes, pisos, lajes e coberturas. Seu peso e outras características tornam-o altamente adaptável a diferentes tipos de projetos, desenhos e alterações no local. Elementos de CLT podem também ser combinados com outros materiais, permitindo flexibilidade no design, estilo e arquitetura. Quando são necessárias modificações dos painéis no canteiro de obras, uma das vantagens que o CLT apresenta quando comparado a outros materiais, tais como concreto pré-moldado, é que mudanças podem ser feitas no local com ferramentas simples.

#### 2.2.4 Normas

Edificações de madeira são capazes de atingir as classificações de resistência ao fogo necessárias para edifícios feitos de materiais não combustíveis. A taxa de carbonização do CLT foi testada em 0,67 milímetro por minuto (Gagnon & Pirvu, 2011).

Ao serem expostos ao fogo durante duas horas os painéis CLT experimentaram uma perda de 80 milímetros de espessura. Portanto um aumento de 80 milímetros na espessura do painel de CLT pode resultar em uma resistência ao fogo de duas horas.

O desempenho sísmico é extremamente importante em regiões de alta atividade sísmica. O design sísmico do CLT é completamente controlado pelos elementos de ligação entre os painéis. Testes em larga escala foram realizados pela

IVALSA (Instituto para a valorização da madeira e de espécies arbóreas)<sup>4</sup>, em uma estrutura CLT de sete andares no Japão (Crespell & Gagnon, 2010). A estrutura foi exposta a simulações de terremoto, incluindo o devastador terremoto de Kobe (magnitude de 7,2 e acelerações de 0,8 a 1,2 g) com o resultado de danos moderados. Algumas ligações tinham falhado, mas no geral a estrutura resistiu às simulações.

O CLT é um sistema construtivo restrito por códigos de construção, tais como o *International Building Code – IBC*<sup>5</sup> -, que limita a altura e metragem quadrada que pode ser projetada. No entanto, existem propostas para a utilização de CLT para criar edifícios mais altos, de até dezessete andares. Estas serão realizadas em projetos de testes até que os códigos de construção estejam adaptados para permitir o uso de CLT em estruturas maiores. A fim de alterar os códigos de construção, o CLT deve passar por testes de segurança, incluindo montagens resistentes ao fogo e desempenho sísmico. Estes testes terão de mostrar se o material é capaz de suportar essas intempéries com um alto padrão de classificação.

Com as inovações em tecnologia da madeira e testes de segurança, a madeira poderá ser o material estrutural primário em edifícios mais altos do que é permitido pelos códigos de hoje.

A norma ANSI/APA PRG 320-2011 define os requisitos de desempenho que devem ser seguidos pelos fabricantes de painéis de CLT, como tolerâncias dimensionais, propriedades da madeira utilizada, propriedades dos adesivos e outras propriedades.

O CLT Handbook na versão Americana ou Canadense, fornece recomendações para o uso do CLT, como dimensionamento estrutural, manufatura dos painéis, dimensionamento das ligações metálicas, assim como outras características relacionadas a manufatura dos painéis, projeto e execução de obras em CLT.

---

<sup>4</sup> IVALSA é um ponto de encontro na Itália para o intercâmbio científico e técnico para o setor de madeira e para especialistas, pesquisadores, designers ou empreiteiros que lidam com a madeira.

<sup>5</sup> O Código Internacional de Construção (IBC) é um código de construção do modelo desenvolvido pelo International Code Council (ICC). Foi adotado pela maior parte dos Estados Unidos.

### 2.2.5 Manufatura

Basicamente, a produção de CLT pode ser dividida nos seguintes passos: (1) seleção da madeira; (2) agrupamento e aplainamento das peças; (3) aplicação do adesivo; (4) montagem e prensagem do painel, (5) usinagem dos painéis; e (6) expedição.

Uma ênfase especial tem que ser colocada na garantia de que todas as lâminas de uma mesma camada sejam de mesma espessura. Isso para garantir que, durante a prensagem, todas as zonas do CLT sejam expostas à mesma pressão transversal e, assim, cumprir os requisitos relativos à largura máxima de abertura entre lâminas de diferentes camadas.

A aptidão do adesivo utilizado tem de ser assegurada por aprovação técnica. Os requisitos técnicos para a utilização de um sistema adesivo (teor de umidade, temperatura, quantidade aplicada, forma de aplicação, a pressão de prensagem, tempo de espera, etc.), conforme regulamentado pelas normas pertinentes, bem como pelo produtor do adesivo, precisam ser cumpridos. Em particular, a pressão de prensagem e a quantidade aplicada de adesivo tem de ser ajustada para as espécies de madeira. A maioria dos fabricantes usam adesivos de poliuretano formaldeído, poliuretano livre de formaldeído, ou melamina-uréia-folmaldeído.

Atualmente espécies resinosas são usadas para a produção de CLT. A espécie principal é a *Picea abies*, e o Abeto Branco. Além dessas, as espécies de madeira macia como pinheiro-silvestre (*Pinus sylvestris*), Larício Europeia (*Larix decidua*), e pinheiros suíços (*Pinus cembra*) são utilizadas. Essas últimas espécies mencionadas são primordiais para o CLT de aparência com alta qualidade e, portanto, para as camadas externas. Outras espécies possíveis são álamo (*Populus spp.*) e a *Fraxinus Excelsior*, que são econômicas e fornecem um mínimo em propriedades mecânicas como exigido para que a estrutura de CLT atenda aos requisito de propriedades mecânicas..

A prensagem pode ser realizada com prensas hidráulicas de grandes dimensões, possibilitando a produção com um ciclo de prensagem relativamente rápido, ou com sistemas a vácuo como na Figura 3, em que o painel é envolvido em um material plástico selado nas extremidades e aplica-se vácuo de forma que a pressão atmosférica comprima as camadas do painel.

**Figura 3 – Prensa a vácuo para CLT**

Fonte: Disponível em: [www.woodtec.ch](http://www.woodtec.ch) Acesso em jun 2016

## **2.3 Wood Frame**

### 2.3.1 História

O sistema *Wood Frame* foi criado quando alguns carpinteiros perceberam que as paredes divisórias leves que foram colocadas dentro de grandes casas de madeira pesadas foram capazes de formar um sistema de construção por si mesmas. Isso aconteceu cerca de um século atrás. O processo foi acelerado pela ampla disponibilidade de pregos.

A tradição americana de *do-it-yourself*<sup>6</sup> também desempenhou um papel importante na popularização deste estilo de construção. Ao contrário de madeira pesada ou alvenaria de tijolo, essa estrutura de madeira não requer um conjunto especial de habilidades adquiridas após anos de prática.

Cada vez mais, o sistema *Wood Frame* está sendo usado em edifícios comerciais e industriais. Edifícios com estrutura de madeira são econômicos de construir, e em proporcionar o máximo conforto aos ocupantes no calor e no frio. Construção em madeira é facilmente adaptável a tradicional, contemporânea, e ao mesmo tempo o mais futurista dos estilos de construção. Suas possibilidades arquitetônicas são ilimitadas (Bodig e Jayne, 1982).

---

<sup>6</sup> Termo em inglês para “faça você mesmo”

### 2.3.2 Definições

Os elementos construtivos do sistema *Wood Frame* são compostos por montantes de madeira horizontais e verticais revestidos com painéis de madeira para uso estrutural, como o OSB ou compensado

O sistema *Wood Frame* é composto por painéis construídos com montantes de madeira serrada, na vertical e na horizontal, revestidos com painéis estruturais como o OSB ou o compensado. O revestimento com painéis estruturais realiza a função de contraventamento da estrutura e pode ser utilizado em uma ou em ambas as faces do painel de *Wood Frame*. A Figura 4 mostra um exemplo de uma construção em *Wood Frame* antes da realização do revestimento com painéis estruturais.

**Figura 4 – Construção em *Wood Frame***



Fonte: Disponível em: [www.homepower.com](http://www.homepower.com) Acesso em jun 2016

Conjuntos de piso, parede, telhado e escada podem ser produzidos em um ambiente industrial e entregues prontos na obra ou podem ser construídos no local. Estes componentes são fixados em conjunto para formar a estrutura e permitir que os espaços interiores funcionem como desejado.

O revestimento da estrutura pode ser feito com diversos materiais, de acordo com as necessidades de cada superfície. As superfícies internas podem ser

revestidas com placas de gesso cartonado ou placas cimentícias e posteriormente pintados ou revestidos com cerâmica. As superfícies voltadas para o ambiente externo devem ser revestidas com materiais resistentes as condições climáticas, como por exemplo lambris de madeira.

Os montantes normalmente medem 38 mm × 89 mm ou 38 mm × mm 140 em madeira serrada e são comumente espaçadas em 400 mm. Este espaçamento pode ser alterado para 300 ou 600 mm dependendo da carga e das limitações impostas pelo tipo e espessura da parede utilizada.

Paredes estruturais internas são montadas da mesma forma como paredes externas. As divisórias internas podem ser construídas com 38 mm x 64 mm espaçadas em 400 ou 600 mm, dependendo do tipo e espessura do revestimento da parede utilizado.

### 2.3.3 Motivações para o uso

Testes sísmicos de estruturas em *Wood Frame* demonstraram um desempenho favorável desse sistema construtivo. Uma pesquisa recente dos impactos dos sete grandes terremotos, entre 1964 e 1995 revelou que apenas 34 mortes relatadas podem ser atribuídas a falha de edifícios de madeira (Rainer e Karacabeyli, 1999).

O público em geral tem uma percepção negativa sobre a segurança contra incêndio em estruturas de madeira. Os códigos de construção tendem a mostrar um preconceito contra a construção de madeira. Forintek, trabalhando com um consórcio internacional de cientistas, avaliou o desempenho a fogo de diferentes materiais em sistemas construtivos. Estes resultados (Sultan *et al.*, 1997) e outros trabalhos estão levando a revisões em curso para os códigos de construção em todo o mundo, para melhorar os sistemas de construção em *Wood frame*.

Questionamentos sobre a durabilidade das estruturas de madeira são muito comuns. A durabilidade da madeira é afetada quanto exposta a umidade excessiva e ataque de cupins ou outros organismos. Examinando-se a situação mais de perto, o problema é sempre uma questão de má concepção, construção mal executada, má manutenção, ou uma combinação destes. Quando essas questões são solucionadas, estruturas em *Wood Frame* podem durar indefinidamente. Há uma necessidade de mais pesquisas em torno do gerenciamento de umidade de estruturas de madeira, bem como programas mais agressivos de transferência de

tecnologia, além de formação para arquitetos e profissionais da construção. (De la Roche, & Gaston, 2001).

#### 2.3.4 Normas

As construções em *Wood Frame* no Brasil seguem as recomendações da Diretriz SINAT Nº 005 - Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”), que trata dos requisitos e critérios de desempenho, assim como dos métodos de avaliação.

### 2.4. Eficiência energética

#### 2.4.1 Importância da eficiência energética

A eficiência energética é uma das formas mais rápidas e mais baratas para aumentar a quantidade de energia disponível para uso. Em contraste, a construção de novas usinas é cara e requer anos de burocracia antes de poder acontecer.

Numerosos outros benefícios da eficiência energética são raramente discutidos. Estes incluem os benefícios psicológicos do uso de fontes de iluminação naturais, incluindo a possibilidade de uma casa ou escritório mais confortável, aumentando a produtividade do trabalhador, ou fazendo uma loja de varejo mais atraente para os clientes.

Outros benefícios incluem edifícios mais bem ventilados, alimento que permanece fresco em refrigeradores mais eficientes e motores que rodam de modo mais silencioso. Um estudo realizado pelo *Rocky Mountain Institute*<sup>7</sup> mostrou que em edifícios eficientes, a produtividade do trabalho aumenta em 6-16% devido ao escritório ser mais silencioso, mais confortável, e com melhor ar e iluminação.

#### 2.4.2 Meios para atingir a eficiência energética em edificações

Sistemas com alta eficiência energética são aqueles que realizam a mesma quantidade de trabalho, utilizando menos energia. Por exemplo, uma máquina de lavar roupa eficiente em energia fornece o mesmo serviço de uma lavanderia, mas a uma taxa mais baixa de consumo de energia. Da mesma forma, uma casa bem

---

<sup>7</sup>Organização americana dedicada à pesquisa, publicação, consultoria e palestras na área geral de sustentabilidade, com especial enfoque em inovações rentáveis para a energia e eficiência dos recursos. Disponível em: <http://www.rmi.org/> Acesso em mai 2016

isolada é mais eficiente em termos energéticos porque perde menos calor e, portanto, menos calor tem de ser utilizado para manter um ambiente confortável em épocas de baixas temperaturas.

A eficiência energética pode ser conseguida de uma variedade de maneiras. Uma delas seria atualizar ou criar novos edifícios para tirar proveito dos recursos naturais e minimizar o desperdício de energia.

