



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

BEN-HUR JALES E SILVA JUNIOR

**Estruturas de madeira submetidas a condição de incêndio: Comparativo
normas NBR 7190 com Eurocode 5 1-2**

PALMAS

2019

BEN-HUR JALES E SILVA JUNIOR

**Estruturas de madeira submetidas a condição de incêndio: Comparativo
normas NBR 7190 com Eurocode 5 1-2**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel no Curso
Superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Adriano dos
Guimarães de Carvalho

**PALMAS
2019**

Jales e Silva Junior, Ben-Hur

Estruturas de madeira submetidas a condição de incêndio:
Comparativo entre normas NBR 7190 com Eurocode 5 1-2 / Ben-
Hur Jales e Silva Junior. – Palmas, 2019
63 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em
Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação do
Tocantins, Campus Palmas, 2019.

Orientador: Prof. DSc. Adriano dos Guimaraes de Carvalho

1. Incêndio 2. Estruturas de madeira 3. Dimensionamento I. Título

BEN-HUR JALES E SILVA JUNIOR

**ESTRUTURAS DE MADEIRA SUBMETIDAS A CONDIÇÃO DE INCÊNDIO:
Comparativo normas NBR 7190 com Eurocode 5 1-2**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Coordenação do curso de
Engenharia Civil Instituto Federal do
Tocantins - Campus Palmas, como
exigência à obtenção do grau em
Engenheiro Civil.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA AVALIADORA

Prof. Dr. Adriano dos Guimarães de Carvalho
Orientador

Prof. Dr. Moacyr Salles Neto

Prof. Ricardo Allen Filgueira Pontes

RESUMO

A madeira trata-se de um excelente material estrutural, sendo largamente utilizada em diversos países, devido suas propriedades mecânicas e potencial sustentável. Apesar de tratar-se de um material combustível, a madeira quando exposta ao fogo, conserva sua capacidade resistente por um dado período de tempo. Assim tornando possível que sejam elaboradas metodologias que descrevam o comportamento da estrutura em condições de incêndio, de modo a permitir seu dimensionamento. No Brasil o dimensionamento de peças estruturais submetidas a condições de incêndio é definido especificamente, para estruturas de aço, concreto e mistas. Todavia, até o momento não há normativa específica no Brasil que leve em consideração o dimensionamento de estruturas de madeira quando em situação de incêndio. Com a ausência de metodologias deste tema, relativas à madeira nas normatizações nacionais, se faz necessária a verificação das disparidades entre estas e as normatizações internacionais. Deste modo o presente trabalho visa análise teórica, comparando as metodologias de dimensionamento da norma nacional NBR 7190 e europeia EN1995 1-1 complementadas pela EN1995 1-2, e apontando os pontos divergentes. Assim observando a possibilidade da aplicação dos procedimentos de cálculo relativos ao incêndio do Eurocode 5 no Brasil, tendo em foco a segurança da estrutura.

Palavras chave: Incêndio. Estruturas de madeira. Dimensionamento. Eurocode 5.

ABSTRACT

Wood is an excellent structural material and is widely used in many countries due to its mechanical properties and sustainable potential. Although it is a combustible material, wood when exposed to fire retains its resilient capacity for a given period of time. Thus, making it possible to elaborate methodologies that describe the behavior of the structure in fire conditions, in order to allow its design. In Brazil the dimensioning of structural parts subjected to fire conditions is specifically defined for steel, concrete and mixed structures. However, to date there is no specific regulation in Brazil that takes into account the design of timber structures when in a fire situation. With the absence of methodologies related to wood in the national norms, it is necessary to verify the disparities between these and the international norms. Thus, the present work aims at theoretical analysis, comparing the design methodologies of the national standard NBR 7190 and European EN1995 1-1 complemented by EN1995 1-2, and pointing the divergent points. Thus, observing the possibility of applying the calculation procedures related to Eurocode 5 fire in Brazil, focusing on the safety of the structure.

Keywords: Fire. Timber Structures. Design. Eurocode 5.

Lista de Figuras

Figura 1 - Propriedades da Madeira.....	16
Figura 2 - Ortotropia da madeira	17
Figura 3 - Contrações e Distorções referentes aos anéis de crescimento	17
Figura 4 - Celulose	18
Figura 5 - Tipos de transmissão de calor	19
Figura 6 - Irradiação	19
Figura 7 - Mecanismos de Ignição	20
Figura 8 - Curva de Incêndio Padrão e Natural	22
Figura 9 - Camadas de Carbonização.....	24
Figura 10 - Zonas de Degradação Térmica.....	25
Figura 11 - Fluxo de Calor na Madeira.....	26
Figura 12 - Taxa de Carbonização Eurocode 5.....	27
Figura 13 - Definição da seção transversal residual e efetiva	27
Figura 14 - Seção Transversal Residual	28
Figura 15 - Tabela de (TRRF)	29
Figura 16 - Flexão Simples Reta	38
Figura 17 - Carbonização unidimensional seção longitudinal da peça.....	46
Figura 18 - Profundidade de Carbonização Imaginaria.....	47
Figura 19 - Definição da seção transversal residual e efetiva	48
Figura 20 - Relação linear de k_{mod}, f_i	50
Figura 21 – Verificação a Incêndio	54
Figura 22 - Fluxograma de Procedimentos	55

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Coeficiente $k_{mod,1}$ NBR 7190	31
Tabela 2 - Coeficiente $k_{mod,2}$ NBR 7190	32
Tabela 3 - Coeficiente $k_{mod,3}$ NBR 7190	32
Tabela 4 - Classes de umidade NBR 7190	33
Tabela 5 - Coeficiente γ_M NBR 7190	33
Tabela 6 - Classes de Resistencia NBR 7190.....	35
Tabela 7 - Coeficiente k_{mod} EN1995 1-1	41
Tabela 8 - Classe de Serviço EN1995 1-1	41
Tabela 9 - Coeficiente γ_M EN1995 1-1	42
Tabela 10 - Classes de Resistência EN1995 1-1	43
Tabela 11 - Taxa de Carbonização	48
Tabela 12 – Coeficiente K_{fi}	52

Lista de Quadros

Quadro 1 - Propriedades de resistência NBR 7190	34
Quadro 2 - Relações de resistência NBR 7190	36
Quadro 3 - Verificações de Solicitações NBR 7190	37
Quadro 4 - Propriedades de resistência EN1995 1-1	42
Quadro 5 - Verificações Solicitações EN1995 1-1	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 PROBLEMA DE PESQUISA	14
3 JUSTIFICATIVA.....	14
4 OBJETIVOS.....	15
4.1 Objetivo Geral	15
4.2 Objetivos Específicos	15
5 REVISÃO DE LITERATURA	16
5.1 Propriedades Físicas	16
5.2 Transmissão de Calor	18
5.3 Desenvolvimento do Incêndio	19
5.4 Curva de incêndio padrão	21
5.5 Degradação térmica da madeira	23
5.6 Taxa de carbonização.....	26
5.7 Tempo Requerido de Resistencia	28
5.8 Ações	29
5.8.1 Eurocode	29
5.8.2 NBR 6120	30
5.9 Dimensionamento NBR 7190:1997.....	30
5.9.1 Coeficiente de modificação.....	30
5.9.2 Módulo de elasticidade	33
5.9.3 Coeficientes de ponderação	33
5.9.4 Correção de Resistência.....	34
5.9.5 Resistência	34
5.9.6 Classe de resistência das madeiras	35
5.9.7 Relações de Resistência	35
5.9.8 Estado Limite Último	36
5.10 Dimensionamento EN1995 1-1:2004	40
5.10.1 Coeficiente de modificação.....	40
5.10.2 Coeficiente de ponderação	41
5.10.3 Resistência	42
5.10.4 Classe de resistência das madeiras	42
5.10.5 Estado Limite Último	44
5.11 Dimensionamento a Incêndio EN1995 1-2:2004.....	45
5.11.1 Valores de resistência de projeto e propriedades dos materiais.....	45
5.11.2 Determinação da profundidade de carbonização	45
5.11.3 Métodos de redução das propriedades mecânicas.....	48
5.11.4 Verificação de estabilidade do elemento	50
5.11.5 Métodos de verificação	52
6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	54
6.1 Metodologia de Pesquisa	55
6.2 Estudo Teórico	55

6.3 Referencial Normativo.....	56
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
7.1 Comparação de Dimensionamento Padrão	56
7.2 Comparação de Dimensionamento para Incêndio	59
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
8.1 Conclusões	60
8.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	61
9 REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais mais antigos utilizados pelo homem na construção civil (AMBROZEWICZ,2013), devido a fácil obtenção natural seu uso se popularizou nos primórdios da humanidade e segue sendo como um dos principais materiais utilizados por diversos países. O potencial produtivo de madeira no Brasil é notável, de acordo com Shingue (2018) o país tem aproximadamente 463 milhões de hectares de florestas, cerca de 54,4% do território nacional, e apenas 1,5% deles são compostos por áreas plantadas, criadas artificialmente para a pratica da silvicultura. Embora quando comparada ao total, a área produtiva, aparente ser pequena, tratam-se de 7,8 milhões de Hectares entre o sul e o norte do Brasil, possuindo uma produtividade equiparada a alguns dos países mais produtivos do mundo, em torno de 40 a 41 m³/ha ano.

Segundo Figueroa e De Moraes (2009) o uso intenso da madeira em países da Europa e na América do Norte se deve ao fato da grande industrialização e racionalização dos seus sistemas construtivos.

Trata-se de um excelente material estrutural que segundo Correia (2009) apresenta além de boas propriedades mecânicas, uma capacidade sustentável, quando em um contexto amplo do ciclo estrutural de sua produção, uso e degradação.

Ainda segundo Correia (2009) a madeira é um material relativamente leve, possuindo uma elevada resistência sendo a relação de peso específico e resistência superiores à do aço, possibilitando às estruturas a redução de cargas de peso próprio. Apesar disso de acordo com Figueroa e De Moraes (2009) seu uso como material de construção apresenta limitações, graças a preconceitos existentes com a madeira quando sob a ação do fogo, popularmente acredita-se que este material não apresente resistência nestas circunstâncias. É fato que:

A madeira é um material combustível e, como os demais materiais combustíveis sólidos, quando aquecida, produz gases combustíveis que, quando expostos ao calor, queimam e produzem chama. (FIGUEROA & MORAES 2009).

Entretanto não existem materiais na construção civil de cunho estrutural que não sofram com a ação do fogo (GALDINO, 2012), ao ponto que suas características mecânicas de resistência não reduzam.

Para o dimensionamento de uma estrutura, indiferente da escolha do material a ser adotado, o fator mais importante durante todo o processo de cálculo é a segurança, a garantia de que a estrutura apresentará estabilidade para seu uso.

Em situações de incêndio a NBR 14432 define, que a estrutura deverá ser capaz de garantir a segura evacuação dos ocupantes, a segurança das operações de combate ao incêndio e a minimização dos danos a edificações do entorno.

Para estruturas de madeira o fogo se demonstra um desafio, entretanto seu desempenho quando comparado com outros materiais da construção civil, como aço nestas mesmas condições, apresenta um comportamento interessante, resistindo por mais tempo antes da ruína da estrutura. A madeira por se tratar de um material combustível, quando queima produz gases que se expostos ao calor produzem chamas, que aquecem a porção ainda não atingida pelo calor, assim liberando mais gases, gerando uma reação em cadeia alimentando a combustão (FIGUEROA e DE MORAES, 2009).

Durante um incêndio o processo de degradação térmica ocasiona na redução gradual da seção transversal da peça substituída pelo material residual carbonizado, deste modo reduzindo proporcionalmente a suas propriedades mecânicas resistentes (PINTO; CALIL JUNIOR, 2006). Este é o problema para a estrutura, uma vez que a peça tenha sido projetada para resistir a determinados esforços solicitantes, ao sofrer uma redução da sua seção resistente pela ação do fogo, de modo que o esforço solicitante supere a capacidade resistente da peça, a estrutura vem a colapso.

É possível efetuar o dimensionamento da estrutura, visando a possibilidade de incêndio e seus efeitos sobre a estrutura, tendo peças com capacidade de resistência suficientes para resistir a ação do fogo por tempo suficiente para evitar o risco a vida. Deste modo a tolerância do material ao fogo, deve ser observada de modo a garantir que, mesmo com a redução de sua seção transversal, a peça ainda resista aos esforços solicitantes, por tempo suficiente para evacuação e segurança dos usuários da edificação.

De acordo com Figueroa & De Moraes (2009) a combustão da madeira gera uma camada de material carbonizado que por sua vez funciona como um

isolante térmico, retardando a transmissão do calor para outras camadas mais profundas da madeira, assim delongando a redução da seção transversal da peça em questão, consequentemente estendendo o tempo de resistência da peça aos esforços de solicitação durante o incêndio.

Deste modo peças estruturais que apresentem maiores dimensões em sua seção transversal, levam mais tempo para serem degradadas pela ação do fogo quando comparadas a peças de menor seção transversal. Uma vez que a peça seja dimensionada apenas para resistir aos esforços solicitantes, quando a carbonização atingir a seção resistente da peça, a mesma não será mais capaz de suportar os esforços para os quais foi calculada. Assim com o aumento da seção transversal do elemento, no dimensionamento, a carbonização levará um tempo maior para atingir a seção resistente responsável por suportar as solicitações de cálculo.

A norma em vigência para o dimensionamento de estruturas de madeira é a NBR 7190:1997, tendo por objetivo a fixação das condições gerais de dimensionamento de estruturas de madeira, entretanto a mesma não define parâmetros para o dimensionamento em condição de incêndio, nem traz em seus itens qualquer tópico relacionado ao assunto de incêndio ou fogo na estrutura.

A normatização nacional relativa a estruturas sob condições de incêndio é a NBR 14432:2001 que dita a exigência de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações. Porém esta não é responsável por definir as condições para o dimensionamento de estruturas de madeira em condição de incêndio.

Em contrapartida a norma europeia responsável pelo dimensionamento de estruturas de madeira Eurocode 5 traz em uma de suas partes, EN-1995 1-2 as especificações para condições de incêndio complementando o dimensionamento por duas abordagens, simplificada e avançada, sendo efetuadas análises separadas dos elementos, de partes da estrutura e da estrutura completa.

