



# **CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE ELEMENTOS DE MADEIRA**

**ISADORA NAGAFUGI ALVES**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

**Engenharia da Construção**

**Novembro 2020**



# CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE ELEMENTOS DE MADEIRA

**ISADORA NAGAFUGI ALVES**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do **Grau de Mestre em Engenharia da Construção** no âmbito da **Dupla Diplomação** com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientadores do Instituto Politécnico de Bragança:

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira**

**Prof.<sup>o</sup> Dr. Luís Manuel Ribeiro Mesquita**

Orientador da Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Prof.<sup>o</sup> Dr. Jorge Luís Nunes de Góes**

**Novembro 2020**

*Dedico este trabalho aos meus pais Nair e José Luiz,  
e aos meus queridos amigos.*



# Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus, por todas as oportunidades. À minha família e amigos mais próximos, pelo apoio e amor incondicional, pela confiança, pelos conselhos que me deram forças para persistir nesta jornada e pela paciência que tiveram comigo ao longo deste processo de formação, e em especial, à minha mãe; por mais que eu tente nunca encontrarei palavras para expressar minha gratidão. Não importa a cidade, o estado ou o país, vocês estão sempre comigo e sei que sempre estarão. Vocês são fundamentais na minha vida.

Devo especiais agradecimentos aos orientadores desta tese, a Professora Doutora Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira e ao Professor Doutor Luís Manuel Ribeiro Mesquita, ambos do Instituto Politécnico de Bragança, pela excepcional orientação, por toda disponibilidade e interesse demonstrados durante a execução deste trabalho, pelo encorajamento constante, pela compreensão nos momentos em que mais necessitei, pelo apoio e compromisso, tornando a realização desta dissertação um trabalho estimulante e enriquecedor, e também ao meu co-orientador Professor Doutor Jorge Luís Nunes de Góes, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por aceitar a proposta de trabalhar em parceria com o Instituto Politécnico de Bragança e se dispor a ajudar no processo de desenvolvimento desta tese.

Gostaria de agradecer a todos os meus professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná e do Instituto Politécnico de Bragança, que auxiliaram na minha formação e marcaram meu percurso acadêmico. E por fim, gostaria de agradecer as duas instituições envolvidas por me proporcionarem a conquista de uma dupla diplomação e por me possibilitarem esta extraordinária experiência de vida.



# Resumo

Os elementos da Madeira de Abeto de Douglas têm sido amplamente utilizados na América do Norte e Europa, devido à sua disponibilidade na natureza, leveza e propriedades físicas e químicas. A compreensão do seu comportamento em condições de incêndio é importante para o desenvolvimento e melhoria de novas estruturas. Por esse motivo, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar o comportamento ao fogo de elementos de Madeira de Abeto de Douglas por meio de análises numéricas, onde o método dos elementos finitos foi aplicado pelo *software Ansys Workbench*. Inicialmente, foi realizada uma análise mecânica e determinada a carga de colapso de uma viga simplesmente apoiada em temperatura ambiente de 20 [°C]. Em seguida, foi realizada uma análise térmica e dois estudos importantes foram propostos. O primeiro buscou determinar a distribuição e evolução da temperatura ao longo da seção, e o segundo propôs definir a taxa de carbonização da madeira em função da espessura da camada carbonizada. Ao final, uma análise termomecânica em regime transiente foi realizada. Em seguida, o tempo de resistência ao fogo foi determinado quando uma carga constante de um determinado grau de utilização foi aplicada no meio do vão livre. Todas as análises propostas foram realizadas para dois modelos de vigas. Os resultados numéricos foram comparados com os dados obtidos pelo método de cálculo simplificado. Os resultados obtidos neste trabalho contribuem para a compreensão do comportamento da madeira em condições de incêndio, sendo fundamentais para o desenvolvimento e aprimoramento da engenharia das construções.

*Palavras Chave:* Madeira Abeto de Douglas, Exposição ao fogo, Análise térmica, Análise mecânica, Análise termomecânica, Taxa de carbonização, Carga de colapso, Tempo de resistência ao fogo.

# Abstract

The elements of Douglas fir wood have been widely used in North America and Europe, due to its availability in nature, lightness and physical and chemical properties. The understanding of their behavior under fire conditions is important to the development and improvement of new structures. For this reason, the present work aims to characterize the fire behavior of Douglas fir wood elements through numerical analysis, where the finite element method was applied by the software Ansys Workbench. Initially, a mechanical analysis was performed, and the collapse load of a beam simply supported at ambient temperature of 20 [°C] was determined. Then, a thermal analysis was carried out, and two important studies were proposed. The first one tried to determine the distribution and evolution of temperature throughout the section, and the second one proposed to define the wood carbonization rate as a function of the thickness of the carbonized layer. At the end, a thermomechanical analysis in a transient regime was performed. Then, the time of fire resistance was determined when a constant load of a specific utilization degree was applied in the middle of the free span. All the analyzes proposed were performed for two beam models. The numerical results were compared with the data obtained through simplified calculation method. The results obtained in this work contribute to the understanding of the behavior of wood in fire conditions, being fundamental for the development and improvement of the engineering of the constructions.

*Keywords:* Douglas Fir Wood, Exposure to fire, Thermal analysis, Mechanical analysis, Thermomechanical analysis, Charring rate, Collapse load, Time to fire resistance.



# Índice

---

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XVI</b>
<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVOS PROPOSTOS .....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	2
<b>CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>4</b>
2.1 TRABALHOS DESENVOLVIDOS .....	4
2.2 CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA .....	6
2.3 CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA ABETO DE DOUGLAS .....	6
2.4 ESTRUTURA DA MADEIRA E ELEMENTOS CONSTITUINTES .....	7
2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA .....	8
2.5.1 <i>Módulo de elasticidade</i> .....	9
2.5.2 <i>Coefficiente de Poisson</i> .....	11
2.5.3 <i>Módulo de rigidez</i> .....	11
2.5.4 <i>Propriedades de resistência</i> .....	12
2.5.4.1 Resistência à compressão .....	12
2.5.4.2 Resistência à tração .....	13
2.5.4.3 Resistência à flexão .....	14
2.5.4.4 Resistência ao corte .....	15
2.5.4.5 Valor da resistência mecânica em situação de incêndio .....	16
2.6 CRITÉRIOS DE RUTURA .....	17
2.6.1 <i>Critério de Tsai-Wu</i> .....	17
2.6.2 <i>Critério de Tsai-Hill</i> .....	19
2.6.3 <i>Critério de Hill</i> .....	20

2.7	PROPRIEDADES TÉRMICAS DA MADEIRA .....	22
2.7.1	Calor específico .....	22
2.7.2	Condutividade térmica.....	23
2.7.3	Coefficiente de dilatação térmica linear .....	25
2.7.4	Teor de umidade.....	25
2.7.5	Massa volúmica.....	26
2.8	MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	27
2.8.1	Transferência de calor por condução .....	28
2.8.2	Transferência de calor por convecção.....	28
2.8.3	Transferência de calor por radiação .....	29
2.9	CURVAS DE INCÊNDIO .....	30
2.9.1	Curva de incêndio natural .....	31
2.9.2	Curva de incêndio padrão ISO 834.....	32
2.10	DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA.....	33
2.10.1	Degradação térmica por pirólise .....	33
2.10.2	Degradação térmica por combustão .....	34
<b>CAPÍTULO 3: MÉTODO DE CÁLCULO SIMPLIFICADO.....</b>		<b>39</b>
3.1	CARGA E GRAU DE UTILIZAÇÃO .....	39
3.1.1	Grau de utilização determinado com a resistência de projeto ao fogo.....	39
3.1.2	Grau de utilização determinado com a resistência característica.....	42
3.2	TAXA DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA .....	44
3.2.1	Camada de carbonização efetiva .....	47
3.3	TEMPO DE RESISTÊNCIA AO FOGO EM VIGAS DE MADEIRA .....	48
<b>CAPÍTULO 4: MÉTODO DE CÁLCULO NUMÉRICO .....</b>		<b>52</b>
4.1	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....	53
4.1.1	Análise experimental.....	53
4.1.2	Análise numérica.....	55
4.1.2.1	Inserção do material .....	55
4.1.2.2	Geometria.....	56
4.1.2.3	Malha .....	57
4.1.2.4	Aplicação da força e condições de fronteira.....	59
4.1.3	Comparação dos resultados experimentais e numéricos .....	60
4.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM VIGAS DE MADEIRA.....	63
4.2.1	Simulação estrutural estática não-linear material em regime estacionário .....	63
4.2.2	Simulação térmica não-linear material em regime transiente .....	64
4.2.3	Simulação termomecânica não-linear material e geométrica .....	65
4.2.4	Considerações do modelo numérico .....	66
4.2.4.1	Inserção do material .....	66
4.2.4.2	Geometria.....	68
4.2.4.3	Malha .....	69

4.2.4.4	Aplicação da força e condições de fronteira .....	72
<b>CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>		<b>76</b>
5.1	ANÁLISE MECÂNICA .....	76
5.2	ANÁLISE TÉRMICA .....	83
5.3	ANÁLISE TERMOMECÂNICA .....	89
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>		<b>97</b>
6.1	CONCLUSÕES GERAIS .....	97
6.2	TRABALHOS FUTUROS .....	98
<b>REFERÊNCIAS.....</b>		<b>100</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>105</b>
ANEXO 1 – RESULTADOS DO MÉTODO DE CÁLCULO SIMPLIFICADO PARA A CARGA E GRAU DE UTILIZAÇÃO .....		105
ANEXO 2 – RESULTADOS DO MÉTODO DE CÁLCULO SIMPLIFICADO PARA O TEMPO DE RESISTÊNCIA AO FOGO.....		107
ANEXO 3 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO MECÂNICA DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO, PARA O ÚLTIMO INSTANTE DE TEMPO. ....		108
ANEXO 4 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO MECÂNICA .....		109
ANEXO 5 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO MECÂNICA REALIZADA NA VIGA 1, PARA O ÚLTIMO INSTANTE DE TEMPO.....		111
ANEXO 6 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO MECÂNICA REALIZADA NA VIGA 2, PARA O ÚLTIMO INSTANTE DE TEMPO.....		113
ANEXO 7 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TÉRMICA REALIZADA NA VIGA 1. ....		115
ANEXO 8 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TÉRMICA REALIZADA NA VIGA 2. ....		116
ANEXO 9 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 20% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 1. ....		117
ANEXO 10 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 30% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 1. ....		118
ANEXO 11 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 40% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 1. ....		119
ANEXO 12 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 50% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 1. ....		120
ANEXO 13 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 60% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 1. ....		121
ANEXO 14 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 70% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 1. ....		122
ANEXO 15 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 80% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 1. ....		123

ANEXO 16 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 90% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 1. ....	124
ANEXO 17 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 20% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 2. ....	125
ANEXO 18 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 30% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 2. ....	126
ANEXO 19 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 40% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 2. ....	127
ANEXO 20 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 50% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 2. ....	128
ANEXO 21 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 60% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 2. ....	129
ANEXO 22 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 70% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 2. ....	130
ANEXO 23 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 80% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 2. ....	131
ANEXO 24 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA PARA 90% DO GRAU DO UTILIZAÇÃO REALIZADA NA VIGA 2. ....	132

## Lista de Figuras

---

Figura 1 – Direções dos eixos principais, [15].	8
Figura 2 – Efeito da temperatura no módulo de elasticidade para madeira macia, adaptado de [19].	10
Figura 3 – Flexão em um elemento de madeira, [22].	14
Figura 4 – Fator de redução da resistência da madeira macia, adaptado de [19].	17
Figura 5 – Calor específico da madeira em função da temperatura, adaptado de [19].	23
Figura 6 – Condutividade térmica da madeira em função da temperatura, adaptado de [19].	24
Figura 7 – Fases de um incêndio natural, [3].	31
Figura 8 – Comparação entre a curva de incêndio natural e a curva de incêndio padrão ISO 834, [45].	32
Figura 9 – Liberação de vapores e gases, pirólise, [5].	35
Figura 10 – Reações de combustão, zona A, pirólise lenta, [5].	35
Figura 11 – Reações de combustão, zona B, pirólise rápida, [5].	36
Figura 12 – Combustão flamejante, [5].	37
Figura 13 – Reações de combustão, zona C, combustão flamejante, [5].	37
Figura 14 – Reações de combustão, zona D, acima de 500 °C, [5].	38
Figura 15 – Viga simplesmente apoiada com carga a meio vão exposta ao fogo, [8].	42
Figura 16 – Viga simplesmente apoiada com carga a meio vão, [8].	43
Figura 17 – Seção carbonizada de madeira, [13].	44
Figura 18 – Seção carbonizada de uma madeira laminada colada com efeito de arredondamento nos cantos, [5].	47
Figura 19 – Definição de camada residual e camada efetiva, [54].	48

Figura 20 – Gráfico da razão entre o módulo elástico da seção retangular com redução da seção pelo módulo elástico da seção retangular sem redução da seção x Tempo de resistência ao fogo. ....	50
Figura 21 – Realização dos testes, [9]. ....	53
Figura 22 – Propriedades da Madeira Abeto de Douglas inseridas na base de dados do <i>Ansys Workbench</i> . ....	55
Figura 23 – Dimensões dos provetes de escala reduzida sujeitos à flexão [mm], [9]. ....	57
Figura 24 – Geometria e dimensões da viga. ....	57
Figura 25 – Malha de elementos finitos aplicada na viga. ....	58
Figura 26 – Geometria do modelo estrutural SOLID185, [55]. ....	59
Figura 27 – Introdução das forças e condições de apoio. ....	59
Figura 28 – Gráfico de Força x Deslocamento vertical a meio vão. ....	61
Figura 29 – Gráfico de Tensão normal máxima de flexão x Deslocamento vertical a meio vão. ....	61
Figura 30 – Condições de fronteira de convecção e radiação nas três faces de exposição ao fogo, para 14 da viga. ....	64
Figura 31 – Propriedades da Madeira Abeto de Douglas inseridas na base de dados do <i>Ansys Workbench</i> . ....	66
Figura 32 – Geometria dos modelos propostos e seus planos de simetria. ....	69
Figura 33 – Malha de elementos finitos aplicada na Viga 1. ....	70
Figura 34 – Malha de elementos finitos aplicada na Viga 2. ....	70
Figura 35 – Geometria do modelo estrutural SOLID70, [55]. ....	71
Figura 36 – Face da viga no plano de simetria Y-Z. ....	72
Figura 37 – Face da viga no plano de simetria X-Y. ....	72
Figura 38 – Condição de apoio da Viga 1. ....	73
Figura 39 – Condição de apoio da Viga 2. ....	74
Figura 40 – Detalhe da aplicação da força para Viga 1. ....	74
Figura 41 – Detalhe da aplicação da força para Viga 2. ....	75
Figura 42 – Gráfico de Força x Deslocamento vertical a meio vão, Viga 1. ....	77
Figura 43 – Gráfico de Força x Deslocamento vertical a meio vão, Viga 2. ....	77

Figura 44 – Gráfico de Tensão normal no eixo Z x Deslocamento vertical a meio vão, Viga 1. ....	78
Figura 45 – Gráfico de Tensão normal no eixo Z x Deslocamento vertical a meio vão, Viga 2. ....	78
Figura 46 – Distribuição da tensão normal no instante de tempo correspondente a força máxima no regime elástico, Viga 1. ....	79
Figura 47 – Distribuição da tensão normal no instante de tempo correspondente a força máxima no regime elástico, Viga 2. ....	80
Figura 48 – Comparação do resultado numérico e o método de cálculo simplificado para carga de colapso e grau de utilização, Viga 1. ....	81
Figura 49 – Comparação do resultado numérico e o de cálculo simplificado para carga de colapso e grau de utilização, Viga 2. ....	82
Figura 50 – Distribuição da temperatura ao longo da altura da seção transversal da Viga 1. ....	83
Figura 51 – Distribuição da temperatura ao longo da largura da seção transversal da Viga 1. ....	84
Figura 52 – Distribuição da temperatura ao longo da altura da seção transversal da Viga 2. ....	84
Figura 53 – Distribuição da temperatura ao longo da largura da seção transversal da Viga 2. ....	85
Figura 54 – Espessura carbonizada e taxa de carbonização. ....	85
Figura 55 – Gráfico de comparação dos resultados do tempo de resistência ao fogo numérico com o Eurocódigo 5, Parte 1-2, Viga 1. ....	92
Figura 56 – Gráfico de comparação dos resultados do tempo de resistência ao fogo numérico com o Eurocódigo 5, Parte 1-2, Viga 2. ....	92
Figura 57 – Evolução temporal do deslocamento vertical no meio vão, Viga 1. ....	93
Figura 58 – Evolução temporal do deslocamento vertical no meio vão, Viga 2. ....	94
Figura 59 – Evolução temporal da tensão normal instalada na Viga 1. ....	95
Figura 60 – Evolução temporal da tensão normal instalada na Viga 2. ....	95
Figura 61 – Malha aplicada na viga. ....	108
Figura 62 – Deslocamento total da viga. ....	108
Figura 63 – Deslocamento direcional no eixo Y da viga. ....	108
Figura 64 – Tensão normal distribuída por toda a viga. ....	109

Figura 65 – Gráfico do Momento atuante x Deslocamento vertical a meio vão, Viga 1. .	109
Figura 66 – Gráfico do Momento atuante x Deslocamento vertical a meio vão, Viga .....	110
Figura 67 – Malha aplicada na Viga 1.....	111
Figura 68 – Deslocamento total da Viga 1. ....	111
Figura 69 – Deslocamento direcional no eixo <i>Y</i> da Viga 1. ....	112
Figura 70 – Tensão equivalente distribuída por toda Viga 1.....	112
Figura 71 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1.....	112
Figura 72 – Malha aplicada na Viga 2.....	113
Figura 73 – Deslocamento total da Viga 2. ....	113
Figura 74 – Deslocamento direcional no eixo <i>Y</i> da Viga 2. ....	113
Figura 75 – Tensão equivalente distribuída por toda Viga 2.....	114
Figura 76 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2.....	114
Figura 77 – Distribuição da temperatura na seção transversal da Viga 1.....	115
Figura 78 – Distribuição da temperatura na seção transversal da Viga 2.....	116
Figura 79 – Deslocamento total da Viga 1. ....	117
Figura 80 – Deslocamento direcional no eixo <i>Y</i> da Viga 1. ....	117
Figura 81 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1.....	117
Figura 82 – Deslocamento total da Viga 1. ....	118
Figura 83 – Deslocamento direcional no eixo <i>Y</i> da Viga 1. ....	118
Figura 84 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1.....	118
Figura 85 – Deslocamento total da Viga 1. ....	119
Figura 86 – Deslocamento direcional no eixo <i>Y</i> da Viga 1. ....	119
Figura 87 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1.....	119
Figura 88 – Deslocamento total da Viga 1. ....	120
Figura 89 – Deslocamento direcional no eixo <i>Y</i> da Viga 1. ....	120
Figura 90 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1.....	120
Figura 91 – Deslocamento total da Viga 1. ....	121

Figura 92 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 1.....	121
Figura 93 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1. ....	121
Figura 94 – Deslocamento total da Viga 1.....	122
Figura 95 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 1.....	122
Figura 96 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1. ....	122
Figura 97 – Deslocamento total da Viga 1.....	123
Figura 98 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 1.....	123
Figura 99 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1. ....	123
Figura 100 – Deslocamento total da Viga 1.....	124
Figura 101 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 1.....	124
Figura 102 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1. ....	124
Figura 103 – Deslocamento total da Viga 2.....	125
Figura 104 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 2.....	125
Figura 105 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2. ....	125
Figura 106 – Deslocamento total da Viga 2.....	126
Figura 107 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 2. ....	126
Figura 108 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2. ....	126
Figura 109 – Deslocamento total da Viga 2.....	127
Figura 110 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 2. ....	127
Figura 111 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2 .....	127
Figura 112 – Deslocamento total da Viga 2.....	128
Figura 113 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 2.....	128
Figura 114 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2. ....	128
Figura 115 – Deslocamento total da Viga 2.....	129
Figura 116 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 2.....	129
Figura 117 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2. ....	129
Figura 118 – Deslocamento total da Viga 2.....	130

Figura 119 – Deslocamento direcional no eixo <i>Y</i> da Viga 2. ....	130
Figura 120 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2. ....	130
Figura 121 – Deslocamento total da Viga 2. ....	131
Figura 122 – Deslocamento direcional no eixo <i>Y</i> da Viga 2. ....	131
Figura 123 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2. ....	131
Figura 124 – Deslocamento total da Viga 2. ....	132
Figura 125 – Deslocamento direcional no eixo <i>Y</i> da Viga 2. ....	132
Figura 126 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2. ....	132

## Lista de Tabelas

---

Tabela 1 – Composição dos constituintes químicos da madeira, [5]. .....	7
Tabela 2 – Módulo de elasticidade de algumas espécies de madeira, [18]. .....	10
Tabela 3 – Coeficiente de Poisson de algumas espécies de madeiras duras e macias, [18]. .....	11
Tabela 4 – Módulo de rigidez de algumas espécies de madeira, [18]. .....	12
Tabela 5 – Resistência à compressão paralela e perpendicular às fibras, [18]. .....	13
Tabela 6 – Resistência à tração paralela e perpendicular às fibras, [18]. .....	14
Tabela 7 – Resistência ao corte paralela às fibras, [18]. .....	16
Tabela 8 – Coeficientes $F_i$ e $F_{ij}$ , [29]. .....	18
Tabela 9 – Calor específico da madeira, [19]. .....	23
Tabela 10 – Condutividade térmica da madeira, [19]. .....	24
Tabela 11 – Deformação térmica da madeira em diferentes temperaturas, [34]. .....	25
Tabela 12 – Taxa de massa volúmica em função da temperatura, [19]. .....	27
Tabela 13 – Massa volúmica da madeira Abeto de Douglas. ....	27
Tabela 14 – Taxa de carbonização para cálculo de projetos de madeira, $\beta_0$ e $\beta_n$ , [19]. .....	46
Tabela 15 – Fator $k_0$ , [19]. .....	47
Tabela 16 – Resultados prévios dos ensaios de flexão dos provetes de escala reduzida, [9]. .....	54
Tabela 17 – Propriedades ortotrópicas da Madeira Abeto de Douglas à temperatura de 20 [°C]. .....	56
Tabela 18 – Taxas de tensão de escoamento direcional do critério de Hill. ....	56

Tabela 19 – Relação das propriedades ortotrópicas da Madeira Abeto de Douglas com a temperatura. ....	67
Tabela 20 – Taxa de tensão de escoamento direcional do critério de Hill em função da temperatura. ....	68
Tabela 21 – Dimensões da geometria dos modelos de vigas. ....	68
Tabela 22 – Comparação do resultado numérico e o método simplificado de cálculo para carga de colapso e grau de utilização. ....	81
Tabela 23 – Espessura carbonizada e taxa de carbonização numérica. ....	87
Tabela 24 – Comparação da taxa de carbonização numérica com o Eurocódigo 5, Parte 1-2. ....	88
Tabela 25 – Taxa de carbonização numérica para quatro faces de exposição, [15]. ....	89
Tabela 26 – Tempo de resistência ao fogo numérico para seus respectivos graus de utilização. ....	90
Tabela 27 – Comparação dos resultados do tempo de resistência ao fogo numérico com o Eurocódigo 5, Parte 1-2. ....	91
Tabela 28 – Determinação do grau de utilização com a resistência de projeto ao fogo para Viga 1 (75x150x6000 [mm]). ....	105
Tabela 29 – Determinação do grau de utilização com a resistência de projeto ao fogo para Viga 2 (250x300x6000 [mm]). ....	106
Tabela 30 – Determinação do grau de utilização com a resistência característica. ....	106
Tabela 31 – Determinação do tempo de resistência ao fogo para Viga 1 (75x150x6000 [mm]). ....	107
Tabela 32 – Determinação do tempo de resistência ao fogo para Viga 2 (250x300x6000 [mm]). ....	107
Tabela 33 – Comparação do resultado numérico e o método de cálculo simplificado para o momento atuante. ....	110

## Nomenclatura

---

### Letras maiúsculas do alfabeto Latino

$A$	Área [m <sup>2</sup> ]
$\bar{E}$	Radiação de um corpo negro [W/m <sup>2</sup> ]
$E_{d,fi}$	Efeito das ações de projeto para situação de incêndio
$E_L$	Módulo de elasticidade longitudinal [MPa]
$E_T$	Módulo de elasticidade tangencial [MPa]
$E_R$	Módulo de elasticidade radial [MPa]
$F$	Força aplicada [kN]
$F_{12}$	Coefficiente de interação
$F_d$	Força de projeto
$F_{d,fi}$	Força de projeto ao fogo
$F_{el}$	Força numérica no regime elástico
$F_i$	Coefficiente de resistência do critério de TSAI e WU
$F_{ij}$	Coefficiente de resistência do critério de TSAI e WU
$F_{máx}$	Força máxima [kN]
$G_{LR}$	Módulo de rigidez nas direções Longitudinal-Radial [MPa]
$G_{LT}$	Módulo de rigidez nas direções Longitudinal-Tangencial [MPa]
$G_{RT}$	Módulo de rigidez nas direções Radial-Tangencial [MPa]
$K_{mod,fi}$	Fator de modificação para situação de incêndio
$L$	Comprimento da viga entre apoios [mm]