No inverno, o sol brilha para dentro da casa através das janelas, o que possui o potencial de redução da necessidade de usar o calor elétrico ou alimentados com gás em países mais frios, e árvores podem fornecer sombra no verão, impedindo o sol de aquecimento da casa. Outras práticas de *design* de edifício que alcançam a eficiência energética incluem isolamento adequado, utilizando vidros duplos, e maximizando o espaço verde para diminuir a absorção de calor.

As novas tecnologias também ajudam a aumentar a eficiência energética. Aparelhos representam cerca de 20% da conta de energia do agregado familiar médio. Substituindo aparelhos velhos por mais novos e mais eficientes pode-se reduzir a utilização elétrica e ajudar a reduzir contas de energia. Por exemplo, um refrigerador "*Energy Star*<sup>8</sup>" certificado deve usar no mínimo 20% menos de energia do que os padrões atuais e 40% menos energia do que o padrão a partir de 2001.

Outra forma de aumentar a eficiência energética é reduzir ou reutilizar o calor residual que é normalmente produzido a partir de processos industriais. Cerca de 30% do uso de energia em todas as indústrias é perdida devido ao transporte ineficiente. Anualmente, cerca de 10 quatrilhões de *BTUs*<sup>9</sup> de energia são emitidos na forma de calor e um adicional de 1,4 quatrilhões de *BTUs* são perdidos na forma de emissões químicas dos processos industriais, equivalente a cerca de 1,960 milhões de barris de óleo. Pesquisando novas tecnologias para capturar o calor e energia química e transformá-la em eletricidade ou outras formas utilizáveis de energia poderia compensar a demanda de petróleo e proporcionar eletricidade mais barata e mais limpa para as indústrias e edificações.

---

<sup>8</sup> Padrão internacional para o consumo eficiente de energia

<sup>9</sup> Acrônimo de British thermal unit ("unidade térmica britânica"), Equivalente a: 252,2 calorias.

### 2.4.3 Importância da aferição da eficiência energética

Regulamentos propostos no Brasil (Brasil, 2001) e os regulamentos existentes em muitos outros países (Paris, 2000) exigem níveis mínimos de consumo energia na construção. Estes regulamentos são esperados para traduzir em menores custos operacionais para os ocupantes, a redução da demanda de energia para os utilitários e as emissões de carbono para o país e o mundo.

Normas prescritivas, que requerem níveis mínimos para o isolamento ou a eficiência de equipamentos, foram redigidas a cerca de setenta anos atrás, especialmente em regiões frias, como a Escandinávia. No entanto, foi nos Estados Unidos no Estado da Califórnia (Comissão de energia da Califórnia, 2001) que se estabeleceu um padrão de construção com base no consumo total de energia do edifício em vez de uma combinação de medidas específicas. O fundamento desta abordagem foi uma "estimativa" de energia máxima para cada categoria de edifício principal e em cada zona climática. Esta abordagem, que foi desenvolvida a mais de vinte anos atrás foi imitada (e melhorada) em dezenas de outros códigos de construção em todo o mundo.

Mas qual é a estimativa de consumo de energia correta para um prédio "eficiente"? Há três abordagens gerais para a seleção de uma estimativa máxima:

- Negociado
- Estatístico
- Custo do ciclo de vida útil mínima

Uma abordagem negociada significa simplesmente selecionar uma estimativa sem fórmula ou procedimento claro. Esta abordagem pode ser tomada quando, por exemplo, um padrão é desenvolvido através de discussões entre o governo e a indústria da construção. Na prática, quase todas as normas contêm um elemento de negociação.

A abordagem estatística serve para determinar a presente gama de desempenho. Então, um padrão é escolhido de tal modo que apenas menos de 50% (ou algum outro número) se encontrará padronizado. Os europeus usaram esta abordagem nos regulamentos de eficiência iniciais para refrigeradores residenciais (Paris, 2000). O Programa de Edifícios *US ENERGY STAR*<sup>10</sup> visa a certificação apenas dos edifícios com uma classificação acima de 75% (que corresponde

---

<sup>10</sup> Disponível em: <https://www.energystar.gov/about> Acesso em mai 2016

aproximadamente a 25% dos edifícios). No Japão, o programa de eficiência *TopRunner*<sup>11</sup> identifica o melhor desempenho atualmente disponível e define um padrão que todas as novas unidades devem ultrapassar em até cinco anos.

A abordagem do custo do ciclo de vida busca os níveis de eficiência que produzem os mais baixos custos de vida (tendo ambos os investimentos e custos operacionais de energia em consideração). Estes cálculos começam com um edifício convencionalmente construídos e em seguida, analisa-se a relação de valor entre os investimentos iniciais em tecnologias de economia de energia para os custos de energia. Esta abordagem tem sido adotada nos Estados Unidos, Austrália e Europa.

## **2.5. EnergyPlus**

### 2.5.1 História

O *EnergyPlus* é um programa de simulação energética para edifícios que possibilita calcular o consumo anual de energia para aquecimento, bem como para refrigeração, iluminação, ventilação e outros fluxos de energia.

Pouca experiência com *EnergyPlus* é necessária para realizar uma modelagem simples, mas os usuários mais avançados têm a flexibilidade para editar arquivos de entrada de dados do *EnergyPlus* para modelar uma vasta gama de tipos de sistema de climatização (Strand *et al*, 1999).

O *EnergyPlus* é um programa de simulação de construção totalmente integrado que encontra resultados para numerosos componentes de um edifício. Ele foi desenvolvido para ser executado em vários sistemas operacionais, como Windows XP, Windows Vista, Windows 7, Windows 8, bem como Macintosh e Linux. (Strand *et al*, 1999).

O *EnergyPlus* está sendo adotado em muitas aplicações novas e já existentes. O conceito básico de *EnergyPlus* é a sua simplicidade de estrutura. A interface gráfica é feita através de outros programas.

Criar arquivos de entrada para o *EnergyPlus* é muitas vezes feito de forma mais simples usando programas como *Openstudio*<sup>12</sup>, já que ele criam um arquivo de entrada e, em seguida, geram também uma visualização dos relatórios de saída, de

---

<sup>11</sup> Programa de Otimização do Consumo de Energia

<sup>12</sup> Ferramentas de software para apoiar a modelagem de energia em edifícios usando *EnergyPlus* e avançada análise de luz natural;

modo que se pode essencialmente usar *EnergyPlus* sem nunca realmente entrar no programa básico *EnergyPlus*.<sup>13</sup>

O *OpenStudio* é um programa que trabalha associado ao *Sketchup*, que é um programa de desenho em 3D desenvolvido pela *Google*. Os três programas em questão, *EnergyPlus*, *OpenStudio* e *Sketchup*, são distribuídos gratuitamente

### 2.5.2 Funcionamento

*EnergyPlus* trabalha com entradas e saídas na forma de texto. No meio, há uma caixa preta que é chamado de motor *EnergyPlus*. Este motor *EnergyPlus* recebe um arquivo de entrada, processa e, em seguida, retorna os dados em formato de texto. Por exemplo, um utilizador introduz as definições básicas do edifício e o programa irá gerar como saída um arquivo de texto contendo informações como o consumo anual de energia, contas de energia, bem como centenas de outros parâmetros, tais como temperaturas da zona térmica e intervalos de umidade (UIUC, 2007).

Baseia-se em recursos e capacidades dos programas *BLAST* e *DOE-2* mais populares, mas também inclui muitas capacidades de simulação inovadoras, tais como intervalos de tempo de menos de uma hora, sistemas modulares e instalações integradas com simulações baseadas no balanço de calor, fluxo de ar de várias zonas e sistemas fotovoltaicos.

O *OpenStudio* gera um arquivo de entrada do *EnergyPlus* que é um modelo térmico completo que contém todas as zonas térmicas, geometria e sombreamento, as propriedades térmicas e físicas dos elementos construtivos, os dados climáticos do local da simulação, as cargas internas, os cronogramas de funcionamento, e os sistemas de climatização.

---

<sup>13</sup> Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> Acesso em jun 2016

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Definição da planta

Optou-se pela simulação de uma edificação usada como escritório porque nesse tipo de ambiente é comum o uso de ar-condicionado por diversas horas diariamente, o que pode gerar um grande consumo de energia elétrica. A escolha do sistema construtivo irá influenciar nesse consumo, assim como a presença de pessoas, lâmpadas e equipamentos elétricos.

Para comparar a eficiência energética dos dois sistemas construtivos através de simulação computacional foi necessário definir diversas características da construção, dentre elas, a geometria, a quantidade de pessoas presentes, a potência da iluminação e dos equipamentos elétricos presentes. A definição dessas características foi feita utilizando-se os ambientes apresentados no catálogo de ambientes da Fundação para o desenvolvimento da educação (FDE).

A FDE é um órgão vinculado à Secretaria da Educação do Estado de São Paulo que tem por finalidade desenvolver projetos para garantir o bom funcionamento e o aprimoramento da rede pública estadual de ensino. A FDE disponibiliza em seu site oficial<sup>14</sup> catálogos técnicos sobre a construção de edificações escolares. Dentre esses catálogos existe um que define como devem ser os diversos ambientes que podem compor uma escola, e traz informações como as dimensões, a quantidade e potência de lâmpadas, o número de postos de trabalho e os equipamentos presentes. As informações presentes nesse catálogo são justamente as informações necessárias para definir os ambientes para a simulação, o que torna conveniente a adoção destes para compor a planta de um escritório.

Os ambientes utilizados, dispostos conforme a planta desenhada no SketchUp apresentada na Figura 5, totalizando 97,20 m<sup>2</sup>, foram:

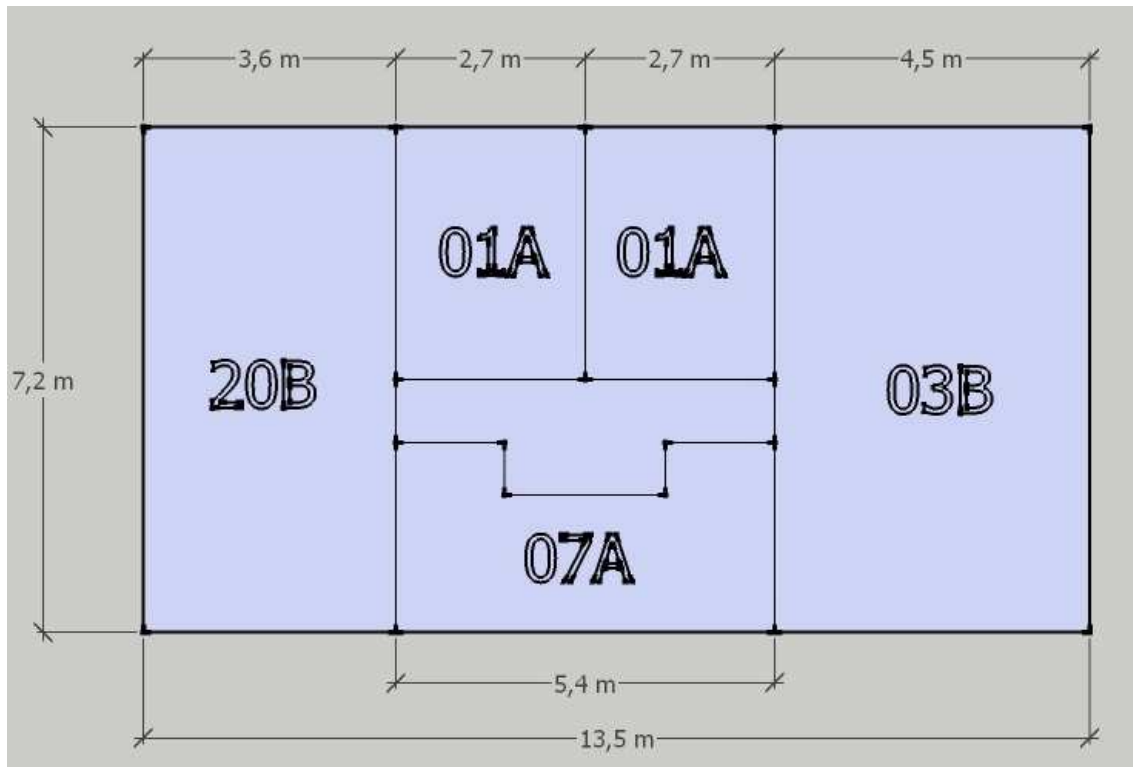
- 01A – Diretoria
- 03B – Secretaria
- 07A – Conjunto Sanitário Administrativo
- 20B – Grêmio

:

---

<sup>14</sup> Disponível em: [http://catalogotecnico.fde.sp.gov.br/meu\\_site/index.html](http://catalogotecnico.fde.sp.gov.br/meu_site/index.html) Acesso em abr 2016