O presente estudo tem por objetivo a comparação das normativas nacionais e europeias referentes ao dimensionamento de estruturas de madeira quando submetidas a condição de incêndio.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

Em normas nacionais, o tema dimensionamento de estruturas para incêndio e resistência ao fogo, pode ser bem observado em estruturas que possuem uma maior representatividade no mercado, como estruturas de aço e concreto. Para projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio temos a NBR 15200:2012 e para projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio a NBR 14323:2013. Existe também a NBR 14432:2001 que fixa as exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações, porém esta não define metodologias de dimensionamento ou projeto, apenas parâmetros de resistência ao fogo para a estrutura, como o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), independente de seu material.

Observa-se na normativa nacional NBR7190 que data de 1993 a ausência de atualizações, em contrapartida na normativa europeia EN1995 1-1 e EN1995 1-2 que datam de 2004, passaram por atualização no ano de 2009.

Deste modo observa-se a ausência de material normativo nacional específico relativo à segurança do dimensionamento de estruturas de madeira quando submetido a condição de incêndio, deixando assim uma disparidade entre as normas nacionais e internacionais que toma como referência.

Quais as diferenças entre a norma nacional relativa ao dimensionamento de estruturas de madeira nacional NBR 7190 e europeia EN1995 1-1?

Na ausência de material normativo nacional específico ao tema, a norma nacional relativa ao dimensionamento de madeira estruturas de NBR 7190 apresenta elementos que levem em consideração a exposição da estrutura a incêndio?

3 JUSTIFICATIVA

A falta de elementos normativos referentes ao dimensionamento de estruturas de madeira para incêndio demonstra uma falha de segurança para edificações deste tipo. Em todo mundo, de acordo com os dados da *Comité Technique International de prevention et d'extinction de Feu* (CTIF) entres os anos de 1993 e 2015 foram registrados em 31 países analisados, com uma taxa de representatividade total de 14% da população mundial, 3,5 milhões de casos de

incêndio, ocorrendo apenas em 2015 18,5 mil mortes e 45 mil feridos por incêndios. Observando uma taxa média de morte por incêndio de 1,9/100 mil.hab, com base na média a CTIF estima que apenas em 2015 tenham ocorrido 136 mil mortes por incêndio no planeta.

Devido este cenário, a preocupação com a segurança da edificação mediante ao fogo é crescente, onde se faz necessário a atualização das normas nacionais referentes as metodologias de dimensionamento. Com a ausência da abordagem de verificações e dimensionamento de estruturas de madeira para incêndio nas normas brasileiras, se faz necessária a comparação entre a normativa nacional e internacional.

Diferentemente de outros estados do Brasil como Pará onde o uso de madeira se faz bastante expressivo, o Tocantins apresenta uma resistência ao uso da madeira como estrutura, “Isto se deve ao desconhecimento do material e à falta de projetos específicos e bem elaborados.” (GESUALDO, 2003, P.6). Esta limitação segundo Figueroa e De Moraes (2009), é oriunda da falta de conhecimento referente ao comportamento e resistência da madeira ao fogo. Deste modo a inserção de trabalhos técnicos que possam aplicar parâmetros de segurança, demonstrando metodologias para o dimensionamento de estruturas de madeira sob a ação do fogo, se mostra interessante.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Realizar a revisão de literatura sobre o dimensionamento de estruturas de madeira, utilizando as metodologias de cálculo para condição de incêndio, nacionais e europeias, das normas referentes ao assunto, NBR 7190:1997 e EN 1995 1-2, verificando o atendimento dos requisitos exigidos pela NBR 14432:2001 a fim de observar as possíveis deficiências resultantes da ausência de parâmetros nacionais de segurança contra o fogo.

4.2 Objetivos Específicos

- Definir a metodologia de dimensionamento de uma estrutura de madeira de acordo com os parâmetros de segurança, exigidos pela NBR 7190:1997.

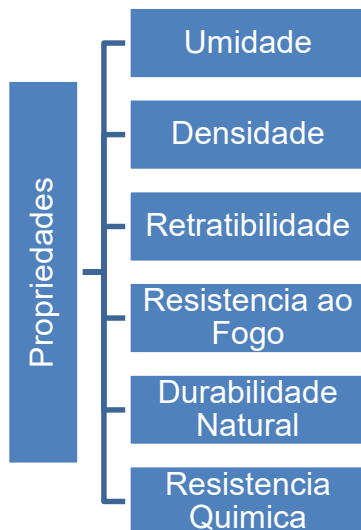
- Definir a metodologia de dimensionamento de uma estrutura de madeira de acordo com os parâmetros de segurança, exigidos pela EN 1995 1-1:2004.
- Definir a metodologia de dimensionamento de uma estrutura de madeira de acordo com os parâmetros de segurança relativos ao incêndio, exigidos pelo EN 1995 1-2:2009.
- Pontuar os requisitos exigidos pela NBR 14432:2001.

5 REVISÃO DE LITERATURA

5.1 Propriedades Físicas

A madeira como material, possui diversas propriedades físicas, para o campo da construção civil algumas se destacam como mais importantes (Figura 1) como aponta (SZÜCS, TEREZO, *et al.*, 2015).

Figura 1 - Propriedades da Madeira

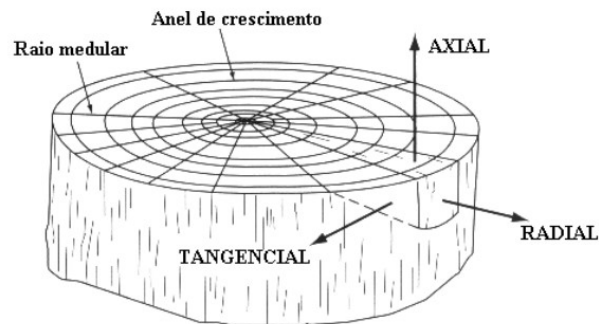


Fonte: Baseado em SZÜCS 2015

Ainda acordo com Szücs, *et al.* (2015) diversos fatores podem influenciar de forma significativa nas propriedades físicas da madeira alterando seu desempenho e resistência para o emprego estrutural. Fatores como espécie, fisiologia da árvore, anatomia do tecido lenhoso, geram variações nas características obtidas por meio de ensaios laboratoriais, sendo possíveis suas verificações por meio de modelos estatísticos.

Uma característica importante é que a madeira se trata de um material ortotrópico, esta, está relacionada à variação das propriedades da madeira segundo os sentidos anatômicos, sendo eles Tangencial, Longitudinal e Radial (Figura 2).

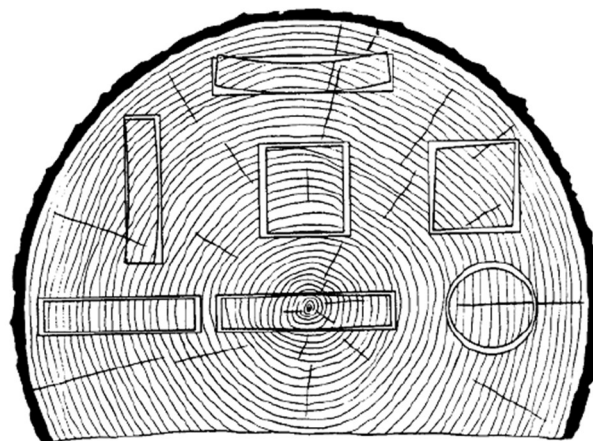
Figura 2 - Ortotropia da madeira



Fonte: PET/ECV, UFSC 2015

As propriedades da madeira podem se dividir em físicas e mecânicas, de modo que as propriedades físicas mais estudadas são a umidade, estabilidade dimensional (contrações e retrações), densidade básica e densidade aparente. De acordo com a NBR 7190:1997, ajustas as propriedades de rigidez e resistência da madeira estrutural.

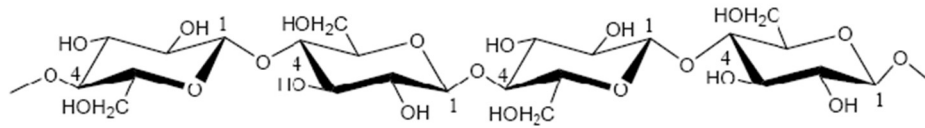
Figura 3 - Contrações e Distorções referentes aos anéis de crescimento



Fonte: Correia, 2009

As contrações da madeira variam de acordo com o direcionamento dos anéis de crescimento desta Figura 3, dependendo de sua orientação.

Figura 4 - Celulose



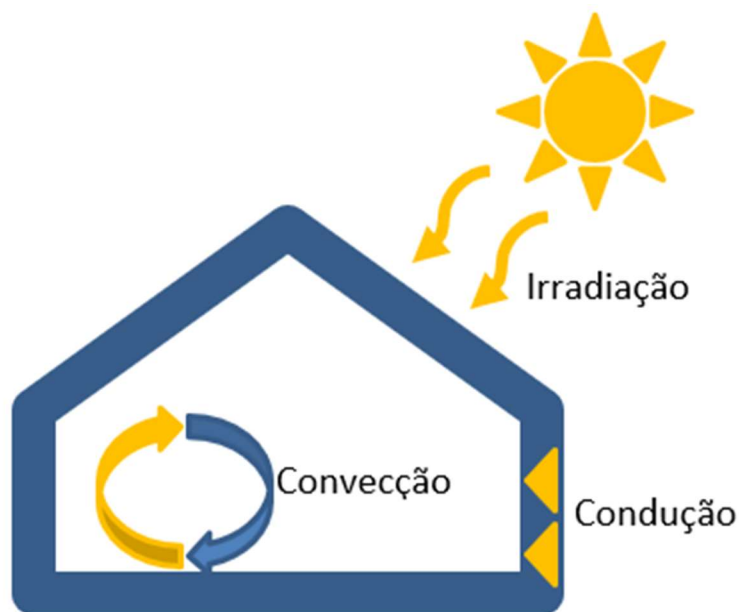
Fonte: Galdino, 2012

Em sua composição química a madeira possui como principais elementos o carbono (C), o hidrogênio (H), oxigênio (O) e o nitrogênio (N), estes elementos formam os principais componentes macromoleculares constituintes da parede celular dos quais se destacam a Celulose (Figura 4), Polioses (hemicelulose) e a Lignina. Estes componentes se fazem presentes em todas as madeiras (GALDINO, 2012).

5.2 Transmissão de Calor

A transmissão térmica pode ocorrer de três formas: Condução, Convecção e Radiação. Na condução segundo Silva, Vargas e Ono, (2010) temos que a transmissão do calor ocorre por meio de um material sólido, sendo o fluxo de transmissão de um ponto de maior calor para outro de menor calor (Figura 5). A convecção é tida pelo aquecimento dos gases provocando sua movimentação no ambiente, de forma que com seu aquecimento sua expansão gera um aumento de pressão fazendo com que se desloque para uma região superior deslocando assim os gases menos aquecidos.

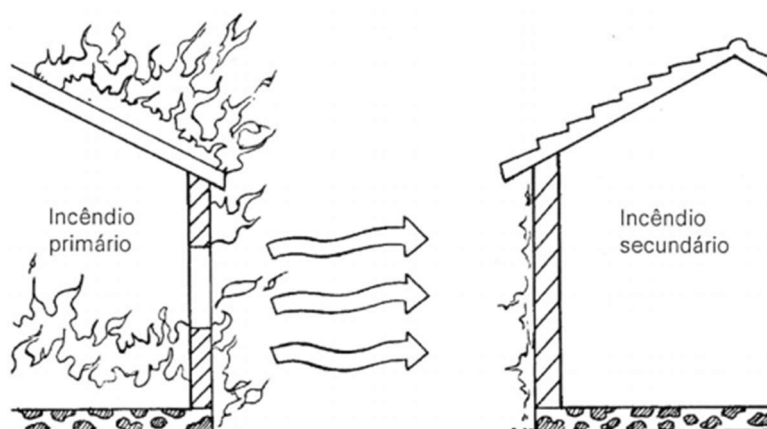
Figura 5 - Tipos de transmissão de calor



Fonte: Elaborada pelo Autor

Esta movimentação gera o contato entre os gases quentes e os elementos do ambiente, ocorrendo a transmissão de calor. Por fim a irradiação é descrita como a transmissão por ondas propagadas pelo ar ou vácuo de um corpo de elevada temperatura sobre outro de menor temperatura (Figura 6).

Figura 6 - Irradiação



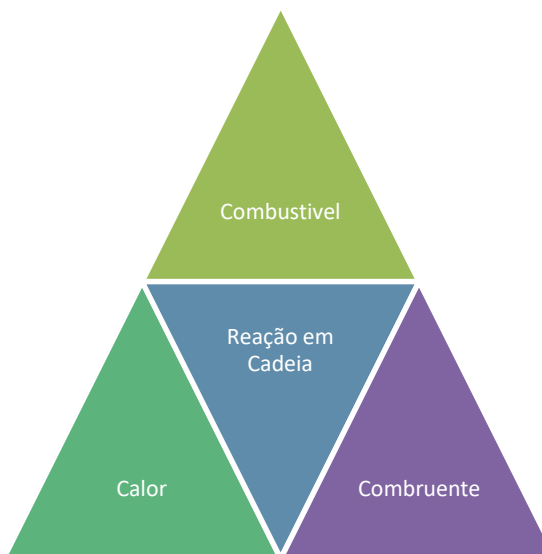
Fonte: Manual de combate a incêndio 2017

5.3 Desenvolvimento do Incêndio

Para que haja incêndio é necessário que ocorra a ignição do fogo, o processo de ignição se trata de uma sequência de fatores que sempre se repetem, o material sólido desprende gases e vapores inflamáveis devido ao aumento de

temperatura, estes se misturam com o oxigênio contido na atmosfera então basta apenas que uma fagulha acenda o fogo ou uma superfície com elevadíssima temperatura se aproxime do sólido e este entrará em combustão (SILVA, VARGAS e ONO, 2010). Deste modo observamos que o fogo como fenômeno transformador necessita de três elementos básicos vistos na Figura 7.