$M$	Momento instalado [N.m]
$M_d$	Momento atuante de projeto
$M_{d,fi}$	Momento atuante de projeto ao fogo
$M_{el}$	Momento instalado no regime elástico
$M_{Rd}$	Momento resistente de projeto
$M_{Rd,fi,t=0}$	Momento resistente de projeto ao fogo
$Q_r$	Quantidade de calor [W]
$R_{ij}$ ( $i,j=1,2,3$ )	Taxa de tensão de escoamento direcional
$R_{d,fi}$	Resistência de projeto correspondente na situação de incêndio
$R_{d,fi,t=0}$	Valor de cálculo da resistência da madeira em situação de incêndio
$T$	Temperatura [°C], [K]
$T_0$	Temperatura inicial [°C]
$T_1$	Temperatura da superfície 1 [K]
$T_2$	Temperatura da superfície 2 [K]
$T_f$	Temperatura do fluido [°C]
$T_w$	Temperatura da superfície [°C]
$W$	Módulo elástico da seção retangular da viga [mm <sup>3</sup> ]
$W_{fi}$	Módulo elástico da seção retangular da viga com redução da seção

**Letras minúsculas do alfabeto latino**

$b$	Base da seção transversal da viga [mm]
$b_{fogo}$	Largura da seção reta da viga exposta ao fogo
$d$	Altura da seção transversal da viga [mm]
$d_{fogo}$	Altura da seção reta da viga exposta ao fogo
$d_0$	Espessura da camada de pirólise [mm]
$d_{char,0}$	Camada carbonizada para um lado de exposição ao fogo [mm]

$d_{char,n}$	Camada carbonizada para efeito de arredondamento [mm]
$d_{ef}$	Camada de carbonização efetiva [mm]
$f_{20}$	Resistência à temperatura ambiente correspondente ao quantil de 20%
$f_c$	Resistência à compressão
$f_{d,fi}$	Resistência de projeto ao fogo
$f_k$	Resistência característica à temperatura ambiente
$f_m$	Resistência à flexão [MPa]
$f_t$	Resistência à tração
$f_v$	Resistência ao cisalhamento
$h_c$	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/m <sup>2</sup> K]
$h_r$	Coefficiente de transferência de calor por radiação [W/m <sup>2</sup> K]
$k_0$	Coefficiente de superfícies desprotegidas por revestimento
$k_{fi}$	Coefficiente a depender do tipo de madeira
$n^{\circ}_{inferior}$	Número de face inferior exposta ao fogo
$n^{\circ}_{laterais}$	Número de faces laterais expostas ao fogo
$n^{\circ}_{superior}$	Número de face superior exposta ao fogo
$q''$	Fluxo de calor [W/m <sup>2</sup> ]
$q_c$	Fluxo de calor transferido por convecção [W/m <sup>2</sup> ]
$q_r$	Fluxo de calor transferido por radiação
$t$	Tempo [min]
$w$	Deslocamento a meio vão no eixo Y [mm]

### **Letras minúsculas do alfabeto grego**

$\beta_0$	Taxa de carbonização unidimensional [mm/min]
$\beta_n$	Taxa de carbonização nominal [mm/min]
$\gamma_{M,fi}$	Fator de segurança parcial da madeira em situação de incêndio

$\bar{\epsilon}$	Emissividade
$\epsilon_{ij}^{pl}$ ( $i,j=1,2,3$ )	Deformação plástica no sistema de coordenadas anisotrópico
$\lambda$	Condutividade térmica [W/mK]
$\mu_0$	Grau de utilização
$\nu_{LR}$	Coefficiente de Poisson nas direções Longitudinal-Radial
$\nu_{LT}$	Coefficiente de Poisson nas direções Longitudinal-Tangencial
$\nu_{RL}$	Coefficiente de Poisson nas direções Radial-Longitudinal
$\nu_{RT}$	Coefficiente de Poisson nas direções Radial-Tangencial
$\nu_{TL}$	Coefficiente de Poisson nas direções Tangencial-Longitudinal
$\nu_{TR}$	Coefficiente de Poisson nas direções Tangencial-Radial
$\bar{\sigma}$	Constante de proporcionalidade de Stefan-Boltzmann [W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$\sigma$	Tensão normal instalada
$\sigma_i^y$	Tensão de escoamento na direção definida pelo índice i
$\sigma_y$	Tensão de escoamento isotrópica
$\omega$	Teor de umidade [%]



# Capítulo 1: Introdução

---

## 1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

A madeira vem sendo empregada como material de construção desde o início da civilização, principalmente devido à elevada rigidez e resistência. Este material é utilizado como matéria-prima em diferentes tipos de estruturas, como por exemplo paredes e telhados, tendo amplas utilizações na engenharia e construção. Nos dias de hoje, a madeira é um material muito requisitado, pois suas necessidades energéticas para a produção de um produto final são menores em relação a outros materiais de construção, como o aço, betão ou plástico, além do seu uso contribuir com a sustentabilidade do meio ambiente [1], [2].

O uso da madeira cresceu muito durante a revolução industrial, passando a ser alvo de pesquisas científicas em meados de 1950. A partir destas pesquisas foi verificado que a madeira possui inúmeras vantagens em relação aos outros materiais de construção, o que pode ser confirmado por meio de suas propriedades físicas (teor de umidade, massa volúmica, propriedades térmicas e acústicas) e propriedades mecânicas (resistência a esforços de compressão, tração, flexão e cisalhamento) [3].

Quando os elementos de madeira são expostos a elevadas temperaturas, como em uma situação de incêndio, à medida que a madeira queima e perde massa, a suas propriedades térmicas e mecânicas são reduzidas. Ao mesmo tempo, passa a se desenvolver uma camada de carvão em sua superfície, que retarda a propagação da temperatura para o interior do elemento, sendo considerada um isolante. Essa camada isolante faz com que o núcleo da madeira se mantenha em baixas temperaturas, permanecendo com suas propriedades inalteradas, em função do tempo de exposição ao fogo e das dimensões do elemento [4].

Com o aumento das construções em madeiras nos últimos tempos, algumas questões sobre segurança foram abordadas, como o uso da regulamentação de segurança contra incêndios e da regulamentação de dimensionamento de estruturas de madeira expostas ao fogo. Os objetivos dos regulamentos são reduzir a probabilidade de ocorrência de incêndios

e garantir a segurança, a manutenção e durabilidade dos elementos de madeira expostos ao fogo [4].

Por essas razões, torna-se indispensável o estudo sobre o comportamento térmico e mecânico de elementos de madeira, para o melhor emprego da mesma na área da engenharia e construção.

Ter conhecimento que a madeira vem sendo utilizada na construção civil desde o começo da civilização, que pesquisas envolvendo este material começaram a ser realizadas por volta de 1950 e saber que estudos inovadores com a madeira ainda hoje estão sendo feitos, é fonte de grande motivação para este trabalho.

## **1.2 OBJETIVOS PROPOSTOS**

Esta tese tinha inicialmente o objetivo de realizar a caracterização da resistência ao fogo de elementos de Madeira de Abeto de Douglas, por intermédio de ensaios laboratoriais, executados de acordo com Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004). Devido ao momento em que vivemos, de pandemia, este trabalho teve que ser adaptado e a caracterização da resistência ao fogo dos elementos de Madeira Abeto de Douglas ocorreu por meio de simulações numéricas. O programa de elementos finitos utilizado para a realização das análises numéricas foi o *Ansys Workbench*. É realizada uma análise mecânica para determinar a carga de colapso para uma viga simplesmente apoiada em temperatura ambiente constante de 20 [°C]. Em seguida é determinada a distribuição da temperatura na seção transversal da viga e a taxa de carbonização da madeira em função da espessura de carbonização, através de uma análise térmica. E, por fim, é efetuada uma análise termomecânica em regime transiente, obtendo a temperatura de colapso ou o tempo de colapso, quando aplicado uma carga mecânica constante representativa de um determinado grau de utilização na viga em estudo.

## **1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE**

O capítulo 1 traz uma breve abordagem do uso da madeira como material de construção e suas vantagens em comparação a outros tipos de materiais. Sua utilização é justificada pelas suas propriedades físicas e mecânicas. Ainda menciona o comportamento

da madeira no decurso da sua exposição ao fogo. São apresentados os objetivos deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta o estado da arte; inicialmente são expostos a classificação da madeira, as características da Madeira Abeto de Douglas e seus elementos constituintes. Em seguida, são descritas as propriedades mecânicas e térmicas, o mecanismo de transferência de calor e as curvas de incêndio e por fim, a degradação térmica da madeira por pirólise e por combustão.

No capítulo 3 são expostos todos os conceitos teóricos e analíticos necessários para este estudo e apresentadas todas as equações empregues para determinação da carga de colapso, carga representativa de um determinado grau de utilização, tempo de resistência ao fogo e a taxa de carbonização em vigas de madeira.

No capítulo 4 é abordada a análise numérica, inicialmente apresenta a comparação dos ensaios experimentais com os resultados numéricos para calibrar e validar o modelo numérico e posteriormente são apresentados os modelos em análises, suas geometrias e dimensões, malhas de elementos finitos e as condições de contorno.

O capítulo 5 expõe os resultados do método de cálculo simplificado e numéricos para a carga de colapso para uma temperatura ambiente constante de 20 [°C], taxa de carbonização, e o tempo de resistência ao fogo em função do grau de utilização para uma viga em situação de incêndio.

O capítulo 6 foi dedicado às conclusões finais sobre todo o trabalho desenvolvido bem como às sugestões para futuros trabalhos nesta área de desenvolvimento.

## Capítulo 2: Estado da arte

---

Neste capítulo serão expostas pesquisas bibliográficas com o objetivo de contextualizar e comparar os estudos já desenvolvidos, que auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

### 2.1 TRABALHOS DESENVOLVIDOS

Nos últimos 15 anos vários estudos foram desenvolvidos no âmbito das estruturas de madeira em situações de incêndio, sendo feitas pesquisas referentes à interferência da temperatura sobre as propriedades mecânicas e análises do comportamento dos elementos de madeira expostos ao fogo, através de simulação numérica e experimental. A seguir é exposta uma sucinta descrição de trabalhos desenvolvidos por outros autores.

Em 2005, Pinto desenvolveu em seu trabalho de doutorado ensaios experimentais com dois tipos de madeira de *Eucalyptus* das espécies *citriodora* e *grandis*. No estudo, as vigas foram expostas ao incêndio padrão acompanhando a curva proposta pela ASTM E119, com aquecimento nas quatro faces, para determinar a taxa de carbonização [5].

Mais tarde, em 2010, Massimo Fragiaco *et.al.* realizaram um estudo numérico e experimental, utilizando um modelo numérico com código em elementos finitos com a contribuição do Abaqus para avaliar a resistência da estrutura de madeira. Esta pesquisa foi realizada em duas etapas. No primeiro estágio foi realizada uma análise térmica do elemento de madeira exposto ao fogo seguindo-se da aplicação de uma carga constante ao longo do tempo, realizando uma análise estrutural, sendo possível verificar a redução das propriedades mecânicas da madeira com o aumento da temperatura ao longo do tempo. Nesta pesquisa os resultados experimentais em condições de temperatura, deslocamento e tempo de falha foram aceitáveis quando comparados com os resultados numéricos realizados [6].

Em 2016, Sean Lineham *et. al.* elaboraram uma série de ensaios em vigas de CTL (*Cross-laminated timber*) expostas ao fogo e sujeitas a carregamento. Esses testes foram realizados com curvas de incêndio não normalizada, usando um fluxo de calor para causar combustão contínua. Esta pesquisa foi comparada com o Eurocódigo 5, Parte 1-2 e foi possível concluir que o mesmo não se aplica a curva de incêndio não normalizada [7].

No mesmo ano, Gisele Martins desenvolveu uma análise numérica e experimental de vigas de madeira laminada colada em situação de incêndio. Este trabalho investigou o comportamento térmico e mecânico de elementos estruturais de madeira laminada colada (MLC) exposta à curva de incêndio-padrão ISO 834, sendo utilizados duas espécies de madeira (*Eucalyptus* e *Pinus*). O objetivo principal deste estudo foi observar a resistência ao fogo de elementos de MLC, analisando a influência da espécie de madeira, da densidade e dos tratamentos preservantes. Os resultados numéricos obtidos em relação a deflexão a meio vão e a análise da temperatura ao longo da profundidade dos elementos foram comparados com os resultados experimentais, sendo possível verificar que os métodos de dimensionamento (simples e avançado) revela risco à segurança contra incêndio para valores da taxa de carbonização das espécies brasileiras determinadas por métodos de cálculo ou normas internacionais [1].

O trabalho de mestrado desenvolvido por Gabriel Costa em 2017, teve como objetivo principal avaliar o comportamento de lajes celulares de madeira Abeto expostas em situações de incêndio, em conformidade com a curva ISO 834, por meio de simulações numéricas para análise térmica não-linear em regime transiente, empregando o método dos elementos finitos. A confirmação do modelo térmico aplicado foi realizada através da comparação entre a velocidade de carbonização calculada para os modelos propostos e os valores prescritos no Eurocódigo. A partir da análise térmica foi possível verificar o aumento da resistência ao fogo com o emprego de materiais isolantes, contribuindo para o aumento nos níveis de segurança em lajes celulares de madeira [3].

No ano seguinte, Pedro Gouveia avaliou a segurança em projeto de elementos estruturais do tipo viga em madeira, com e sem isolamento. Para isto, foi necessário definir a carga em projeto a submeter a meio vão em vigas simplesmente apoiadas à temperatura ambiente e com exposição ao fogo em uma ou três frentes. O trabalho consistiu na análise da resistência à flexão e no cumprimento das regras de segurança impostas pelo Eurocódigo e na avaliação da resistência ao fogo nos elementos de madeira protegidos com material isolante, podendo ser observado um atraso no início da carbonização. Foram realizados

diferentes modelos de cálculo usando algoritmos de análise mecânica para carga incremental, análise térmica em regime transiente e análise termomecânica que foram comparados com a metodologia de cálculo analítico [8].

Lopes em 2019, em seu mestrado avaliou os possíveis fatores que podem influenciar as propriedades físicas e mecânicas da Madeira Abeto de Douglas. Na primeira fase do estudo, em conformidade com EN 408, foi realizado ensaios de flexão e compressão paralela ao grão para obtenção das suas respectivas resistências e do módulo de elasticidade. Na segunda fase, foi determinado o teor de umidade e as densidades básica e aparente do material. Por fim, foi executada uma ficha técnica para Madeira Abeto de Douglas, com os dados relacionados com as suas propriedades físicas e mecânicas [9], [10].

## **2.2 CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA**

Para o melhor uso da madeira é importante realizar a caracterização da sua natureza, a partir da suas propriedades, como por exemplo, massa volúmica, umidade, propriedades mecânicas, térmicas e acústicas [8].

As árvores apresentam diferenças estruturais a nível anatômico e botânico, podendo ser divididas em dois grupos: Gimnospérmicas (conhecida como Resinosas, Coníferas ou madeira macias), oriundas de plantas sem flores e, as Angiospérmicas (denominada de Folhosas, madeira estrutural ou madeira dura), procedente de plantas floridas [11].

As Gimnospérmicas são subdivididas em quatro subgrupos, porém somente o subgrupo das coniferopsidas e das conifiérais podem ser utilizadas na construção como material estrutural, devido a sua alta resistência à compressão e à tração. Enquanto, as Angiospérmicas são divididas em dois subgrupos: as monocotiledóneas, com baixa resistência estrutural e as dicotiledóneas, com alta resistência estrutural [9], [11].

## **2.3 CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA ABETO DE DOUGLAS**

O Abeto de Douglas é uma espécie de madeira conífera, é do gênero *Pseudotsuga* e pertence a família *Pinaceae*. Seu nome científico é *Pseudotsuga menziesii*, mas também é conhecida pelo seus nomes comuns como Douglas fir, árvore de Douglas e pinheiro do Oregon [9].

Esta espécie de madeira é muito empregue na construção e carpintaria exterior, ela pode ser utilizada como tábuas de cofragem, ripas para caixas e painéis, fabrico de poste e também como elementos estruturais [12].

O Abeto de Douglas foi escolhido para este estudo, pois inicialmente a caracterização da resistência ao fogo de elementos de madeira seria realizada por intermédio de ensaios laboratoriais e as amostras cedidas pela empresa IS-madeiras foram desta espécie de madeira. Devido a pandemia este trabalho foi adaptado e a caracterização da resistência ao fogo de elementos de madeira foi realizada através de simulações numéricas, mas o material utilizado se manteve o mesmo do projeto inicial.

#### **2.4 ESTRUTURA DA MADEIRA E ELEMENTOS CONSTITUINTES**

A madeira é um material natural e heterogêneo que contém diversos tipos de células que exercem funções específicas na árvore. Estas células estão dispostas no sentido longitudinal, radial e tangencial da madeira; e as mesmas se encontram ligadas umas às outras por meio da lignina, compondo o tecido lenhoso [13].

Os principais constituintes químicos da madeira são a celulose, a hemicelulose, a lignina e extrativos em geral, que na generalidade dispõem das porcentagens exibidas da Tabela 1 [5].

Tabela 1 – Composição dos constituintes químicos da madeira, [5].

<b>Constituinte</b>	<b>Composição [%]</b>	<b>Natureza polimérica</b>	<b>Função</b>
Celulose	45 - 50	Molécula linear cristalina	Sustentação
Hemicelulose	20 - 25	Molécula ramificada amorfa	Matriz
Lignina	20 - 30	Molécula tridimensional amorfa	Matriz

Os tecidos vegetais são compostos principalmente por celulose, tanto nas angiospermas quanto nas gimnospermas. As hemiceluloses são polissacarídeos que estão ligados a celulose na parede celular, apesar de serem formados por cadeias poliméricas menores que a da celulose, ainda asseguram suporte mecânico às fibras de celulose. A lignina por sua vez, configura uma malha tridimensional com ligações cruzadas, possuindo uma estrutura macromolecular diferente da exibida pela celulose e pela hemicelulose. A mesma,

desempenha o papel de adesivo entre os vários tecidos da madeira, conferindo-lhes resistência e rigidez, além de ser a maior fonte de compostos aromáticos. Ademais, a madeira ainda apresenta diversos extrativos na sua composição [13].

## 2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

As propriedades mecânicas são muito importantes para classificar e caracterizar a madeira, quando se trata de estabilidade estrutural e durabilidade. A madeira pode ser caracterizada como um material anisotrópico, isto é, apresenta propriedades únicas e independentes nas direções dos três eixos perpendiculares entre si: tangencial, radial e longitudinal. O eixo tangencial é perpendicular às fibras e tangente aos anéis de crescimento, o eixo radial é normal aos anéis de crescimento e o eixo longitudinal é paralelo às fibras e ao tronco da árvore, como mostra a Figura 1 [14].

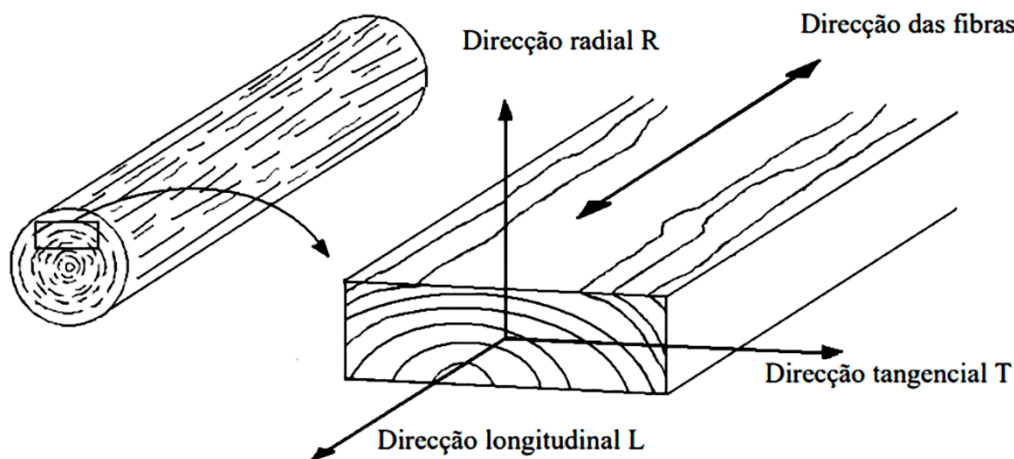


Figura 1 – Direções dos eixos principais, [15].

Conforme for executado o corte no elemento de madeira, a mesma pode exibir maior resistência em um sentido ou outro. Isso ocorre pelo fato das direções citadas revelar comportamento, características e propriedades físicas e mecânicas específicas. A distinção das propriedades entre as direções radial e tangencial tem pouca relevância, sendo necessário apenas distinguir as propriedades na direção das fibras paralelas e também na direção perpendicular às mesmas [16].

A exposição da madeira a temperaturas elevadas causa efeitos temporários ou permanentes, os quais dependem da duração de tempo que a madeira esteve submetida ao

calor e da temperatura. Os efeitos temporários são ocasionados pelo aquecimento da madeira por pequenos períodos de tempo, acarretando a redução provisória da resistência mecânica que é recuperada após o resfriamento do elemento. Os efeitos permanentes por sua vez, não desaparecem depois que a temperatura volta ao normal e ocorrem a temperaturas superiores a 65 [°C] [13].

### 2.5.1 *Módulo de elasticidade*

O módulo de elasticidade ou módulo de Young foi determinado por Thomas Young no século XVIII. Esta propriedade é caracterizada como a tensão máxima que um material pode suportar sem que haja deformações permanentes e, após os esforços serem removidos o mesmo regressa ao seu estado original. No momento em que esse limite é excedido em níveis superiores de tensão, ocorre as deformações plástica ou permanente, podendo ocasionar uma rutura [17].

Esse coeficiente elástico varia de acordo com a espécie e também com a variação do teor de umidade e densidade. No caso da madeira, o módulo de elasticidade na direção longitudinal é maior que o módulo de elasticidade nas direções radial e tangencial [17].

Quanto mais rígido o material, maior o módulo de elasticidade, ou seja, maior sua resistência em relação às deformações [8].

A Tabela 2 expõem os valores dos módulos de elasticidade de diferentes espécies de madeira, com teor de umidade de 12% [18].

Tabela 2 – Módulo de elasticidade de algumas espécies de madeira, [18].

Espécies	Módulo de elasticidade [MPa]		
	E <sub>L</sub>	E <sub>T</sub>	E <sub>R</sub>
<b>Madeiras duras</b>			
Freixo branco	12000,0	960,0	1500,0
Álamo amarelo	10900,0	468,7	1002,8
Vidoeiro amarelo	13900,0	695,0	1084,2
Cerejeira preta	10300,0	885,8	2029,1
<b>Madeiras macias</b>			
Cedro branco	5500,0	445,5	1006,5
Cedro vermelho	6500,0	357,5	526,5
Abeto de Douglas	10300,0	515,0	700,4
Pinho vermelho	11200,0	492,8	985,6
Hemlock	11300,0	350,3	655,4
Larício	12900,0	838,5	1019,1

Os três módulos de elasticidade, designados E<sub>L</sub>, E<sub>T</sub> e E<sub>R</sub>, são respetivamente os módulos de elasticidade ao longo dos eixos longitudinal, tangencial e radial da madeira [18].

Quando a madeira é exposta a condições de incêndio, o módulo de elasticidade tende a diminuir com o aumento da temperatura até a perda total de resistência [15].

De acordo com o Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), o valor do módulo de elasticidade para madeira macia em situação de incêndio deve ser multiplicado por um fator de redução que depende da temperatura, como pode ser observado na Figura 2 [19].

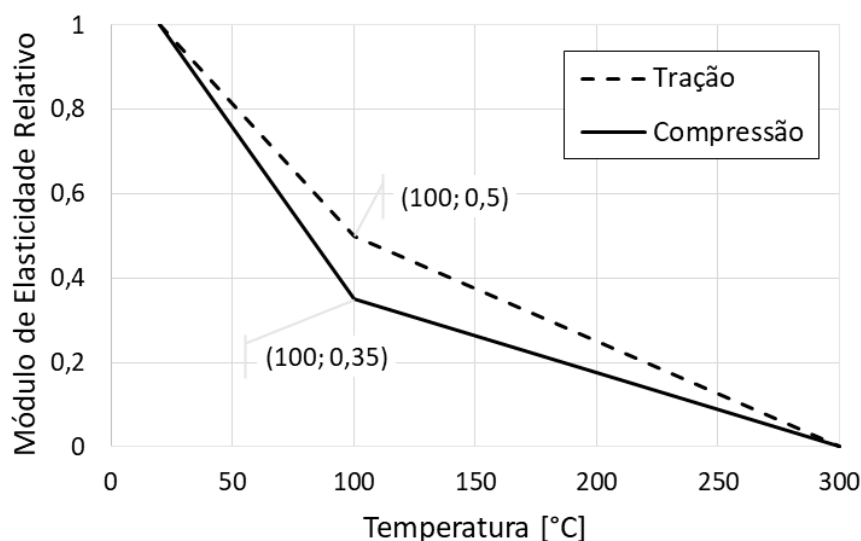


Figura 2 – Efeito da temperatura no módulo de elasticidade para madeira macia, adaptado de [19].