**Figura 5 – Planta**



Fonte: Autor

Algumas características consideradas para a simulação foram comuns aos dois modelos

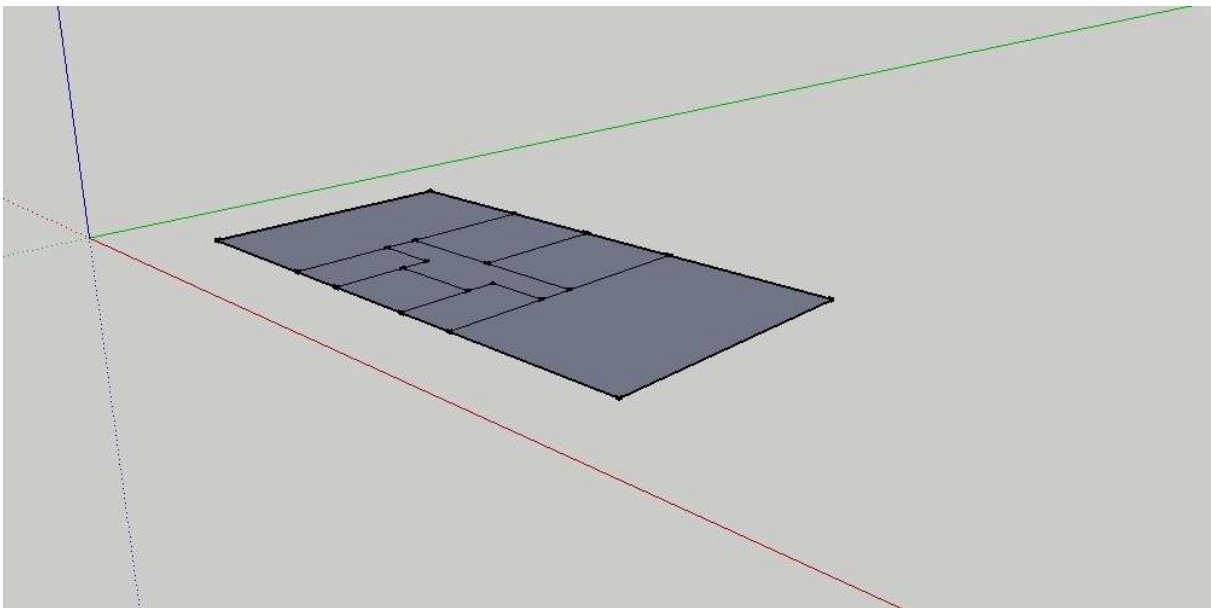
- Fundação: Radier;
- Piso: O acabamento da superfície do piso será feito através de um processo de polimento;
- Telhado: Estrutura de madeira coberta com telhas cerâmicas romanas;
- Portas: Madeira maciça;
- Janelas: Vidro duplo. Duas camadas de vidro 6mm separadas por uma camada de 13mm de ar;
- Climatização: Será considerado um sistema de climatização ideal para determinação das cargas térmicas.
- Iluminação, Equipamentos e ocupação: Determinados pelo catalogo da FDE.

### 3.2 Modelagem em 3D no *Sketchup / Openstudio*

A definição da geometria dos modelos foi feita no software *Sketchup* com o *plugin Openstudio*.

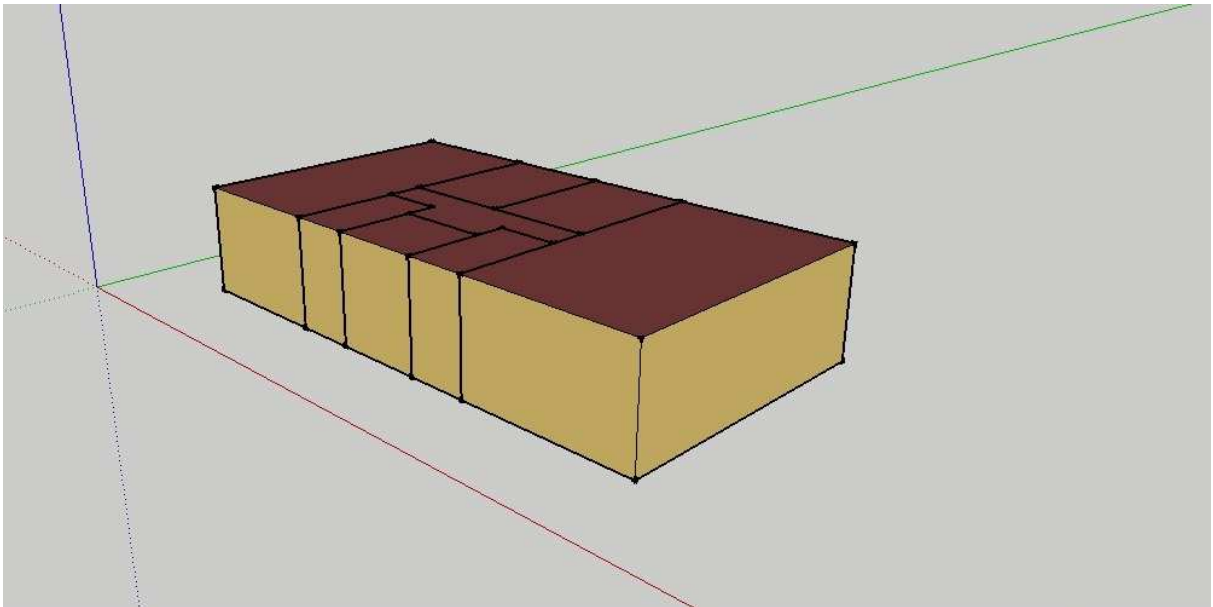
A modelagem em 3D se iniciou com o desenho da planta da edificação. Foram utilizadas as medidas do eixo das paredes, como indicado nas plantas dos ambientes do catálogo da FDE.

**Figura 6 - Início do desenho da planta da edificação**



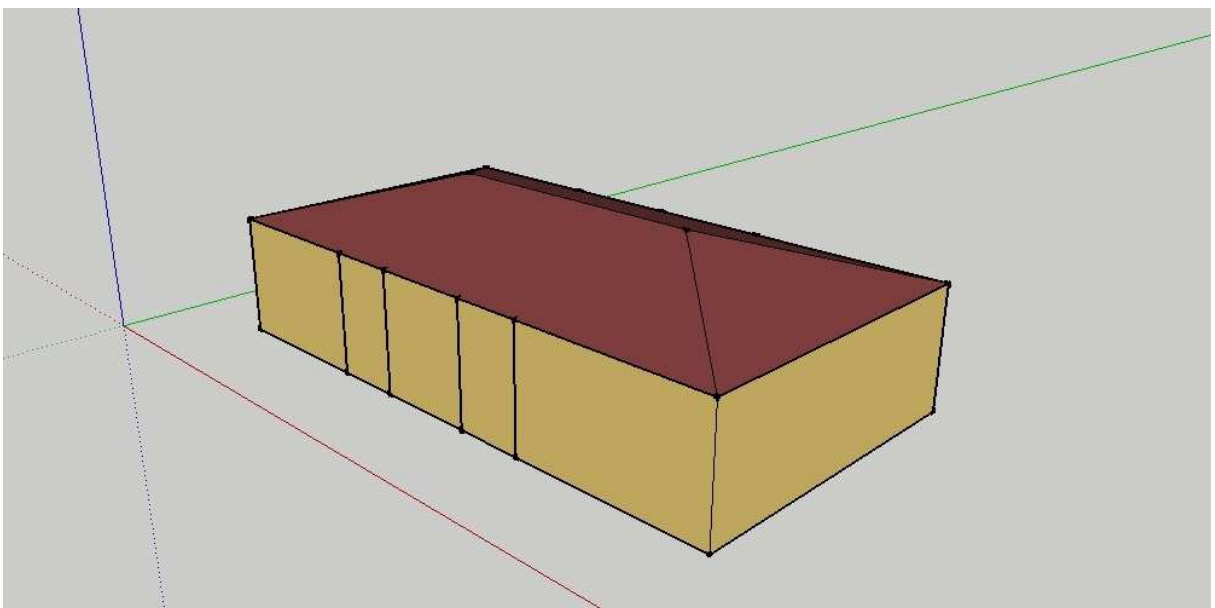
Fonte: Autor

Em seguida foram criados os ambientes com a ferramenta “Create spaces from diagram”, onde se define a altura do pé direito e o número de pavimentos. A altura mínima do pé direito recomendada pelos catálogos da FDE é de 2,7m, e o painel de CLT produzido pela KLH Massivholz GmbH que mais se aproxima dessa medida é o de 2,72m de altura. A altura do pé direito adotada foi, portanto, de 2,72m. Essa mesma altura também foi adotada para o modelo em *Wood Frame*.

**Figura 7 - Ambientes**

Fonte: Autor

O telhado, Figura 8, é definido como o segundo pavimento da construção, foi concebido como um telhado de quatro águas e com inclinação de 30% para possibilitar o uso de telhas cerâmicas romanas.

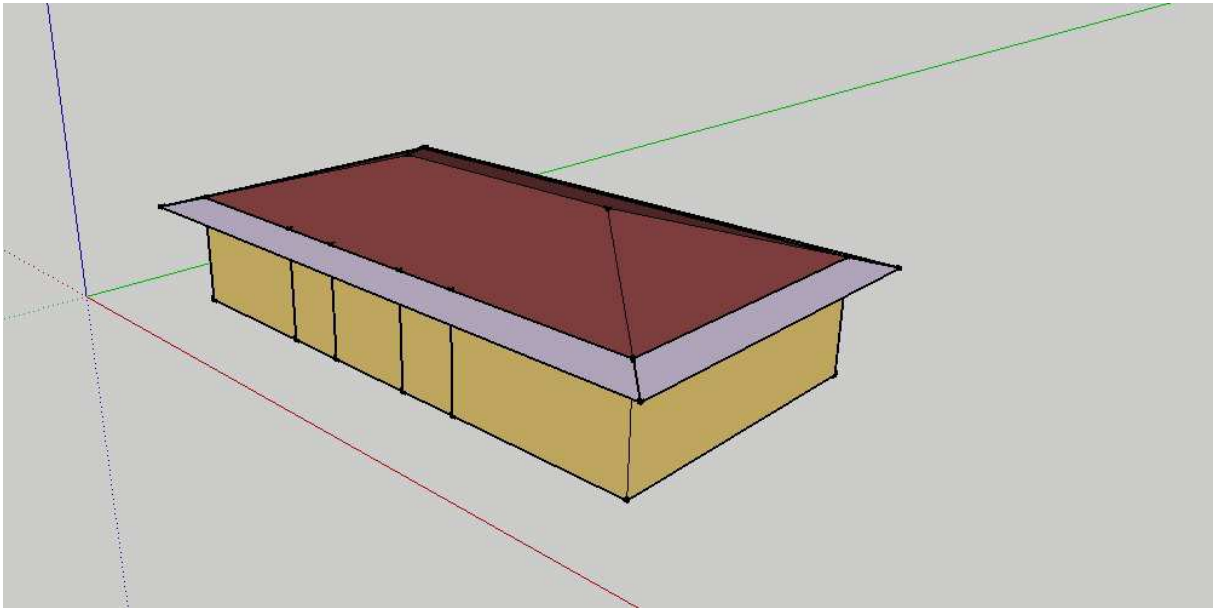
**Figura 8 - Telhado**

Fonte: Autor

Os beirais do telhado, vistos na Figura 8, são modelados como superfícies de sombreamento separadas das superfícies do telhado, para que o efeito do

sombreamento possa ser calculado corretamente e para que a área dos beirais não seja considerada como uma superfície pela qual ocorre transmissão de calor. Outras superfícies que podem causar sombreamento na construção, como toldos, muros ou outras edificações, devem ser definidos dessa forma também. Nesse estudo de caso não serão considerados outros sombreamentos além dos beirais.