Figura 7 - Mecanismos de Ignição



Fonte: Adaptado de Anastácio.

A ignição dependerá da reação em cadeia presente com a transmissão de calor. Com o fogo agindo a reação se realimenta aquecendo mais materiais, liberando mais gases que se misturam o oxigênio.

A temperatura durante um incêndio pode variar, esta variação apresenta fases que podem ser observadas nas curvas de incêndio natural, Gráfico 1.

A evolução do incêndio em um ambiente pode ser representada por uma curva com três fases bem definidas: fase inicial de elevação progressiva da temperatura; fase de aquecimento brusco; fase de resfriamento e extinção, [...]. (Silva, 2010, p.16)

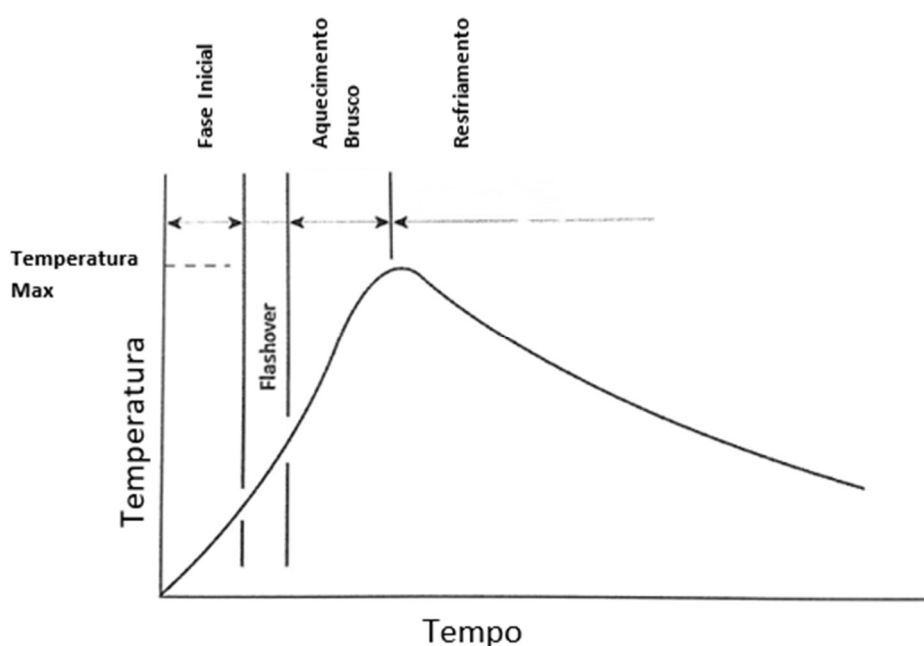
De acordo com Silva, Vargas e Ono (2010), a fase inicial se caracteriza pela ignição e aumento gradual da temperatura, entretanto em pontos diferentes do ambiente podem haver temperaturas variadas, devido a queima dos materiais e os mecanismos de transmissão variados. Esta fase não apresenta muito risco para a estrutura, porém existe durante esta, a geração de gases tóxicos ou asfixiante.

A fase de aquecimento brusco, é caracterizada pela elevação abrupta da temperatura e a combustão simultânea dos materiais contidos no ambiente ocorrendo o *flashover* (SILVA, VARGAS e ONO, 2010). O Fogo que antes se tratava

de um fenômeno local, agora se espalha para todo combustível presente no ambiente. Após o *flashover* a temperatura ocorre um alto aumento de temperatura, sendo a fase mais agressiva e danosa para a estrutura da edificação (D'AMBROS, 2018).

Com o consumo de todo material combustível, ocorre o declínio de temperatura no ambiente que antes estava em chamas, fazendo com que o incêndio entre em uma fase de esfriamento, até se extinguir por completo.

Gráfico 1 – Curva de Incêndio Natural



Fonte: Adaptado de D'AMBROS (2018)

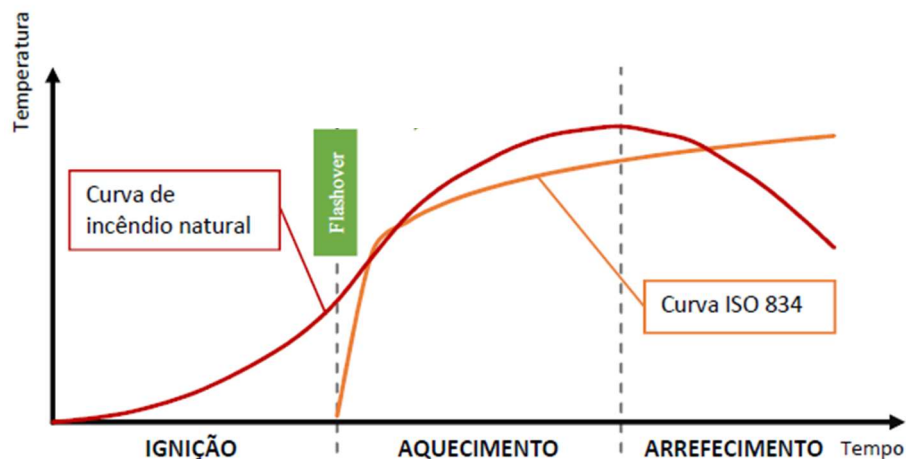
5.4 Curva de incêndio padrão

Curvas de incêndio padrão ou nominal, tratam-se de modelos idealizados da variação de temperatura de um ambiente durante um incêndio, estes foram elaborados para, na ausência de dados realísticos, serem utilizados em análises experimentais. São representações simplificadas do comportamento de um incêndio apresentando a variação de temperatura dos gases contidos no ambiente pelo tempo.

Possuem apenas um tramo crescente, não levando em consideração a carga de incêndio ou o grau de ventilação do ambiente, possuindo como principal

característica seu tempo de início após o flashover. São utilizadas para a padronização de métodos de ensaio, de forma a permitir a análise de comportamento de diferentes materiais em diferentes localidades, possibilitando a comparação dos resultados.

Figura 8 - Curva de Incêndio Padrão e Natural



Fonte: Amorim, 2018

As curvas mais conhecidas são a ASTM E-119, (*Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials*) elaborada em 1918, e a ISO-834, *Fire Resistance Tests – Elements of Building Construction*, de 1975.

A norma europeia EN 1991 1-2 (Actions on structures exposed to fire) de 2002, recomenda a utilização da curva padrão ISO-834 para a determinação de resistência ao fogo dos materiais construtivos, bem como as normas brasileiras NBR-5628 de 2001, que trata da determinação de resistência ao fogo dos componentes construtivos estruturais e a NBR-14432 (2001).

A NBR-14432 (2001) define o incêndio padrão como “a elevação padronizada de temperatura em função do tempo”. Esta, tem como curva padrão a ISO-834, definida pela seguinte expressão.

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (1)$$

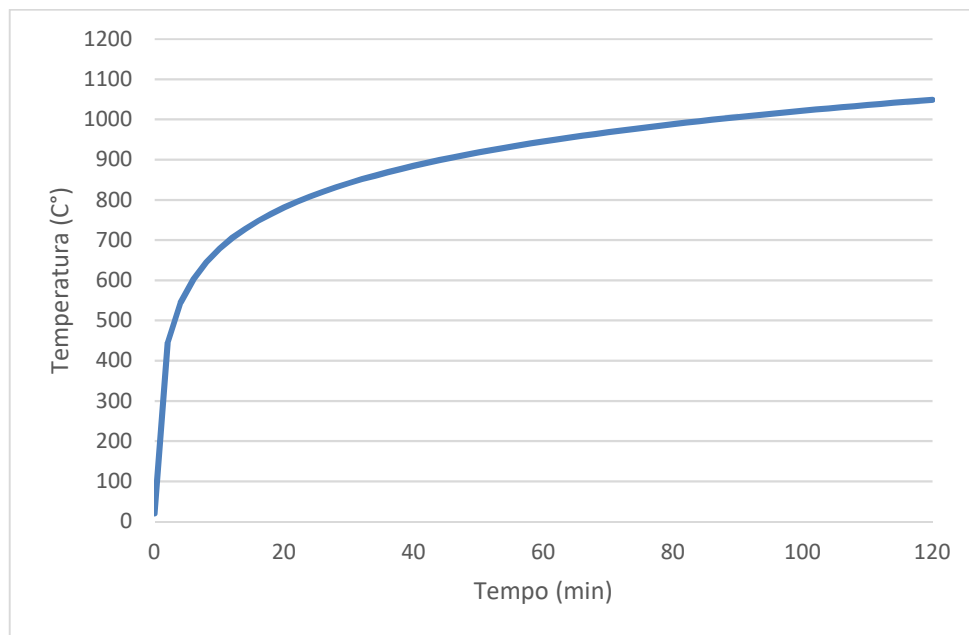
Onde:

t é o tempo em minutos;

θ_0 é a temperatura ambiente antes do início do aquecimento, geralmente considerada 20°C;

θ_g é a temperatura dos gases no instante t ;

Gráfico 2 - ISO-834



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Degradação térmica da madeira

De acordo com Pinto (2015) a madeira é um combustível sólido, tido como uma fonte de energia que passa por processos de gaseificação alimentando as reações de combustão.

Quando a madeira está submetida ao calor seus materiais constituintes sofrem uma despolimerização e a madeira é carbonizada, sofrendo alterações das propriedades físicas do material, variando de acordo com a intensidade do calor e o tempo de duração da aplicação deste calor. Segundo (PINTO, 2005) existem três variáveis importantes para o comportamento da madeira durante o processo de carbonização: temperatura, umidade e densidade.

A umidade segundo (PINTO, 2005), é responsável por elevar a temperatura necessária para a ignição do fogo, assim atrasando o processo de degradação da madeira, como explica:

O teor elevado de umidade dificulta o processo de combustão devido ao vapor de água resultante baixar a temperatura da área de combustão, resfriando a madeira, uma vez que ela cede energia para a evaporação da água e reduz a quantidade de oxigênio. Os espaços vazios são ocupados

com o vapor d'água, tornando necessária maior quantidade de calor para que ocorra a ignição. (PINTO, 2005, p.33)

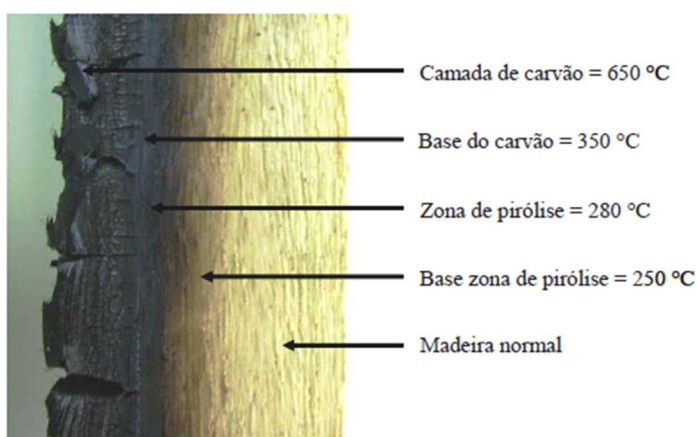
A baixa densidade influencia na ignição, facilitando-a, uma vez que uma menor densidade apresenta maior volume em relação ao peso, portanto há mais massa exposta (PINTO, 2005). O aumento da temperatura inicia um processo de degradação térmica do material.

Para a deterioração de cada elemento a temperatura varia de acordo com o tipo de madeira levando em conta diversos fatores como a diferença de espécies, dos anéis de crescimento e do teor de umidade da madeira. Pode-se dividir o processo de degradação térmica em etapas de acordo com a temperatura vista na Figura 9 (Figuerola; Moraes, 2009).

Abaixo da camada carbonizada encontra-se uma faixa de madeira que, embora não tenha sido exposta a temperaturas elevadas o bastante para promover a carbonização, é afetada pela temperatura por meio da redução das propriedades mecânicas resultante da degradação dos componentes químicos da madeira. (PINTO & CALIL JUNIOR, 2006, p. 135)

Portanto com o aumento da temperatura externa na madeira, as zonas se formam adentrando a madeira, Figura 9, onde observa-se uma degradação menos acentuada na região interna e uma degradação mais acentuada na região externa.

Figura 9 - Camadas de Carbonização

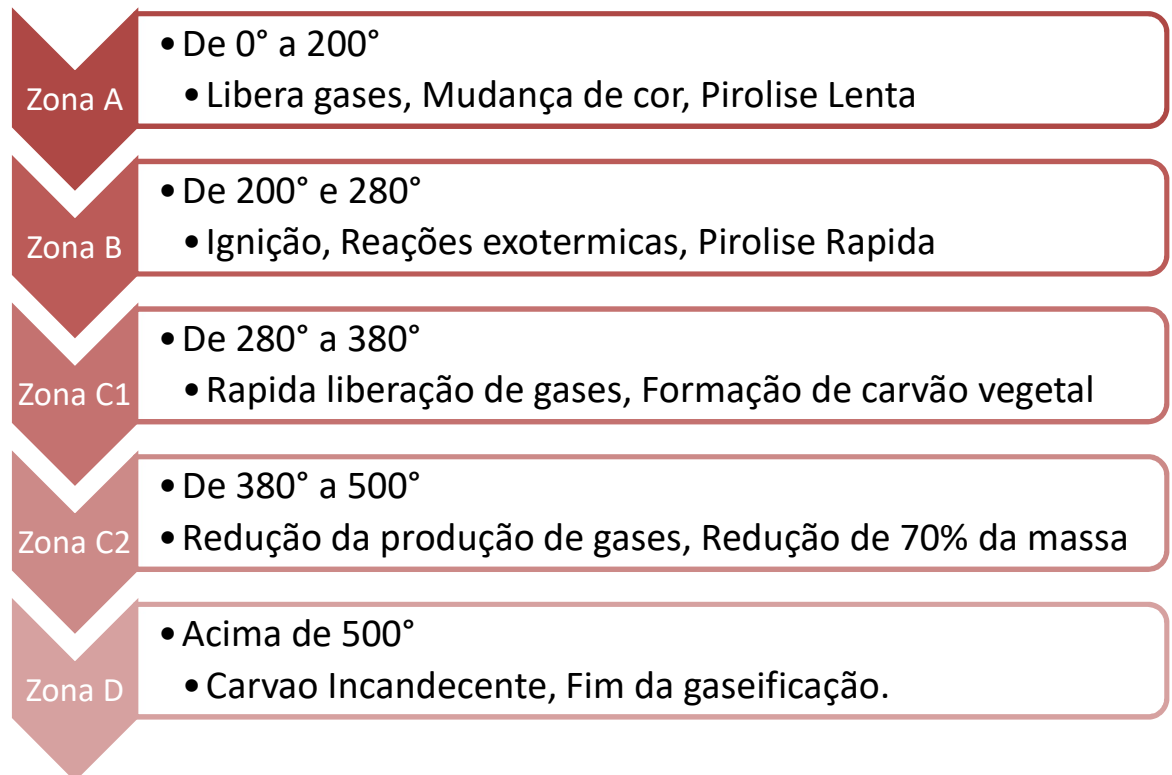


Fonte: Figuerola & Moraes 2009

Segundo Pinto & Calil Junior (2006) o processo de degradação térmico se divide em 4 zonas variando de acordo com a temperatura, porém Figuerola & Moraes (2009) afirmam a existência de 5 zonas, pois na faixa de temperatura de 280° a 500° a “zona C” ocorreria uma subdivisão entre 280° e 380° a qual

chamaremos de “C1” e 380° e 500° que chamaremos de “C2”. Estas zonas podem ser vistas no processo de carbonização com a temperatura penetrando a madeira em um fluxo de calor que tende a diminuir à medida que penetra a madeira (PINTO, 2005).