### 2.5.2 Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson é uma constante elástica que mensura a proporcionalidade entre a deformação perpendicular a uma aplicação de carga e a deformação paralela à mesma, sendo uma grandeza sem dimensões. Esta propriedade varia de acordo com a espécie da madeira e com o nível do teor de umidade do material, o que pode ser observado na Tabela 3 [8].

Tabela 3 – Coeficiente de Poisson de algumas espécies de madeiras duras e macias, [18].

<b>Espécies</b>	<b><math>\nu_{LR}</math></b>	<b><math>\nu_{LT}</math></b>	<b><math>\nu_{RT}</math></b>	<b><math>\nu_{TR}</math></b>	<b><math>\nu_{RL}</math></b>	<b><math>\nu_{TL}</math></b>
<b>Madeiras duras</b>						
Freixo branco	0,371	0,440	0,684	0,360	0,059	0,051
Álamo amarelo	0,318	0,392	0,703	0,329	0,030	0,019
Vidoeiro amarelo	0,426	0,451	0,697	0,426	0,043	0,024
Cerejeira preta	0,392	0,428	0,695	0,282	0,086	0,048
<b>Madeiras macias</b>						
Cedro branco	0,337	0,34	0,458	0,345	-	-
Cedro vermelho	0,378	0,296	0,484	0,403	-	-
Abeto de Douglas	0,292	0,449	0,390	0,374	0,036	0,029
Pinho vermelho	0,347	0,315	0,408	0,308	-	-
Hemlock	0,485	0,423	0,442	0,382	-	-
Larício	0,355	0,276	0,389	0,352	-	-

Na denominação, a primeira letra do subscrito é referente a direção em que é aplicada a tensão e a segunda letra refere-se à direção da deformação transversal. As letras L, R e T, representam as direções dos eixos longitudinal, radial e tangencial, respetivamente [8].

### 2.5.3 Módulo de rigidez

O módulo de rigidez, também conhecido como módulo de cisalhamento, designa a resistência à deflexão de um elemento originada por tensão de cisalhamento. Os módulos de rigidez  $G_{LR}$ ,  $G_{LT}$  e  $G_{RT}$  são constantes elásticas no plano LR, LT e RT [18].

O módulo de rigidez de diferentes espécies de madeira, com teor de umidade a 12%, são expostos na Tabela 4 [18].

Tabela 4 – Módulo de rigidez de algumas espécies de madeira, [18].

Espécies	Módulo de rigidez [MPa]		
	GLR	GLT	GRT
<b>Madeiras duras</b>			
Freixo branco	1308,0	924,0	-
Álamo amarelo	817,5	752,1	119,9
Vidoeiro amarelo	1028,6	945,2	236,3
Cerejeira preta	1514,1	999,1	-
<b>Madeiras macias</b>			
Cedro branco	1155,0	1028,5	82,5
Cedro vermelho	565,5	559,0	32,5
Abeto de Douglas	659,2	803,4	72,1
Pinho vermelho	1075,2	907,2	123,2
Hemlock	429,4	361,6	33,9
Larício	812,7	890,1	90,3

#### 2.5.4 Propriedades de resistência

A resistência a forças exteriores e a tensões internas provenientes do encurtamento e alongamento do elemento de madeira é um fator que depende das propriedades mecânicas da madeira. Esta resistência altera muito dependendo da intensidade e do tipo de carregamento pelo qual o elemento está sendo solicitado, seja de compressão, tração, flexão ou corte [11].

A madeira é um material composto por fibras, por isso a sua resistência depende do sentido da carga, sendo assim, é importante diferenciar a resistência paralela ou perpendicular às fibras. A resistência para solicitações no sentido paralelo é sempre maior que na direção perpendicular das fibras. Desta maneira, entende-se que não é correto dizer em resistência global para um elemento estrutural de madeira [20], [16].

##### 2.5.4.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão paralela às fibras é 15 vezes maior que a resistência à compressão perpendicular às fibras. A Tabela 5 mostra os valores da resistência à compressão paralela e perpendicular às fibras de algumas espécies de madeira com teor de umidade de 12% [20].

Tabela 5 – Resistência à compressão paralela e perpendicular às fibras, [18].

<b>Espécies</b>	<b>Compressão paralela às fibras [kPa]</b>	<b>Compressão perpendicular às fibras [kPa]</b>
<b>Madeiras duras</b>		
Freixo branco	51100	8000
Álamo amarelo	38200	3400
Vidoeiro amarelo	56300	6700
Cerejeira preta	49000	4800
<b>Madeiras macias</b>		
Cedro branco	27300	2100
Cedro vermelho	31400	3200
Abeto de Douglas	43000	5100
Pinho vermelho	41900	4100
Hemlock	49000	3800
Larício	52500	6400

A compressão paralela às fibras pode acarretar a separação das fibras longitudinais, a rutura das camadas intercelulares, o corte e a rutura das paredes celulares. Enquanto a compressão perpendicular às fibras pode ocasionar mudança de forma na seção transversal e diminuição das cavidades celulares, a rutura pode ocorrer por deformação plástica das paredes celulares [9], [20].

#### 2.5.4.2 Resistência à tração

Um ponto em que a madeira se diferencia dos outros materiais é o fato de possuir uma resistência à tração duas vezes maior que a resistência a compressão. Além disso, ainda dispõe de uma resistência paralela às fibras 50 vezes superior à resistência perpendicular às fibras. A Tabela 6 exhibe os valores da resistência à tração paralela e perpendicular às fibras de algumas espécies de madeira com teor de umidade de 12% [21].

Tabela 6 – Resistência à tração paralela e perpendicular às fibras, [18].

<b>Espécies</b>	<b>Tração paralela às fibras [kPa]</b>	<b>Tração perpendicular às fibras [kPa]</b>
<b>Madeiras duras</b>		
Freixo branco	-	6500
Álamo amarelo	-	3700
Vidoeiro amarelo	109600	6300
Cerejeira preta	-	3900
<b>Madeiras macias</b>		
Cedro branco	-	1700
Cedro vermelho	45500	1500
Abeto de Douglas	107600	2300
Pinho vermelho	-	3200
Hemlock	89600	2300
Larício	111700	3000

Foi verificado que ao aplicar tração paralela às fibras da madeira, ocorre a aproximação das mesmas, ocasionando uma maior aderência e coesão na madeira proporcionando a aplicação de maiores carregamentos. A resistência à tração perpendicular às fibras é baixa e por esse motivo é normal não esforçar os elementos de madeira neste sentido [21].

#### 2.5.4.3 Resistência à flexão

O esforço de flexão está imposto sempre em áreas livres debaixo de apoios, onde há a necessidade de vencer a força da gravidade. Quando isso ocorre, três tensões se manifestam no elemento; a tensão de compressão, a tensão de cisalhamento e a tensão de tração, como pode ser visto na Figura 3 [11].

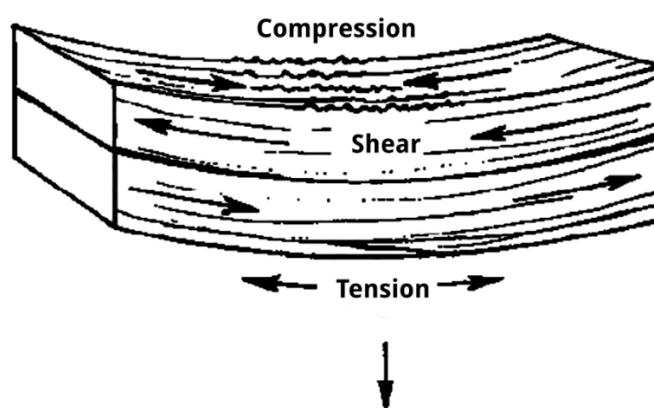


Figura 3 – Flexão em um elemento de madeira, [22].

Quando o elemento de madeira simplesmente apoiado está submetido a um carregamento de flexão, o lado superior do eixo neutro sofre compressão nas fibras superiores, enquanto o lado inferior suporta tração nas fibras inferiores. O cisalhamento por sua vez, ocorre entre os planos horizontais da madeira, sendo máximos no eixo neutro e nulos nas superfícies [11].

No estágio inicial as tensões de tração e de compressão são iguais, mas no decorrer do ensaio de flexão a zona neutra passa a se mover para o lado da tração. Conforme o tempo passa, a tensão na direção da compressão para de crescer, em consequência das deformações plásticas que se iniciam nesta direção. Enquanto isso o lado da tração permanece resistindo sem que haja deformação plástica, até cerca do dobro da resistência suportada pela compressão. O esforço de tração continua até que as deformações plásticas se iniciem e em consequência atinja a resistência máxima de tração da madeira, sucedendo a sua rutura [23].

A rutura mais comum apresentada em elementos de madeira à flexão é dada pelo rompimento no lado oposto da carga aplicada (lado submetido à tração), geralmente com uma falha longa seguindo a linha neutra, enquanto isso o lado de aplicação da carga só indica amassamento, devido a deformação plástica [23].

#### **2.5.4.4 Resistência ao corte**

A madeira está submetida ao corte quando é aplicado duas forças em sentido opostos na mesma, ocorrendo o deslizamento das fibras em diferentes planos. A resistência ao corte pode ser originada por três tipos de tensões: tensão paralela às fibras, tensão normal às fibras e a tensão oblíqua às fibras. Na Tabela 7 é exibido os valores da resistência ao corte paralela às fibras de algumas espécies de madeira com teor de umidade de 12% [24].

Tabela 7 – Resistência ao corte paralela às fibras, [18].

<b>Espécies</b>	<b>Resistência ao corte paralela às fibras [kPa]</b>
<b>Madeiras duras</b>	
Freixo branco	13200
Álamo amarelo	8200
Vidoeiro amarelo	13000
Cerejeira preta	11700
<b>Madeiras macias</b>	
Cedro branco	5900
Cedro vermelho	6800
Abeto de Douglas	10400
Pinho vermelho	8400
Hemlock	8600
Larício	9400

De acordo com o Eurocódigo 5, Parte 1-1 (2004), a resistência ao corte perpendicular às fibras da madeira é aproximadamente igual ao dobro da resistência à tração perpendicular às fibras [25].

#### **2.5.4.5 Valor da resistência mecânica em situação de incêndio**

De acordo com o anexo B, métodos avançados de cálculo, do Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), para definir o valor da resistência mecânica em situação de incêndio para a madeira macia, deve-se multiplicar a resistência por um fator de redução dependente da temperatura, conforme a Figura 4 [19].

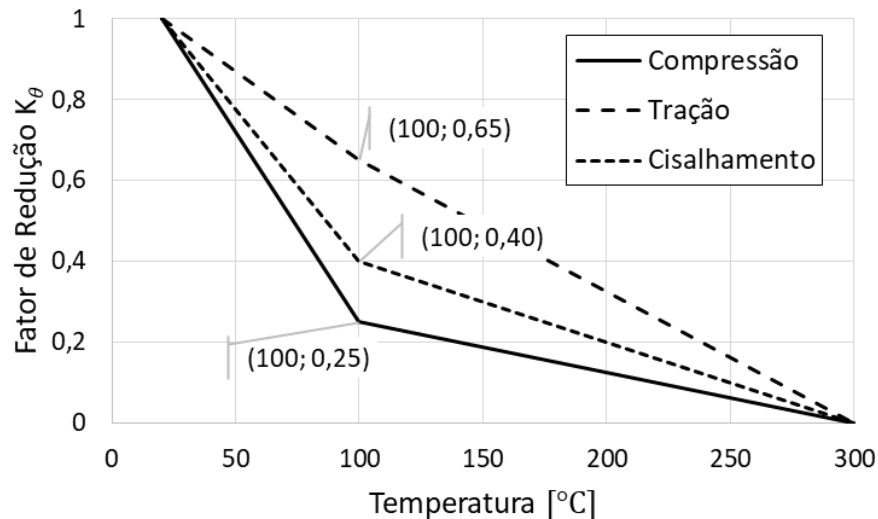


Figura 4 – Fator de redução da resistência da madeira macia, adaptado de [19].

## 2.6 CRITÉRIOS DE RUTURA

Os critérios de rutura têm como propósito estabelecer as tensões admissíveis para os estados de tensões complexos. Estes critérios têm por finalidade definir leis pelas quais pode-se, pelo desempenho mecânico do material nos ensaios de compressão ou tração simples, analisar a condição de rutura sob qualquer espécie de tensão composta [26].

Inicialmente os critérios de rutura foram elaborados para materiais isotrópicos com simetria de resistência, mais tarde foram desenvolvidos critérios que preveem a resistência de materiais isotrópicos assimétricos, ortotrópicos e logo mais foram realizados os critérios de rutura para os materiais anisotrópicos. Para cada material existem critérios de rutura específicos, sendo os mais utilizados para a madeira, os critérios de: Tsai-Wu, Tsai-Hill e Hill. Neste trabalho o critério de rutura utilizado será o critério de Hill [26].

### 2.6.1 Critério de Tsai-Wu

O critério de falha de Tsai-Wu foi proposto em 1971 por Tsai e Wu, o qual foi fundamentado na Teoria de Falha da Energia de Deformação Total. Este método tem o objetivo de descrever o comportamento do material de maneira coerente e para isso foi necessário aumentar o número de termos na equação do critério de rutura de Tsai-Hill, na tentativa de melhorar a conformidade dos dados experimentais adquiridos para os diversos materiais [27], [28].

Esse critério consegue prever o carregamento na presença de diversos estados de tensão empregando os tensores de força que tem como finalidade modificar um sistema de coordenadas em outro, sendo estes tensores de forças os encarregados por diferenciar as tensões de tração e de compressão [27].

Tendo em vista materiais completamente anisotrópicos, verifica-se que estes apresentam modos de falha vinculados tanto pelas tensões normais quanto pelas tensões tangenciais, dado que as falhas podem acontecer em consequência de distintos conjuntos de tensões que atuam sobre o componente [28].

Para demonstrar a teoria geral de resistência para materiais anisotrópicos, de Tsai e Wu, temos a expressão (1).

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1, \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (1)$$

A forma expandida da expressão (1) pode ser observada na expressão (2):

$$\begin{aligned} F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_3 \sigma_3 + F_4 \sigma_4 + F_5 \sigma_5 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 \\ + 2F_{13} \sigma_1 \sigma_3 + 2F_{14} \sigma_1 \sigma_4 + 2F_{15} \sigma_1 \sigma_5 + 2F_{16} \sigma_1 \sigma_6 + F_{22} \sigma_2^2 \\ + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + 2F_{24} \sigma_2 \sigma_4 + 2F_{25} \sigma_2 \sigma_5 + 2F_{26} \sigma_2 \sigma_6 + F_{33} \sigma_3^2 \\ + 2F_{34} \sigma_3 \sigma_4 + 2F_{35} \sigma_3 \sigma_5 + 2F_{36} \sigma_3 \sigma_6 + F_{44} \sigma_4^2 + 2F_{45} \sigma_4 \sigma_5 \\ + 2F_{46} \sigma_4 \sigma_6 + F_{55} \sigma_5^2 + 2F_{56} \sigma_5 \sigma_6 + F_{66} \sigma_6^2 = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

Na expressão (2) nota-se a presença de vários coeficientes de resistência. Para obter estes parâmetros de resistência é preciso realizar ensaios uniaxiais de tração, compressão e cisalhamento. A Tabela 8 exhibe os valores dos coeficientes  $F_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) e  $F_{ij}$  ( $i = 1$  a 6) do tensor polinomial [29].

Tabela 8 – Coeficientes  $F_i$  e  $F_{ij}$ , [29].

$F_1 = \frac{1}{f_{t1}} - \frac{1}{f_{c1}}$	$F_2 = \frac{1}{f_{t2}} - \frac{1}{f_{c2}}$	$F_3 = \frac{1}{f_{t3}} - \frac{1}{f_{c3}}$
$F_{11} = \frac{1}{f_{t1} * f_{c1}}$	$F_{22} = \frac{1}{f_{t2} * f_{c2}}$	$F_{33} = \frac{1}{f_{t3} * f_{c3}}$
$F_{44} = \frac{1}{f_{v4}^2}$	$F_{55} = \frac{1}{f_{v5}^2}$	$F_{66} = \frac{1}{f_{v6}^2}$

Sendo:  $f_t$  - resistência à tração,  $f_c$  - resistência à compressão e  $f_v$  - resistência ao cisalhamento.

O único coeficiente que demonstra dificuldade em ser calculado é o  $F_{12}$ , pois o mesmo requer o uso de um ensaio biaxial. Diante da dificuldade de determinação experimental deste coeficiente e a indiferença do seu valor exato para a utilização do critério, usaram-se dados experimentais já existentes e apresentaram uma expressão para estimar esse valor, dada pela expressão (3), normalmente esta expressão oferece um bom resultado [28].

$$F_{12} = -\frac{1}{2}\sqrt{F_{11}F_{22}} \quad (3)$$

Empregando o critério de Tsai-Wu para materiais ortotrópicos e considerando o estado plano de tensões, simplificando o uso da expressão (2), temos:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{44}\sigma_4^2 = 1 \quad (4)$$

A expressão (4) representa que o estado de tensões encontra-se num ponto crítico, porém se o estado de tensões exibir resultados menores que 1 do lado direito, tem-se situação de segurança [28].

### 2.6.2 Critério de Tsai-Hill

O critério de rutura de Tsai-Hill foi elaborado com base na generalização da Teoria de Distorção Máxima. Assim sendo a rutura do material acontece quando a energia de distorção é maior ou igual ao valor de resistência da camada, não existindo diferença entre as tensões de compressão e de tração [27].

A expressão do critério de rutura de Tsai-Hill para um plano de isotropia transversal nas direções 2 e 3, ou seja,  $f_{t2}=f_{t3}$  é definida na expressão (5) [26].

$$\frac{\sigma_1^2}{f_{t1}^2} + \frac{\sigma_2^2}{f_{t2}^2} - \left( \frac{1}{f_{t1}^2} + \frac{1}{f_{t2}^2} - \frac{1}{f_{t3}^2} \right) \sigma_1\sigma_2 + \frac{\sigma_4^2}{f_{v4}^2} = 1 \quad (5)$$

$$\left( \frac{\sigma_1}{f_{t1}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_2}{f_{t2}} \right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{f_{t1}^2} + \left( \frac{\sigma_4}{f_v} \right)^2 = 1 \quad (6)$$

Onde  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são ambas tensões de tração na equação acima. O critério de Tsai-Hill quantifica a diferença em tração e compressão do elemento, logo, quando as tensões normais  $\sigma_1$  e/ou  $\sigma_2$  são de compressão, as equivalentes tensões de compressão devem ser utilizadas na expressão (6) [30].

### 2.6.3 Critério de Hill

O critério de Hill para materiais anisotrópicos é fundamentado no critério de escoamento de von Mises, sendo este uma generalização do estudo do comportamento de metais dúcteis em escoamento a princípio isotrópicos, que nas condições de elevadas deformações, exibem sua estrutura cristalina disposta na direção do esforço, dando um comportamento anisotrópico [30].

Este critério de rutura considera que o modo de falha é independente da pressão hidrostática e que as tensões de escoamento do material são as mesmas na tração e compressão. Pode ser utilizado para modelar materiais em que a microestrutura influencia o comportamento macroscópico do material, como metais e compósitos [26], [31].

O critério de Hill pode ser descrito matematicamente na expressão (7) [31].

$$f(\sigma, \sigma_y) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 - \sigma_y^2 = 0 \quad (7)$$

Onde os valores de  $F$ ,  $G$ ,  $H$ ,  $L$ ,  $M$  e  $N$  são parâmetros característicos do estado de anisotropia do material. Esses coeficientes podem ser definidos por meio das tensões limites de escoamento nas direções principais do material, logo os coeficientes de resistência deste critério são:

$$F = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \quad (8)$$

$$G = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \quad (9)$$

$$H = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad (10)$$

$$L = \frac{3}{2} \left( \frac{1}{R_{23}^2} \right) \quad (11)$$

$$M = \frac{3}{2} \left( \frac{1}{R_{13}^2} \right) \quad (12)$$

$$N = \frac{3}{2} \left( \frac{1}{R_{12}^2} \right) \quad (13)$$

Onde as taxas de tensão de escoamento direcional são parâmetros de entrada do usuário [31]:

$$R_{11} = \frac{\sigma_{11}^y}{\sigma_y} \quad (14)$$

$$R_{22} = \frac{\sigma_{22}^y}{\sigma_y} \quad (15)$$

$$R_{33} = \frac{\sigma_{33}^y}{\sigma_y} \quad (16)$$

$$R_{12} = \sqrt{3} \frac{\sigma_{12}^y}{\sigma_y} \quad (17)$$

$$R_{23} = \sqrt{3} \frac{\sigma_{23}^y}{\sigma_y} \quad (18)$$

$$R_{13} = \sqrt{3} \frac{\sigma_{13}^y}{\sigma_y} \quad (19)$$

Onde  $\sigma_i^y$  é a tensão de escoamento na direção definida pelo índice  $i$  e  $\sigma_y$  é tensão de escoamento isotrópica [31].

O critério de Hill estabelece uma superfície no espaço de tensão de seis dimensões e a direção do escoamento é normal à superfície. Os incrementos de deformação plástica no sistema de coordenadas anisotrópica são [31]:

$$d\varepsilon_{11}^{pl} = d\lambda[H(\sigma_1 - \sigma_2) + G(\sigma_1 - \sigma_3)] \quad (20)$$

$$d\varepsilon_{22}^{pl} = d\lambda[F(\sigma_2 - \sigma_3) + H(\sigma_2 - \sigma_1)] \quad (21)$$

$$d\varepsilon_{33}^{pl} = d\lambda[G(\sigma_3 - \sigma_1) + F(\sigma_3 - \sigma_2)] \quad (22)$$

$$d\varepsilon_{23}^{pl} = d\lambda[2L\sigma_{23}] \quad (23)$$

$$d\varepsilon_{31}^{pl} = d\lambda[2M\sigma_{31}] \quad (24)$$

$$d\varepsilon_{12}^{pl} = d\lambda[2N\sigma_{12}] \quad (25)$$

## 2.7 PROPRIEDADES TÉRMICAS DA MADEIRA

As propriedades térmicas da madeira são de grande importância, pois as mesmas possibilitam avaliar o comportamento do material quando este está exposto a mudanças de temperatura [8].

### 2.7.1 Calor específico

O calor específico de um material é definido como a quantidade de energia térmica necessária para aumentar uma unidade de temperatura em uma unidade de massa, ou seja, elevar a temperatura de 1 [kg] em 1 [°C] ou [K] [32].

Na madeira o calor específico está em função da temperatura e do teor de umidade, mas não depende da densidade ou da espécie de madeira. Sabe-se que esta propriedade é relativamente alta na madeira, comparada com outros materiais. Isto implica que, ao expor este material a uma determinada quantidade de calor, ele se aquecerá menos que os materiais com calor específico menor, como por exemplo metais, concretos e tijolos [23].

Os valores apresentados no Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), de calor específico estão expostos na Tabela 9 e na Figura 5 [19].

Tabela 9 – Calor específico da madeira, [19].

Temperatura [°C]	Calor Específico [kJ/kgK]
20	1,53
99	1,77
99	13,60
120	13,50
120	2,12
200	2,00
250	1,62
300	0,71
350	0,85
400	1,00
600	1,40
800	1,65
1200	1,65

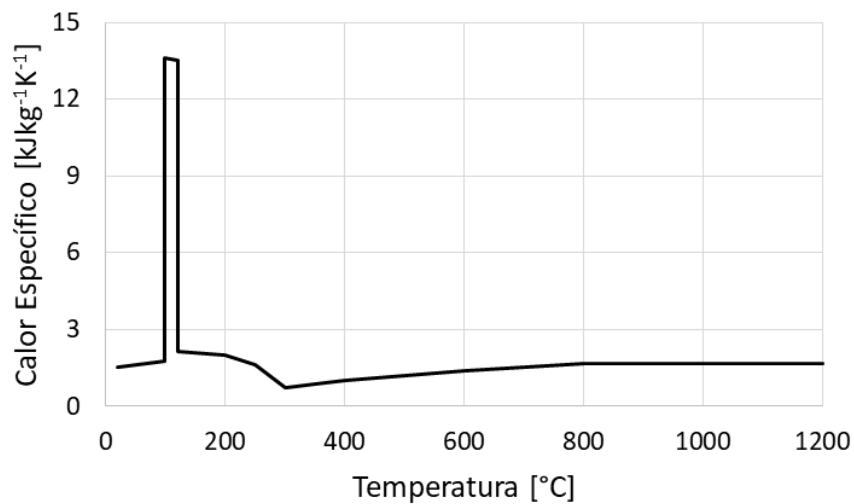


Figura 5 – Calor específico da madeira em função da temperatura, adaptado de [19].