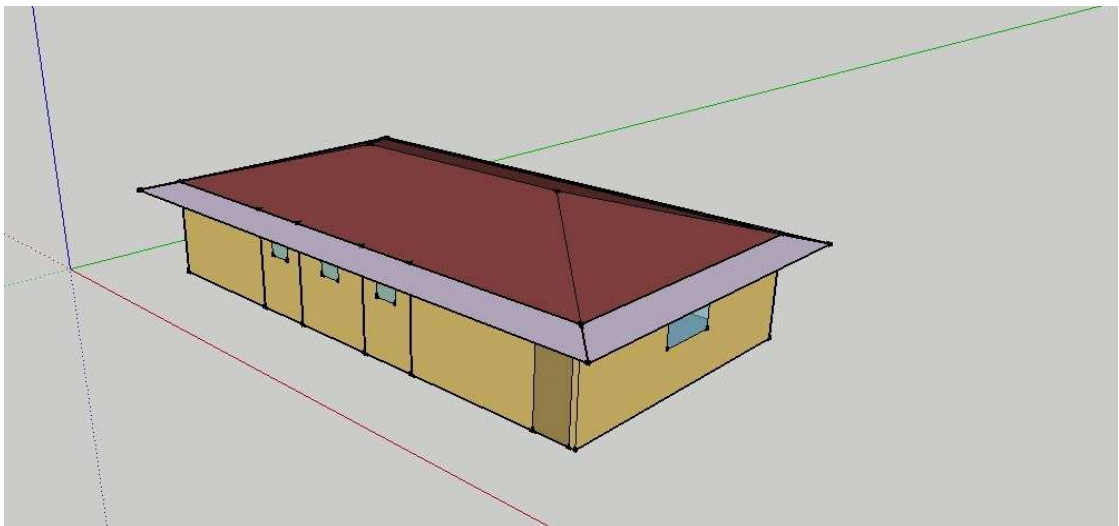
**Figura 9 - Beirais**



Fonte: Autor

As esquadrias são desenhadas sobre as superfícies das paredes e posteriormente são projetadas nas superfícies utilizando a ferramenta “Project Loose Geometry”, o que cria as aberturas nas paredes. Devem ser definidas tanto as esquadrias externas como as internas.

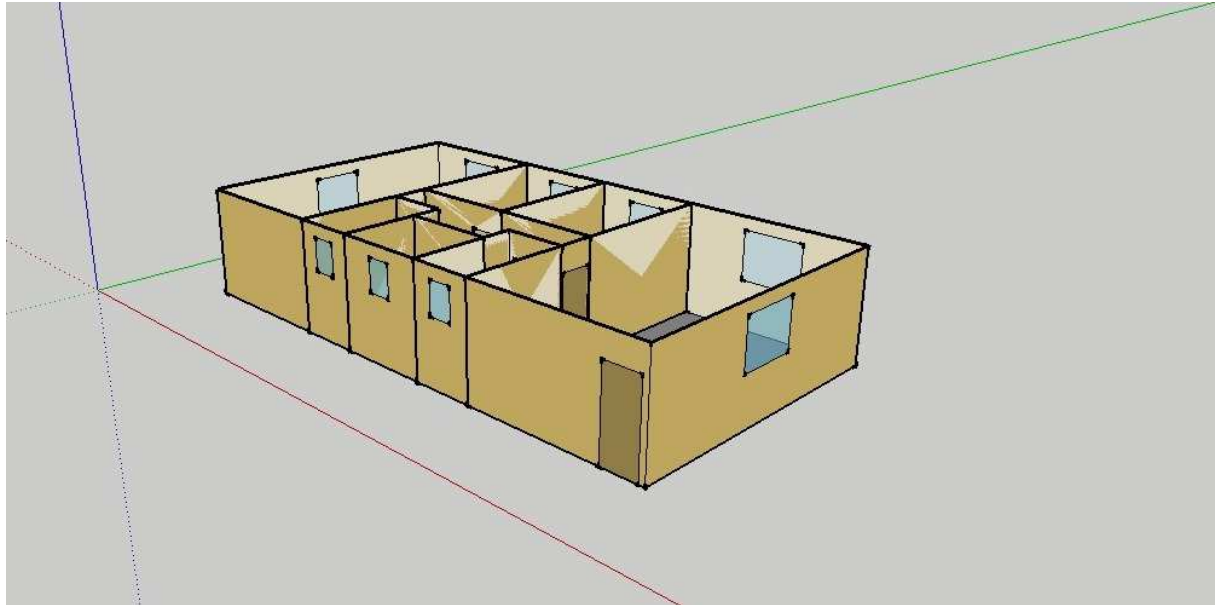
**Figura 10 - Esquadrias**



Fonte: Autor

O corte na Figura 11 mostra as esquadrias já projetadas nas paredes.

**Figura 11 – Esquadrias projetadas**

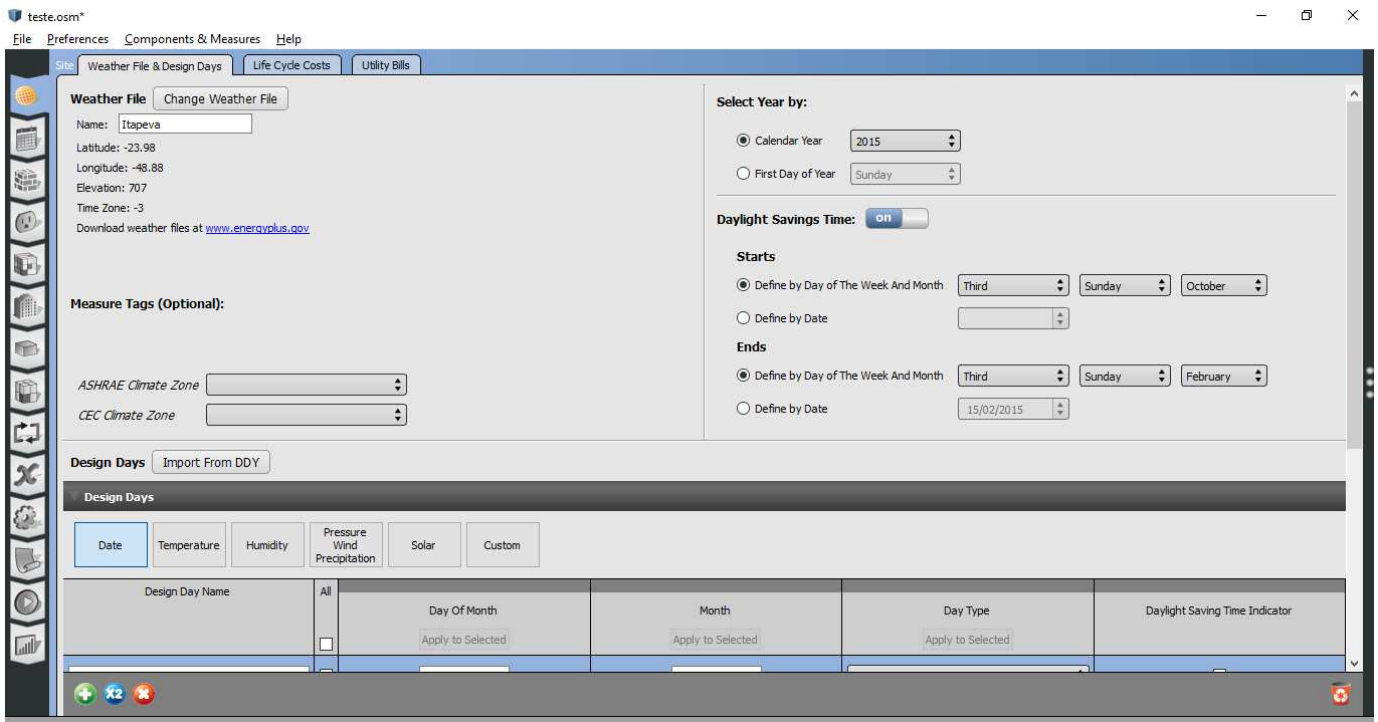


Fonte: Autor

Quando um ambiente é criado o *Openstudio* define por padrão que o piso troca calor com o solo e que as outras superfícies trocam calor com o ar externo. Porém, em muitos casos as superfícies estão em contato com a própria edificação e não com o ar externo, e irão trocar calor com os ambientes adjacentes. É necessário indicar quais são essas superfícies e isso pode ser feito de forma automática com a ferramenta *Surface Matching*.

### **3.3 Definições no *Openstudio***

Através da interface do *Openstudio* foram definidos diversos detalhes necessários para que o *EnergyPlus* pudesse realizar a simulação. No canto esquerdo da interface do programa existe um menu através do qual foi possível acessar as páginas onde foram inseridos os dados como descrito nos próximos tópicos.

Figura 12 – Tela do software *Openstudio*

Fonte: Autor

### 3.3.1 Local (site)

Para realizar a simulação, o *EnergyPlus* necessita de informações sobre o clima do local onde se pretende construir a edificação. Essas informações foram inseridas no projeto através de um arquivo com extensão “epw”, que contém os dados climáticos, e um arquivo com extensão “ddy” com informações sobre um dia de verão e um dia de inverno, para o cálculo dos picos de carga no sistema de climatização.

Os arquivos com os dados climáticos de Itapeva foram retirados do site do Laboratório de eficiência energética em edificações da Universidade Federal de Santa Catarina<sup>15</sup>. Os dados presentes nesses arquivos foram coletados na estação meteorológica do INMET - Instituto nacional de meteorologia - instalada no ano de 2006 no campus da Unesp de Itapeva.

No campo “*Daylight savings time*” pode ser determinado o início e término do horário de verão, que no Brasil é definido pelo decreto da casa civil n° 6558 de 08 de

<sup>15</sup> Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2015> Acesso em mai 2016

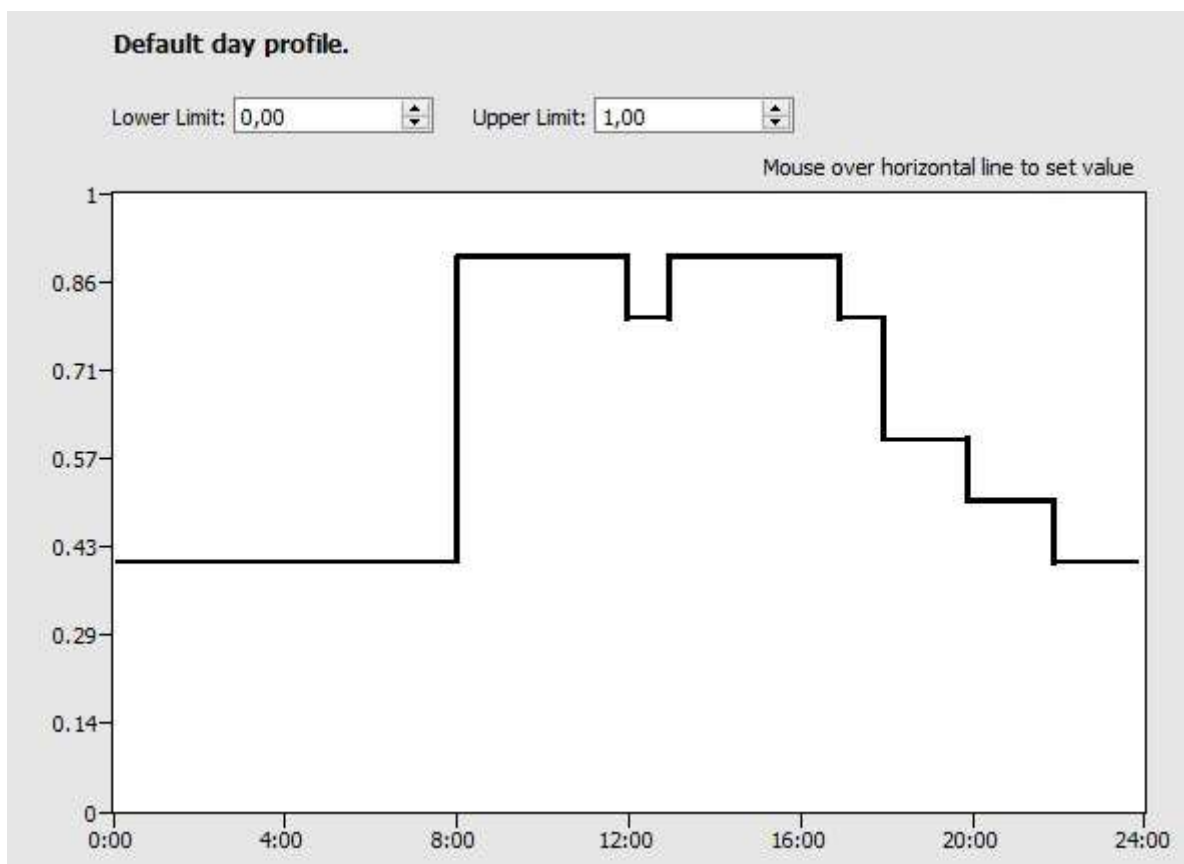
setembro de 2008 com início no terceiro domingo de outubro e término no terceiro domingo de fevereiro.

### 3.3.2 Cronogramas (Schedule)

Nesta página foram definidos os cronogramas de horário de trabalho, uso da iluminação, equipamentos elétricos, infiltração de ar e outras características.

Primeiro criou-se o cronograma de cada uma das características através de uma interface gráfica como a que segue. No eixo horizontal é representado o horário e no vertical a intensidade da característica. Em seguida esses cronogramas foram agregados em conjuntos (Schedule sets) que posteriormente foram associados a um ambiente.