Figura 10 - Zonas de Degradação Térmica



Fonte: Elaborada pelo Autor

Zona A, Temperaturas até 200°: libera vapor de água e gases, mudança de cor, reação exotérmica de oxidação, pirolise lenta;

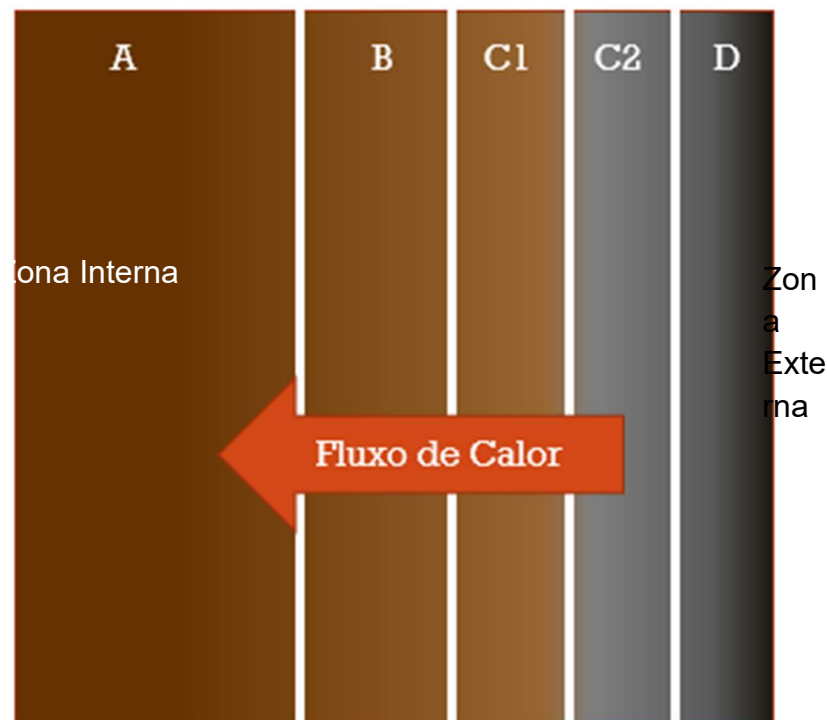
Zona B, Temperaturas entre 200° e 280°: ignição da madeira, aumento de reação química e liberação de gases, reações exotérmicas primárias sem inflamação, pirolise rápida;

Zona C1, temperaturas entre 280° e 380°: A rápida liberação dos gases com produção de ácidos acéticos e metanol pelo aquecimento da madeira gera um recobrimento sobre a madeira, de material residual carvão vegetal, fase exotérmica;

Zona C2, temperaturas entre 380° e 500°: com a falta de oxigenação redução da emissão de gases, produção de ácido acético metanol e substâncias gasosas condensáveis, 70% de perda de massa, fase exotérmica;

Fase D, temperatura maiores que 500°: finalizado processo de gaseificação, produto residual carvão, fase exotérmica;

Figura 11 - Fluxo de Calor na Madeira



Fonte: Elaborada pelo Autor

5.6 Taxa de carbonização

A velocidade da degradação varia de acordo com diversos fatores relacionado a madeira, tendo como resíduo o material carbonizado, a taxa relativa à dificuldade de carbonização do material, ou seja, a taxa que madeira se converte em carvão é denominada de taxa de carbonização. Esta é observada por indicar, mesmo que de maneira indireta, a resistência de peças estruturais ao fogo, uma vez que a resistência da peça reduz à medida que sua seção transversal diminui pela carbonização (Figueroa & Moraes, 2009).

A taxa de carbonização é obtida através de ensaios de incêndio com peças de tamanho real, uma vez que o efeito de carbonização não pode ser reproduzido em escala. Segundo Pinto (2005) os fatores que mais influenciam na taxa de carbonização são a umidade e densidade.

As taxas de carbonização mais utilizadas na América do Norte (EUA e Canadá) é de 0,60mm/m. As taxas de carbonização utilizadas pelo Eurocode podem ser observadas na Figura 12 variando pela densidade da madeira.

Especificação	Material	β_0 (mm/min.)	β_n (mm/min.)
coníferas	MLC, densidade $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.7
	Madeira serrada, densidade $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.8
folhosas	Madeira serrada ou MLC, densidade $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.7
	Madeira serrada ou MLC, densidade $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0.5	0.55

β_0 taxa de carbonização básica para exposição em uma dimensão;

β_n taxa de carbonização nominal, incluindo o efeito de arredondamento das quinas e aparecimento de frestas;

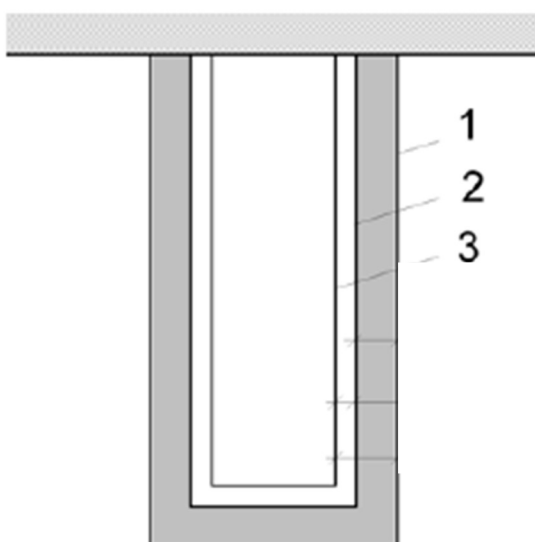
MLC Madeira Laminada Colada.

Figura 12 - Taxa de Carbonização Eurocode 5

Fonte: Pinto, 2005

De acordo com o Eurocode 5, a zona carbonizada da madeira pode ser definida pela taxa e carbonização, uma vez que se tenha o tempo de exposição ao fogo e as condições de exposição da peça.

Figura 13 - Definição da seção transversal residual e efetiva



Fonte: Adaptado EN 1995: 1-2, 2004

Na Figura 13 estão discriminadas as camadas de carbonização consideradas no cálculo do dimensionamento pelo método da seção reduzida, onde

em 1 temos a superfície inicial da peça, 2 temos a superfície da seção transversal residual e na 3 a superfície da seção transversal efetiva.

Das camadas calculadas apenas a seção transversal efetiva apresenta resistência mecânica.

Quando analisado em relação a fotografias de peças reais como na figura 14 submetidas a incêndio observamos que o comportamento apontado pela norma se confirma

Figura 14 - Seção Transversal Residual



Fonte: Pinto, 2005

5.7 Tempo Requerido de Resistencia

A NBR 14432 caracteriza o incêndio padronizado como a elevação de temperatura definida pela ISO834. A norma traz uma série de classificações de edificação quanto a suas dimensões e uso. Estas classificações definem o potencial calorífico da edificação no caso de um incêndio pela carga de incêndio q_{fi} dada em MJ/m².

Para a obtenção do tempo requerido de resistência ao fogo no estudo devem ser seguidas as diretrizes de enquadramento das edificações por ocupação e uso apresentadas no anexo B da norma, a classificação é dada por grupos e subgrupos classificados de A a J. Após a classificação da edificação obtém-se o TRRF no Anexo A, este depende da classe da edificação de acordo com sua altura variando de P1 a P5 e a classe de subsolo, caso a edificação possua, S1 e S2.

A NBR 14432:2001, define o (TRRF):

Figura 15 - Tabela de (TRRF)

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Profundidade do subsolo		Altura da edificação				
			Classe S ₂ h ₂ > 10 m	Classe S ₁ h ₂ ≤ 10 m	Classe P ₁ h ≤ 6 m	Classe P ₂ 6 m < h ≤ 12 m	Classe P ₃ 12 m < h ≤ 23 m	Classe P ₄ 23 m < h ≤ 30 m	Classe P ₅ h > 30 m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60 (30)	30	30	60	90	120
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120
C	Comercial varejista	C-1 a C-3	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60 (30)	30	30	60	90	120
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6 e F-8	90	60	60 (30)	60	60	90	120
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 a H-5	90	60	30	60	60	90	120
I	Industrial	I-1	90	60 (30)	30	30	60	90	120
		I-2	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
J	Depósitos	J-1	90	60 (30)	30	30	30	30	60
		J-2	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120

Fonte: NBR 14432, 2001.

5.8 Ações

5.8.1 Eurocode

Para a análise comparativa dos métodos de dimensionamento é necessário a comparação de obtenção de cargas, o Eurocode 1 trata-se da norma europeia responsável pela definição de tais cargas a serem consideradas no dimensionamento, também conhecida como EN 1991. Dividido em 4 partes, e suas subdivisões, sendo elas:

- EN 1991 1-1 Densidades, pesos próprios, cargas impostas sobre edificações;
- EN 1991 1-2 Ações em Estruturas Expostas a Incêndio;
- EN 1991 1-3 Cargas de Neve;
- EN 1991 1-4 Cargas de Vento;
- EN 1991 1-5 Cargas Térmicas;
- EN 1991 1-6 Cargas Durante a Execução;
- EN 1991 1-7 Cargas Acidentais;
- EN 1991 2 Carregamento de Tráfego em Pontes;
- EN 1991 3 Ações de Guindastes e Maquinários;
- EN 1991 4 Silos e Reservatórios.

Em estruturas submetidas a incêndio a EN 1991 1-2 descreve como devem ser as considerações de análise mecânica nas estruturas durante um incêndio.

Para as ações gerais, devem ser consideradas todas as cargas não favoráveis. As ações devem ser combinadas de acordo com a EN 1990:2002, para a situação de cargas acidentais.

5.8.2 NBR 6120

A NBR 6120:1980 fixa as condições exigíveis para a determinação dos valores de cargas que devem ser considerados para o dimensionamento de estruturas, definindo cargas permanentes e acidentais. Esta norma não apresenta definições relativas as combinações das cargas.

As combinações das ações aplicadas a estruturas de madeira são determinadas pela NBR 7190:1997. Nesta são definidas combinações para os estados limites últimos como: combinações ultimas normais, combinações ultimas especiais e combinações ultimas excepcionais.

As orientações sobre o emprego da correta combinação são determinadas pela NBR 8681:2003 que tem como foco as ações e segurança nas estruturas, de modo que esta determina que para casos de incêndio devem ser adotadas ações excepcionais.

5.9 Dimensionamento NBR 7190:1997

A norma brasileira apresenta as propriedades dos materiais distinguindo-os pelas características da madeira, levando em consideração suas propriedades de resistência a tração e a compressão, sua ortotropia de modo a classificar as propriedades paralelas e perpendiculares as fibras, bem como a classe de umidade. A aplicação das propriedades dos materiais se dá no cálculo das propriedades solicitantes de projeto, X_d de modo a aplicar as modificações e ponderações nas propriedades características do material, X_k de modo que temos o coeficiente de modificação k_{mod} , e o coeficiente de ponderação γ_w . A obtenção de X_d é dada por:

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_w} \cdot k_{mod} \quad (2)$$

5.9.1 Coeficiente de modificação

Os efeitos da umidade e da duração do carregamento são tidos como coeficientes modificadores denominados k_{mod} , onde $k_{mod,1}$ é o coeficiente parcial de modificação referente aos efeitos de duração do carregamento e $k_{mod,2}$ o coeficiente parcial de modificação relativo aos efeitos da umidade.

Os efeitos relativos à categoria das peças de madeira, devido a defeitos presentes nesta como nós ou excentricidades provenientes de empeno, são dados pelo coeficiente parcial de modificação $k_{mod,3}$.

Onde

$$k_{mod} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3} \quad (3)$$

A obtenção de $k_{mod,1}$ é dada partir da tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Coeficiente $k_{mod,1}$ NBR 7190

$k_{mod,1}$		
Classes de Carregamento	Tipos de madeira	
	Serrada; laminada colada; compensada	Recomposta
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Media duração	0,80	0,65
Curta duração	0,90	0,90
Instantânea	1,10	1,10

Fonte: Adaptado NBR 7190

A obtenção de $k_{mod,2}$ é dada partir da tabela 2 a seguir:

Tabela 2 - Coeficiente $k_{mod,2}$ NBR 7190

$k_{mod,2}$		
Classes de Umidade	Tipos de Madeira	
	Serrada; laminada colada; compensada	Recomposta
1 e 2	1,00	1,00
3 e 4	0,80	0,90

Fonte: Adaptado NBR 7190

A obtenção de $k_{mod,3}$ é dada partir da tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - Coeficiente $k_{mod,3}$ NBR 7190

$k_{mod,3}$		
Categoria da madeira	Tipos de Madeira	
	Dicotiledônias	Coníferas
1° Categoria	1,00	0,80
2° Categoria	0,80	

Fonte: Baseado NBR 7190

A classificação de umidade leva em consideração a umidade do ambiente U_{amb} é dada pela tabela 4 a seguir:

Tabela 4 - Classes de umidade NBR 7190

Classes de Umidade	U_{amb}	U_{eq}
1	$U_{amb} \leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$85\% < U_{amb}$	$\geq 25\%$

Fonte: Baseado NBR 7190

5.9.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade da madeira E_w é obtido através dos ensaios de compressão paralelo e perpendicular as fibras, obtendo-se os módulos de elasticidade E_{w0} e E_{w90} , respectivamente.