### 2.7.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica fundamenta-se na taxa de energia calorífica que será transferida por meio de 1 [m<sup>2</sup>] de área transversal, por cada diferença de temperatura, por toda a extensão da superfície. Logo, quanto maior o coeficiente de condutividade térmica do material, maior o fluxo de calor transferido [23].

Essa propriedade é uma característica específica de cada material, pois depende da estrutura física, atômica e molecular da madeira. A madeira pode ser considerada um bom isolante térmico, pois a organização estrutural do seu tecido contém pequenos volumes de ar no seu interior, impedindo a transferência de temperatura. Além disso, a celulose que a compõem é um mau condutor de calor [33].

Ao contrário dos materiais homogêneos, o fluxo de calor pela madeira muda em cada direção anatômica e com as irregularidades estruturais, como fendas e nós, além de variar de acordo com a massa específica, o teor de umidade e o teor de extrativos, ou seja, quanto maior for essas propriedades, maior será a sua condutividade térmica [23].

Os valores apontados no Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), de condutividade térmica da madeira estão exibidos na Tabela 10 e na Figura 6 [19].

Tabela 10 – Condutividade térmica da madeira, [19].

<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Condutividade térmica [W/mK]</b>
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50

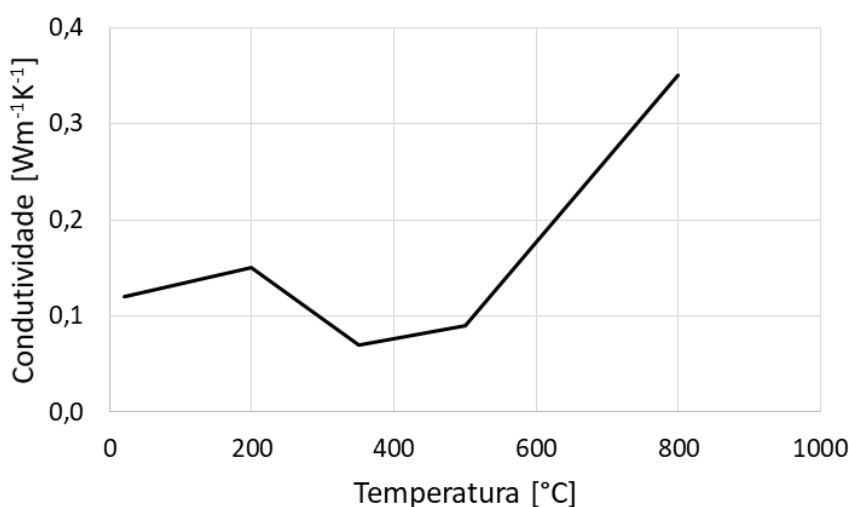


Figura 6 – Condutividade térmica da madeira em função da temperatura, adaptado de [19].

### 2.7.3 Coeficiente de dilatação térmica linear

O coeficiente de dilatação térmica linear pode ser definido como a medida da variação das dimensões de um elemento submetido a mudança de temperatura. A expansão térmica (ou retração) da madeira é influenciada pela orientação das fibras e pela densidade da madeira [34].

A madeira sofre expansão até uma temperatura de 80 [°C] e passa a se retrair quando é exposta a temperaturas superiores a 100 [°C], por causa da evaporação da água presente na mesma. A retração da madeira pode ser estimada em 8% na direção radial, 12% na direção tangencial e na direção longitudinal pode variar entre 0,1% a 0,2%. A Tabela 11 apresenta a deformação térmica da madeira em diferentes temperaturas [34].

Tabela 11 – Deformação térmica da madeira em diferentes temperaturas, [34].

<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Deformação térmica [m/m/°C]</b>
20	0,00008
50	0,0002
100	-0,0004
150	-0,0006
200	-0,0008
250	-0,0010
300	-0,0012

### 2.7.4 Teor de umidade

A madeira é um material higroscópico, que realiza constantemente trocas de água com o meio ambiente, em função da temperatura ambiente, umidade relativa do ar e a quantidade de água contida na própria madeira, até atingir o ponto de equilíbrio. A mudança do teor de água na madeira acarreta variações nas dimensões do material lenhoso quando as células absorvem ou eliminam água, causando o inchaço ou retração do elemento, além de influenciar as propriedades físicas e mecânicas [35].

A água se encontra sob três formas na madeira: água de constituição, água de impregnação e água livre. A água de constituição não é removida na fase de secagem, não sendo possível sua eliminação; a água de impregnação aparece entre as fibras e as células lenhosas, alterando suas propriedades físico mecânicas e por fim a água livre, que é originada

de qualquer acréscimo de água após o teor de umidade de saturação ser alcançado. Após o abate da árvore a água livre é liberada rapidamente enquanto a água impregnada sai lentamente, diminuindo drasticamente o teor de água em cerca de 20% a 30% para a maioria das espécies [20].

Foi estabelecido o valor de referência para o teor de umidade de 12%, como medida internacional para execução de ensaios de determinação das propriedades da madeira [11].

O teor de umidade da madeira pode ser obtido pela diferença entre a massa de madeira úmida e a massa dessa mesma amostra depois de seca em estufa, dividida pela massa da amostra seca, expresso em porcentagem [36].

#### *2.7.5 Massa volúmica*

A massa volúmica de materiais higroscópicos, como a madeira, dependem da sua umidade, ou seja, quanto maior o teor de água maior será sua massa volúmica, e também do peso da substância básica. Na madeira, a densidade também é influenciada pela composição química, largura do anel e porção de lenho do início ao fim da estação. Esta propriedade determina o peso que a madeira tem por cada unidade de volume [3], [16].

Na maior parte dos casos, os elementos de madeira com maior densidade apontam maior resistência mecânica, dureza e elasticidade, porém diminuem sua permeabilidade a soluções preservantes e sua trabalhabilidade [33].

A massa volúmica pode ser básica ou aparente. A massa volúmica básica pode ser determinada através da relação entre o peso absoluto seco da madeira em [g] ou [kg], por seu volume em [cm<sup>3</sup>] ou [m<sup>3</sup>], respetivamente, em estado de saturação [16], [37], [38].

A massa volúmica aparente é definida com base em um teor de umidade padrão de referência de 12% de teor de água, para cada classe de resistência. Esta mesma propriedade é empregada no dimensionamento de estruturas de madeira. A massa volúmica da madeira seca esta em função dos valores apresentados na Tabela 12 [23], [15].

Tabela 12 – Taxa de massa volúmica em função da temperatura, [19].

Temperatura [°C]	Taxa de massa volúmica
20	1+ $\omega$
99	1+ $\omega$
120	1,00
200	1,00
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0,00

$\omega$  é o teor de umidade

Levando em consideração as propriedades da madeira de Abeto de Douglas temos uma massa volúmica básica igual a 407 [kg/m<sup>3</sup>] e um teor de umidade de 12% , sendo assim obtemos a Tabela 13 [9].

Tabela 13 – Massa volúmica da madeira Abeto de Douglas.

Temperatura [°C]	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]
20	455,84
99	455,84
120	407,00
200	407,00
250	378,51
300	309,32
350	211,64
400	154,66
600	113,96
800	105,82
1200	0,00

## 2.8 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é estabelecida como uma energia térmica em trânsito de uma região para outra em elementos que podem estar no estado sólido, no estado líquido ou no

estado gasoso, devido a uma diferença de temperaturas entre elas. A troca de calor poderá ocorrer de três maneiras diferentes: condução, convecção e radiação [39].

### 2.8.1 Transferência de calor por condução

A transferência de calor por condução ocorre quando a energia térmica é transferida entre corpos sólidos e/ou entre fluidos estacionários. A condução transfere calor a nível atômico molecular quando há o contato entre as partículas de maior energia e, a transferência de energia ocorre para as partículas de menor energia, ou seja, região mais energizada apresenta moléculas vibrando com mais intensidade, conseqüentemente, cada molécula transfere energia para a molécula vizinha. O calor flui sempre dos corpos de alta temperatura para corpos com baixa temperatura [39].

A Lei de Fourier descreve o fluxo de calor por meio da condução térmica a partir da expressão (26), é possível verificar que o fluxo de calor ( $q''$ ) por unidade de área é proporcional à distribuição de temperaturas na direção do fluxo e uma constante de proporcionalidade ( $\lambda$ ) [40].

$$q'' = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (26)$$

A constante de proporcionalidade  $\lambda$  é nomeada condutividade térmica e varia conforme o material e a temperatura, mas em geral, essas variações não são muito significativas. Para a madeira, o valor de  $\lambda$ , obtido ao longo das suas fibras, é quase o dobro do valor determinado transversalmente, por se tratar de um material anisotrópico [15].

### 2.8.2 Transferência de calor por convecção

A transferência de calor por convecção ocorre na ocasião em que um fluido escoar sobre um corpo sólido ou por dentro de um canal, onde a temperatura do fluido e da superfície sólida são diferentes [15].

Em situação de incêndio a transferência de calor por convecção é a causadora da propagação do fogo, por causa do transporte de vapores e fumaça [41].

A transferência de calor por convecção pode ser classificada conforme o tipo de escoamento do fluido. Se o movimento do fluido for induzido artificialmente, ou seja, por

equipamento mecânico (bomba ou ventiladores), forçando o fluxo do fluido sobre a superfície, diz-se que a convecção é forçada. Por outro lado, se o movimento do fluido resultar dos efeitos da diferença de massa causada pela diferença de temperatura no fluido, consta que a convecção é livre. O efeito global de convecção pode ser representado pela Lei de Newton, expressão (27) [40].

$$q_c = h_c(T_w - T_f) \quad (27)$$

Onde,  $q_c$  representa o fluxo de calor transferido por convecção [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $T_w$  é a temperatura da superfície [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $T_f$  é a temperatura do fluido de escoamento em [ $^{\circ}\text{C}$ ] e a grandeza  $h_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção em [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]. De acordo com o Eurocódigo 1, Parte 1-2 (2002), para curva de incêndio padrão deve-se adotar o valor de 25 [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] [42].

### 2.8.3 Transferência de calor por radiação

O termo radiação térmica designa-se pela emissão contínua de energia dos corpos por meio de ondas eletromagnéticas e/ou fótons, dada a sua temperatura (ondas de calor). É desta maneira que o fluxo de calor é emitido e absorvido por um corpo, isto é, a radiação presente no interior do corpo é liberada por meio da superfície. Por outro lado, a radiação incidente na superfície exterior do corpo é absorvida até o centro do mesmo, onde é amenizada. Diferente dos outros métodos de transferência de calor, a radiação não precisa de um meio material para acontecer, podendo ocorrer no vácuo, onde se propaga sem qualquer tipo de redução [39].

A Lei de Stefan-Boltzmann, expressão (28), descreve o comportamento de corpos negros (corpos ideais que absorvem absolutamente toda energia que neles incida), mostra um limite superior para o poder emissivo, que corresponde à quantidade de radiação que esse corpo pode emitir [43].

$$\bar{E} = \bar{\sigma}T^4 \quad (28)$$

Nesta equação,  $T$  é temperatura absoluta da superfície [K],  $\bar{\sigma}$  define-se como a constante de proporcionalidade de Stefan-Boltzmann igual a  $5,6697 \times 10^{-8}$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ ] e  $\bar{E}$  corresponde a radiação do corpo negro em [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] [43].

O fluxo de radiação emitidos por corpos reais é sempre menor em comparação ao corpo negro, ambos à mesma temperatura, como pode ser visto na expressão (29) [15].

$$q_r = \bar{\varepsilon} \bar{E} = \bar{\varepsilon} \bar{\sigma} T^4 \quad (29)$$

Onde  $\bar{\varepsilon}$  corresponde ao valor da emissividade, seu valor é sempre menor que um e maior que zero. O Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004) indica  $\bar{\varepsilon} = 0,8$  para madeira quando submetida a condições de incêndio em uma superfície e também aponta  $\bar{\varepsilon} = 1$  para o fogo [19].

A radiação pode ser descrita de forma simplificada, utilizando uma equação que contém um coeficiente de transferência de calor por radiação  $h_r$ , análogo ao coeficiente de calor por convecção, como pode ser visto na expressão (30) e expressão (31) [15].

$$Q_r = h_r A (T_1 - T_2) \quad (30)$$

$$q_r = h_r (T_1 - T_2) \quad (31)$$

Onde  $A$  é a área [m<sup>2</sup>] em que ocorre a troca de calor. Assim sendo, o coeficiente de transferência de calor por radiação é obtido pela expressão (32).

$$h_r = \bar{\varepsilon} \bar{\sigma} (T_1^2 - T_2^2) (T_1 + T_2) \quad (32)$$

## 2.9 CURVAS DE INCÊNDIO

Um dos fatores mais importantes para avaliação de elementos estruturais expostos em condições de incêndio é a caracterização do próprio fogo. Para esse fim, algumas normas concedem curvas de incêndio que tem o objetivo de caracterizar esse comportamento. Uma curva de incêndio designa-se como a variação da temperatura dos gases existentes nas proximidades das superfícies dos elementos que são submetidos ao fogo em função do tempo. As curvas nominais são empregadas para classificar ou verificar a resistência ao fogo de um material. As curvas paramétricas são desenvolvidas a partir de modelos específicos de incêndio e retratam o comportamento do fogo por intermédio de parâmetros pré-existentes [42].

Em seguida, serão apresentadas a curva de incêndio natural e a curva de incêndio padrão ISO 834.

### 2.9.1 Curva de incêndio natural

A curva de incêndio natural retrata o comportamento natural do fogo presente em uma condição de incêndio. O incêndio identifica-se como sendo uma combustão incontrolada no espaço e no tempo, que para se desenvolver necessita da presença de material combustível, fonte de calor e oxigênio [44].

O comportamento natural de um incêndio é composto essencialmente por quatro fases distintas denominadas ignição, fase inicial, fase de plena combustão e fase de arrefecimento. A Figura 7 representa o desenvolvimento da curva natural de incêndio e suas fases [3].

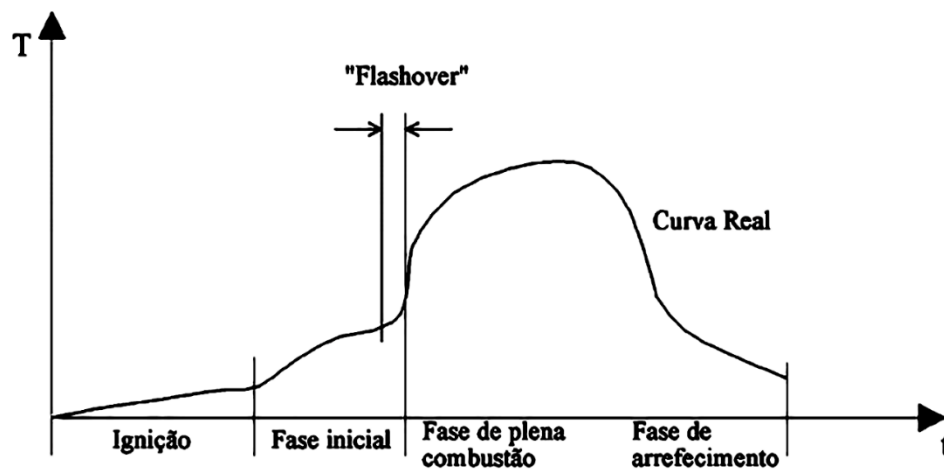


Figura 7 – Fases de um incêndio natural, [3].

A primeira etapa do processo é a ignição do material. O elemento aos poucos vai se aquecendo de acordo com a quantidade de calor que recebe no início da ignição, até alcançar um nível suficiente de radiação e entrar em ignição rapidamente, atingindo o ponto mais crítico do incêndio, denominado *flashover* ou inflamação generalizada. Esta etapa é importante, pois sua identificação possibilita a prevenção do incêndio [45].

Os fatores que controlam a ignição dos materiais são as condições atmosféricas do ambiente, a fonte de ignição, os fatores relacionados com as propriedades dos materiais e o seu desempenho quando exposto a altas temperaturas (inflamabilidade, liberação de calor, propagação das chamas e fumaças) [15].

A terceira fase apresenta a elevação da temperatura de forma brusca e a ligeira propagação do incêndio. Nesta etapa ocorre uma grande produção de chamas alcançando a temperatura máxima ocasionada pela grande quantidade de oxigênio existente no ar

alimentando a combustão e também pelos vapores quentes que se produzem e se elevam. O combate de um incêndio na terceira fase é mais complicado, pois a energia térmica liberada é alta, o que torna a tentativa de combate insuficiente [44].

A quarta fase de um incêndio é caracterizada pela sua extinção, ocasionada pela queima total dos materiais combustíveis e a falta de fornecimento de energia térmica para o ambiente. Desta forma, a temperatura diminui e interrompe a cadeia de elementos necessários para ocorrência do fogo (calor, combustível, comburente e reação) denominados como tetraedro do fogo. Nesta fase, a resistência dos materiais ao fogo é crucial para mantê-los estáveis por um período de tempo [45].

### 2.9.2 Curva de incêndio padrão ISO 834

A curva padrão ISO 834 exposta no Eurocódigo 1, Parte 1-2 (2002), representa o comportamento da temperatura em função do tempo e pode ser obtida pela expressão (33) [42].

$$T = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (33)$$

Onde  $T$  [°C] corresponde à temperatura dos gases do compartimento de incêndio no instante  $t$  [min] e  $T_0$  é a temperatura inicial do compartimento, em geral igual a 20 [°C].

Na Figura 8 é possível verificar a curva de incêndio padrão ISO 834 e compará-la com a curva de incêndio natural.

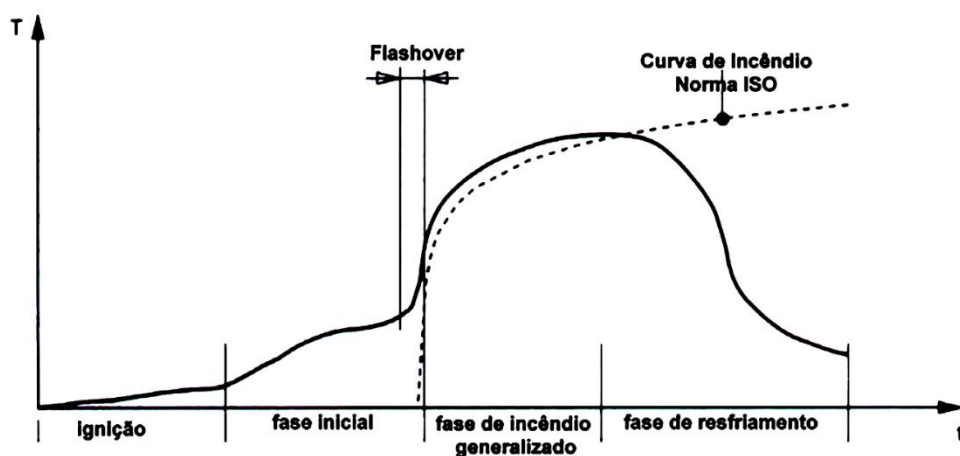


Figura 8 – Comparação entre a curva de incêndio natural e a curva de incêndio padrão ISO 834, [45].

## 2.10 DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA

O fogo é o produto de uma reação química causada pela presença simultânea do calor (faísca, chama e radiação térmica), do combustível, como por exemplo, a madeira, e o comburente (oxigênio). Quando estes três se juntam, o oxigênio reage com o combustível ocorrendo uma intensa oxidação designada de combustão, dando origem ao fogo [45].

Quando a madeira é submetida a elevadas temperaturas, seus constituintes sofrem intensas modificações, o que pode ser denominado como processo de degradação da madeira. Neste processo, acontecem fenômenos físicos como perda de umidade, liberação de gases voláteis inflamáveis, combustão do material lenhoso e combustão incandescente do carbono fixo. Cada espécie de madeira tem sua própria composição química, o que acaba influenciando o processo de decomposição e a temperatura na qual ele acontece. Outros fatores que influenciam o processo de degradação da madeira são os anéis de crescimento, o teor de umidade, a densidade, a inclinação do fio e a condutibilidade térmica [46], [3].

A degradação da madeira acontece por fases e seu entendimento ajuda a compreender o comportamento da carbonização da madeira para uso estrutural, possibilitando utilizar a madeira de forma mais racional e segura [17].

A degradação térmica da madeira pode ocorrer por pirólise ou por combustão. Estas etapas podem ser divididas em quatro zonas ou regiões limitadas por faixas de temperaturas e, tais zonas são caracterizadas nos subcapítulos a seguir [47].

### 2.10.1 Degradação térmica por pirólise

A pirólise é a degradação térmica que ocorre na ausência de oxigênio. Para dar início a esse processo é necessário que a quantidade de calor fornecida e a temperatura limite seja atingida. Em geral esse processo pode ser verificado no intervalo de temperatura de 100 [°C] a 500 [°C] [3].

#### **Até os 200 [°C], zona A**

Quando a madeira é submetida a temperaturas menores que 100 [°C] as propriedades não sofrem variações significativas. Quando a temperatura ultrapassa os 100 [°C], inicia-se o processo de evaporação da água presente no interior da madeira, acarretando a perda da sua umidade, provocando a desidratação da camada superficial da madeira. Nesta fase,

também ocorre a liberação de calor, dióxido de carbono, de ácidos acético e fórmico e de glioxal [3], [5].

#### **200 [°C] a 280 [°C], zona B**

A deterioração presente na superfície da madeira dirige-se para o núcleo, dando origem a uma camada que se processa lentamente, região onde acontece o processo de pirólise. Nesta etapa também são liberados vapores d'água, ácido fórmico e acético, glioxal e monóxido de carbono. As reações que se sucedem nesta fase, na sua maioria são endotérmicas e os produtos gasosos não são combustíveis. Durante esta etapa, é possível verificar os primeiros componentes da madeira a se degradar, a hemicelulose, e em seguida a degradação da celulose, que ocorre na faixa de 240 [°C] a 350 [°C], originando uma pequena formação de carvão [5].

#### **280 [°C] a 500 [°C], zona C**

Nesta zona as reações são designadas como exotérmicas, dando início a liberação de gases combustíveis e alcatrão na forma de fumaça e, o resíduo formado nesta região é o carvão. Esta faixa é reconhecida pela degradação da lignina [5].

#### **Acima de 500 [°C], zona D**

Nesta fase é possível verificar o processo de combustão incandescente. Processo este, onde a chama se interrompe e ocorre quando o carvão sólido residual é aquecido até a emissão de luminosidade, dando origem ao dióxido de carbono, devido a combinação do carbono sólido com o oxigênio. A combustão incandescente é autossustentável e permanecerá até que o carvão seja todo consumido [45].

As reações secundárias observadas nesta etapa, geram produtos gasosos e alcatrões das áreas mais internas do elemento, formando produtos altamente combustíveis. Quando a temperatura atinge os 1000 [°C], todo carbono restante é consumido, realizando a carbonização completa da madeira [3], [5].

### *2.10.2 Degradação térmica por combustão*

Na degradação térmica por combustão a madeira é submetida a temperaturas suficientemente altas e ao mesmo tempo na presença de oxigênio existente no ambiente.

Neste processo as reações que ocorrem são isotérmicas e as temperaturas são classificadas como ponto de ignição [3], [5].

#### **Até 200 [°C], zona A**

Quando a madeira é aquecida, a mesma solta vapor d'água e gases, como pode ser visto na Figura 9, acarretando a sua perda de massa de forma homogênea. Se o aquecimento se suceder de maneira lenta o processo é intitulado como pirólise lenta, como ilustrado na Figura 10 [5].



Figura 9 – Liberação de vapores e gases, pirólise, [5].

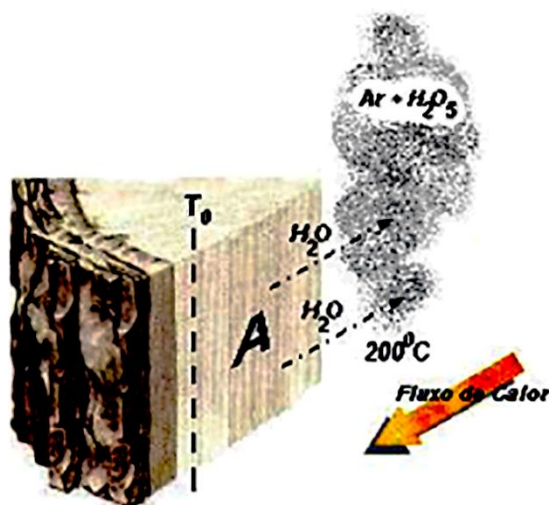


Figura 10 – Reações de combustão, zona A, pirólise lenta, [5].