**Figura 13 – Schedule**



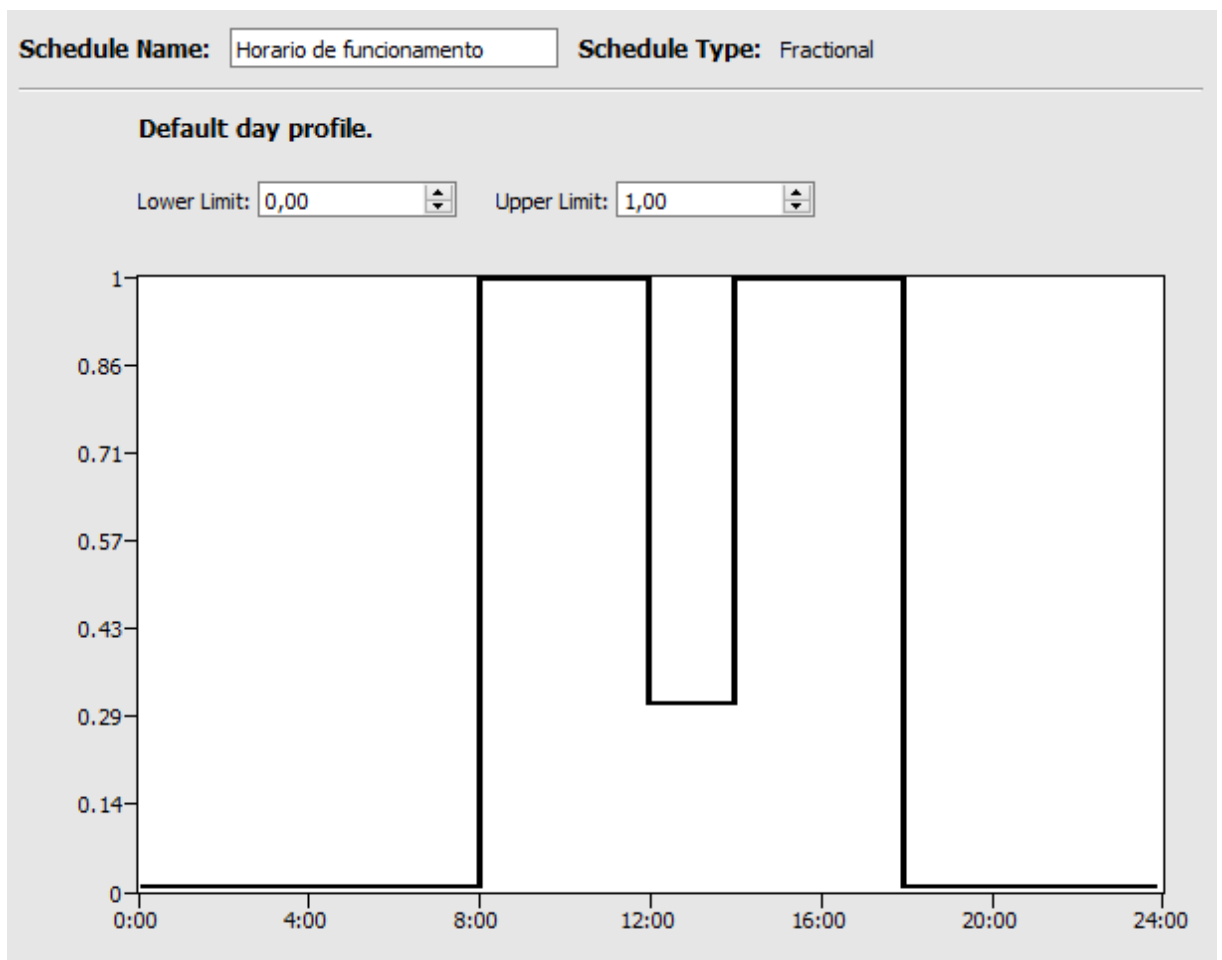
Fonte: Autor

Nesse estudo de caso foi definido o horário de funcionamento como sendo das 8 h às 12 h e das 14 h às 18 h de segunda-feira a sexta-feira. Os cronogramas

criados foram horário de funcionamento, atividade de escritório, infiltração de ar, temperatura de verão e temperatura de inverno, como segue:

- Horário de funcionamento. Define qual fração do total de pessoas estará presente ao longo do dia. O valor 1 representa que todas as pessoas estarão presentes e 0 que nenhuma pessoa estará presente. Esse cronograma será usado para definir também o horário em que a iluminação, equipamentos elétricos e ar-condicionado irão funcionar. No horário do almoço (das 12h as 14h) o nível de atividade foi determinado como 30%, o que implica para a simulação que as cargas térmicas internas estarão atuando com 30% da capacidade e que o sistema de climatização estará ativo.

**Figura 14 – Tela “Horário de funcionamento”**



Fonte: Autor

- Atividade de escritório. Define o tipo de atividade e conseqüentemente a quantidade de calor gerada pelas pessoas presentes no ambiente. A potência gerada por cada pessoa foi definida com base na tabela C.1 do anexo C da norma ABNT NBR 16401-1:2008. Considerando um homem adulto realizando atividade moderada em trabalhos de escritório, a potência é de 140W.
- Infiltração de ar. A infiltração de ar na edificação influencia a carga do sistema de climatização e é importante para a manutenção da qualidade do ar no interior da edificação. No cronograma foi definido que ocorrerá infiltração de ar constantemente. O volume de infiltração de ar para cada ambiente foi definido na página tipos de ambientes.
- Temperatura verão. Esse cronograma define a temperatura em que o sistema de climatização irá tentar manter o ambiente no período de verão. A temperatura escolhida foi de 23°C.
- Temperatura inverno. Esse cronograma define a temperatura em que o sistema de climatização irá tentar manter o ambiente no período de inverno. A temperatura escolhida foi de 20°C.

### 3.3.3 Construções (Constructions)

#### 3.3.3.1 Materiais

Para realizar a simulação o *Energyplus* é necessário inserir algumas propriedades térmicas e físicas dos materiais que compõe a construção. Essas propriedades são a densidade, a condutividade térmica e o calor específico. Para os materiais que ficarão expostos ao ambiente externo deve-se definir também a absorvância para radiação solar e a absorvância térmica.

Os valores dessas propriedades encontram-se na Tabela 1 e foram obtidos por diversos meios. Os dados referentes ao CLT foram obtidos em tabela do fabricante de painéis KLH disponível no site da empresa (<http://www.klhuk.com>). As densidades de algumas espécies de madeira foram obtidas através site do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (<http://www.ipt.br>). As propriedades do vidro e da camada de ar que compõe as janelas foram obtidas no programa *Openstudio*. O

restante das propriedades foi obtido através das tabelas da norma ABNT NBR 15220, ou calculadas no apêndice A de acordo com a mesma norma.

**Tabela 1 – Propriedades térmicas e físicas dos materiais**

MATERIAL	DENSIDADE [kg/m <sup>3</sup> ]	CONDUTIVIDADE TÉRMICA [W/m*K]	CALOR ESPECÍFICO [J/kg*K]	ABSORTÂNCIA SOLAR	ABSORTÂNCIA TÉRMICA	FONTE
CLT 5s 140 TL (Laje)	471,00	0,1300	1600,00	n/a	n/a	Catálogo do fabricante KLH
CLT 3s 94 TT (Paredes)	471,00	0,1300	1600,00	n/a	n/a	Catálogo do fabricante KLH
Parede Wood Frame	158,01	0,0571	580,68	n/a	n/a	Apêndice A
Laje Wood Frame	200,83	0,0460	446,00	n/a	n/a	Apêndice A
Espaçador ripa e ar	40,00	0,1560	1340,00	n/a	n/a	Apêndice A
Cobertura de telha de barro sem forro	n/a	4,5500	n/a	0,80	0,90	ABNT NBR 15220
Gesso cartonado 12,5 mm	875,00	0,3500	840,00	0,20	0,90	ABNT NBR 15220
OSB 15 mm	600,00	0,1400	2300,00	n/a	n/a	ABNT NBR 15220
OSB 11 mm	600,00	0,1400	2300,00	n/a	n/a	ABNT NBR 15220
Lambri de pinus 20 mm (Pintura branca)	480,00	0,1500	1340,00	0,20	0,90	ABNT NBR 15220, e IPT
Vidro 6mm (Clear 6MM)	n/a	0,9000	n/a	n/a	n/a	OpenStudio
Camada de ar 13mm (AIR 13MM)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	OpenStudio
Madeira porta externa 35 mm (Angelim-Pedra, pintura branca)	710,00	0,2300	1340,00	0,20	0,90	ABNT NBR 15220, e IPT
Madeira porta interna 35 mm (Pinus, pintura branca)	480,00	0,1500	1340,00	0,20	0,90	ABNT NBR 15220, e IPT
Radier 300 mm (Concreto polido)	2300,00	1,7500	1000,00	n/a	n/a	ABNT NBR 15220

### 3.3.3.2 Elementos construtivos

Os elementos construtivos são compostos por camadas dos materiais, sendo a primeira camada aquela que se localiza na superfície externa da edificação. A Tabela 2 resume a composição dos elementos construtivos adotados.

**Tabela 2 – Camadas dos elementos construtivos**

<b>Elemento</b>	<b>1 (Externa)</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Fundação e piso</b>	Radier 300mm				
<b>Janela</b>	Vidro 6mm	Camada de ar 13mm	Vidro 6mm		
<b>Laje CLT</b>	CLT 5s 140 TL	Gesso cartonado 12,5 mm			
<b>Laje Wood Frame</b>	OSB 15mm	Laje Wood Frame	Gesso cartonado 12,5 mm		
<b>Parede CLT externa</b>	Lambri de pinus 20mm	Espaçador ripas e ar	CLT 3s TT	Gesso cartonado 12,5 mm	
<b>Parede Wood Frame externa</b>	Lambri de pinus 20mm	Espaçador ripas e ar	OSB 11mm	Parede Wood Frame	Gesso cartonado 12,5 mm
<b>Parede CLT interna</b>	Gesso cartonado 12,5 mm	CLT 3s TT	Gesso cartonado 12,5 mm		
<b>Parede Wood Frame interna</b>	Gesso cartonado 12,5 mm	OSB 11mm	Parede Wood Frame	Gesso cartonado 12,5 mm	
<b>Porta externa</b>	Madeira porta externa 35mm				
<b>Porta interna</b>	Madeira porta interna 35mm				
<b>Telhado</b>	Cobertura de telha de barro sem forro				

### 3.3.3.3 Conjuntos de elementos construtivos

As simulações dos dois sistemas construtivos foram feitas em arquivos separados, um deles contento o conjunto de elementos construtivos chamado Escritório CLT e o outro Escritório *Wood Frame*. Ambos com os elementos construtivos comuns aos dois modelos e os elementos respectivos a cada sistema construtivo.

### 3.3.4 Cargas (loads)

A presença de pessoas, iluminação e equipamentos elétricos nos ambientes influencia na carga térmica do sistema de climatização. No inverno essas cargas reduzem a demanda de aquecimento, e no verão elas aumentam a demanda por refrigeração.

**Pessoas:** De acordo com o número de postos de trabalho de cada ambiente no catálogo da FDE

- 01A – 1 pessoa
- 01A – 1 pessoa
- 03B – 3 pessoas
- 07A – nenhuma
- 20B – 2 pessoas

Iluminação: De acordo com definições de cada ambiente no catálogo da FDE

- 01A – 3 luminárias 2 x 32
- 01A – 3 luminárias 2 x 32
- 03B – 8 luminárias 2 x 32
- 07A – 3 luminárias 2 x 32
- 20B – 2 luminárias 2 x 32

Equipamentos elétricos: De acordo com definições de cada ambiente no catálogo da FDE

- 01A – 1 computador, 1 impressora a laser de mesa, pequena
- 01A – 1 computador, 1 impressora a laser de mesa, pequena
- 03B – 3 computadores, 1 impressora a laser de escritório, pequena
- 07A – nenhum
- 20B – 2 computadores

A potência desses equipamentos foi definida com base nos valores das tabelas C.3 e C.4 do anexo C da norma ABNT NBR 16401-1: 2008.