A norma prevê que na ausência de determinação experimental a relação dos módulos de elasticidade E_{w0} e E_{w90} é dada por:

$$E_{w90} = \frac{1}{20} E_{w0} \quad (4)$$

5.9.3 Coeficientes de ponderação

A fim de ponderar as cargas de forma a minora-las são adotados coeficientes de ponderação γ_w , estes variam dependendo do estado limite, se ultimo ou de utilização. No caso do estado limite último a ponderação se aplica com valores diferentes para a tração, compressão e cisalhamento, com os coeficientes γ_{wt} , γ_{wc} e γ_{wv} respectivamente. Os valores de ponderação podem ser observados na tabela 5 a seguir:

Tabela 5 - Coeficiente γ_M NBR 7190

Resistência	Estados limites	
	ELU	ELS
Tração	$\gamma_{wt} = 1,8$	$\gamma_{wc} = 1,0$
Compressão	$\gamma_{wc} = 1,4$	
Cisalhamento	$\gamma_{wv} = 1,8$	

Fonte: Baseado NBR 7190

5.9.4 Correção de Resistência

A norma traz como parâmetro de referência a classe de umidade 1 de $U_{eq} = 12\%$, devido a variação de propriedades da madeira em relação a umidade, sendo necessária a correção dos parâmetros de resistência de madeiras que apresentem os teores de umidade nos intervalos de 10% a 20%. As correções devem ser calculadas para a resistência e rigidez como:

Para resistência,

$$F_{12} = F_{u\%} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (5)$$

Onde,

F_{12} é a resistência da madeira a $U_{eq} = 12\%$;

$F_{u\%}$ é a resistência da madeira analisada;

$U\%$ é a umidade da madeira analisada.

5.9.5 Resistência

As propriedades de resistência a compressão e tração da madeira são obtidas através de ensaios, com suas nomenclaturas apresentadas no quadro 1 a seguir:

Quadro 1 - Propriedades de resistência NBR 7190

Resistencia	Paralelo as fibras	Perpendicular as fibras
Compressão	$f_{wc,0}$ ou $f_{c,0}$	$f_{wc,90}$ ou $f_{c,90}$
Tração	$f_{wt,0}$ ou $f_{t,0}$	0
Cisalhamento	$f_{wv,0}$ ou $f_{v,0}$	$f_{wv,90}$ ou $f_{v,90}$

Fonte: Baseado NBR 7190

De acordo com a norma são desprezados, para fins de projeto, os valores de resistência a tração paralelos as fibras.

No caso de espécies de madeira pouco conhecidas a norma traz em seu anexo B as diretrizes para a caracterização de suas propriedades por meio de ensaios padronizados.

5.9.6 Classe de resistência das madeiras

A NBR 7190 classifica as madeiras por suas resistências características, separando-as em dois grupos: coníferas e dicotiledôneas. Os valores característicos podem ser observados na tabela 6 a seguir:

Tabela 6 - Classes de Resistencia NBR 7190

Coníferas					
Classes	$f_{c,0k}$ (MPa)	$f_{v,0k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m ³)	ρ_{apar} (kg/m ³)
C20	20	4	3500	400	500
C25	25	5	8500	450	550
C30	30	6	14500	500	600
Dicotiledôneas					
Classes	$f_{c,0k}$ (MPa)	$f_{v,0k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m ³)	ρ_{apar} (kg/m ³)
C20	20	4	9500	500	650
C30	30	5	14500	650	800
C40	40	6	19500	750	950
C60	60	8	24500	800	1000

Fonte: Adaptado NBR 7190

5.9.7 Relações de Resistência

A norma permite a adoção dos valores tabelados, pela ausência das demais resistências, admitindo que as demais resistências sejam obtidas por meio das relações com $f_{c,0k}$, de acordo com a quadro 2 a seguir:

Quadro 2 - Relações de resistência NBR 7190

Relações		
Resistencia	Coníferas	Dicotiledôneas
$f_{v,0k}$	$0,15 \cdot f_{c,0k}$	$0,12 \cdot f_{c,0k}$
$f_{t,0k}$	$\frac{f_{c,0k}}{0,77}$	
$f_{tM,k}$	$\frac{f_{c,0k}}{0,77}$	
$f_{c,90k}$	$0,25 \cdot f_{c,0k}$	
$f_{e,0k}$	$f_{c,0k}$	
$f_{e,90k}$	$0,25 \cdot f_{c,0k}$	

Fonte: Baseado NBR 7190

5.9.8 Estado Limite Último

Os esforços de solicitação precisam atender verificações de condições de segurança que relacionam a solicitação e a resistência, conforme apresentados no quadro 3 a seguir:

Quadro 3 - Verificações de Solicitações NBR 7190

Solicitações	Verificações
Tração	$\sigma_{td} \leq f_{td}$
Compressão	$\sigma_{c0,d} \leq f_{c0,d}$
	$\sigma_{c90,d} \leq f_{c90,d}$
Flexão Simples Reta ⁽¹⁾	$\sigma_{t2d} \leq f_{td}$ e $\sigma_{c1,d} \leq f_{c0,d}$
Flexão Simples Obliqua ⁽²⁾	$\frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{wd}} + K_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{wd}} \leq 1$ e $K_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{wd}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{wd}} \leq 1$
Flexotração ⁽³⁾	$\frac{\sigma_{Nt,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{t0,d}} + K_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{t0,d}} \leq 1$ e $\frac{\sigma_{Nt,d}}{f_{t0,d}} + K_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{t0,d}} \leq 1$
Flexocompressão ⁽⁴⁾	$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + K_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1$ e $\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + K_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1$
Cisalhamento ⁽⁵⁾	$\tau_d \leq f_{v0,d}$
Obs.: ¹ - Descrição item 7.2.8.1 ² - Descrição item 7.2.8.2 ³ - Descrição item 7.2.8.3 ⁴ - Descrição item 7.2.8.4 ⁵ - Descrição item 7.2.8.5	

Fonte: Baseado NBR 7190

7.2.8.1 Flexão simples reta

Para a flexão simples reta os valores de σ_{t2d} e $\sigma_{c1,d}$, tratam-se das tensões atuantes de cálculo nas bordas mais tracionada e comprimida obtidas pelo seguinte cálculo:

$$\sigma_{t1d} = \frac{Md}{W_t} \quad \text{e} \quad \sigma_{c1,d} = \frac{Md}{W_c} \quad (6)$$

Onde,

M_d é o momento fletor de cálculo;

W_t e W_c são os módulos de cálculo, estes são obtidos através das equações a seguir:

$$W_c = \frac{I}{y_{c1}} \quad \text{e} \quad W_t = \frac{I}{y_{t1}}; \quad (7)$$

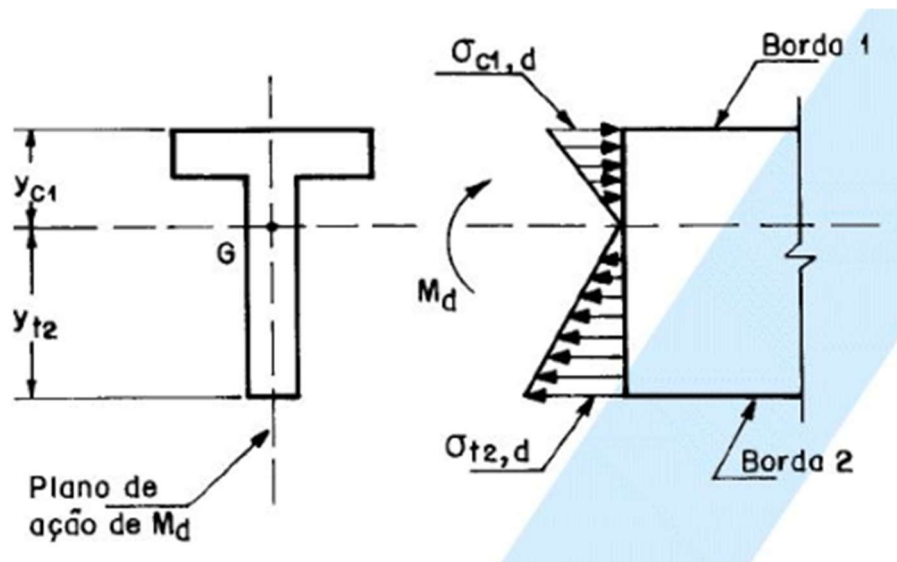
Onde,

I é o momento de inércia da peça

y_{c1} é a distância da fibra mais comprimida ao centro de gravidade da peça;

y_{t1} é a distância da fibra mais tracionada ao centro de gravidade da peça;

Figura 16 - Flexão Simples Reta



Fonte: NBR 7190

7.2.8.2 Flexão simples oblíqua

Para a flexão simples oblíqua temos:

$\sigma_{Mx,d}$ e $\sigma_{My,d}$, tensões máximas devido as componentes de flexão atuantes.

K_M é o coeficiente de correção sendo 0,5 para seções retangulares e 1 para outras seções.

7.2.8.3 Flexotração

Para a Flexotração temos:

$\sigma_{Nt,d}$ é o valor de cálculo da parcela de tensão atuante referente a tração

K_M é o coeficiente de correção sendo 0,5 para seções retangulares e 1 para outras seções.

7.2.8.4 Flexocompressão

Para a Flexocompressão temos que:

$\sigma_{Nc,d}$ é o valor de cálculo da parcela de tensão atuante referente a compressão.

K_M é o coeficiente de correção sendo 0,5 para seções retangulares e 1 para outras seções.

7.2.8.5 Cisalhamento

Para o cisalhamento a obtenção da máxima tensão de cisalhamento temos:

$$\tau_d = \frac{3.V_d}{2 b.h} \quad (8)$$

Onde,

τ_d é a máxima tensão de cisalhamento;

V_d é o esforço cortante de cálculo;

b é a largura da seção transversal da peça;

h é a altura da seção transversal da peça;

Para o correto dimensionamento a obtenção da área da peça deve ser calculada respeitando as verificações.

5.10 Dimensionamento EN1995 1-1:2004

A EN1995 1-1 apresenta as propriedades dos materiais distinguindo-as pelas características da madeira, levando em consideração suas propriedades de resistência a tração e a compressão, sua Ortotropia de modo a classificar as propriedades paralelas as fibras e perpendiculares as fibras, bem como correspondentes a classe de umidade.

A aplicação das propriedades dos materiais se dá no cálculo das propriedades solicitantes de projeto, X_d de modo a aplicar as modificações e ponderações nas propriedades características do material, X_k de modo a obter o coeficiente de modificação k_{mod} , e o coeficiente de ponderação γ_M . A obtenção de X_d é dada por:

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_M} \cdot k_{mod} \quad (9)$$

5.10.1 Coeficiente de modificação

Os efeitos da umidade e da duração do carregamento são tidos como coeficientes modificadores denominados k_{mod} que diferentemente da norma brasileira não apresentam coeficientes parciais de modificação. A norma europeia traz uma uniformização dos coeficientes de modificação para o caso de peças que possuam dois tipos distintos de madeira dado por:

$$k_{mod} = \sqrt{k_{mod,1} \cdot k_{mod,2}} \quad (10)$$

Onde,

$k_{mod,1}$ e $k_{mod,2}$ são os coeficientes de modificação dos dois tipos de madeira.

O coeficiente de modificação k_{mod} na norma europeia varia de acordo com o tipo de madeira, o tempo de duração da ação e a classe de serviço, sendo obtido pela tabela 7 a seguir:

Tabela 7 - Coeficiente k_{mod} EN1995 1-1

k_{mod}					
Classes de Carregamento	Tipos de madeira				
	Sólida; Laminada colada; Compensada			OSB	
Classe de serviço	1	2	3	1	2
Permanente	0,60		0,50	0,30	0,30
Longa duração	0,70		0,55	0,45	0,40
Media duração	0,80		0,65	0,65	0,55
Curta duração	0,90		0,70	0,85	0,70
Instantânea	1,10		0,90	1,10	0,90

Fonte: Adaptado de EN1995 1-1

A classe de serviço varia de acordo com a umidade do ambiente U_{amb} , as classes de serviços estão contidas na tabela 8 a seguir:

Tabela 8 - Classe de Serviço EN1995 1-1

Classes de serviço	U_{amb}
1	$U_{amb} \leq 65\%$
2	$65\% < U_{amb} \leq 85\%$
3	$85\% < U_{amb}$

Fonte: Baseado em EN1995 1-1

5.10.2 Coeficiente de ponderação

O coeficiente de ponderação apresentado no Eurocode diferentemente da norma brasileira não se diferencia pelo tipo de resistência, seja por tração, compressão ou cisalhamento, mas pelo material e pela combinação como visto na tabela 9 a seguir:

Tabela 9 - Coeficiente γ_M EN1995 1-1

Tipo de Madeira	Combinações	
	Fundamental	Acidental
Sólida	$\gamma_{Mt} = 1,3$	$\gamma_M = 1,0$
Laminada colada	$\gamma_{Mt} = 1,25$	
LVL, OSB, compensada	$\gamma_{Mt} = 1,2$	
Recompostas	$\gamma_{Mt} = 1,3$	

Fonte: Adaptado de EN1995 1-1

5.10.3 Resistência

As propriedades de resistência a compressão, tração e cisalhamento da madeira são obtidas através de ensaios, sendo:

Quadro 4 - Propriedades de resistência EN1995 1-1

Resistencia	Paralelo as fibras	Perpendicular as fibras
Compressão	$f_{c,0}$	$f_{c,90}$
Tração	$f_{t,0}$	$f_{t,90}$
Cisalhamento	$f_{v,0}$	$f_{v,90}$

Fonte: Baseado EN1995 1-1

5.10.4 Classe de resistência das madeiras

A classificação de resistência de madeiras maciças é dada pela EN338, apresentado na tabela a seguir 10 a seguir:

Tabela 10 - Classes de Resistência EN1995 1-1

Coníferas								
Classes	$f_{m,0k}$ (MPa)	$f_{t,0k}$ (MPa)	$f_{c,0k}$ (MPa)	$f_{c,90k}$ (MPa)	$f_{v,k}$ (MPa)	$E_{0,mean}$ (GPa)	ρ_k (kg/m ³)	G_{mean} (GPa)
C14	14	8	16	2	3	7	290	0,44
C16	16	10	17	2,2	3,2	8	310	0,5
C18	18	11	18	2,2	3,4	9	320	0,56
C20	20	12	19	2,3	3,6	9,5	330	0,59
C22	22	13	20	2,4	3,8	10	340	0,63
C24	24	14	21	2,5	4	11	350	0,69
C27	27	16	22	2,6	4	11,5	370	0,72
C30	30	18	23	2,7	4	12	380	0,75
C35	35	21	25	2,8	4	13	400	0,81
C40	40	24	26	2,9	4	14	420	0,88
C45	45	27	27	3,1	4	15	440	0,94
C50	50	30	29	3,2	4	16	460	1,00
Folhosas								
Classes	$f_{m,0k}$ (MPa)	$f_{t,0k}$ (MPa)	$f_{c,0k}$ (MPa)	$f_{c,90k}$ (MPa)	$f_{v,k}$ (MPa)	$E_{0,mean}$ (GPa)	ρ_k (kg/m ³)	G_{mean} (GPa)
D18	18	11	18	7,5	3,4	9,5	475	0,59
D14	24	14	21	7,8	4	10	485	0,62
D30	30	18	23	8	4	11	530	0,69
D35	35	21	25	8,1	4	12	540	0,75
D40	40	24	26	8,3	4	13	550	0,81
D50	50	30	29	9,3	4	14	620	0,88
D60	60	36	32	10,5	4,5	17	700	1,06
D70	70	42	34	13,5	5	20	900	1,25

Fonte: Baseado EN3381-1

Por fornecer mais informações relativas à resistência da madeira não é necessária a apresentação de relações entre elas como no caso da norma brasileira.

5.10.5 Estado Limite Último

Os esforços de solicitação precisam atender verificações de condições de segurança que relacionam a solicitação e a resistência, conforme apresentados no quadro 5 a seguir:

Quadro 5 - Verificações Solicitações EN1995 1-1

Solicitações	Verificações
Tração	$\sigma_{td} \leq f_{td}$
Compressão ⁽¹⁾	$\sigma_{c0,d} \leq f_{c0,d}$
	$\sigma_{c90,d} \leq K_{c90} \cdot f_{c90,d}$
Flexão ⁽²⁾	$\frac{\sigma_{my,d}}{f_{my,d}} + K_M \frac{\sigma_{mz,d}}{f_{mz,d}} \leq 1$ e $K_M \frac{\sigma_{my,d}}{f_{my,d}} + \frac{\sigma_{mz,d}}{f_{mz,d}} \leq 1$
Cisalhamento	$\tau_d \leq f_{v,d}$
Torção ⁽³⁾	$\tau_{tor,d} \leq k_{forma} \cdot f_{v,d}$
Flexotração ⁽²⁾	$\frac{\sigma_{t0,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{my,d}}{f_{my,d}} + K_M \frac{\sigma_{mz,d}}{f_{mz,d}} \leq 1$ e $\frac{\sigma_{t0,d}}{f_{t0,d}} + K_M \frac{\sigma_{my,d}}{f_{my,d}} + \frac{\sigma_{mz,d}}{f_{mz,d}} \leq 1$
Flexocompressão ⁽²⁾	$\left(\frac{\sigma_{c0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{my,d}} + K_M \frac{\sigma_{Mz,d}}{f_{mz,d}} \leq 1$ e $\left(\frac{\sigma_{c0,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + K_M \frac{\sigma_{my,d}}{f_{my,d}} + \frac{\sigma_{mz,d}}{f_{mz,d}} \leq 1$
Obs.: ¹ Descrição item 7.3.5.1 ² Descrição item 7.3.5.2 ³ Descrição item 7.3.5.3	

Fonte: Baseado EN1995 1-1

7.3.5.1 Compressão

Para a compressão perpendicular as fibras $\sigma_{c90,d}$, temos que:

K_{c90} é determinado levando em consideração a configuração das cargas, para simplificação este é adotado com 1,00.

7.3.5.2 Flexão; Flexotração e Flexocompressão

Para a Flexão; Flexotração e Flexocompressão temos que:

$\sigma_{my,d}$ e $\sigma_{mz,d}$, são as tensões máximas devido as componentes de flexão atuantes.

K_M é o coeficiente de correção sendo 0,7 para seções retangulares e 1 para outras seções.

7.3.5.3 Torção

k_{forma} é o coeficiente que leva em relação a geometria do elemento, para seções retangulares k_{forma} , deve ter o valor máximo de 2,00 sendo calculado por:

$$k_{forma} = 1 + 0,15 \cdot \frac{b}{h} \quad (11)$$

Onde,

b é o valor da menor dimensão da seção transversal do elemento;

h é o valor da maior dimensão da seção transversal do elemento.

5.11 Dimensionamento a Incêndio EN1995 1-2:2004

5.11.1 Valores de resistência de projeto e propriedades dos materiais

De acordo com o Eurocode 1 EN 1991 1-2, referente ao comportamento de cargas nas estruturas em situações de incêndio, os elementos estruturais devem passar por uma redução de suas resistências características devido a ação da temperatura nos materiais, essa redução está atrelada a como o material se comporta à elevadas temperaturas. Além da resistência as propriedades de rigidez do material podem sofrer alterações devido a ação do fogo.

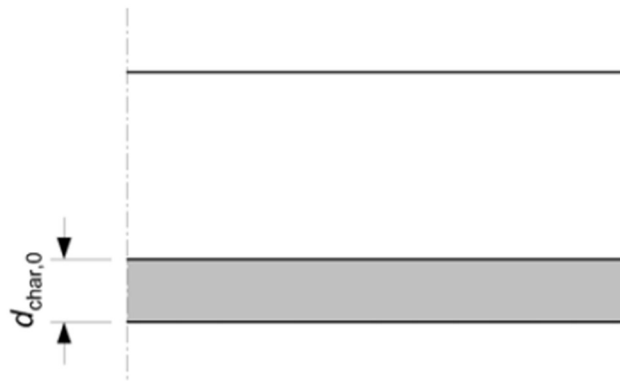
5.11.2 Determinação da profundidade de carbonização

Para o dimensionamento de elementos lineares como pilares para as condições de incêndio, a EN1995 1-2 caracteriza como necessária a obtenção das profundidades de carbonização.

No caso do estudo serão analisadas peças sem materiais de proteção passiva mecânica contra incêndios, as metodologias de cálculo apresentadas são aplicadas para o comportamento de incêndios padrão, respeitando a curva de incêndio padrão ISO-834. A norma traz o cálculo da profundidade de carbonização para três casos:

- Superfícies sem proteção durante todo tempo do incêndio;
- Superfícies parcialmente protegidas antes da falha da proteção;
- Superfícies parcialmente protegidas quando expostas ao fogo após a falha da proteção.

Figura 17 - Carbonização unidimensional seção longitudinal da peça



Fonte: EN 1995: 1-2, 2004

Para as superfícies sem proteção a obtenção da taxa de carbonização se dá por:

$$d_{char, 0} = \beta_0 * t \quad (12)$$

Onde,

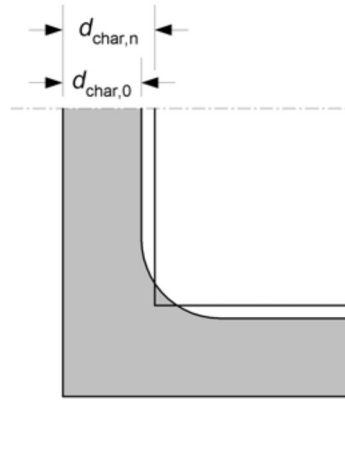
d_{char} é o valor da medida de profundidade de carbonização;

β_0 é a taxa de Carbonização;

t é o tempo de exposição ao fogo.

Porém d_{char} não leva em consideração o efeito de arredondamento da peça, sendo necessária a utilização da taxa de carbonização imaginária β_n , que leva em consideração este efeito de modo que se tem:

Figura 18 - Profundidade de Carbonização Imaginaria



Fonte: EN 1995: 1-2, 2004

$$d_{char,n} = \beta_n * t \quad (13)$$

Onde,

$d_{char,n}$ é o valor da medida de profundidade de carbonização imaginaria;

β_n é a taxa de Carbonização imaginaria;

t é o tempo de exposição ao fogo;

A taxa de carbonização deve ser aplicada quando a menor dimensão da seção transversal for menor que b_{min} .

Para $d_{char,0} \geq 13mm$

$$b_{min} = 2 \cdot d_{char,0} + 80 \quad (14)$$

Para $d_{char,0} < 13mm$

$$b_{min} = 8,15 \cdot d_{char,0} \quad (15)$$

As taxas de carbonização β_n e β_0 podem ser obtidas na tabela 11 a seguir:

Tabela 11 - Taxa de Carbonização

Especificação	Tipo de Madeira	β_0	β_n
Coníferas	Laminada Colada, densidade ≥ 290 kg/cm ²	0,65	0,7
	Serrada, densidade ≥ 290 kg/cm ²	0,65	0,8
Folhosas	Serrada; Laminada Colada, densidade ≥ 290 kg/cm ²	0,65	0,7
	Serrada; Laminada Colada, densidade ≥ 450 kg/cm ²	0,5	0,55

Fonte: Adaptado de Pinto 2004

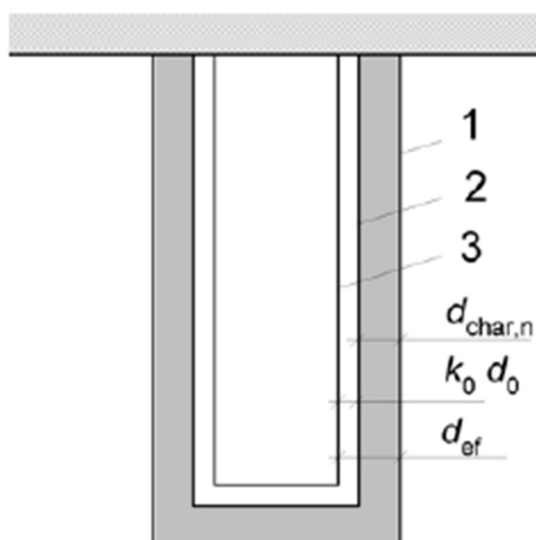
5.11.3 Métodos de redução das propriedades mecânicas

Após obtidas as profundidades de carbonização a norma apresenta duas metodologias de redução das propriedades mecânicas do elemento, o método de redução da seção transversal e o método de redução das propriedades.

5.11.3.1 Redução a seção transversal

Método de redução da seção transversal determina a perda das propriedades pela redução volumétrica da seção resistente, o cálculo leva em consideração a taxa de carbonização e o tempo de exposição da peça ao incêndio.

Figura 19 - Definição da seção transversal residual e efetiva



Fonte: EN 1995: 1-2, 2004

Inicialmente deve-se calcular a profundidade de carbonização efetiva d_{ef} , calculado da seguinte maneira:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 \quad (16)$$

Onde,

d_{ef} é o valor da profundidade de carbonização efetiva;

$d_{char,n}$ é o valor da profundidade de carbonização ideal;

k_0 é o coeficiente de proteção de peça em relação ao tempo;

d_0 é a profundidade da camada de rigidez e resistência nulas, assume-se o valor de 7mm.

Para peças sem proteção ao fogo a determinação de k_0 é dada por:

Para $t < 20\text{min}$;

$$k_0 = \frac{t}{20} \quad (17)$$

Para $t > 20\text{min}$;

$$k_0 = 1 \quad (18)$$

Onde,

t é o tempo de exposição ao fogo.

7.5.3.2 O método de redução das propriedades

Este leva em consideração a perda da capacidade resistente da peça pela ação do fogo, considerando a seção transversal residual A_r calculada a partir da profundidade de carbonização. A redução da capacidade resistente da peça se dá pelo cálculo do $k_{mod,fi}$, dado por:

Para resistência a flexão:

$$k_{mod,fi} = 1 - \frac{1}{200} \cdot \frac{P}{A_r}; \quad (19)$$

Para a resistência a compressão:

$$k_{mod,fi} = 1 - \frac{1}{125} \cdot \frac{P}{A_r}; \quad (20)$$

Para a resistência a tração e modulo de elasticidade:

$$k_{mod,fi} = 1 - \frac{1}{330} \cdot \frac{P}{A_r}; \quad (21)$$

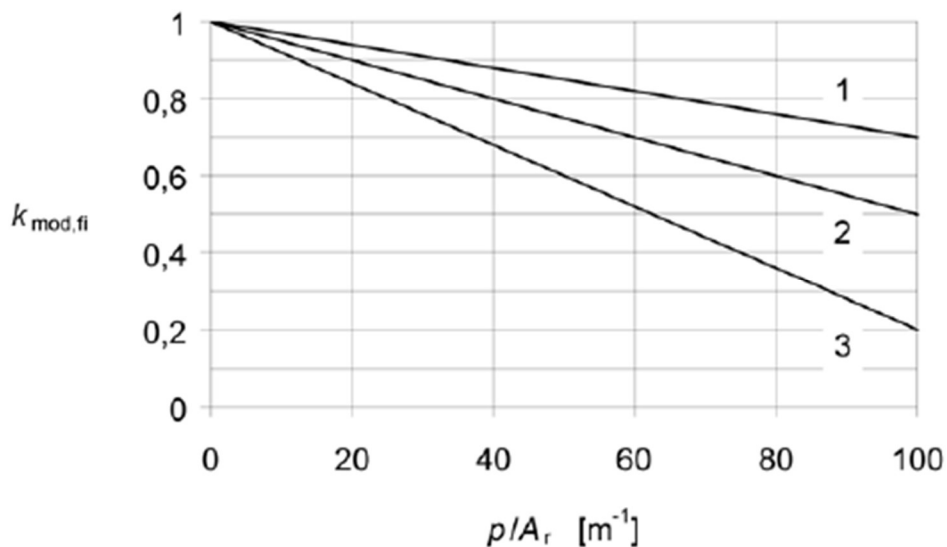
Onde,

P é o perímetro de exposição ao fogo da seção transversal;

A_r é a área da seção transversal residual.