#### **200 [°C] a 280 [°C], zona B**

Ainda que os gases ligeiramente liberados não ignizem de modo instantâneo, uma reação exotérmica é alcançada em condições de menores temperaturas que na degradação térmica por pirólise. O ponto de ignição pode ser designado com a temperatura necessária para que as reações se tornem exotérmicas. Existem diversos registros desta temperatura:

235 [°C] a 240 [°C], 232 [°C] a 260 [°C], 192 [°C] a 220 [°C], esta alteração dá-se devido ao tempo e à temperatura envolvida na ignição a baixas temperaturas. Esta etapa é caracterizada como pirólise rápida e está representada na Figura 11 [17].

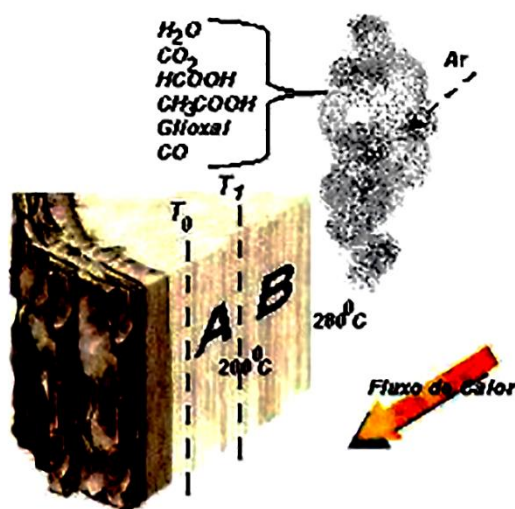


Figura 11 – Reações de combustão, zona B, pirólise rápida, [5].

### 280 [°C] a 500 [°C], zona C

Nesta etapa, verifica-se a elevada liberação de gases ricos em dióxido de carbono e vapor de água suficiente para conservar a chama, Figura 12. Como consequência da pirólise secundária, estes gases se alteram rapidamente dando origem a combustíveis, como ilustra a Figura 13. Durante a pirólise ocorre a combustão flamejante de fase gasosa e externa à madeira. A combustão acontece quando os gases inflamáveis são liberados e reagem com o oxigênio do ar até alcançarem proporções adequadas para sua ignição, se forem submetidos a uma chama-piloto. Os gases soltos recobrem a superfície da madeira, a quantidade de oxigênio neste estágio é reduzida, dificultando a queima completa do carvão, o seu acúmulo diminui a penetração do calor e retarda a chegada do ponto exotérmico para as camadas internas da madeira, A e B [17].

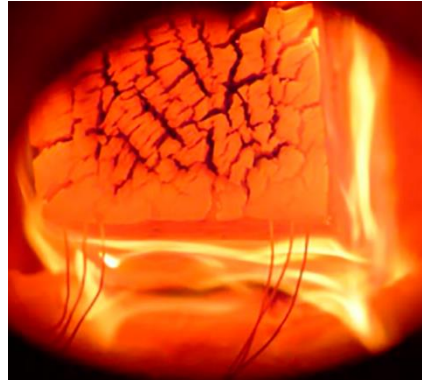


Figura 12 – Combustão flamejante, [5].

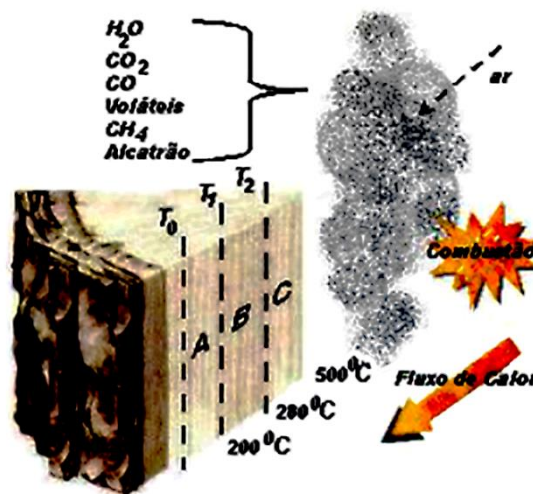


Figura 13 – Reações de combustão, zona C, combustão flamejante, [5].

Nesta etapa, há formação de monóxido de carbono, metano, metanol, formaldeído, ácido fórmico e acético e hidrogênio, e também são liberados alcatrões inflamáveis, transportados para fora da madeira através de gases e vapores, acarretando uma suspensão de gotículas denominada fumaça. A perda de massa é de 70% comparada com a massa de origem [17].

#### **Acima de 500 [°C], zona D**

Na temperatura de 500 [°C] o carvão incandescente se consome. Dentro do corpo sólido conserva-se as zonas A, B e C. No momento que a temperatura da superfície alcança aproximadamente os 1000 [°C] o carbono é ligeiramente consumido na superfície e as áreas de degradação adentram na madeira. As chamas somem cedendo lugar a queima luminosa

do monóxido de carbono e hidrogênio, combustão incandescente. Em conclusão, o carvão remanescente realça-se com pouca ou nenhuma chama, Figura 14 [17].

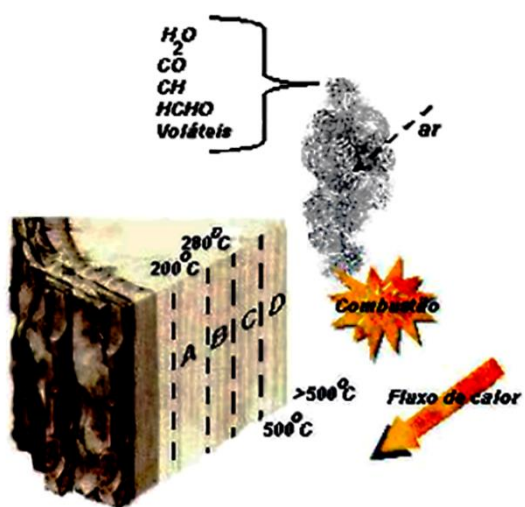


Figura 14 – Reações de combustão, zona D, acima de 500 °C, [5]

## Capítulo 3: Método de cálculo simplificado

---

Os Eurocódigos estruturais são um conjunto de normas elaboradas pelo CEN – Comitê Europeu de Normalização que têm como objetivo a regularização dos critérios de dimensionamento de estruturas e de outras obras de engenharia civil, padronizando os níveis de segurança das construções executadas na Europa [35].

O Eurocódigo 5: *Design of timber structures*, determina os princípios e requisitos para a segurança, manutenção e durabilidade das estruturas de madeira. O Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), apresenta as condições de projeto de estruturas de madeira para situação de acidente por exposição ao fogo (*Structural fire design*) [25], [48].

### 3.1 CARGA E GRAU DE UTILIZAÇÃO

O grau de utilização utilizado nesta tese será de 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% e 90% da carga de projeto em temperatura ambiente de 20 [°C], calculado a partir da resistência de projeto ao fogo, ou por meio da resistência característica de projeto. Estes cálculos são demonstrados nos subcapítulos a seguir.

#### 3.1.1 Grau de utilização determinado com a resistência de projeto ao fogo

De acordo com o Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), o modelo estrutural adotado para um projeto deve refletir o desempenho da estrutura em situação de incêndio, para isso deve ser verificado o tempo necessário de exposição ao fogo, conforme a expressão (34) [19].

$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (34)$$

Onde:

$E_{d,fi}$  é o efeito das ações de projeto para situação de incêndio, determinado de acordo com EN 1991-1-2: 2002, incluindo efeitos de expansões e deformações térmicas, [42];

$R_{d,fi}$  é a resistência de projeto correspondente na situação de incêndio.

A resistência de projeto  $R_{d,fi}$  no tempo  $t$  deve ser determinada, geralmente na hipótese de uma temperatura uniforme na seção transversal.

O Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), indica a expressão (35) para determinar o valor da resistência mecânica em situação de incêndio, conforme as regras simplificadas [19].

$$f_{d,fi} = K_{mod,fi} * \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (35)$$

Onde:

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

$f_{20}$  é a resistência à temperatura ambiente correspondente ao quantil de 20%;

$\gamma_{M,fi}$  é o fator de segurança parcial da madeira em situação de incêndio. Para material em situação de incêndio é recomendado um fator igual a 1,0;

$K_{mod,fi}$  é o fator de modificação para situação de incêndio.

O Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004) recomenda utilizar o método da seção transversal reduzida, disponível na seção 4.2.2 da norma. Logo, para as propriedades de resistência ao projeto e rigidez da seção transversal efetiva deve ser utilizado um  $K_{mod,fi} = 1,0$  [19].

Os 20% do quantil da resistência à temperatura ambiente deve ser calculado conforme a expressão (36).

$$f_{20} = k_{fi} * f_k \quad (36)$$

Onde:

$k_{fi}$  é um coeficiente a depender do tipo de madeira. Para madeira maciça este coeficiente é igual a 1,25;

$f_k$  é a resistência característica à temperatura ambiente.

O grau de utilização  $\mu_0$  da carga de projeto ao fogo em temperatura ambiente de 20 [°C] pode ser obtido a partir de:

$$\mu_0 = \frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi,t=0}} \quad (37)$$

$R_{d,fi,t=0}$  corresponde ao valor de cálculo da resistência do elemento de madeira, em situação de incêndio, no instante de  $t=0$ , isto é,  $T=20$  [°C] (sem redução da seção).

A expressão anterior também pode ser definida em função do momento, como mostra a expressão (38).

$$\mu_0 = \frac{M_{d,fi}}{M_{Rd,fi,t=0}} \quad (38)$$

Sendo:

$M_{d,fi}$  o momento atuante de projeto ao fogo;

$M_{Rd,fi,t=0}$  o momento resistente de projeto ao fogo.

O momento resistente de projeto ao fogo pode ser determinado de acordo com a expressão (39).

$$M_{Rd,fi,t=0} = f_{d,fi} * W \quad (39)$$

$W$  é o módulo elástico da seção retangular da viga, no instante de  $t=0$ , isto é,  $T=20$  [°C] (sem redução da seção), expressão (40).

$$W = \frac{b * d^2}{6} \quad (40)$$

Onde:

$b$  é a base da seção transversal da viga em temperatura ambiente de 20 [°C];

$d$  é a altura da seção transversal da viga em temperatura ambiente de 20 [°C].

Enquanto o momento atuante de projeto ao fogo pode ser definido como:

$$M_{d,fi} = \mu_0 * M_{Rd,fi,t=0} \quad (41)$$

Pode-se também determinar o momento atuante de projeto ao fogo por meio da expressão (42), desde que seja uma viga simplesmente apoiada com carga pontual a meio vão, de acordo com a Figura 15.

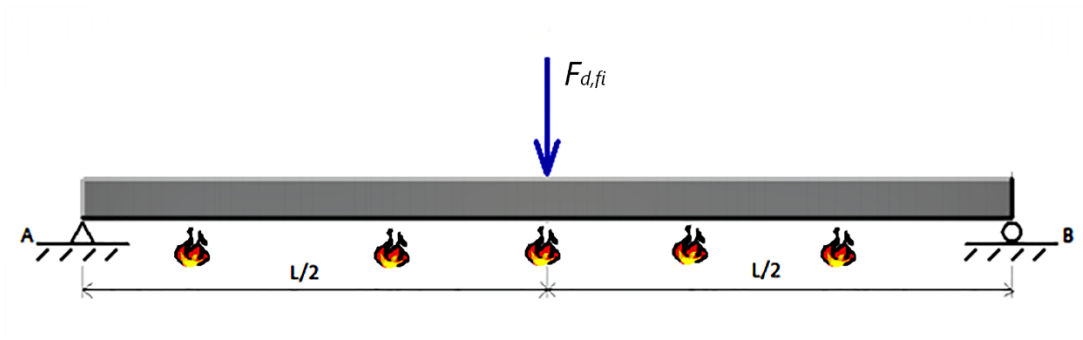


Figura 15 – Viga simplesmente apoiada com carga a meio vão exposta ao fogo, [8].

$$M_{d,fi} = \frac{F_{d,fi} * L}{4} \quad (42)$$

Sendo:

$F_{d,fi}$  a força de projeto ao fogo;

$L$  o comprimento do vão entre apoios da viga.

Para determinar a força de projeto ao fogo é simples, basta isolar  $F_{d,fi}$  da expressão (42), como é visto a seguir:

$$F_{d,fi} = \frac{M_{d,fi} * 4}{L} \quad (43)$$

### 3.1.2 Grau de utilização determinado com a resistência característica

O grau de utilização de uma carga de projeto em temperatura ambiente de 20 [°C] pode ser determinado em função do momento, de acordo com a expressão (44).

$$\mu_0 = \frac{M_d}{M_{Rd}} \quad (44)$$

Sendo,

$M_d$  o momento atuante de projeto;

$M_{Rd}$  o momento resistente de projeto.

O momento resistente de projeto pode ser obtido a partir de:

$$M_{Rd} = f_k * W \quad (45)$$

$f_k$  é a resistência característica à temperatura ambiente;

$W$  é o módulo elástico da seção retangular da viga, como mostra a expressão (40).

O momento atuante de projeto é expresso como:

$$M_d = \mu_0 * M_{Rd} \quad (46)$$

O momento atuante de projeto também pode ser calculado por meio da expressão (47), desde que seja uma viga simplesmente apoiada com carga pontual a meio vão e com seção transversal retangular, com dimensões  $b$  (base) e  $d$  (altura), conforme a Figura 16.

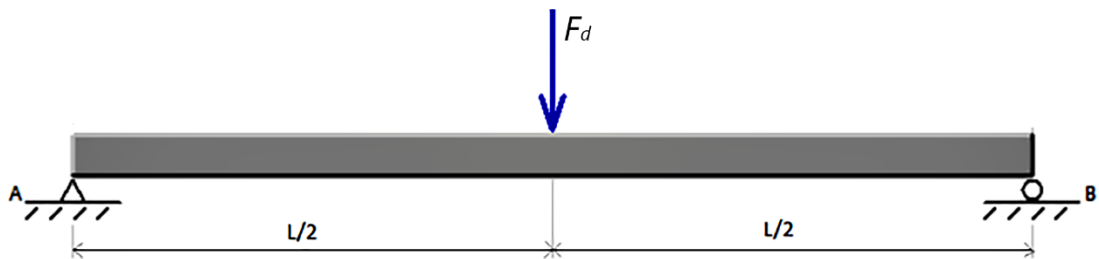


Figura 16 – Viga simplesmente apoiada com carga a meio vão, [8].

$$M_d = \frac{F_d * L}{4} \quad (47)$$

Onde:

$F_d$  é a força de projeto;

$L$  é o comprimento do vão livre.

A força de projeto pode ser definida conforme a expressão (48).

$$F_d = \frac{M_d * 4}{L} \quad (48)$$

### 3.2 TAXA DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA

A madeira sã sofre carbonização quando é submetida a uma determinada temperatura por um período de tempo específico. Quando são alcançadas as condições necessárias a combustão parcial do material se inicia, dando origem a uma camada de carvão sobre a superfície da madeira. O carvão representa 1/6 da condutividade térmica da madeira. Sua composição é em torno de 20% a 25% de material volátil, 70% a 75% de carbono fixo e 5% de cinzas [13], [17].

A espessura da camada carbonizada pode ser designada como a distância entre a superfície externa do elemento original e a posição da linha de carbonização. Segundo o Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), a camada carbonizada é o limite entre o material que sofreu pirólise e o núcleo intacto da madeira, como pode ser verificado na Figura 17 [19].

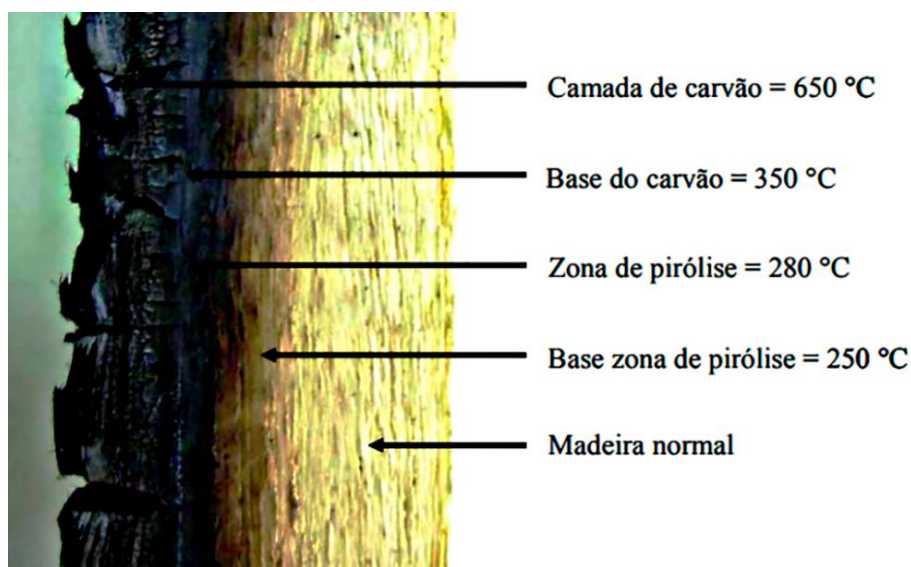


Figura 17 – Seção carbonizada de madeira, [13].

A velocidade com a qual a madeira é transformada em carvão é nomeada taxa de carbonização. Esta taxa é um valor dimensional utilizado para analisar a resistência ao fogo das estruturas, ou seja, de maneira indireta ela aponta a redução da seção transversal da madeira. A determinação da taxa de carbonização pode ser fundamentada em modelos empíricos formulados a partir de dados experimentais ou teóricos, apoiados em princípios físicos e químicos. Pode ser caracterizada pelo avanço da carbonização [mm/s] ou pela perda de massa [g/s], designada taxa de queima, sendo que o avanço da carbonização é o mais usado, pois mostra de forma direta a seção residual, respondendo aos interesses da pesquisa

de elementos estruturais em situações de incêndio, que se baseia na redução da área resistente e na perda das propriedades mecânicas da madeira submetida a altas temperaturas [15], [19].

Existem inúmeros fatores que influenciam a taxa de carbonização, como a espécie de madeira, massa volúmica, teor de umidade, composição química, permeabilidade, condutibilidade térmica, dimensão da madeira, orientação das fibras (o sentido longitudinal da madeira é duas vezes mais carbonizado que no sentido transversal) [49], [50].

A massa volúmica afeta consideravelmente a taxa de carbonização e, isso significa que quanto maior a densidade, menor a taxa de carbonização. Outra propriedade que influencia essa taxa é o teor de umidade, pois ele retarda o processo de combustão até a evaporação da água existente na madeira. As formas e dimensão da seção transversal da amostra de madeira também interferem na velocidade de carbonização, ou seja, em amostras pequenas, a taxa de carbonização é maior que em peças grandes, pois as peças pequenas possuem maior superfície específica do que as grandes. As peças com seção transversal retangular também apresentam maior taxa de carbonização quando comparadas com as peças de seção circular, isso devido a maior área de exposição ao calor nas arestas da peça. Por fim, é possível observar que a taxa de carbonização é maior inicialmente, estabilizando-se com o tempo, em razão da camada isolante de carvão formada pelo processo de combustão [51], [52], [5].

A taxa de carbonização da madeira é em função da temperatura e do tempo que a mesma é exposta ao fogo. Considera-se que, quanto mais rápido a madeira atingir a temperatura de carbonização, mais ligeira será a taxa de formação de carvão e também sua degradação. Contudo, a madeira apresenta uma baixa taxa de carbonização, que permite aos elementos estruturais manterem uma porção considerável da sua capacidade de carregamento, quanto submetidos ao fogo [19], [53], [52].

O Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), assume uma taxa de carbonização em função dos diversos tipos de madeira, com diferentes valores de massa volúmica, conforme a Tabela 14 [19].

Tabela 14 – Taxa de carbonização para cálculo de projetos de madeira,  $\beta_0$  e  $\beta_n$ , [19].

<b>Espécies</b>	<b>Material</b>	<b><math>\beta_0</math> [mm/min]</b>	<b><math>\beta_n</math> [mm/min]</b>
<i>Softwood</i> (madeira macia)	MLC, $\rho \geq 290$ [kg/m <sup>3</sup> ] Madeira maciça, $\rho \geq 290$ [kg/m <sup>3</sup> ]	0,65 0,65	0,70 0,80
<i>Hardwood</i> (madeira estrutural)	Madeira maciça ou MLC, $\rho \geq 290$ [kg/m <sup>3</sup> ] Madeira maciça ou MLC, $\rho \geq 450$ [kg/m <sup>3</sup> ]	0,65 0,50	0,70 0,55

$\beta_0$  – taxa de carbonização para exposição ao fogo numa direção;

$\beta_n$  – taxa de carbonização nominal, incluindo efeito de arredondamento dos cantos e aparecimento de fissuras;

MLC – madeira laminada colada.

A taxa de carbonização unidimensional ou taxa de carbonização básica ( $\beta_0$ ) é determinada mediante a observação sob situação de exposição ao fogo padronizada, onde apenas uma das superfícies é exposta. Já a taxa de carbonização nominal ( $\beta_n$ ) considera o efeito de arredondamento dos cantos da peça submetida ao fogo e o surgimento de fissuras [5].

O Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), recomenda uma equação de projeto para estabelecer a evolução da carbonização,  $d_{char,0}$  [mm], considerando uma superfície não protegida exposta ao fogo normalizado, em conformidade com a expressão (49), que associa a velocidade de carbonização  $\beta_0$  em [mm/min] e o tempo  $t$  em [min] de exposição ao fogo [19].

$$d_{char,0} = \beta_0 * t \quad (49)$$

A expressão (49) não leva em conta as fissuras e arredondamento nas quinas da peça de madeira, que podem ser desenvolvidas quando a mesma é submetida ao fogo em diversas direções. A expressão (50) é recomendada para este cálculo [19].

$$d_{char,n} = \beta_n * t \quad (50)$$

Uma seção transversal de madeira sob a ação do fogo em várias direções é representada na Figura 18. Nesta situação, a carbonização da madeira causa o arredondamento dos cantos da peça. Segundo o Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), o raio de arredondamento dos cantos será igual à espessura da camada carbonizada [19].

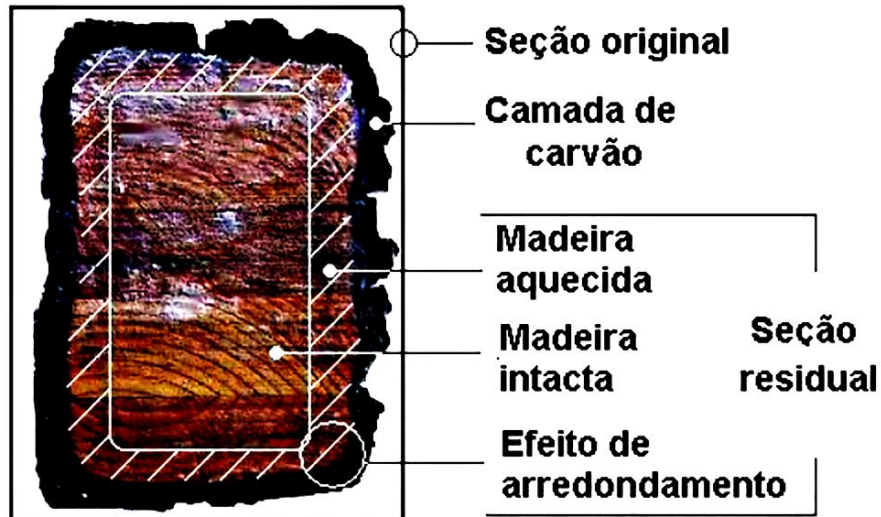


Figura 18 – Seção carbonizada de uma madeira laminada colada com efeito de arredondamento nos cantos, [5].

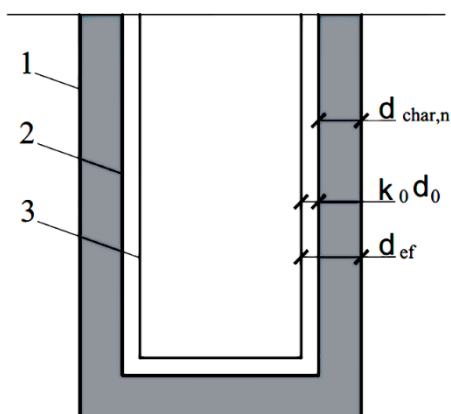
### 3.2.1 Camada de carbonização efetiva

A camada de carbonização efetiva considera a região da camada de carbonização e da camada de pirólise, que são originadas ao longo da queima da madeira, Figura 19. Para determinar a camada de carbonização efetiva ( $d_{ef}$ ), emprega-se a expressão (51), onde  $d_{char,n}$  é a camada carbonizada para efeitos de arredondamento,  $d_0$  corresponde a espessura da camada de pirólise que, conforme Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), deve ser usado um valor de 7 [mm], e  $k_0$  define-se como coeficiente para superfícies desprotegidas, obtido por meio da Tabela 15 [19].