Computadores:

**Tabela 3 – Potência dos equipamentos**

	Uso contínuo [W]	Modo economizador [W]
Computadores: Valor médio	55	20
Monitores: Médio (16 pol. A 18 pol.)	70	0

Fonte: Tabela C.3 ABNT NBR 16401-1:2008

A potência média do conjunto computador e monitor foi calculada considerando que eles estarão em funcionamento em uso contínuo por 66% do tempo e modo economizador por 34% do tempo.

$$\text{Potência} = 66\% \times (55W + 70W) + 34\% \times (20W + 0) = 89,30W$$

**Tabela 4 - Potência das impressoras**

	Uso contínuo [W]	Ligada, em espera [W]
Impressora a laser de mesa, pequena	130	10
Impressora a laser de escritório, pequena	320	70

Fonte: Tabela C.4 ABNT NBR 16401-1:2008

Nos ambientes do tipo 01A foi adotada uma impressora a laser de mesa, pequena, e a sua potência média foi calculada considerando que elas estarão em funcionamento em uso contínuo por 34% do tempo e em modo de espera por 66% do tempo.

$$\text{Potência} = 34\% \times 130W + 66\% \times 10W = 50,80W$$

No ambiente do tipo 03B foi adotada uma impressora a laser de escritório, pequena, e a sua potência média foi calculada considerando que ela estará em funcionamento em uso contínuo por 34% do tempo e em modo de espera por 66% do tempo.

$$\text{Potência} = 34\% \times 320W + 66\% \times 70W = 155,00W$$

### **3.3.5 Tipos de ambientes (Space types)**

Aqui são criados os tipos de ambientes, onde se define o tipo de ocupação, iluminação, equipamentos, infiltração de ar. Para cada tipo de ambiente são associados um conjunto de elementos construtivos e um conjunto de cronogramas.

Infiltração de ar nos ambientes com ar-condicionado será adotado 0,5 ren/h com base na ASHRAE 2005 Fundamentals handbook

Ventilação dos ambientes sem ar-condicionado (banheiros e ático) será adotado conforme a ABNT NBR 15575-1 a taxa de 1 ren/h.

**Figura 15 – Tela tipos de ambientes**

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="border: 1px dashed gray; padding: 5px; border-radius: 5px;">Drop Space Type</div> <div style="display: flex; gap: 10px;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; background-color: #e0f0ff;">General</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">Loads</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">Measure Tags</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">Custom</div> </div> </div>							
Filter: Load Type <input type="text" value="Show all loads"/>							
Space Type Name	All	Rendering Color	Default Construction Set	Default Schedule Set	Design Specification Outdoor Air	Space Infiltration Design Flow Rates	Space Infiltration Effective Leakage Areas
		Apply to Selected		Apply to Selected		Apply to Selected	
01A - Sala	<input type="checkbox"/>	■	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	Infiltracao		
03B - Recepcao	<input type="checkbox"/>	■	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	Infiltracao		
07A - Banheiro	<input type="checkbox"/>	■	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	Ventilacao		
20B - Sala de reuniao	<input type="checkbox"/>	■	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	Infiltracao		
Atico 1	<input type="checkbox"/>	■	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	Ventilacao		
Corredor 1	<input type="checkbox"/>	■	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	Infiltracao		

Fonte: Autor

Na aba Loads são definidos os detalhes referentes as cargas internas da edificação. Isso é feito associando-se ao ambiente uma carga criada anteriormente, e aplicando um fator multiplicador. Neste caso pode-se ver pela Figura 16 que o fator multiplicador define a quantidade de pessoas, luminárias, computadores e impressoras por tipo de ambiente.

**Figura 16 – Tela “Loads”**

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="border: 1px dashed gray; padding: 5px; border-radius: 5px;">Drop Space Type</div> <div style="display: flex; gap: 10px;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">General</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; background-color: #e0f0ff;">Loads</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">Measure Tags</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">Custom</div> </div> </div>						
Filter: Load Type <input type="text" value="Show all loads"/>						
Space Type Name	All	Load Name	Multiplier	Definition	Schedule	Activity Schedule (People Only)
		Apply to Selected		Apply to Selected		Apply to Selected
01A - Sala	<input type="checkbox"/>	Pessoas 01A	1.000000	Colaborador	Horario de funcionamento	Atividade de escritório
	<input type="checkbox"/>	Iluminacao 01A	3.000000	Luminaria 2 x 32W	Horario de funcionamento	
	<input type="checkbox"/>	Computador 01A	1.000000	Computador	Horario de funcionamento	
	<input type="checkbox"/>	Impressora 01A	1.000000	Impressora de mesa pequena	Horario de funcionamento	
03B - Recepcao	<input type="checkbox"/>	Pessoas 03B	3.000000	Colaborador	Horario de funcionamento	Atividade de escritório
	<input type="checkbox"/>	Iluminacao 03B	8.000000	Luminaria 2 x 32W	Horario de funcionamento	
	<input type="checkbox"/>	Computador 03B	3.000000	Computador	Horario de funcionamento	
	<input type="checkbox"/>	Impressora 03B	1.000000	Impressora de escritorio pequena	Horario de funcionamento	

Fonte: Autor

### 3.3.6 Edificação (Facility)

Nesta página são definidas algumas características gerais da edificação, como o nome, a orientação em relação ao norte (adotado 180°) e altura do pé direito. Podem ser definidos também conjuntos de elementos construtivos, e cronogramas padrão para a edificação.

### 3.3.7 Ambientes (Spaces)

A cada espaço definido na geometria da edificação é associado um pavimento da edificação, uma zona térmica e um tipo de ambiente.

**Figura 17 – Tela de associação**

Space Name	All	Story	Thermal Zone	Space Type	Default Construction Set	Default Schedule Set	Part of Total Floor Area
Atico	<input type="checkbox"/>	Ático	Zona termica 1	Atico 1	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	<input type="checkbox"/>
Banheiro 1	<input type="checkbox"/>	Térreo	Zona termica 3	07A - Banheiro	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	<input checked="" type="checkbox"/>
Banheiro 2	<input type="checkbox"/>	Térreo	Zona termica 5	07A - Banheiro	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	<input checked="" type="checkbox"/>
Banheiro cadeirante	<input type="checkbox"/>	Térreo	Zona termica 4	07A - Banheiro	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	<input checked="" type="checkbox"/>
Corredor	<input type="checkbox"/>	Térreo	Zona termica 7	Corredor 1	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	<input checked="" type="checkbox"/>
Recepcao	<input type="checkbox"/>	Térreo	Zona termica 2	03B - Recepcao	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	<input checked="" type="checkbox"/>
Sala 1	<input type="checkbox"/>	Térreo	Zona termica 9	01A - Sala	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	<input checked="" type="checkbox"/>
Sala 2	<input type="checkbox"/>	Térreo	Zona termica 8	01A - Sala	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	<input checked="" type="checkbox"/>
Sala de reunião	<input type="checkbox"/>	Térreo	Zona termica 6	20B - Sala de reuniao	Escritorio CLT	Cronogramas escritório	<input checked="" type="checkbox"/>

Fonte: Autor

### 3.3.8 Zonas térmicas (Thermal zone)

As zonas térmicas são definidas na geometria da edificação. Aqui associa-se a cada zona térmica as definições referentes a climatização. Equipamentos, termostatos e etc.

**Figura 18 – Tela “definições de climatização”**

HVAC Systems									
Cooling Sizing Parameters									
Heating Sizing Parameters									
Custom									
Name	All	Turn On Ideal Air Loads	Air Loop Name	Zone Equipment	Cooling Thermostat Schedule	Heating Thermostat Schedule	Humidifying Setpoint Schedule	Dehumidifying Setpoint Schedule	Multiplier
	<input type="checkbox"/>			Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected
Zona termica 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	None						1
Zona termica 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	None		Temperatura verao	Temperatura inverno			1
Zona termica 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	None		Temperatura verao	Temperatura inverno			1
Zona termica 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	None		Temperatura verao	Temperatura inverno			1
Zona termica 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	None		Temperatura verao	Temperatura inverno			1
Zona termica 6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	None		Temperatura verao	Temperatura inverno			1
Zona termica 7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	None		Temperatura verao	Temperatura inverno			1
Zona termica 8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	None		Temperatura verao	Temperatura inverno			1
Zona termica 9	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	None		Temperatura verao	Temperatura inverno			1

Fonte: Autor

Nesse estudo de caso foi utilizada a opção “ideal termal loads” selecionada na página Zonas Térmicas. Essa opção simula um sistema de ar-condicionado ideal, que irá tentar suprir, a cada intervalo de cálculo, a necessidade de aquecimento ou refrigeração demandada pelo ambiente. Os sistemas foram limitados pela potência do ar-condicionado escolhido para cada ambiente. Essa escolha foi feita de acordo com tabelas de dimensionamento simples fornecidas pelos comerciantes de aparelhos de climatização.

No campo Cooling Thermostat Schedule foi definida a temperatura que o sistema irá tentar manter o ambiente durante o verão (foi utilizado o cronograma Temperatura verão) e no campo Heating Thermostat Schedule é definida a temperatura que o sistema irá manter o ambiente durante o inverno (foi utilizado o cronograma Temperatura inverno)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Consumo de energia total

A edificação consome energia elétrica para a iluminação e equipamentos, e energia térmica para aquecimento e refrigeração. A tabela 5 mostra a quantidade de energia consumida para cada finalidade e a total em cada um dos modelos.

**Tabela 5 - Consumo de energia por finalidade de uso**

	CLT – Energia [GJ]		Wood Frame – Energia [GJ]	
	Energia [GJ]	%	Energia [GJ]	%
Aquecimento	0,06	0%	0,05	0%
Refrigeração	16,41	47%	19,00	52%
Iluminação	10,86	32%	10,86	29%
Equipamentos	7,13	21%	7,13	19%
TOTAL	34,46		37,04	

Fonte: Autor

O Consumo de energia para iluminação e equipamentos é igual para os dois modelos, porque ambos foram programados com as mesmas cargas internas.

### 4.2 Consumo de energia para climatização

Pode-se observar que o consumo de energia para aquecimento é quase desprezível. O calor gerado pelas pessoas presentes, pela iluminação, pelos equipamentos elétricos e pela incidência de radiação solar contribuem para o aquecimento do ambiente. Para o período frio isso é vantajoso porque diminui a demanda de energia térmica para manter o ambiente dentro dos limites de temperatura definidos. No período quente do ano essa geração de calor é desvantajosa porque aumenta a demanda do sistema de climatização. Para os modelos simulados essas contribuições para o aquecimento foram suficientes para reduzir substancialmente a demanda por energia para aquecimento.

A energia consumida para refrigeração apresentou diferença entre os modelos, com 16,41 GJ para o CLT e 19,00 GJ para o *Wood Frame*. Essa diferença demonstra que o CLT apresentou uma maior eficiência energética do que o *Wood Frame* na simulação.

Os únicos elementos construtivos diferentes entre os modelos são as lajes e paredes. A tabela 6 mostra algumas propriedades desses elementos construtivos.

**Tabela 6 – Transmitância térmica e densidade superficial**

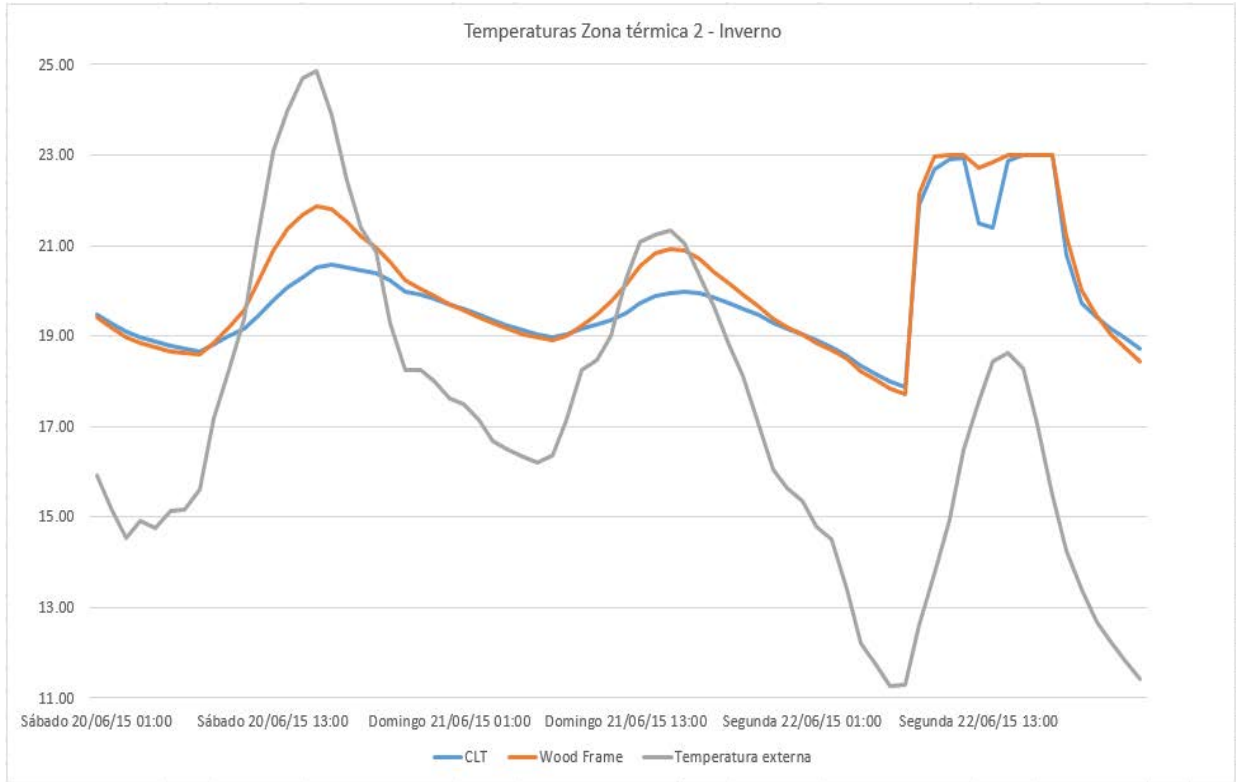
Elemento construtivo	Transmitância térmica [W/m <sup>2</sup> *K]	Densidade superficial [kg/m <sup>2</sup> ]
Laje CLT	0,798	76,88
Parede CLT externa	0,832	65,81
Laje <i>Wood Frame</i>	0,428	31,02
Parede <i>Wood Frame</i> externa	0,458	43,67

A transmitância térmica representa a potência em Watts [W] de calor que passa através de um metro quadrado da superfície para cada Kelvin [K] de diferença na temperatura entre as faces do elemento.