A norma traz observações relativas ao tempo de exposição ao fogo, para o cálculo das peças submetidas ao fogo por um tempo $t = 0$, adota-se $k_{mod,fi} = 1$. O coeficiente $k_{mod,fi}$ também pode ser obtido através da interpolação linear.

Figura 20 - Relação linear de $k_{mod,fi}$



Fonte: EN 1995: 1-2, 2004

Onde a linha 1, 2 e 3 representam a relação linear de $k_{mod,fi}$ para as resistências da madeira a Tração, Flexão e Compressão respectivamente.

5.11.4 Verificação de estabilidade do elemento

Portanto para que sejam efetuadas as verificações de resistência ou atendimento, deve-se calcular a resistência de projeto da madeira para quando esta estiver em situação de incêndio, a verificação é dada por:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{0,2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (22)$$

Onde:

$f_{d,fi}$ é a resistência de projeto ao fogo;

$k_{mod,fi}$ é o coeficiente de modificação para incêndio;

$f_{0,2}$ é o valor de 20% da resistência da madeira a temperatura natural;

$\gamma_{M,fi}$ é o coeficiente de segurança para a madeira em incêndio;

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{S_{0,2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (23)$$

Onde:

$S_{d,fi}$ é o módulo de elasticidade do material em incêndio;

$k_{mod,fi}$ é o coeficiente de modificação para incêndio;

$f_{0,2}$ é o valor de 20% da elasticidade do material a temperatura natural;

$\gamma_{M,fi}$ é o coeficiente de segurança para a madeira em incêndio;

O valor da resistência mecânica deve ser calculado como:

$$R_{d,t,fi} = \eta \frac{R_{0,2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (24)$$

$R_{d,t,fi}$ é o valor da resistência mecânica com um tempo de exposição t ;

η é um fator de conversão;

$R_{0,2}$ é o valor de 20% da resistência mecânica a temperatura natural, sem considerar a umidade e o efeito de duração de carga ($k_{mod} = 1$)

A fração de 20% das propriedades de rigidez deve ser calculada como:

$$f_{0,2} = k_{fi} \cdot f_k \quad (25)$$

$$S_{0,2} = K_{fi} \cdot E_{0,05} \quad (26)$$

Onde:

$f_{0,2}$ é a fração de 20% das propriedades de resistência a temperatura natural;

$S_{0,2}$ é a fração de 20% das propriedades de rigidez do material a temperatura natural;

$E_{0,05}$ é a fração de 5% das propriedades de rigidez do material a temperatura natural;

O coeficiente K_{fi} é obtido através da seguinte tabela 12 a seguir:

Tabela 12 – Coeficiente K_{fi}

Tipo de Material	K_{fi}
Madeira solida	1,25
Madeira Laminada Colada	1,15
Painéis de madeira	1,15
LVL	1,1

Fonte: EN 1995: 1-2, 2004

A fração de 20% do valor de resistência da madeira, $R_{0,2}$ deve ser calculada como:

$$R_{0,2} = K_{fi} \cdot R_k \quad (27)$$

$R_{0,2}$ é o valor de 20% da resistência de uma conexão a temperatura natural, sem considerar a umidade e o efeito de duração de carga ($k_{mod} = 1$);

K_{fi} é obtido através da seguinte tabela 12;

5.11.5 Métodos de verificação

A verificação de elementos segundo Pinto (2004) é o suficiente para satisfazer as exigências padrão, esta verificação ocorre pelo módulo de elasticidade em situação de incêndio, onde pode ser entendido como a projeção das ações para situações de incêndio, incluindo efeitos de expansão e deformação, obtida como:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (28)$$

Sendo:

$E_{d,fi}$ é a projeção das ações para situações de incêndio, incluindo efeitos de expansão e deformação;

E_d é o modulo de elasticidade da madeira de cálculo em temperatura natural;

η_{fi} é o fator de redução para carga de projeto em situação de incêndio;

Por simplificação a norma recomenda que seja adotado $\eta_{fi} = 0,7$ para áreas a edificação de galpões onde ocorram acúmulos de bens, para as demais edificações recomenda-se $\eta_{fi}=0,6$.

Segundo a norma o modelo de sistema estrutural adotado deve refletir a performance da estrutura quando submetida a condição de incêndio, e deve ser verificado para um tempo de exposição t , como descrito na equação:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad (29)$$

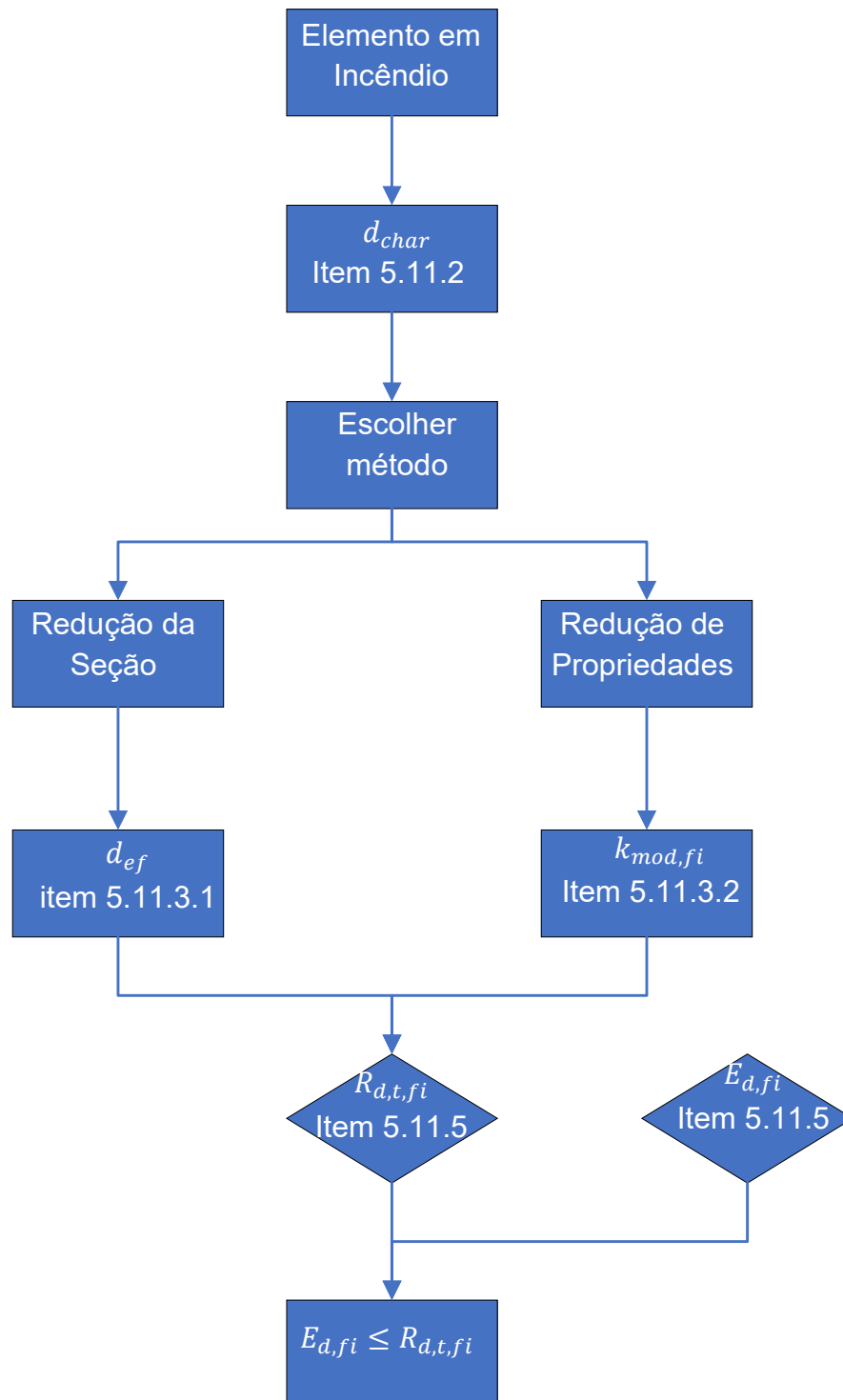
Onde:

$R_{d,t,fi}$ é o valor da resistência mecânica com um tempo de exposição t ;

$E_{d,fi}$ é a projeção das ações para situações de incêndio, incluindo efeitos de expansão e deformação;

No caso de não cumprimento da verificação a peça deve ser redimensionada de modo a atender a verificação.

Figura 21 – Verificação a Incêndio



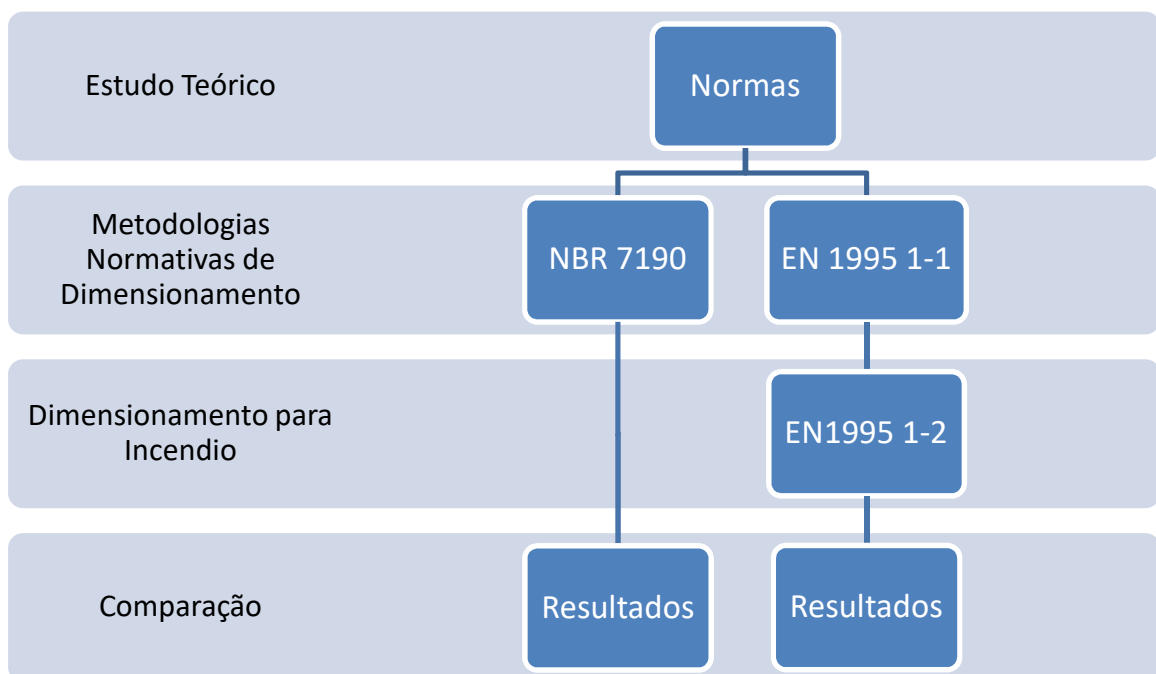
Fonte: Baseado em EN1995 1-2

6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

6.1 Metodologia de Pesquisa

Tendo como base os objetivos apresentados neste trabalho, a metodologia a ser desenvolvida consistirá em um estudo teórico normativo para a fundamentação e embasamento de cálculo de estruturas de madeira nacional e europeia seguida da análise da complementação normativa referente ao dimensionamento de estruturas de madeira sob condição de incêndio europeia. A estrutura metodológica pode ser observada na Figura 15 a seguir:

Figura 22 - Fluxograma de Procedimentos



Fonte: Elaborado Pelo Autor

6.2 Estudo Teórico

Na fase de estudos iniciais e levantamento teórico, definiu-se o problema a ser discutido seguido da pesquisa do material para fundamentação do trabalho. O levantamento normativo para o dimensionamento de estruturas de madeira, nacional por meio NBR 7190:1997 e europeia por meio da EN1995 1-1:2004, seguido do estudo normativo relativo ao dimensionamento de estruturas de madeira submetida a incêndio, verificando a presença de normativas nacionais referentes ao tema comparadas a norma europeia EN1995 1-2.

6.3 Referencial Normativo

Para o estudo, a norma nacional a ser observada é a NBR 7190:1997, referente ao dimensionamento de estruturas de madeira, que até o momento não apresenta metodologias de dimensionamento para situações de incêndio, deste modo será realizado o estudo relativo as metodologias de dimensionamento para estruturas em madeira sem observações para requisitos de resistência ao fogo.

Os dimensionamentos de estrutura de madeira na Europa seguem as orientações do Eurocode 5. A parte específica que trata deste assunto é a EN 1995 1-1:2004. Outras partes da norma devem ser observadas para a determinação de diversos parâmetros de cálculo, como por exemplo a obtenção das classes de resistência de madeira foi analisada a EN338:2009, a EN 1995 1-2:2004 referente ao projeto de estruturas de madeira em condição de incêndio. A EN 1995 1-2:2004 complementa o dimensionamento padrão.