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 * d_0 \quad (51)$$

Tabela 15 – Fator  $k_0$ , [19].

Tempo	$k_0$
$t \leq 20$ [mim]	$t/20$
$t \geq 20$ [mim]	1,00



- 1 - Superfície inicial;  
 2 - Limite da seção transversal residual;  
 3 - Limite da seção transversal efetiva.

Figura 19 – Definição de camada residual e camada efetiva, [54].

### 3.3 TEMPO DE RESISTÊNCIA AO FOGO EM VIGAS DE MADEIRA

Neste subcapítulo serão apresentadas as equações utilizadas para o cálculo do tempo de resistência ao fogo em vigas de madeira. Para esta operação será necessário adotar o método da seção transversal reduzida, indicada pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004) [19].

O módulo elástico da seção retangular reduzida pela ação do fogo é exibido na expressão (52).

$$W_{fi} = \frac{b_{fogo} * d_{fogo}^2}{6} \quad (52)$$

Onde:

$b_{fogo}$  é a largura da seção reta da viga exposta ao fogo;

$d_{fogo}$  é a altura da seção reta da viga exposta ao fogo.

Para obter a largura da seção reta da viga exposta ao fogo, é empregada a expressão (53), em que  $b$  é a largura inicial da seção transversal da viga,  $n^{\circ}_{laterais}$  é o número de faces laterais expostas ao fogo e  $d_{ef}$  é a espessura da camada de carbonização efetiva, determinada pela expressão (51).

$$b_{fogo} = b - n^{\circ}_{laterais} * d_{ef} \quad (53)$$

Para definir a altura da seção reta da viga exposta ao fogo é utilizada a expressão (54), onde  $d$  é a altura da seção transversal da viga,  $n^{\circ}_{superior}$  é o número de face superior exposta ao fogo,  $n^{\circ}_{inferior}$  é a quantidade de face inferior exposta ao fogo e  $d_{ef}$  é a espessura que carbonizou da seção reduzida.

$$d_{fogo} = d - ((n^{\circ}_{superior} + n^{\circ}_{inferior}) * d_{ef}) \quad (54)$$

A seção 3.2.1 desta tese traz todas as informações necessárias sobre a camada de carbonização efetiva.

Para este trabalho foram propostos dois modelos de vigas de Madeira de Abeto de Douglas, o modelo de Viga 1 com dimensões de 75 [mm] de largura por 150 [mm] de altura e 6000 [mm] de comprimento e o modelo de Viga 2 com 250 [mm] de largura, 300 [mm] de altura e 6000 [mm] de comprimento. Ambas são em madeira maciça com densidade maior que 290 [kg/m<sup>3</sup>], por isso possuem uma taxa de carbonização, considerando o efeito de arredondamento nos cantos, de 0,8 [mm/min], conforme o Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004).

Sendo assim temos:

Para  $t < 20$  [mim],

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 * d_0 \rightarrow d_{ef} = (0,8 * t) + \frac{t}{20} * 7 = 1,15 * t \quad (55)$$

Para  $t \geq 20$  [mim],

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 * d_0 \rightarrow d_{ef} = (0,8 * t) + 1 * 7 = (0,8 * t) + 7 \quad (56)$$

Para este estudo, estamos admitindo que a viga está exposta ao fogo nas quatro faces, face inferior, superior e laterais.

Substituindo a expressão (52) para o modelo de Viga 1, temos:

Para  $t < 20$  [mim],

$$W_{fi} = \frac{(75 - 2 * 1,15t) * (150 - ((1 + 1) * 1,15t))^2}{6} \quad (57)$$

$$W_{fi} = \frac{(-2,3t + 75) * (-2,3t + 150)^2}{6} \quad (58)$$

Para  $t \geq 20$  [mim],

$$W_{fi} = \frac{(75 - 2 * ((0,8 * t) + 7)) * (150 - ((1 + 1) * ((0,8 * t) + 7)))^2}{6} \quad (59)$$

$$W_{fi} = \frac{(-1,6t + 61) * (-1,6t + 136)^2}{6} \quad (60)$$

Substituindo a expressão (52) para o modelo de Viga 2, temos:

Para  $t < 20$  [min],

$$W_{fi} = \frac{(250 - 2 * 1,15t) * (300 - ((1 + 1) * 1,15t))^2}{6} \quad (61)$$

$$W_{fi} = \frac{(-2,3t + 250) * (-2,3t + 300)^2}{6} \quad (62)$$

Para  $t \geq 20$  [min],

$$W_{fi} = \frac{(250 - 2 * ((0,8 * t) + 7)) * (300 - ((1 + 1) * ((0,8 * t) + 7)))^2}{6} \quad (63)$$

$$W_{fi} = \frac{(-0,8t + 118) * (-1,6t + 286)^2}{3} \quad (64)$$

A Figura 20 mostra a razão entre o módulo elástico da seção retangular com redução da seção pelo módulo da seção retangular sem redução da seção em relação ao tempo de resistência ao fogo.

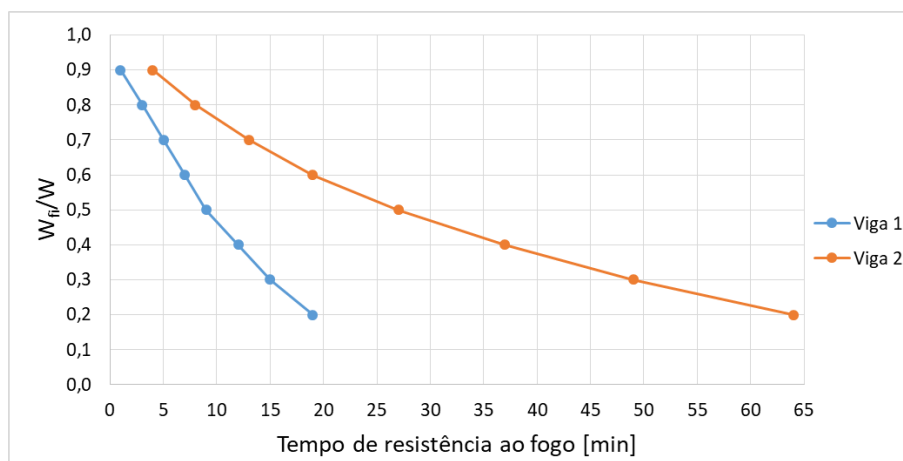


Figura 20 – Gráfico da razão entre o módulo elástico da seção retangular com redução da seção pelo módulo elástico da seção retangular sem redução da seção x Tempo de resistência ao fogo.

O que podemos perceber neste gráfico é que o valor da divisão entre o módulo elástico da seção retangular com redução da seção pelo módulo elástico da seção retangular sem redução da seção resultou no mesmo valor para as duas vigas, uma vez que o valor do módulo elástico com redução da seção transversal está em função do grau de utilização. Logo, somos capazes de verificar que para mesma porcentagem de seção resistente, a Viga 2 suporta um tempo de resistência ao fogo maior, isso porque a seção transversal da mesma é maior, e conseqüentemente, sua seção resistente.

## Capítulo 4: Método de cálculo numérico

---

Nesta tese o comportamento das vigas de Madeira Abeto de Douglas foi simulado com o auxílio de análises não lineares em elementos finitos.

O método dos elementos finitos (FEM – *Finite Element Method*), utiliza equações diferenciais parciais para solucionar problemas físicos. Este método se resume em fracionar o domínio de uma função em partes menores. Dentro desta fragmentação, são originados os elementos finitos, quanto menor a dimensão do elemento finito, mais preciso será os resultados da análise.

A realização de simulações numéricas por meio de um modelo de elementos finitos está sendo cada vez mais empregada nos campos da engenharia, proporcionando soluções de problemas de forma precisa e permitindo uma considerável redução do número de experimentos físicos, os quais levam tempo e apresentam custos elevados.

As simulações numéricas são utilizadas para resolver problemas cujos métodos analíticos não conseguem alcançar soluções satisfatórias, ou seja, as simulações numéricas são realizadas com o intuito de obter resultados aproximados para problemas complexos. Desta maneira, é essencial o uso de um sistema computacional de alto desempenho. Neste estudo foi utilizado o programa *Ansys Workbench*.

O programa *Ansys Workbench* permite o uso de uma linguagem de programação de código chamada APDL (*Ansys Parametric Design Language*). Esta linguagem faz com que o *software* seja mais intuitivo, possibilitando que o utilizador realize operações de forma mais rápida e direta, simplificando a atribuição de variáveis na construção da geometria, na introdução de materiais, condições de fronteira e desenvolvimento da solução.

O desenvolvimento de um modelo numérico é constituído por diferentes fases. A primeira fase é a de pré-processamento, onde são introduzidas as propriedades do material, a construção do modelo geométrico e condições de fronteira. Esta fase é de funda mental

importância para que na etapa do pós-processamento os resultados do problema sejam obtidos com sucesso.

#### **4.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO**

No desenvolvimento desta etapa foram executadas duas análises, uma análise experimental, realizada a partir dos dados experimentais da Madeira Abeto de Douglas retirados da tese de Lopes [9] e uma análise numérica para avaliar o comportamento mecânico do elemento de Madeira Abeto de Douglas. A finalidade da análise experimental foi obter a resistência à flexão média experimental para calibração do modelo numérico, enquanto análise numérica foi realizada com o intuito de ser comparada com os resultados experimentais e validar o modelo numérico estrutural.

##### *4.1.1 Análise experimental*

Para determinar a resistência à flexão média experimental foi necessário avaliar os dados obtidos por meio dos ensaios realizados por Lopes [9], como a força máxima ( $F_{máx}$ ) suportada por cada amostra, o deslocamento a meio vão ( $w$ ), o tempo necessário para atingir a carga máxima e a resistência à flexão ( $f_m$ ) de cada amostra, como pode ser visto na Tabela 16. Embora as amostras sejam da mesma espécie, apresentem aproximadamente as mesmas dimensões e tenham sido submetidas ao mesmo procedimento, é possível observar uma discrepância nos valores determinados.

A Figura 21 mostra a realização dos testes para determinação da taxa de aplicação da carga, do deslocamento ao meio vão, do tempo para atingir a força máxima e consequentemente da tensão de resistência à flexão, seguindo as exigências da EN 408 [10].



Figura 21 – Realização dos testes, [9].

Tabela 16 – Resultados prévios dos ensaios de flexão dos provetes de escala reduzida, [9].

Amostras	$F_{\text{máx}}$ [kN]	w [mm]	Tempo [s]	$f_m$ [MPa]
PD-F-1	10,36	31,15	319,2	42,00
PD-F-2	11,45	40,99	348,6	48,03
PD-F-3	10,07	28,07	312,0	42,05
<b>PD-F-4</b>	<b>5,55</b>	<b>24,96</b>	<b>171,8</b>	<b>23,98</b>
PD-F-5	10,68	41,19	327,0	45,30
<b>PD-F-6</b>	<b>5,30</b>	<b>26,07</b>	<b>167,0</b>	<b>20,94</b>
<b>PD-F-7</b>	<b>5,30</b>	<b>17,75</b>	<b>171,0</b>	<b>21,12</b>
PD-F-8	10,06	36,44	301,0	39,87
PD-F-9	12,54	46,30	424,4	49,59
PD-F-10	14,11	35,15	426,4	56,88
PD-F-11	14,98	45,20	450,8	60,76
PD-F-12	7,85	22,55	234,2	31,37
PD-F-13	11,14	35,93	401,6	50,20
PD-F-14	9,76	36,17	307,6	39,37
<b>PD-F-15</b>	<b>2,91</b>	<b>14,56</b>	<b>100,2</b>	<b>11,35</b>
PD-F-16	7,35	19,98	218,4	28,42
<b>PD-F-17</b>	<b>4,78</b>	<b>20,92</b>	<b>147,0</b>	<b>17,05</b>
<b>Média</b>	<b>10,86</b>	<b>34,93</b>	<b>339,3</b>	<b>44,49</b>

Segundo Lopes [9], os provetes destacados na Tabela 16 não atingiram o tempo mínimo de ensaio de 180 [s] de acordo com EN 408 [10]; também é possível verificar que nenhum destes provetes conseguiram suportar uma carga máxima superior a 6 [kN]. Estes fatos foram justificados por Lopes através de uma análise visual nas amostras, onde o mesmo observou que, principalmente na zona central desses elementos, havia uma grande quantidade de nós e bolsa de resina. Por esse motivo, os provetes destacados na Tabela 16 foram suprimidos do cálculo da média aritmética para a determinação da resistência à flexão média experimental e obtenção da força máxima média.

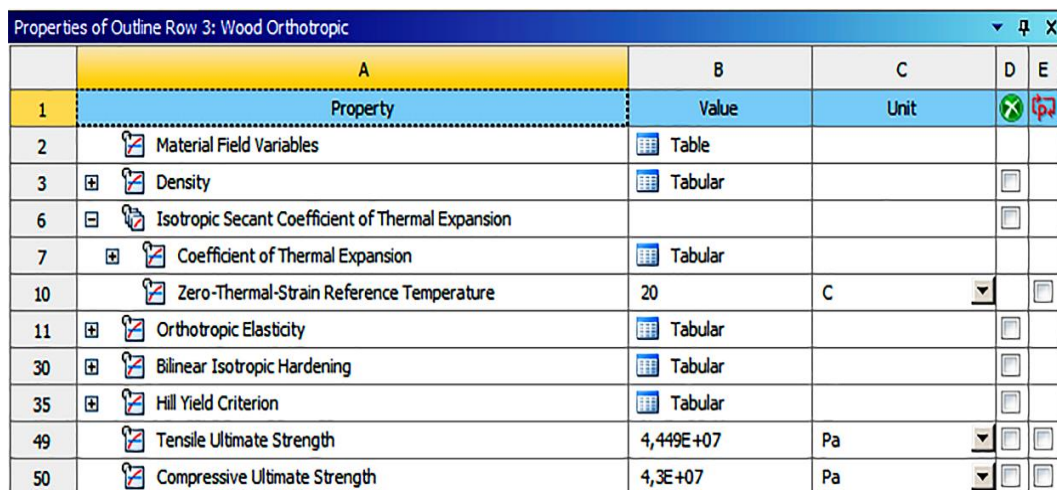
Como já mencionado no capítulo 2, a rutura de um elemento de madeira submetido à flexão ocorre nas fibras opostas à aplicação da carga, ou seja, na região dos esforços de tração. Em vista disso, o valor obtido de resistência à flexão média experimental foi introduzido no modelo numérico, na parte das propriedades do material, como resistência à tração paralela às fibras da madeira, uma vez que o valor encontrado na literatura para essa propriedade foi muito alto, como pode ser visto na Tabela 8.

#### 4.1.2 Análise numérica

A análise numérica apresentada nesta parte da tese aborda apenas a simulação estrutural estática em regime estacionário desenvolvida com base em elementos finitos tridimensionais, este estudo foi realizado em uma viga simplesmente apoiada à temperatura ambiente constante de 20 [°C].

##### 4.1.2.1 Inserção do material

Nesta etapa foi necessário criar um novo material na biblioteca do *Ansys Workbench* capaz de simular o comportamento ortotrópico da Madeira Abeto de Douglas, esse novo material recebeu o nome de *Wood Orthotropic* como pode ser visto na Figura 22.



Properties of Outline Row 3: Wood Orthotropic				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	Tabular		
6	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
7	Coefficient of Thermal Expansion	Tabular		
10	Zero-Thermal-Strain Reference Temperature	20	C	
11	Orthotropic Elasticity	Tabular		
30	Bilinear Isotropic Hardening	Tabular		
35	Hill Yield Criterion	Tabular		
49	Tensile Ultimate Strength	4,449E+07	Pa	
50	Compressive Ultimate Strength	4,3E+07	Pa	

Figura 22 – Propriedades da Madeira Abeto de Douglas inseridas na base de dados do *Ansys Workbench*.

A caracterização do material foi feita utilizando as propriedades descritas no capítulo 2, obtidas por referências bibliográficas, com exceção da resistência à tração paralela às fibras da madeira que foi substituída pela resistência à flexão média definida na análise experimental.

O comportamento ortotrópico do Abeto de Douglas foi recriado adicionando o campo *Orthotropic Elasticity*, onde foram adicionados os valores dos módulos de elasticidade, dos coeficientes de Poisson e dos módulos de rigidez para as direções longitudinal, tangencial e radial, conforme a Tabela 17.

Tabela 17 – Propriedades ortotrópicas da Madeira Abeto de Douglas à temperatura de 20 [°C].

Módulo de elasticidade [MPa]			Coeficiente de Poisson			Módulo de rigidez [MPa]		
E <sub>x</sub>	E <sub>y</sub>	E <sub>z</sub>	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{xz}$	G <sub>xy</sub>	G <sub>yz</sub>	G <sub>xz</sub>
515,0	700,4	10300,0	0,374	0,036	0,029	72,1	659,2	803,4

Para caracterizar o comportamento elásto-perfeitamente plástico foi inserido o campo *Bilinear Isotropic Hardening*. Os valores de tensão preservam-se lineares até alcançar a tensão de cedência, que neste estudo tem o valor igual à 44,49 [MPa], a partir deste ponto se atinge um domínio perfeitamente plástico com uma linha sem declive, definida pelo módulo tangente igual a 0.

Para representar o critério de rutura foi introduzido o campo *Hill Yield Criterion* com o intuito de estabelecer as tensões admissíveis. A Tabela 18 mostra as taxas de tensão de escoamento direcional do critério de Hill para temperatura de 20 [°C].

Tabela 18 – Taxas de tensão de escoamento direcional do critério de Hill.

Critério de Hill					
R <sub>11</sub>	R <sub>22</sub>	R <sub>33</sub>	R <sub>12</sub>	R <sub>23</sub>	R <sub>13</sub>
0,052	0,052	1,000	0,179	0,405	0,405

#### 4.1.2.2 Geometria

A geometria da viga, as dimensões e a disposição das forças foram executadas de acordo com o modelo apresentado por Lopes [9], como pode ser visto na Figura 23.

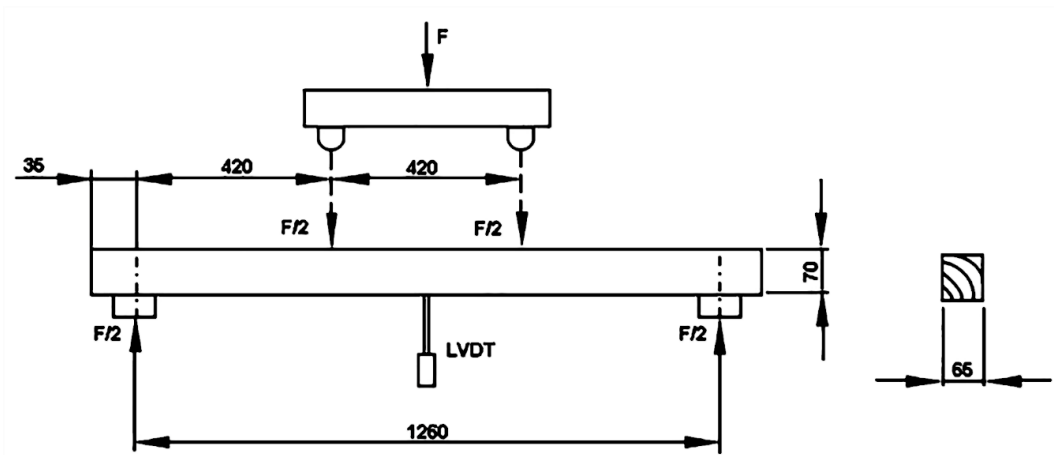


Figura 23 – Dimensões dos provetes de escala reduzida sujeitos à flexão [mm], [9].

Como se trata de uma geometria simples, foi empregada a plataforma *Design Modeler* que faz parte do *Ansys Workbench*, para execução da viga com altura igual à 70 [mm], largura de 65 [mm] e comprimento do vão entre apoios igual à 1260 [mm]. Na Figura 24, temos a imagem da viga utilizada no *software*, semelhante à do modelo experimental.

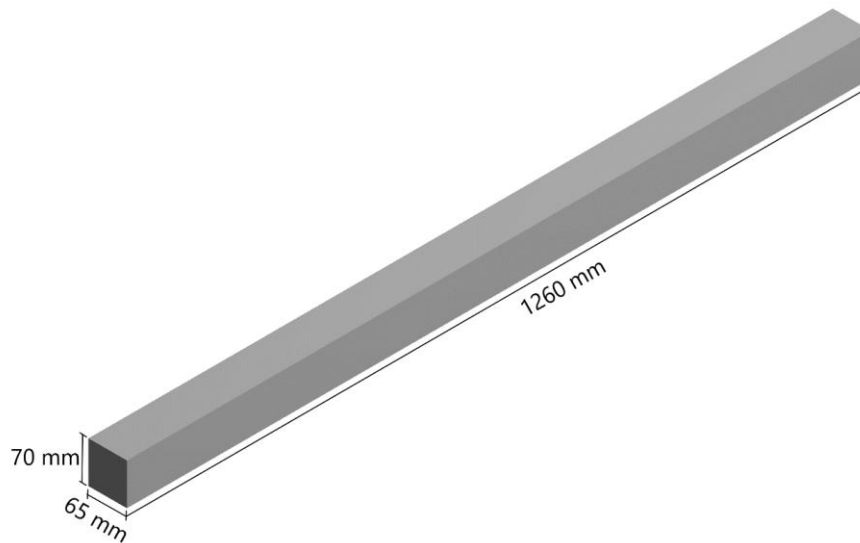


Figura 24 – Geometria e dimensões da viga.

#### 4.1.2.3 Malha

O *Ansys Workbench* possui um sistema de aplicação de malha automático, onde o objeto de estudo é analisado pelo programa e a partir da verificação do perfil geométrico identificado é sugerida a malha. Neste estudo o *software* não foi capaz de gerar uma malha

de boa qualidade de forma automática, sendo necessário alterar estas definições manualmente.

A malha de elementos finitos considerados na seção transversal da viga tem um tamanho de 10 [mm], enquanto a malha aplicada por todo comprimento da viga foi de 15 [mm]. As dimensões do elemento finito foram definidas após ser realizados testes de convergência de malha.

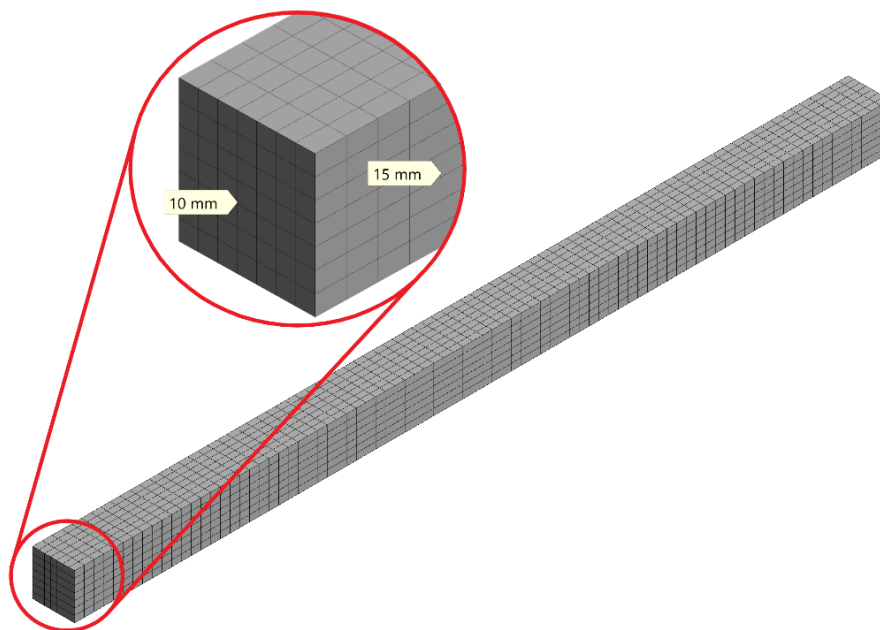


Figura 25 – Malha de elementos finitos aplicada na viga.

O *software* também permite que o utilizador escolha a ordem do elemento finito que será empregado na simulação, linear ou quadrática, e como neste estudo a viga não sofre variação geométrica significativa foi utilizado um elemento de ordem linear e tridimensional, o SOLID185, que é descrito como um elemento sólido de oito nós com três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ . O elemento é indicado para análise de plasticidade e hiperelasticidade, bem como em casos onde se verificam grandes deflexões e deformações [55].