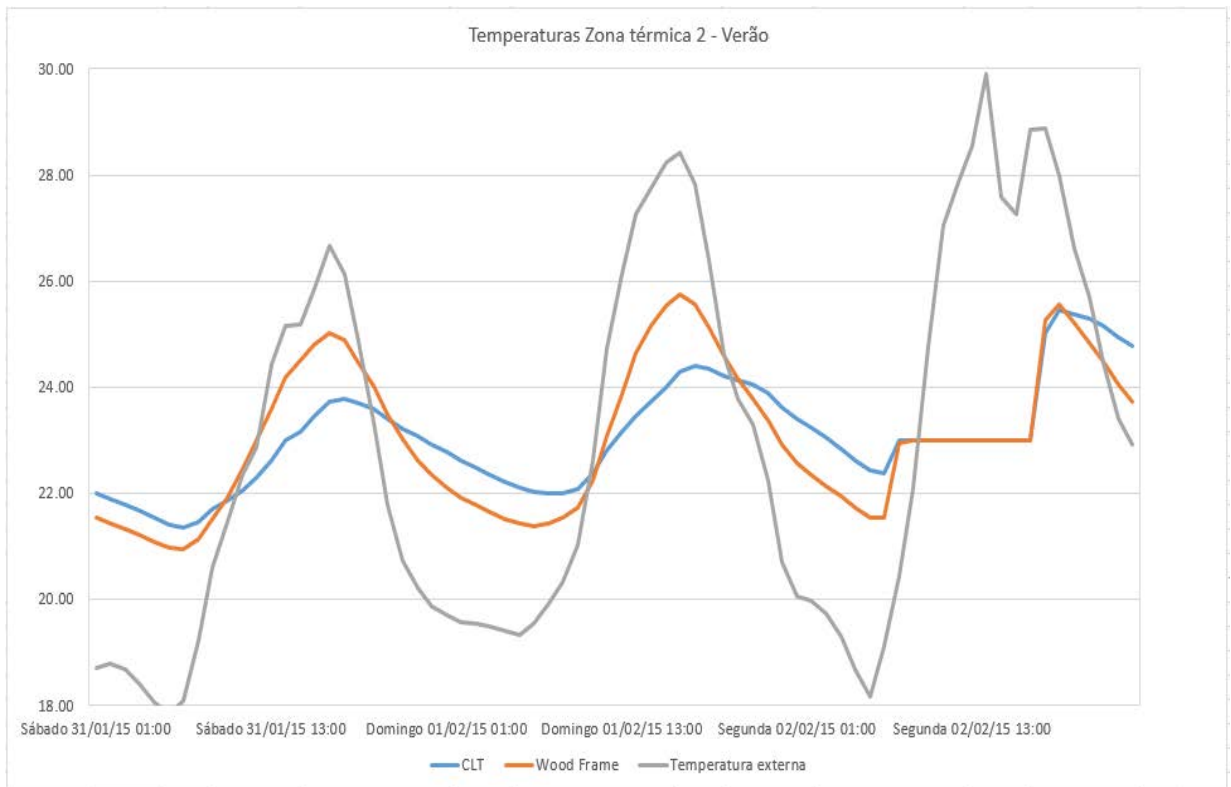
Os elementos do *Wood Frame* apresentam transmitância térmica menor do que os elementos do CLT, o que é favorável do ponto de vista térmico. Em contrapartida os elementos do CLT apresentam uma maior densidade superficial, que implica em uma maior inercia térmica e conseqüentemente uma menor velocidade na mudança de temperatura.

Esse efeito pode ser observado nos gráficos 1 e 2, que mostram as temperaturas internas de um ambiente da edificação em CLT e *Wood Frame*, e a temperatura do ambiente externo. Os primeiros dois dias representados nos gráficos são um sábado e um domingo para que possa ser observada a variação de temperatura da edificação sem a interferência do sistema de climatização.

**Grafico 1 – Temperaturas no inverno**



**Grafico 2 – Temperaturas no verão**



Nos dois gráficos pode-se observar que a amplitude térmica do modelo em *Wood Frame* é maior do que o modelo em CLT. Essa maior amplitude térmica indica que a construção em *Wood Frame* apresenta menor inercia térmica e, portanto, demanda mais energia para manter a temperatura interna determinada.

## 5 CONCLUSÕES

O sistema construtivo em CLT apresentou maior eficiência energética do ponto de vista térmico quando comparado ao sistema *Wood Frame*. Essa eficiência ocorreu devido ao fato de a estrutura em CLT possuir mais massa, o que causou uma maior atenuação da onda térmica.

A diferença no consumo de energia para refrigeração foi expressiva, mas outros fatores podem influenciar na escolha do sistema construtivo. Um desses fatores é o custo, que pode ser maior no caso do CLT devido ao fato de ser um material novo e ainda pouco conhecido e utilizado no Brasil.

## 6 REFERÊNCIAS

ASHRAE. 2010. ANSI/ASHRAE Standard 55-2010. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Bodig J. e B. A. Jayne. 1982. Mecânica da madeira e de composições em madeira. Van Nostrand Reinhold Company, NY. pp. 712.

BRASIL. Decreto Presidencial nº 4059 Regulação da lei 10.295 (17Outubro de 2001) Conservação e Uso Racional de Política Energética "Brasília. Governo do Brasil de 2001

Centro de Conservação de Energia do Japão, "Programa TopRunner ", <http://www.eccj.or.jp/toprunner/>, mai de 2016

Comissão de energia de Sacramento, Califórnia. Normas para edifícios residenciais e não residenciais. Califórnia. Número de publicação. 2001.

Crespell, P., & Gagnon, S. (2010). Cross Laminated Timber: Cartilha. Vancouver, British Columbia: FPInnovations.

De la Roche, I. e C. Gaston. 2001. O futuro de produtos de madeira: qual é o prognóstico. O Chronicle Forestry 77 (6): 985-988.

ECV4202 – Análise Térmica de Edificações. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/ensino/pos-graduacao/ecv4202> Acesso em abr 2016

Engenheiros e arquitetos se rendem ao *EnergyPlus*. Disponível em: <http://www.engenhariaearquitectura.com.br/noticias/417/Engenheiros-e-arquitetos-se-rendem-ao-EnergyPlus.aspx> Acesso em abr 2016

Falk, R. H. Recuperando-se de madeira para a reutilização e reciclagem. 2002 FPInnovations. 2010. Cross Laminated Timber Hand book. FPInnovations, SP-528E, Canada.

Gagnon, S., & Pirvu, C. (Eds.). (2011). Manual CLT: Cross-Laminated Timber. Vancouver, British Columbia: FPInnovations.

Houghton, R.A., Lawrence, K.T., Hackler, J. L., Brown, S., 2001. A distribuição espacial da biomassa florestal na Amazônia brasileira: a comparação das estimativas. Mudança Global do Biol. 7, 731-746.

Introdução à avaliação de eficiência energética e desempenho térmico de edificações por Simulação Computacional. Disponível em <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/building-design/concepts> Acesso em abr 2016

Kosny, J. Desjarlais, A.O. "Influência de detalhes arquitetônicos no desempenho térmico global dos sistemas de parede residencial". 1994

Kumaran, K., Mukhopadhyaya, P & Cornick, S.M. "Uma metodologia integrada para desenvolver estratégias de gerenciamento de umidade para sistemas de parede exterior". 2003

McKeever, D.B.; Phelps, R. B. "Os produtos de madeira utilizados na construção nova casa unifamiliar: 1994

Paris. Etiquetas de energia e Padrões: Agência Internacional de Energia, 2000.

PEREIRA, P. A.P. Política Social e Democracia. 2. ed. Rio de Janeiro: Cortez, 2002.  
CORTINA, A. Ética, Tecnologia y Salud. Buenos Aires: Ed. Salvier, 1998.

Rainer, J. H. e Karacabeyli, E. Desempenho de construção de edifícios de estrutura de madeira em terremotos. Publicação Especial No. SP-40, Forintek Canadá, Vancouver, de 1999.

Santos, Fernando Miguel Soares Mamede. Células de Combustível: Uma Tecnologia para a Geração Distribuída, Dissertação de Mestrado apresentada na Universidade de Coimbra orientada pelo Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2003.

Strand, R., Winkelmann F., Buhl F., Huang J., Liesen R., Pedersen C. "melhorar e estender as capacidades da técnica de construção de calor Balance Simulação para uso em *EnergyPlus*", em Processo de construção Simulação '99, Volume II, pp 653 -. 660, Kyoto, Japão, em setembro de 1999. IBPSA

Sultan, M.A., V.R. Kodur, L.R., Richardson e R.A. McPhee. Resistência ao fogo de conjuntos de parede em woodframe. In: Proc. 4 Japão / Canadá Housing R & D Workshop. Sapporo, Japão, 17-20 novembro de 1997. 7 p.

TIEMANN, H.D. tecnologia da madeira: constituição, propriedades e usos. 3. Ed. New York: Pitman Publishing Corporation, 1951. 396 p.

UIUC, LBNL.. *EnergyPlus* Engenharia de Referência, Departamento de Energia dos EUA. 2007

Woodworks. (2011). Design Madeira & Series Construção: Madeira e pegada de carbono. Tacoma, Washington: Woodworks. Disponível em: <http://woodworks.org/publications/information-sheets/> Acesso em mai 2016

ASHRAE Handbook—Fundamentals. (2005). Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.

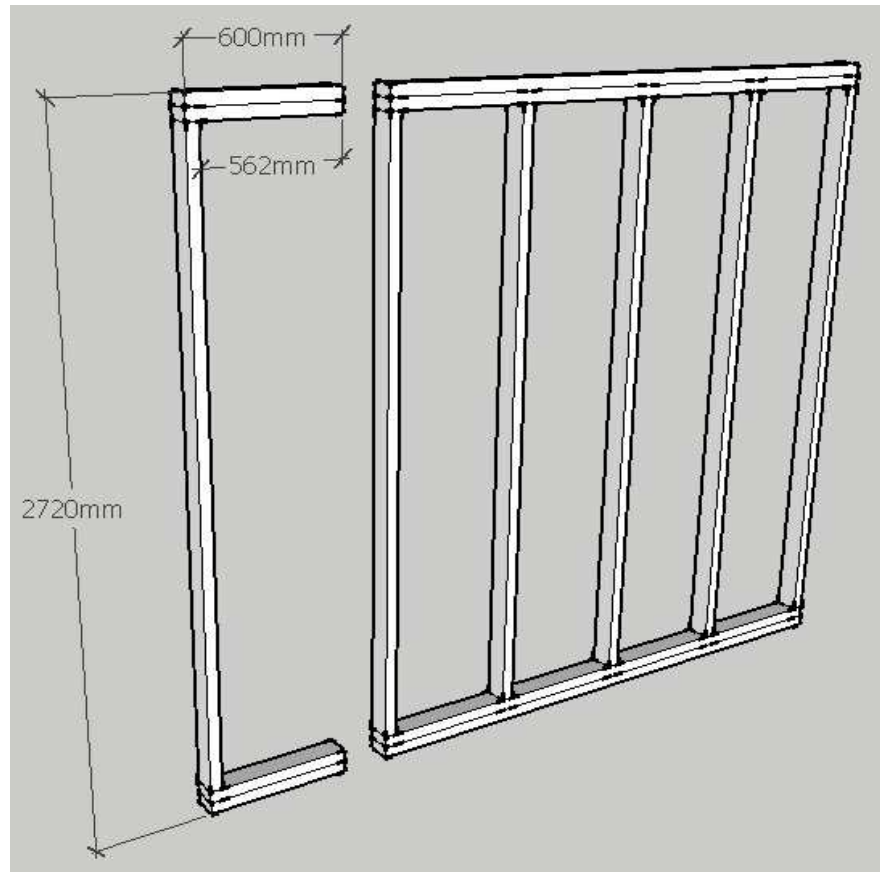
## APÊNDICE A – Cálculo das propriedades físicas e térmicas

As propriedades físicas e térmicas de alguns materiais utilizados na simulação não foram encontradas em catálogos de fabricantes ou em normas e, portanto, foram calculadas conforme a norma ABNT NBR 15220-2008.