Para o estudo de cargas no dimensionamento, utiliza-se a NBR 6120:1980 e a EN1991:2002, para o Brasil e para a Europa, respectivamente. Para o estudo de determinação de tempo de requerido de resistência ao fogo (TRRF), deve-se ser seguido a NBR 14432:2001, no Brasil.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo Mitto e Dias (2003) diferentes metodologias de cálculo ao serem analisadas e comparadas devem não apenas verificar os resultados do dimensionamento, mas também a eficiência de aplicabilidade do processo. A comparação normativa realizada, observando o dimensionamento de estruturas de madeira sem levar em consideração os efeitos da ação do fogo aos elementos no item 7.1, e o dimensionamento de estruturas de madeira levando em consideração os efeitos da ação do fogo 7.2. Foi tido como foco comparativo os elementos sólidos maciços de madeira.

7.1 Comparação de Dimensionamento Padrão

Quando analisadas a norma nacional NBR 7190:1997 e a norma europeia EN1995 1-1, ambas relativas ao dimensionamento de estruturas de madeira para edificações, foram observadas similaridades entre elas como a sua estruturação fundamental, porém diversas divergências podem ser pontuadas e seus efeitos podem apenas ser mensurados através do efetivo dimensionamento comparando-se as estruturas dimensionadas.

Por apresentarem divergências normativas referentes a definição das cargas entre as normas NBR 6120:1980 e a norma EN1991:2002, a comparação entre os dimensionamentos deve-se levar em consideração fatores que podem divergir entre as normas como as combinações, os próprios coeficientes de segurança, as cargas permanentes, o comportamento e obtenção das cargas relativas as ações de vento.

As divergências observadas entre os regulamentos de dimensionamento nacionais e Europeias, ainda sem o foco de incêndio foram em sua maioria relativas à uniformização de informações, como o fornecimento mais preciso de elementos necessários ao dimensionamento na norma europeia.

No caso dos coeficientes de modificação da madeira observa-se a separação em coeficientes parciais de modificação $k_{mod,1}$, $k_{mod,2}$, $k_{mod,3}$, na NBR 7190 estes são separados de modo que levam em consideração a influência da umidade, duração de carga e a qualidade homogênea da madeira como visto no item 5.9.1. No Eurocode o coeficiente de modificação trata-se de um elemento único que leva em consideração os efeitos da umidade e da duração de carga, variando de acordo com os tipos de madeira, como apresentado no item 5.10.1 da norma Europeia. A apresentação das informações se dá de forma mais simplificada no Eurocode por apresentar uma tabela única que contempla as informações necessárias para a obtenção do k_{mod} .

Observou-se que no caso do coeficiente de modificação a NBR 7190 de forma mais clara as influências referentes a umidade, duração da carga e qualidade da madeira.

Os coeficientes de ponderação γ_w apresentam grandes divergências, no caso da normativa nacional estes são obtidos através da variação da tipologia de resistência seja por compressão, tração ou cisalhamento e do estado limite, item 5.9.3. Para a normativa europeia a obtenção deste é tida pela variação da tipologia da madeira e situação de combinação, como vistos na tabela 9 no item 5.10.2 da

referida norma. Neste caso, o coeficiente de ponderação do Eurocode aparenta ser mais interessante, do ponto de vista estrutural, para o dimensionamento, uma vez que os dados do coeficiente apresentam menor variação, e estão atrelados ao tipo de madeira.

A obtenção das classes de resistência, no caso da normativa nacional, a própria NBR 7190:2004 fornece os valores padronizados, observados na Tabela 6 no item 5.9.6 deste estudo, as resistências apresentadas pela norma referem-se apenas as de compressão paralelas as fibras e a resistência ao esforço cortante, sendo necessário para o dimensionamento a utilização das relações entre os índices de resistência fornecidas pela norma, descritas no quadro 2 no item 5.9.7 deste estudo.

No Eurocode os valores referentes aos índices de resistência não são fornecidos na EN1995 1-1, este determina que a obtenção destes valores deve ser obtida na EN338:2009 como vistos na tabela 10 do item 5.10.4. Os valores são apresentados de forma completa divididos em classes de resistência pelas espécies de madeira dos demais índices de resistência.

Constatou-se que a classificação das resistências apresentadas pelo Eurocode também aparenta ser mais interessante, do ponto de vista estrutural, por apresentar um número maior de classes e dados mais completos, evitando o uso de relações numéricas entre os dados de resistência.

Nas verificações de estado limite último divergências no caso das verificações de Flexotração e Flexocompressão, segundo Mitto e Dias (2003) existem divergências significativas, onde observam-se as razões entre as solicitações de tensão geradas pelo momento aplicado na peça e a tensão de resistência. No caso do Eurocode os índices de resistência para a relação de flexão $\frac{\sigma_{My,d}}{f_{my,d}}$ e $\frac{\sigma_{Mz,d}}{f_{mz,d}}$, relativas são as de compressão e tração, relativas a borda da peça. No caso da NBR 7190 na relação de flexão $\frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{t0,d}}$ e $\frac{\sigma_{My,d}}{f_{t0,d}}$ o índice de resistência adotado trata apenas da tração no caso da Flexotração, e no caso da Flexocompressão nas relações de flexão $\frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}}$ e $\frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}}$ o índice de resistência adotado trata apenas da compressão.

Observou-se que a Flexotração e Flexocompressão calculada pelo Eurocode também aparenta ser mais interessante, do ponto de vista estrutural, uma

vez que a parcela da equação relativa à flexão não leva em consideração um índice único de resistência, mas sim aos índices correspondentes as solicitações.

7.2 Comparação de Dimensionamento para Incêndio

O Eurocode 5 traz no EN1995 1-2:2004 o procedimento de dimensionamento de estruturas de madeira para a situação de incêndio, a norma age como um complemento da EN1995 1-1, adequando o dimensionamento padrão para a situação de incêndio. Para o estudo foram priorizadas as metodologias de dimensionamento para situação de incêndio para peças sólidas de madeira.

A norma modifica os coeficientes e parâmetros de resistência de projeto, ponderando as propriedades de resistência de cálculo da madeira agindo em favor da segurança. As propriedades do material segundo a norma podem ser alteradas por meio de métodos simplificados que levam em consideração a variação de temperatura no material com o emprego de curvas de incêndio padronizadas, ou métodos avançados consideram a alteração de temperatura dos elementos durante um incêndio através de parâmetros.

A metodologia simplificada utiliza como base a curva de incêndio padrão ISO834. O dimensionamento simplificado pode ser efetuado por dois métodos, o método de redução da seção transversal e o método de redução das propriedades do material, como pode ser observado no item 5.11.3 do presente estudo.

O método de redução da seção transversal visto no item 5.11.3.1 caracteriza-se por prever a seção resistente da peça analisada após um período de tempo t sob a ação do incêndio, de modo que as verificações devem ser efetuadas para a seção transversal resistente efetiva.

Para o método de redução das propriedades visto no item 5.11.3.2 adota-se a seção residual da peça após um período de tempo t , sob a ação do incêndio, alterando-se também o coeficiente de modificação relativo ao incêndio, $K_{mod,fi}$, para cada propriedade de resistência analisada.

No caso da normatização brasileira, não existem metodologias ou verificações especiais relativas ao dimensionamento para estruturas submetidas a condições de incêndio, a norma apenas sugere o dimensionamento padrão conforme descrito na NBR 7190:1997.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 Conclusões

Para garantir a segurança das estruturas ao incêndio, aliada ao correto dimensionamento respaldado por normativas completas que preconizem a segurança para as situações mais adversas que possam trazer risco a vida (como o caso do incêndio), é de extrema importância que sejam criados critérios específicos para o dimensionamento de estruturas de madeira.

Quanto ao estudo comparativo entre as normas observou-se diferenças nos critérios de dimensionamento exigidos por cada uma delas, como no caso das normas referentes a ações, combinações e pela padronização de cálculo observados na NBR 7190 (no que tange a, por exemplo, fixação da umidade da madeira em 12%), apresentando correções para a resistência de peças com umidade diferentes. Este fator de correção de umidade não é adotado no Eurocode.

Observou-se que o sistema do Eurocode apresenta de forma organizada e simplificada seu conjunto de especificidades e detalhes quanto à metodologia de dimensionamento, apresentando uma melhor classificação e organização. Possui nomenclaturas claras com o objetivo de uniformizar a informação.

Internamente as normas Europeias estudadas possuem linguagem objetiva e sequencial. No caso da EN1995 1-2 tem-se apresentados diagramas indicando a correta utilização da própria norma, auxiliando o usuário no decorrer do dimensionamento. A organização, sistematização e elaboração das informações por parte das normativas europeias pode ser atrelado ao fato de seu uso mais intensivo de sistemas estruturais que utilizem a madeira como material estrutural na Europa historicamente.

Constatou-se que a NBR7190:1997 não teve atualizações desde sua criação, em contrapartida as normas do Eurocode sofreram atualizações recentes, tendo a EN1995 1-1 passado por atualizações em 2004, e a EN1995 1-2 em 2009, permitindo se adaptar melhor aos processos científicos desenvolvidos nos últimos anos.

Observou-se a completa ausência de normatização específica no Brasil vigente, relativa ao dimensionamento de estruturas de madeira para situações de incêndio, apesar da existência de normas relativas ao dimensionamento de estruturas de aço e concreto. Constatou-se também a omissão de parâmetros e observações referentes a ação do fogo na estrutura, na norma nacional de dimensionamento de estruturas de madeira.

8.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para comparação efetiva de resultados entre a normativa nacional e a europeia, sugere-se a realização de uma análise de uma estrutura de madeira padrão, dimensionadas pelas normas referentes ao dimensionamento de estruturas de madeira, nacionais NBR 7190 e europeia Eurocode 5.

No dimensionamento pela normativa europeia seria considerada a metodologia para estruturas submetidas a condições de incêndio. Sendo modeladas e tendo seus comportamentos de resistência comparados de modo a verificar a eficiência e similaridade entre os resultados encontrados.

Acrescenta-se ainda a possibilidade de dimensionamento do comportamento térmico da estrutura, bem como a verificação de cumprimento do TRRF da estrutura quando submetida a incêndio, a partir do SAFIR. Este programa modela o comportamento das estruturas do edifício submetidas ao fogo. A análise pode ser realizada a partir de um esqueleto 3D, como vigas e colunas, conectadas aos elementos planares, como lajes e paredes, fornecendo informações importantes sobre o comportamento da estrutura em situação de incêndio.

9 REFERÊNCIAS

- AMBROSEWICZ, P. H. L. **Materiais da construção**: Normas, Especificações, Aplicação e Ensaio de Laboratório. 1. ed. São Paulo: Pini, 2013. 460 p.
- AMORIM, A. M. **ESTUDO DE CASO DE VERIFICAÇÃO DE ESTRUTURA DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: emprego de curva padrão e curvas paramétricas e de métodos simplificados e avançados IFTO**. Palmas, p. 92. 2019.
- ANASTÁCIO, R. S.. **ESPECIFICAÇÃO DE PROTECÇÃO FOGO**. FEUP. Porto, p. 118. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5628 - **Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo**. Rio de Janeiro, 1980.
- _____. NBR 6123 – **Forças devido ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. NBR 7190 – **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. NBR 8681 – **Ações e segurança nas estruturas**. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. NBR 13860. **Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio**. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. NBR 14432 – **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2001.
- CORREIA, A. S. **Análise e Dimensionamento de Estruturas de Madeira**. FEUP. Porto, p. 163. 2009.
- CTIF. **World Fire Statistics**. [S.l.], p. 56. 2017.
- D'AMBROS, H. C. M. **Estruturas Metálicas de Galpões Industriais em Situação de Incêndio: Estudo dos Sistemas de Proteção Passiva a Partir das Características de Ventilação**. IFTO. Palmas, p. 63. 2018.
- FERREIRA, . **PROTECÇÃO DA MADEIRA CONTRA O FOGO**. Consultoria e Formação em Protecção Incêndio. Coimbra: [s.n.]. 2005. p. 13.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, **Eurocode 5: Design of Timber Structures - Part 1-1: General - Design of timber structures**. Novembro, 2004.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, **Eurocode 5: Design of Timber Structures - Part 1-2: General - Structural fire design**. Novembro, 2004.
- _____. **EN 338 - Structural Timber Strength class**. Outubro, 2009.

FIGUEROA, M. J. M.; DE MORAES, D. Comportamento da madeira a elevadas temperaturas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174, Dezembro 2009.

GALDINO, D. S. **Análise de Propriedades da Madeira de Estrutura de Telhado Após a Ocorrência de Um Incêndio**. UEP. ITAPEVA, p. 73. 2012.

GESUALDO, F. A.. **ESTRUTURAS DE MADEIRA**. UFU. Uberlândia, p. 98. 2003.

MANRÍQUEZ, M.J.; Moraes, P. D. **Comportamento da madeira a temperaturas elevadas**. *Ambiente Construído*, v. 9, p. 157-174, 2009.

MITTO, J. L; DIAS, A.A.

Avaliação dos critérios de dimensionamento para peças comprimidas e flexocomprimidas de madeira. *Revista Minerva*, v. 3, p. 131-140, 2006.

PINTO, E. M.; Carlito Calil Jr. **Estudo Teórico e experimental sobre a degradação térmica da madeira de Eucalyptus de uso estrutural exposta ao fogo**. *Revista Madeira: Arquitetura e Engenharia*, v. 4, n. 10, jan./jun. 2003.

PINTO, E. M. **Proteção Contra Incêndio para Habitações em Madeira**. USP. São Carlos, p. 157. 2001.

_____. **Determinação de um Modelo de Taxa de Carbonização Transversal a Grã para o Eucalyptus citriodora E E. grandis**. USP. São Carlos, p. 138. 2005.

PINTO, E. M.; Carlito Calil Jr. **Estudo Teórico e experimental sobre a degradação térmica da madeira de Eucalyptus de uso estrutural exposta ao fogo**. *Revista Minerva*, v. 3, p. 131-140, 2006.

SHINGUE, E. K. **Difusão da Construção em Madeira no Brasil: Agentes, Ações e Produtos**. USP. São Carlos, p. 250. 2018.

SILVA, V. P.; VARGAS, M. ; ONO,. **Prevenção contra incêndio no Projeto de Arquitetura**. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2010. p. 72.

SZÜCS, C. et al. **ESTRUTURAS DE MADEIRA**. UFSC. Florianópolis, p. 219. 2015.