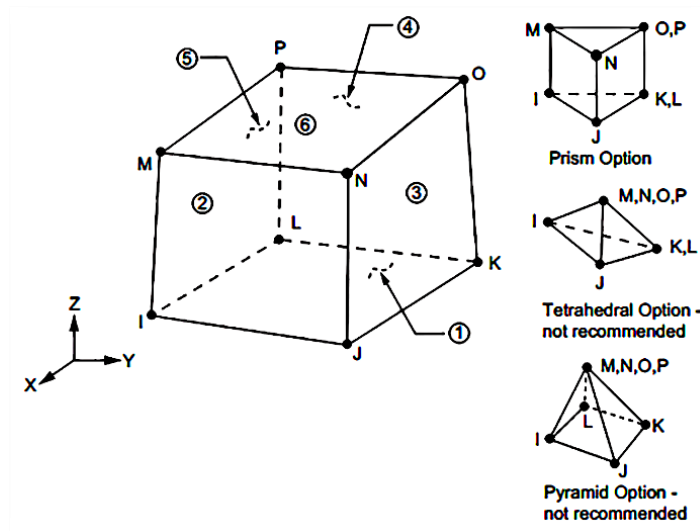


Figura 26 – Geometria do modelo estrutural SOLID185, [55].

#### 4.1.2.4 Aplicação da força e condições de fronteira

Para a análise mecânica foi imposta duas cargas incrementais lineares com valor igual a 15000 [N] nas arestas da face superior da viga, como mostra a Figura 27. Para esta análise foi admitido um *step end time* de 3600 [s], foi escolhido um incremento de tempo inicial de 20 [s], um incremento de tempo mínimo de 0,12 [s] e um incremento de tempo máximo de 100 [s].

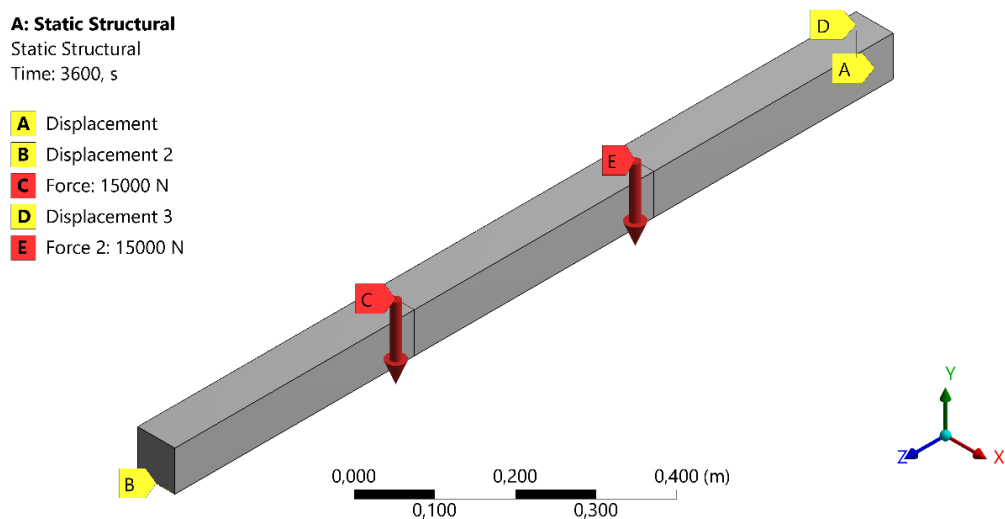


Figura 27 – Introdução das forças e condições de apoio.

Para determinar os valores das forças do modelo numérico foi utilizado a equação da reta, como mostra a expressão (65), uma vez que a relação entre tempo e força não depende das propriedades do material.

$$F = \frac{30000 * t}{3600} \rightarrow F = 8,333 * t \quad (65)$$

As condições de apoio desta viga simplesmente apoiada, pode ser observado na Figura 27, sendo representado pelas letras A, B e D. O apoio simbolizado pela letra A foi aplicado na aresta inferior da seção transversal da viga impossibilitando o deslocamento nos eixos  $Y$  e  $Z$ , o apoio denotado por B também foi posto na aresta inferior da seção transversal oposta da viga, impedindo o deslocamento no eixo  $Y$  e por fim a letra D representa uma restrição colocada no vértice inferior da viga com o intuito de bloquear o deslocamento na direção do eixo  $X$ .

Por se tratar de uma análise não linear material foi necessário ativar a opção *Large Deflection* na componente de estudo, uma vez que alcançamos o domínio plástico do material. Esta opção permite a determinação de resultados mais precisos para este tipo de teste.

O critério de convergência utilizado nesta simulação para deslocamento e força foi controlado pelo programa *Ansys Workbench*, tendo uma tolerância de convergência igual a 0,5%. O *Ansys* utiliza o método Newton-Raphson para prever os resultados em cada iteração e se o resultado é convergido ou não. O critério de convergência está relacionado com os métodos iterativos na resolução de sistemas de equações. Se a diferença entre os valores calculados e estimados for menor que o critério de convergência, o sistema passa para a próxima etapa de tempo. Se essa diferença for maior do que o critério de convergência, o sistema vai para outra iteração. Portanto, a solução iterativa não será uma boa aproximação para a solução exata se o critério de convergência for grande.

#### 4.1.3 Comparação dos resultados experimentais e numéricos

Neste subcapítulo, são apresentados os resultados dos testes experimentais realizado por Lopes [9] e o resultado da simulação numérica, que serão comparados por meio de gráficos com o objetivo de validar o modelo numérico.

O gráfico apresentado na Figura 28, representa os valores das forças obtidos nos doze ensaios experimentais e na simulação numérica por seus respectivos deslocamentos.

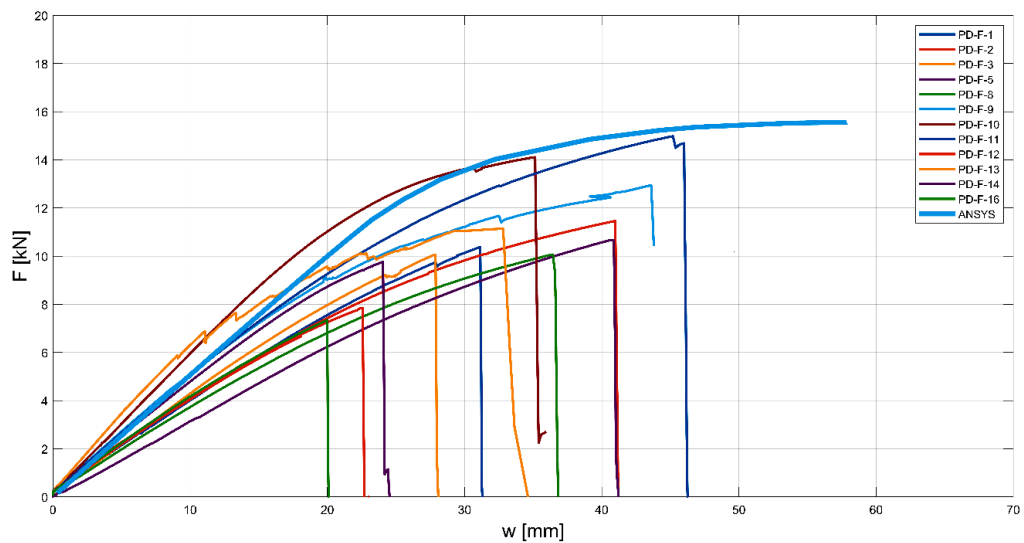


Figura 28 – Gráfico de Força x Deslocamento vertical a meio vão.

O gráfico de tensão normal máxima de flexão versus deslocamento vertical a meio vão, empregado na comparação dos doze ensaios experimentais e a simulação numérica é exibido na Figura 29.

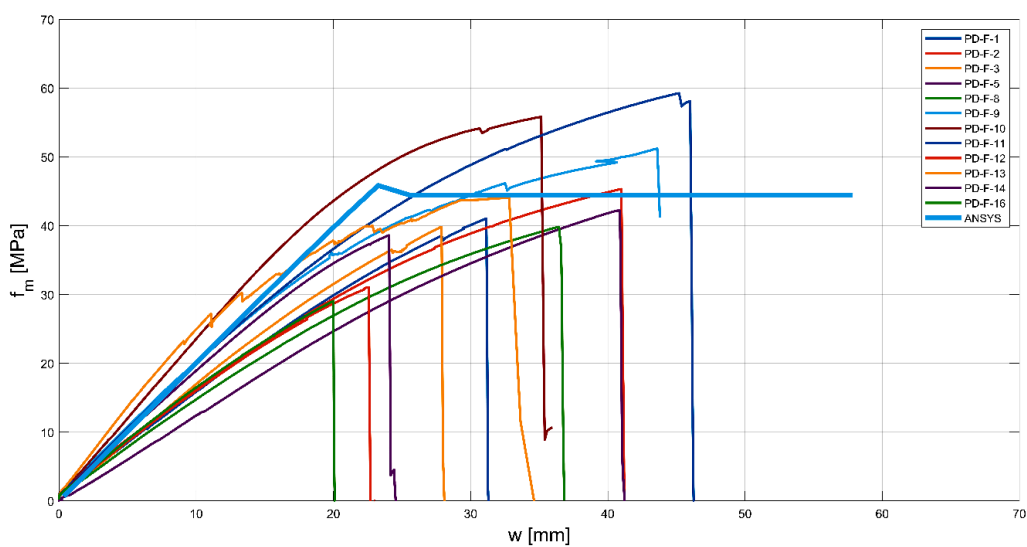


Figura 29 – Gráfico de Tensão normal máxima de flexão x Deslocamento vertical a meio vão.

Comparando os resultados obtidos no gráfico de tensão normal máxima de flexão pelo deslocamento a meio vão, identificamos que o resultado numérico apresenta valores de tensões que se mantêm lineares até atingir a tensão de cedência e, a partir deste ponto, forma-se um patamar de tensões. Por outro lado, é possível notar que os resultados experimentais apresentam-se em forma de curvas seguida da queda brusca do patamar.

Esta situação pode ser justificada uma vez que experimentalmente a madeira apresenta quase sempre um comportamento no domínio elástico, por isso não ocorre o patamar antes da rutura, por sua vez, o modelo numérico foi caracterizado com um comportamento no domínio elásto-perfeitamente plástico, para garantir que o material tenha um limite elástico, sendo este limite a tensão de cedência. Não é possível programar a queda do patamar, já que no campo *Bilinear Isotropic Hardening* só permite módulo tangente igual ou maior que zero.

Para determinar os resultados da simulação mecânica até o limite do regime elástico, uma vez que não faz sentido analisar os resultados do regime plástico, pois o material não apresenta este comportamento experimentalmente, obteve-se por meio do gráfico de tensão normal o último ponto do regime elástico, sendo este, o ponto que antecede o início do patamar de tensões. Para este ponto existe um tempo correspondente e por meio dele foi determinada a força máxima para o regime elástico.

Verificando os resultados numéricos e experimentais temos, para a tensão à flexão média experimental um valor de 44,49 [MPa], enquanto a tensão normal de flexão numérica foi de 45,86 [MPa], apresentando um erro relativo de 3,1%. Já para a força foi determinado um valor de 10,86 [kN] para a força máxima média experimental e um valor de 11,52 [kN] para a força numérica máxima no regime elástico, exibindo um erro relativo de 6,1%.

Sendo assim, pode-se afirmar que a solução determinada pela análise numérica é coerente com os resultados experimentais, portanto a solução obtida por elementos finitos é fiável. Assim, fica comprovada a capacidade do modelo numérico no que diz respeito a análise estrutural estática, definindo-se um modelo numérico estrutural para as simulações que serão efetuadas posteriormente.

No Anexo 3, encontram-se os resultados obtidos para deslocamento total, deslocamento direcional no eixo *Y* e tensão normal no eixo *Z*, para o último instante de tempo desta simulação.

## 4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM VIGAS DE MADEIRA

O comportamento térmico e mecânico de elementos estruturais de madeira foi investigado nesta tese por intermédio de simulações não lineares em elementos finitos tridimensionais. Neste estudo foram efetuadas diversas análises computacionais nos elementos de Madeira Abeto de Douglas: simulações estruturais estáticas, simulações térmicas transientes e simulações termomecânicas em regime transiente, para dois modelos de vigas propostos. O modelo de Viga 1 com dimensões de 75 [mm] de largura por 150 [mm] de altura e 6000 [mm] de comprimento e o modelo de Viga 2 com 250 [mm] de largura, 300 [mm] de altura e 6000 [mm] de comprimento.

### 4.2.1 Simulação estrutural estática não-linear material em regime estacionário

Para determinar a carga de colapso em uma viga em regime estacionário com temperatura ambiente constante de 20 [°C], foi realizada uma simulação estrutural estática.

Nesta análise foi empregado um *time step* inicial de 10 [s], um *time step* mínimo de 0,01 [s] e um *time step* máximo de 60 [s].

Para a simulação estrutural do modelo de Viga 1 foi imposta uma carga incremental linear com valor igual a 3000 [N] no decorrer de 1800 [s], para  $\frac{1}{4}$  da viga. Desta forma, os valores das forças do modelo numérico podem ser definidos por meio da equação da reta, expressão (66).

$$F = 4 * \left( \frac{3000 * t}{1800} \right) \rightarrow F = 6,667 * t \quad (66)$$

Para o modelo de Viga 2, foi admitida uma carga incremental linear com valor igual a 50000 [N] ao longo de 3600 [s], para  $\frac{1}{4}$  da viga. Desta forma, os valores das forças do modelo numérico podem ser definidos por meio da equação da reta, expressão (67).

$$F = 4 * \left( \frac{50000 * t}{3600} \right) \rightarrow F = 55,556 * t \quad (67)$$

#### 4.2.2 Simulação térmica não-linear material em regime transiente

Para avaliar a influência da temperatura no comportamento estrutural das vigas de Madeira Abeto de Douglas foi realizada uma sequência de simulações térmicas e estruturais em modelos tridimensionais. Para tal fim, inicialmente obteve-se a distribuição e evolução da temperatura em todo o elemento para, posteriormente, realizar uma simulação estrutural estática, tendo como dados de entrada a resposta da distribuição de temperatura determinada na análise térmica.

Na simulação térmica foram consideradas as condições de fronteira de convecção e radiação nas superfícies expostas ao incêndio, ou seja, na face inferior, superior e nas faces laterais, como pode ser visto na Figura 30. As superfícies expostas ao fogo sofreram influência da curva de incêndio padrão ISO 834.

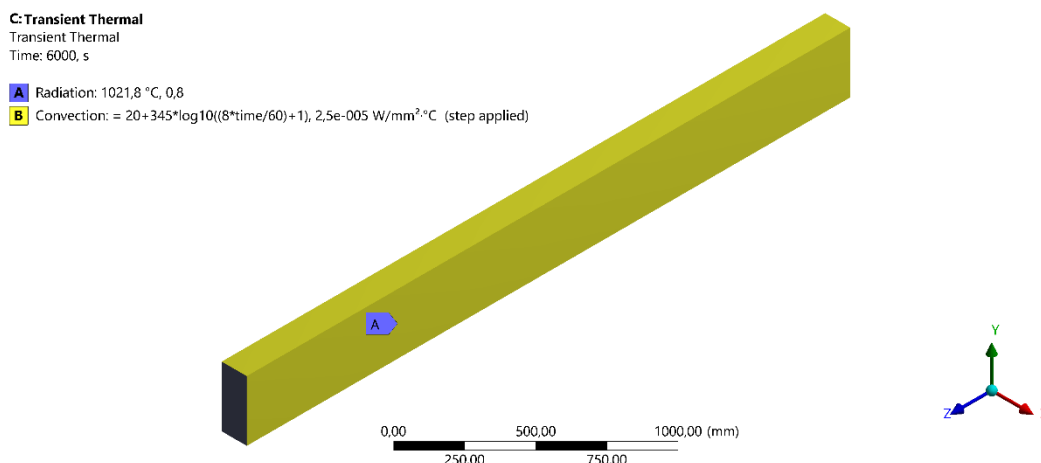


Figura 30 – Condições de fronteira de convecção e radiação nas três faces de exposição ao fogo, para  $\frac{1}{4}$  da viga.

Adotando as recomendações do Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), para o coeficiente de transferência de calor por convecção foi usado um valor de 25 [W/m<sup>2</sup>°C], enquanto para os efeitos de radiação, a emissividade na madeira assumiu valor de 0,8. A temperatura ambiente considerada foi de 20 [°C].

Neste modelo térmico foi usado um comando que permite que os resultados gerados pelo programa sejam dados em pontos igualmente espaçados, para este estudo foi admitido um espaçamento igual a 60 [s]. O objetivo de adicionar este campo é diminuir a quantidade de resultados fornecido no ficheiro de soluções, pois uma vez que estes dados de temperatura são exportados para o modelo estrutural é obrigatório realizar as simulações mecânicas para

todos os instantes de tempo. Quando a simulação estrutural não converge para um tempo que existe, o *software* faz uma interpolação linear entre os tempos fornecidos na simulação térmica.

O incremento de tempo considerado entre as interações foi de no máximo 60 [s] e no mínimo 0,01 [s]. Para o modelo de Viga 1, o *step end time* da simulação foi de 3600 [s] e para o modelo de Viga 2 o *step end time* foi de 6000 [s], visto que a seção transversal da viga é maior.

Com o intuito de determinar a espessura da camada carbonizada na seção transversal da viga, em função do tempo, foi acrescentado o comando *path* no centro vertical e horizontal da seção transversal para obter a distribuição de temperatura ao longo da seção transversal da viga.

Para o cálculo da espessura carbonizada, a linha da camada carbonizada foi estimada como sendo a posição da isoterma de 300 [°C], como recomendado pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004). Consequentemente, as regiões que exibem temperaturas superiores a 300 [°C] são consideradas carbonizadas, em contrapartida a região com temperaturas inferiores a 300 [°C] é denominada seção transversal residual.

#### 4.2.3 Simulação termomecânica não-linear material e geométrica

O estudo do comportamento térmico e estrutural de vigas em situação de incêndio é de extrema importância tendo em vista que, havendo a variação das propriedades térmicas e mecânicas da madeira, haverá uma perda progressiva da capacidade estrutural do elemento com o aumento da temperatura. Deste modo foram adotadas as variações das propriedades térmicas e mecânicas indicadas pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004). Além dos efeitos de altas temperaturas, também foi considerada a ação simultânea de uma força constante representativa de um determinado grau de utilização aplicada no centro da seção transversal da viga no meio do vão livre.

A simulação estrutural estática da viga foi processada em seguida à simulação térmica. Inicialmente, foram executadas simulações térmicas num modelo tridimensional, e posteriormente, os resultados da distribuição de temperatura ao longo da viga foram introduzidos como dados de entrada para simulação estrutural.

A análise termomecânica foi realizada com a finalidade de determinar o tempo de resistência ao fogo em função do grau de utilização, que para este trabalho foi definido como 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% e 90% da carga mecânica suportada pela viga à temperatura ambiente de 20 [°C].

Para este modelo foi utilizado um *time step* mínimo de 0,01 [s], um *time step* máximo de 60 [s] e um *time step* inicial de 10 [s].

#### 4.2.4 Considerações do modelo numérico

##### 4.2.4.1 Inserção do material

Para este modelo foi utilizado como base o material “*Wood Orthotropic*” criado para a simulação mecânica utilizada para a calibração e validação do modelo numérico. Como o próprio nome indica, ele simula o comportamento ortotrópico da Madeira Abeto de Douglas, utilizando o campo *Orthotropic Elasticity* em temperatura ambiente de 20 [°C]. Logo, como este modelo também será utilizado para simulações térmicas e termomecânicas foi necessário acrescentar propriedades térmicas, conforme a Figura 31.

Properties of Outline Row 3: Wood Orthotropic				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	Tabular		
6	Orthotropic Elasticity	Tabular		
25	Bilinear Isotropic Hardening	Tabular		
30	Hill Yield Criterion	Tabular		
44	Tensile Ultimate Strength	4,449E+07	Pa	
45	Compressive Ultimate Strength	4,3E+07	Pa	
46	Isotropic Thermal Conductivity	Tabular		
49	Specific Heat, C <sub>p</sub>	Tabular		

Figura 31 – Propriedades da Madeira Abeto de Douglas inseridas na base de dados do *Ansys Workbench*.

Para caracterizar as mudanças graduais das propriedades mecânicas e térmicas da madeira exposta ao fogo foram considerados as variações destas propriedades de acordo com o Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), detalhada no Estado da Arte. No capítulo 2 se encontram

todas as propriedades empregues na especificação da Madeira Abeto de Douglas, exceto o valor da resistência à flexão média experimental inserida neste modelo, como resistência à tração paralela às fibras da madeira, que foi determinada na seção 4.1.1 deste trabalho.

O *Ansys Workbench* não permite que a caracterização do material seja realizada usando duas relações de módulo de elasticidade, desta forma admitiu-se o fator de redução do módulo de elasticidade à tração, indicado pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), uma vez que para vigas submetidas à flexão é esperada que a rutura ocorra principalmente na região tracionada.

Conforme o Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), para temperatura superiores a 300 [°C] o fator de redução das propriedades mecânicas é zero, porém para a simulação numérica adotou-se um fator de redução de 0,01 do valor da propriedade mecânica à 20 [°C], pois o *software* não aceita valores nulos para o processamento do modelo. Também foi adotado neste modelo valores constantes das propriedades mecânicas no intervalo de 300 [°C] a 1200 [°C], como pode ser visto na Tabela 19.

Tabela 19 – Relação das propriedades ortotrópicas da Madeira Abeto de Douglas com a temperatura.

Temperatura [°C]	Fator de redução $K_0$	Módulo de elasticidade [MPa]			Módulo de rigidez [MPa]		
		$E_X$	$E_Y$	$E_Z$	$G_{XY}$	$G_{YZ}$	$G_{XZ}$
20	1,00	515,0	700,4	10300,0	72,1	659,2	803,4
100	0,50	257,5	350,2	5150,0	36,1	329,6	401,7
300	0,01	5,2	7,0	103,0	0,7	6,6	8,0
1200	0,01	5,2	7,0	103,0	0,7	6,6	8,0

Os coeficientes de Poisson introduzidos na caracterização do material foram,  $\nu_{XY} = 0,374$ ,  $\nu_{YZ} = 0,036$  e  $\nu_{XZ} = 0,029$ , para todas as temperaturas, uma vez que eles não variam com o aumento da mesma.

Para representar o comportamento elásto-perfeitamente plástico foi introduzido o campo *Bilinear Isotropic Hardening*. Os valores de tensão preservam-se lineares até atingir a tensão de cedência, que neste estudo tem o valor igual a 44,49 [MPa], a partir deste ponto se atinge um domínio perfeitamente plástico com uma linha sem declive, definida pelo módulo tangente igual a 0.

Para representar o critério de rutura foi introduzido o campo *Hill Yield Criterion* com o intuito de estabelecer as tensões admissíveis. As taxas de tensão de escoamento direcional do critério de Hill em função da temperatura é apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 – Taxa de tensão de escoamento direcional do critério de Hill em função da temperatura.

Temperatura [°C]	Critério de Hill					
	R <sub>11</sub>	R <sub>22</sub>	R <sub>33</sub>	R <sub>12</sub>	R <sub>23</sub>	R <sub>13</sub>
20	0,052	0,052	1,000	0,179	0,405	0,405
100	0,052	0,052	1,000	0,110	0,249	0,249
300	0,052	0,052	1,000	0,179	0,405	0,405
1200	0,052	0,052	1,000	0,179	0,405	0,405

#### 4.2.4.2 Geometria

Para a execução dos dois modelos geométricos das vigas foi utilizado a plataforma *Design Modeler* que integra o *Ansys Workbench*, as dimensões geométricas das vigas estão dispostas na Tabela 21.

Tabela 21 – Dimensões da geometria dos modelos de vigas.

Modelo da viga	Base (b) [mm]	Altura (d) [mm]	Comprimento (L) [mm]
Viga 1	75,00	150,00	6000,00
Viga 2	250,00	300,00	6000,00

Na Figura 32 é possível observar a geometria dos modelos das vigas propostas com suas dimensões genéricas.

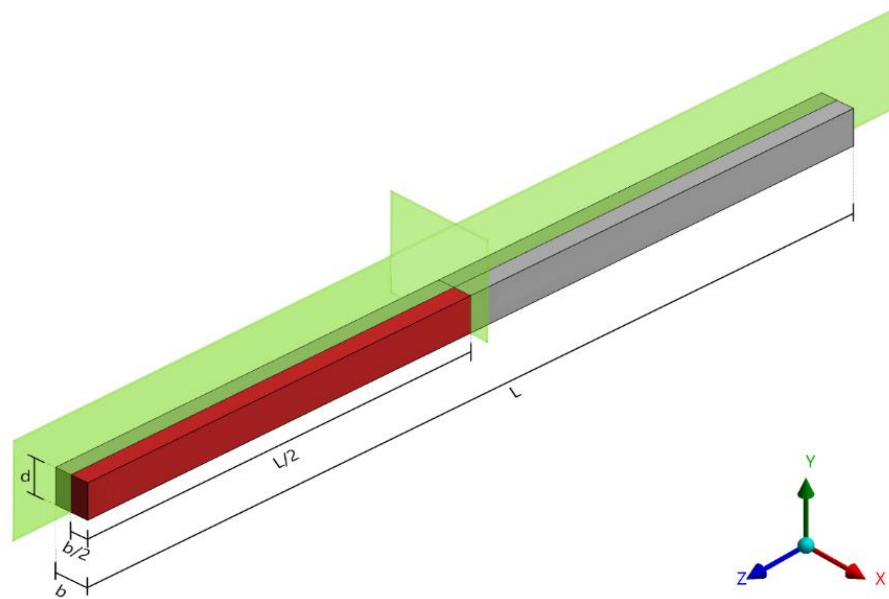


Figura 32 – Geometria dos modelos propostos e seus planos de simetria.