- *Parede Wood Frame*

A parede do sistema *Wood Frame* foi considerada como composta por perfis de madeira de Pinus medindo 38mm x 89mm cm posicionados na vertical a cada 600 mm e quatro perfis na horizontal. Os espaços internos aos perfis foram preenchidos com lã de rocha. Essa composição de materiais foi representada como um único material, e foram calculadas a condutividade térmica, a densidade e o calor específico do material equivalente. A figura 14 mostra a estrutura de uma parede em *Wood Frame* e em destaque, com as cotas, o seguimento utilizado para o cálculo das propriedades do material.

### **Figura 19 – Estrutura de uma parede em *Wood Frame***



Fonte: Autor

Condutividade térmica ( $\lambda$ )

$$R = e / \lambda \quad \text{equação(1)}$$

A equação 1 mostra a relação entre a resistência térmica e a condutividade térmica, onde “R” é a resistência térmica e “e” a espessura da seção.

A resistência térmica equivalente da composição ( $R_t$ ) será calculada com a equação 2.

$$R_t = (A_a + A_b + \dots + A_n) / [(A_a / R_a) + (A_b / R_b) + \dots + (A_n / R_n)] \quad \text{equação(2)}$$

Onde  $R_a$ ,  $R_b$  e  $R_n$  são as resistências térmicas de cada seção e  $A_a$ ,  $A_b$  e  $A_n$ , são as áreas das seções.

Área da madeira ( $A_m$ )

$$A_m = (4 \times 0,562 \text{ m} + 2,72 \text{ m}) \times 0,038 \text{ m} = 0,1888 \text{ m}^2$$

Área da lã de rocha ( $A_l$ )

$$A_l = (2,72 \text{ m} \times 0,60 \text{ m}) - 0,1888 \text{ m}^2 = 1,4432 \text{ m}^2$$

Resistência térmica da madeira ( $R_m$ )

Condutividade térmica da madeira =  $0,15 \text{ W/m}^*\text{K}$

Dado da tabela B.3 do anexo B da norma ABNT NBR 15220 parte 2

$$R_m = 0,089 \text{ m} / 0,15 \text{ W/m}^*\text{K} = 0,5933 \text{ m}^2*\text{K/W}$$

Resistência térmica da lã de rocha ( $R_l$ )

Condutividade térmica da lã de rocha =  $0,045 \text{ W/m}^*\text{K}$

Dado da tabela B.3 do anexo B da norma ABNT NBR 15220 parte 2

$$R_l = 0,089 \text{ m} / 0,045 \text{ W/m}^*\text{K} = 1,9778 \text{ m}^2*\text{K/W}$$

Substituindo os dados na equação 2 obtém-se a resistência térmica do segmento de *Wood Frame* ( $R_{wf}$ )

$$R_{wf} = 1,5574 \text{ m}^2*\text{K/W}$$

A resistência térmica foi convertida para a condutividade térmica pela equação 1

$$\lambda_{wf} = 0,089 \text{ m} / 1,5574 \text{ m}^2*\text{K/W} = 0,0571 \text{ W/ m}^2*\text{K}$$

Densidade ( $\rho$ )

A densidade do material equivalente foi calculada pela média ponderada em relação a área dos componentes. Foi adotado o valor médio do intervalo de densidade dos componentes, madeira e lã de rocha, apresentados na tabela B.3 do anexo B da norma ABNT NBR 15220 parte 2

$$P_{wf} = (A_m \times \rho_m + A_l \times \rho_l) / (A_m + A_l)$$

$$P_{wf} = (0,1888 \times 525 + 1,4432 \times 110) / (0,1888 + 1,4432) = 158,01 \text{ kg / m}^3$$

Onde,  $A_m$  e  $A_l$  são respectivamente as áreas da madeira e da lã de rocha, e  $\rho_m$  e  $\rho_l$  são respectivamente as densidades da madeira e da lã de rocha.

Calor específico (c)

Para determinar o calor específico do material equivalente foi calculada primeiramente a capacidade térmica e em seguida o calor específico pela equação 3.

$$C = e * c * \rho \quad \text{equação(3)}$$

Onde, e é a espessura do material, c é o calor específico e  $\rho$  a densidade.

Capacidade térmica (CT)

Calculada pela equação para componentes com camadas não homogêneas. Utilizando dados de calor específico e densidade da tabela B.3 do anexo B da norma ABNT NBR 15220 parte 2

$$C_t = (A_a + A_b + \dots + A_n) / [ (A_a / C_a) + (A_b / C_b) + \dots + (A_n / C_n) ] \quad \text{equação(4)}$$

Onde  $C_{Ta}$ ,  $C_{Tb}$ ,  $C_{Tn}$ , são as capacidades térmicas do componente de cada seção e  $A_a$ ,  $A_b$ , e  $A_n$  são as áreas das seções

Capacidade térmica da madeira ( $C_{Tm}$ )

Calculado com a equação 3,

$$C_{Tm} = 0,089 \text{ m} \times 1,34 \text{ kJ/kg}^*K \times 480 \text{ kg/m}^3 = 57,2448 \text{ kJ/m}^2K$$

Capacidade térmica da lã de rocha ( $C_{Tl}$ )

Calculado com a equação 3,

$$C_{Tl} = 0,089 \text{ m} \times 0,75 \text{ kJ/kg}^*K \times 110 \text{ kg/m}^3 = 7,3425 \text{ kJ/m}^2K$$

Substituindo os dados na equação 4 obtemos a capacidade térmica do segmento de *Wood Frame* ( $C_{Twf}$ )

$$C_{Twf} = 8,1660 \text{ kJ/m}^2K$$

Substituindo os dados na equação 3 obtemos o calor específico do segmento de *Wood Frame* ( $c_{wf}$ )

$$C_{wf} = 8,1660 \text{ kJ/m}^2\text{K} / (0,089\text{m} \times 158,01 \text{ kg}) = 0,5806 \text{ kJ/kg}^*\text{K} = 580,68 \text{ J/kg}^*\text{K}$$

- Laje *Wood Frame*

A laje em *Wood Frame* foi considerada composta por vigas medindo 50 mm x 250 mm posicionadas a cada 600 mm. O espaço entre as vigas será preenchido com uma camada de 10 cm de lã de rocha.

Essa composição de materiais foi representada como um único material, e foram calculadas a condutividade térmica, a densidade e o calor específico do material equivalente de forma análoga ao cálculo feito para a parede *Wood Frame*, considerando, para finalidade do cálculo, um segmento com um metro de comprimento.

#### 3.4.4 Condutividade térmica ( $\lambda$ )

Área da madeira ( $A_m$ )

$$A_m = 1 \text{ m} \times 0,05 \text{ m} = 0,05 \text{ m}^2$$

Área da lã de rocha ( $A_l$ )

$$A_l = 1 \text{ m} \times 0,55 \text{ m} = 0,55 \text{ m}^2$$

Resistência térmica da madeira ( $R_m$ )

Condutividade térmica da madeira = 0,15 W/m\*K

Dado da tabela B.3 do anexo B da norma ABNT NBR 15220 parte 2

$$R_m = 0,25 \text{ m} / 0,15 \text{ W/m}^*\text{K} = 1,67 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistência térmica da lã de rocha ( $R_l$ )

Condutividade térmica da lã de rocha = 0,045 W/m\*K

Dado da tabela B.3 do anexo B da norma ABNT NBR 15220 parte 2

$$R_l = 0,10 \text{ m} / 0,045 \text{ W/m}^*\text{K} = 2,22 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Substituindo os dados na equação 2 foi obtida a resistência térmica laje *Wood Frame* ( $R_{wf}$ )

$$R_{lwf} = 2,16 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

A resistência térmica foi convertida para condutividade térmica pela equação 1

$$\lambda_{lwf} = 0,1 \text{ m} / 2,16 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} = 0,046$$

Densidade ( $\rho$ )

A densidade do material equivalente foi calculada pela média ponderada em relação a área dos componentes. Foi adotado o valor médio do intervalo de densidade dos componentes, madeira e lã de rocha, apresentados na tabela B.3 do anexo B da norma ABNT NBR 15220 parte 2

$$\rho_{lwf} = (A_m \times \rho_m + A_l \times \rho_l) / (A_m + A_l) = 200,83 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Calor específico ( $c$ )

Para determinar o calor específico do material equivalente foi calculada primeiramente a capacidade térmica do material equivalente e em seguida o calor específico.

Capacidade térmica ( $C_T$ )

Calculada pela equação para componentes com camadas não homogêneas. Utilizando dados de calor específico e densidade da tabela B.3 do anexo B da norma ABNT NBR 15220 parte 2

Capacidade térmica da madeira ( $C_{Tm}$ )

Calculado com a equação 3,

$$C_{Tm} = 0,25 \text{ m} \times 1,34 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \times 480 \text{ kg/m}^3 = 160,80 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$$

Capacidade térmica da lã de rocha ( $C_{Tl}$ )

Calculado com a equação 3,

$$C_{TI} = 0,10 \text{ m} \times 0,75 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{K} \times 110 \text{ kg/m}^3 = 8,25 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

Substituindo os dados na equação 4 obtemos a capacidade térmica da laje *Wood Frame* ( $C_{TIwf}$ )

$$C_{TIwf} = 8,96 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

Substituindo os dados na equação 3 obtemos o calor específico da laje *Wood Frame* ( $c_{Iwf}$ )

$$c_{Iwf} = 8,96 \text{ kJ/m}^2\text{K} / (0,10\text{m} \times 200,83 \text{ kg}) = 0,446 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{K} = 446 \text{ J/kg}^{\circ}\text{K}$$

$$c_{Iwf} = 446 \text{ J/kg}^{\circ}\text{K}$$

- Espaçador ripa e ar

O espaçador ripa e ar é composto por ripas de madeira de pinus medindo 2,5 cm x 5,0 cm posicionadas na vertical espaçadas de 60 cm, e uma camada de ar entre elas. Esse material será utilizado para distanciar os lambris, que formaram o revestimento externo, do elemento que compõe a parede. Foi utilizado tanto no modelo em CLT quanto no modelo em *Wood Frame*. Essa composição de materiais foi representada como um único material, e foram calculadas a densidade, a condutividade térmica, e o calor específico do material equivalente de forma análoga ao cálculo para a parede *Wood Frame*. Considerando, para finalidade do cálculo, um segmento com um metro de comprimento.

Condutividade térmica ( $\lambda$ )

Área da madeira ( $A_m$ )

$$A_m = 1 \text{ m} \times 0,05 \text{ m} = 0,05 \text{ m}^2$$

Área da camada de ar ( $A_i$ )

$$A_i = 1 \text{ m} \times 0,55 \text{ m} = 0,55 \text{ m}^2$$

$$R_m = 0,025 \text{ m} / 0,15 \text{ W/m}^{\circ}\text{K} = 0,1667 \text{ m}^2\text{K/W}$$

A resistência térmica da camada de ar foi definida de acordo com os dados da tabela B.1 do anexo B da norma ABNT NBR 15220 parte 2

$$R_{ar} = 0,16 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Substituindo os dados na equação 2 obtemos a resistência térmica do espaçador ripa e ar ( $R_{ra}$ )

$$R_{ra} = 0,1603 \text{ m}^2\text{K/W}$$

A resistência térmica deve ser convertida para a condutividade térmica pela equação 1

$$\lambda_{lwf} = 0,025 \text{ m} / 0,1603 \text{ m}^2\text{K/W} = 0,1560$$

Densidade ( $\rho$ )

A densidade do material equivalente foi calculada pela média ponderada em relação a área dos componentes. Foi adotado o valor médio do intervalo de densidade da madeira, apresentada na tabela B.3 do anexo B da norma ABNT NBR 15220 parte 2, a densidade do ar foi desprezada

$$\rho_{lwf} = (A_m \times \rho_m + A_{ar} \times \rho_{ar}) / (A_m + A_l) = 40 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Calor específico (c)

De acordo com a orientação da norma ABNT NBR 15220 parte 2 a capacidade térmica do ar pode ser desprezada, e conseqüentemente foi desprezado também o calor específico. Foi adotado o calor específico somente da madeira, utilizando dados da tabela B.3 do anexo B da norma ABNT NBR 15220 parte 2

$$c_{ra} = 1,34 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} = 1340 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$