Observando a Figura 32 certifica-se que os modelos de vigas propostos exibem dois eixos de simetria. Esta situação permite que a simulação seja feita em apenas  $1/4$  da viga, representado pelo retângulo vermelho da figura anterior. Para que seja possível adotar a condição de simetria nas vigas devem ser definidas condições de contorno apropriadas para que os resultados dos troço de viga em análise representem os mesmos resultados, caso a simulação fosse realizada em toda a viga. Esta técnica de modelar apenas  $1/4$  da viga proporciona uma economia de processamento computacional durante a simulação realizando-a num menor intervalo de tempo.

#### 4.2.4.3 Malha

Como citado temos dois modelos de vigas com dimensões diferentes, por isso nesta seção será exposto dois tipos de malha, um para cada viga.

Para a Viga 1, temos uma malha quadrada de elementos finitos na seção transversal da viga de 9,375 [mm], enquanto a malha inserida por todo o comprimento tem a dimensão de 20 [mm], como mostra a Figura 33.

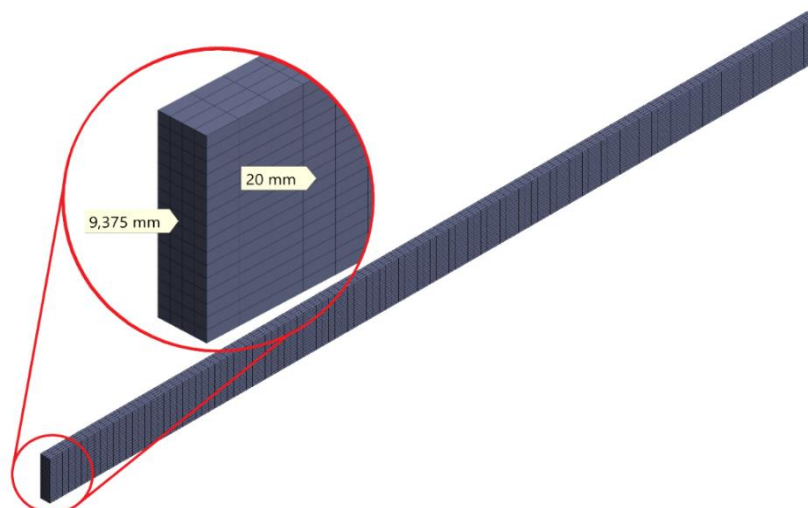


Figura 33 – Malha de elementos finitos aplicada na Viga 1.

Já para o modelo da Viga 2, foi aplicada uma malha de 12,5 [mm] na seção transversal e de 20 [mm] por todo o comprimento da viga, de acordo com a Figura 34.

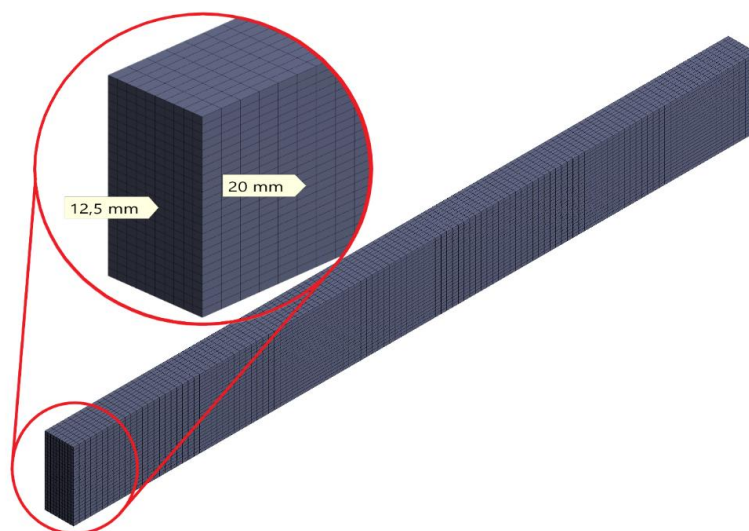


Figura 34 – Malha de elementos finitos aplicada na Viga 2.

Na Figura 33 e Figura 34 é possível observar a discretização da geometria em pequenos elementos finitos, a exatidão dos resultados obtidos nas análises numéricas depende muito das dimensões e da quantidade dos elementos finitos existentes na geometria. Para malha de elementos finitos ser considerada ideal o tamanho dos elementos finitos deve ser o menor possível, mas sem ocasionar um enorme custo computacional.

O *software* tem a opção de escolha da ordem do elemento finito, assim como na análise numérica de calibração e validação do modelo numérico, neste estudo a ordem do elemento também será linear e tridimensional.

O elemento utilizado para a simulação térmica transiente foram dois, o SOLID70 e o SURF152. O SOLID70 é caracterizado por apresentar oito nós com um único grau de liberdade, temperatura, em cada nó. Funções de interpolação linear são usadas para este elemento e o método de integração completa de Gauss 2x2x2 também é aplicado. O elemento é capaz de realizar condução térmica tridimensional e pode ser usado tanto no regime estacionário quanto no regime transiente da análise térmica. Se o modelo que contém o elemento SOLID70 também for analisado estruturalmente, o elemento deve ser substituído por um elemento estrutural equivalente como o SOLID185. A geometria do SOLID70 pode ser vista na Figura 35 [55], [56].

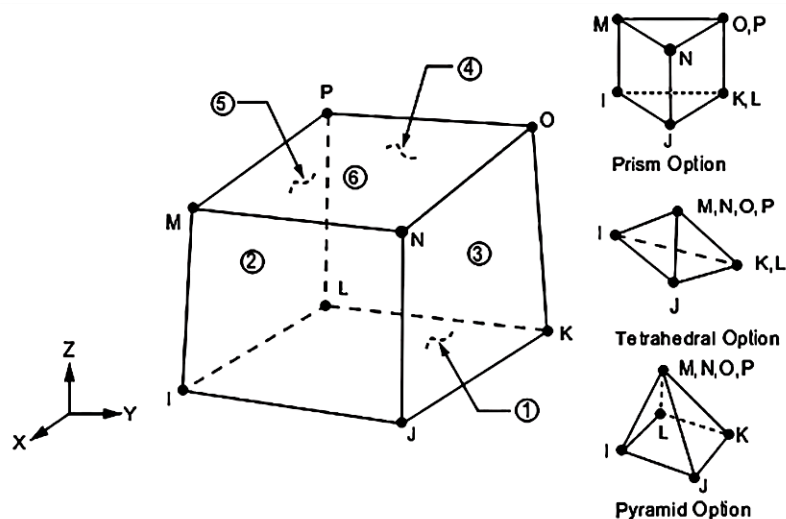


Figura 35 – Geometria do modelo estrutural SOLID70, [55].

O elemento SURF152 é empregado em análises térmicas tridimensionais e pode ser usado para várias aplicações de carga e efeito de superfície, ele pode ser sobreposto a face de qualquer elemento térmico tridimensional [55].

Para a simulação estrutural estática foi usado o elemento SOLID185, definido por oito nós e três graus de liberdade, o elemento é adequado para análise de plasticidade, hiperelasticidade, com grandes deflexões e com grandes deformações, Figura 26 [55].

#### 4.2.4.4 Aplicação da força e condições de fronteira

Por se tratar de uma simulação de somente  $1/4$  da viga, porém com o intuito de se alcançar os mesmos resultados, caso estivéssemos realizando a simulação no modelo inteiro, é de fundamental importância aplicar as condições de contorno apropriadas nas faces onde se localizam os planos de simetria. O *Ansys Mechanical* permite a introdução de condições de contorno em faces de simetria. No caso da face localizada no plano de simetria  $Y-Z$ , foi utilizada a condição de contorno *Displacement*, esta restrição impede o deslocamento na direção do eixo  $X$ .



Figura 36 – Face da viga no plano de simetria  $Y-Z$ .

Analogamente, empregou-se a restrição *Remote Displacement 2* em todos os nós da face localizada no plano de simetria  $X-Y$ , impossibilitando dessa maneira o deslocamento dos nós na direção do eixo  $Z$  e a rotação em torno dos eixos  $Y$  e  $Z$ .

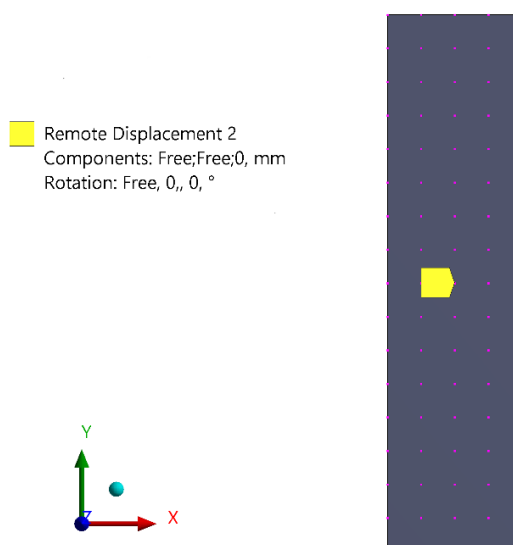


Figura 37 – Face da viga no plano de simetria  $X-Y$ .

Para as condições de contorno no suporte, considerando uma viga simplesmente apoiada, admitiu-se novamente uma restrição de *Remote Displacement*, com o objetivo de bloquear o deslocamento do elemento na direção do eixo *Y* e permitir sua rotação em torno do eixo *X*.

Para o modelo de Viga 1 o mesmo foi aplicado no centro da seção transversal da viga, como é visto na Figura 38.

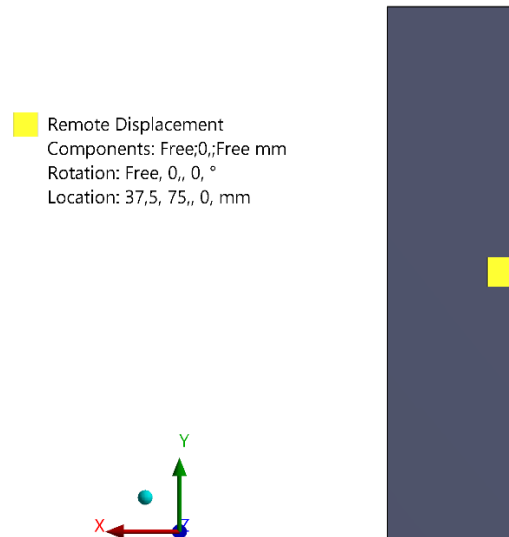


Figura 38 – Condição de apoio da Viga 1.

Enquanto para o modelo de Viga 2 o *Remote Displacement* foi aplicado em diversos nós correspondente ao centro horizontal da seção transversal da viga, com o objetivo de diminuir o efeito localizado de deformação no nó, ocasionado pelo grande valor da carga aplicada nesta viga, Figura 39. Para a simulação mecânica foi posto o *Remote Displacement* em 10 nós e para a simulação termomecânica foi empregado um nó para cada 10% da carga representativa de um determinado grau de utilização.

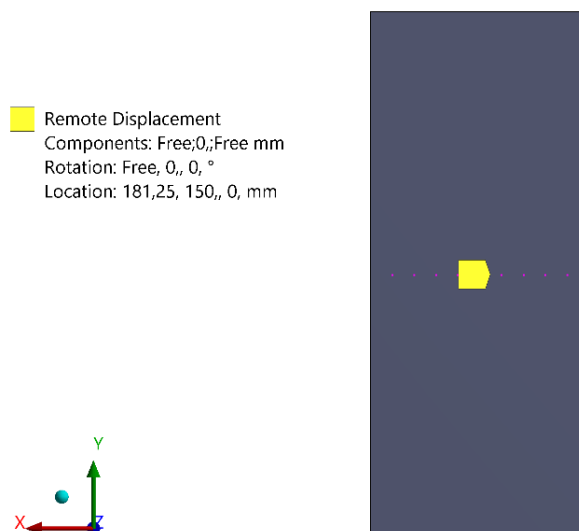


Figura 39 – Condição de apoio da Viga 2.

No modelo de Viga 1 foi aplicada uma força pontual localizada no nó central da seção transversal no meio do vão livre da viga, como exibe a Figura 40.

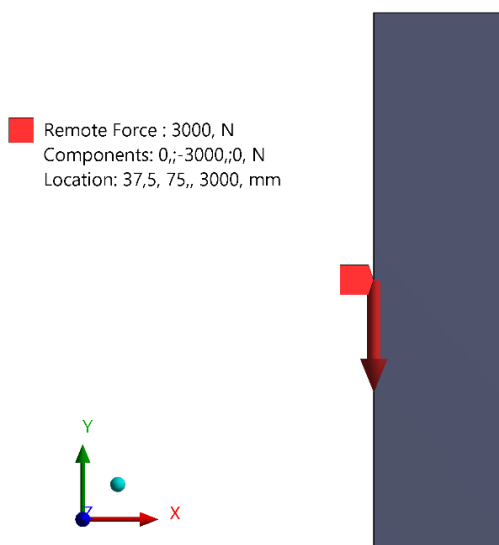


Figura 40 – Detalhe da aplicação da força para Viga 1.

Para diminuir o efeito localizado de deformação no nó provocado pelo grande valor da carga aplicada na viga, o *Remote Force* foi empregado em 10 nós, que se encontram no meio horizontal da seção transversal da viga, para simulação mecânica, enquanto para a simulação termomecânica foi empregado um nó para cada 10% da carga representativa de um determinado grau de utilização, conforme a Figura 41.

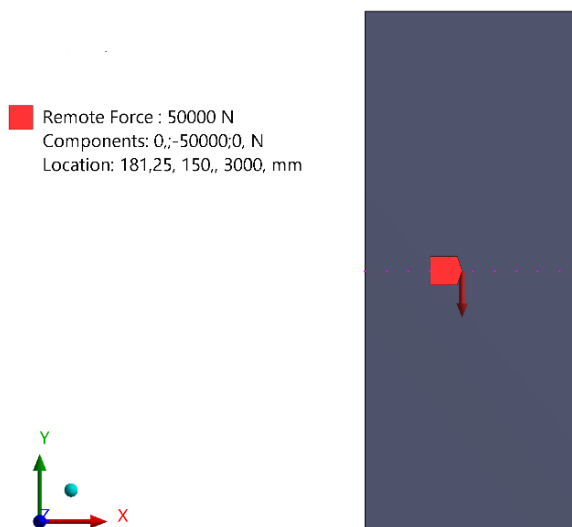


Figura 41 – Detalhe da aplicação da força para Viga 2.

## Capítulo 5: Resultados e discussões

---

Neste capítulo são apresentados, comparados e discutidos os resultados do método de cálculo simplificado fornecido pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004) e os resultados das simulações numéricas executados para elaboração deste estudo. Os resultados são apresentados na seguinte sequência: Análise mecânica, determinando a carga de colapso para uma viga simplesmente apoiada em temperatura ambiente constante de 20 [°C], posteriormente os resultados da análise térmica, determinando a espessura da camada carbonizada, as dimensões da seção resistente e a taxa de carbonização e por fim, os resultados das análises termomecânicas, onde será exibido os tempos de resistência ao fogo em função do grau de utilização da carga de projeto, aplicada de maneira constante no meio do vão livre da viga de madeira em situação de incêndio. Os demais resultados são apresentados em anexo.

Os resultados aqui exibidos passaram por um tratamento estatístico com o objetivo de obter conclusões em relação aos resultados adquiridos. Existem vários tipos de tratamentos estatísticos, e para este estudo foi adotado o erro relativo.

O erro relativo é uma porcentagem que representa os erros de aproximações entre duas soluções, soluções dos cálculos analíticos e soluções dos cálculos numéricos, que dependem muito da discretização da malha de elementos finitos.

$$Erro\ Relativo = \frac{Analítico - Numérico}{Analítico} * 100 \quad (68)$$

### 5.1 ANÁLISE MECÂNICA

Nesta etapa foi realizada uma simulação estrutural estática em regime estacionário com temperatura ambiente constante de 20 [°C] para cada modelo de viga, com o objetivo

de determinar a carga de colapso para uma viga de Madeira Abeto de Douglas simplesmente apoiada, e a partir desta carga definir a força de cada grau de utilização empregada na simulação termomecânica.

A Figura 42 e a Figura 43, representam os gráficos de força por deslocamento vertical a meio vão para o modelo de Viga 1 e Viga 2, respetivamente.

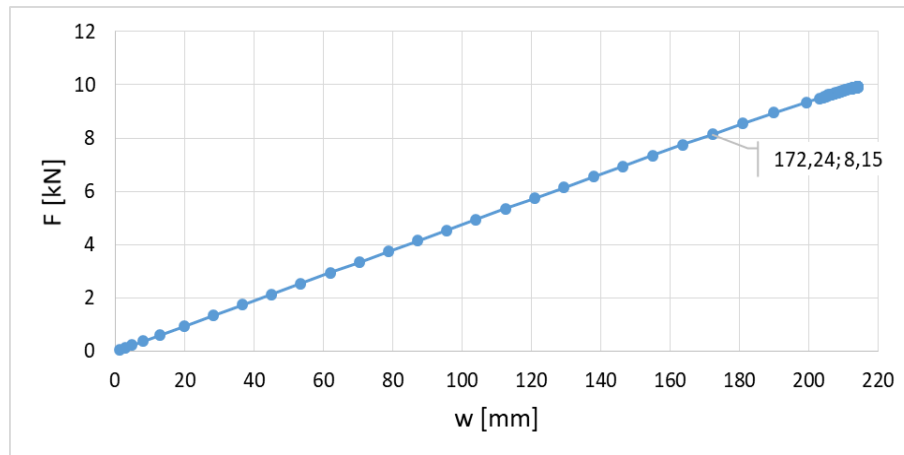


Figura 42 – Gráfico de Força x Deslocamento vertical a meio vão, Viga 1.

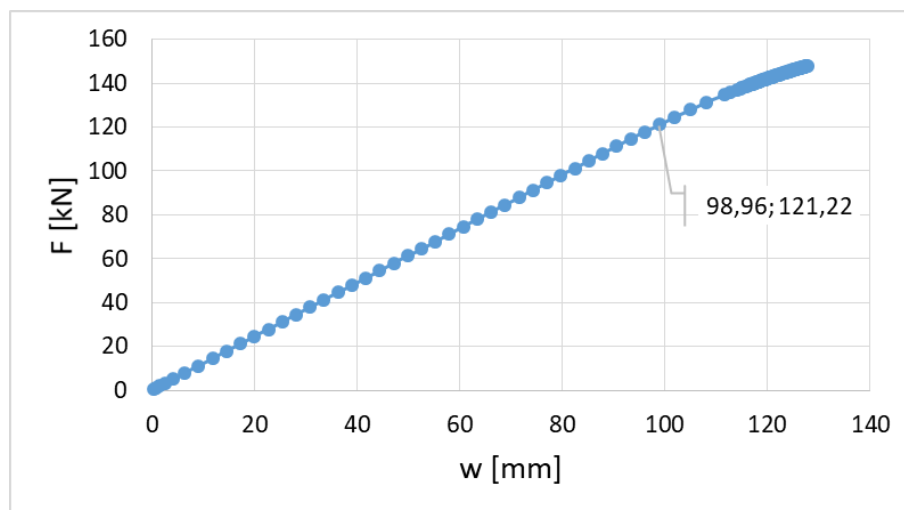


Figura 43 – Gráfico de Força x Deslocamento vertical a meio vão, Viga 2.

Para a Viga 1 e Viga 2 também foi plotado o gráfico do momento atuante pelo deslocamento vertical a meio vão, como pode ser visto na Figura 65 e Figura 66 do Anexo 4 de modo respetivo.

Como pode ser observado na Figura 42 e na Figura 43, para um ponto específico é dado as coordenadas do ponto (x,y). A abscissa corresponde o deslocamento vertical a meio

vão, enquanto a ordenada representa a força máxima do regime elástico. Essa força foi determinada utilizando a tensão normal de flexão ao longo do eixo Z, fornecida pelo programa *Ansys*.

Com base no gráfico de tensão normal no eixo Z por deslocamento vertical a meio vão foi possível obter o ponto de tensão normal máxima no regime elástico para cada modelo de viga, para este ponto existe um tempo correspondente e por intermédio deste tempo foi adquirido o valor da carga máxima do regime elástico.

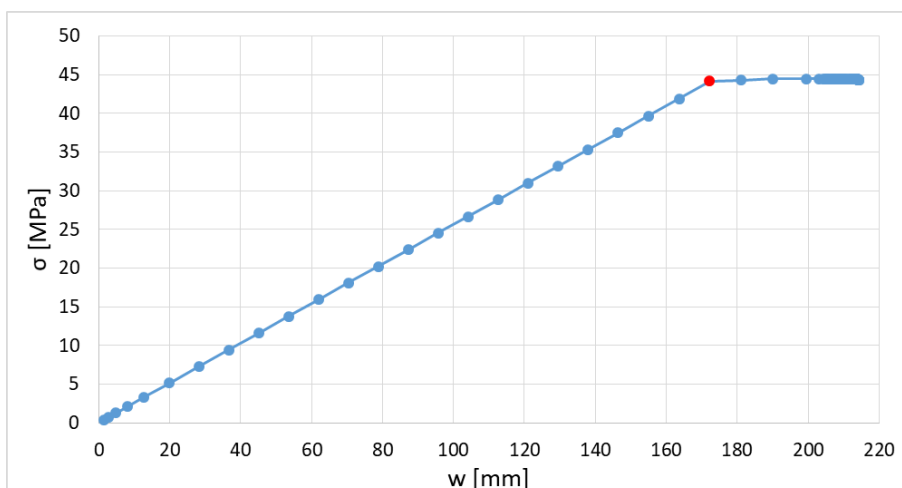


Figura 44 – Gráfico de Tensão normal no eixo Z x Deslocamento vertical a meio vão, Viga 1.

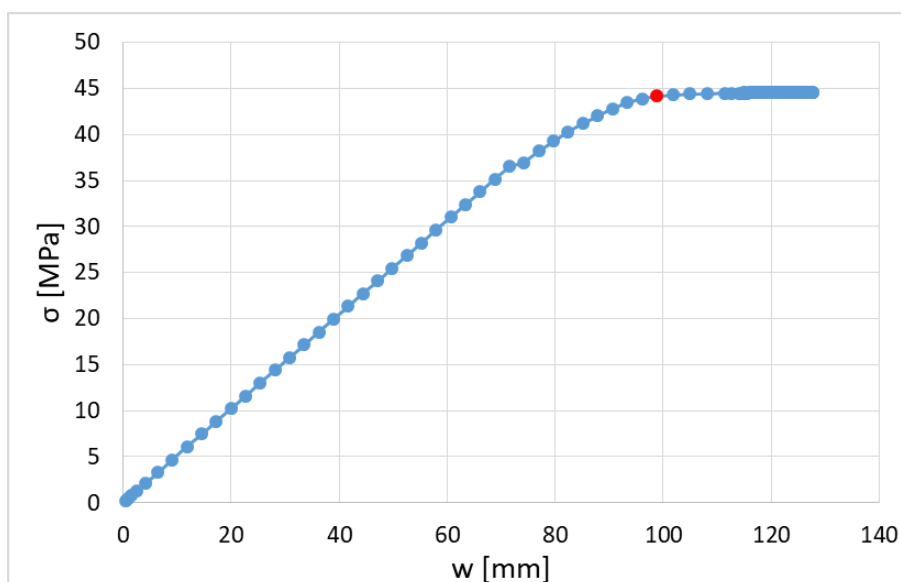


Figura 45 – Gráfico de Tensão normal no eixo Z x Deslocamento vertical a meio vão, Viga 2.

O ponto vermelho presente nos dois gráficos anteriores representa o último ponto do regime elástico. Foi admitido este ponto levando em consideração dois fatores: primeiro, ele apresenta um valor de tensão normal próximo ao valor da tensão de cedência de 44,49 [MPa], determinado através da média aritmética da resistência à flexão de 12 resultados de ensaios experimentais obtidos na tese de Lopes [9], conforme discutido na seção 4.1.1 deste trabalho. Segundo fator, este ponto é o último ponto que antecede o patamar de tensão, ou seja, os dados posteriores a ele pertencem ao regime plástico.

A carga de colapso foi considerada a carga máxima do regime elástico, uma vez que experimentalmente a madeira apresenta quase sempre um comportamento no regime elástico. Mas para assegurar que o material tenha um limite elástico, sendo este limite a tensão de cedência, foi necessário caracterizar a madeira com um comportamento elasto-perfeitamente plástico no modelo numérico.

A Figura 46 mostra a distribuição da tensão normal no eixo Z, para  $1/4$  da Viga 1, no instante de tempo correspondente à força máxima no regime elástico.

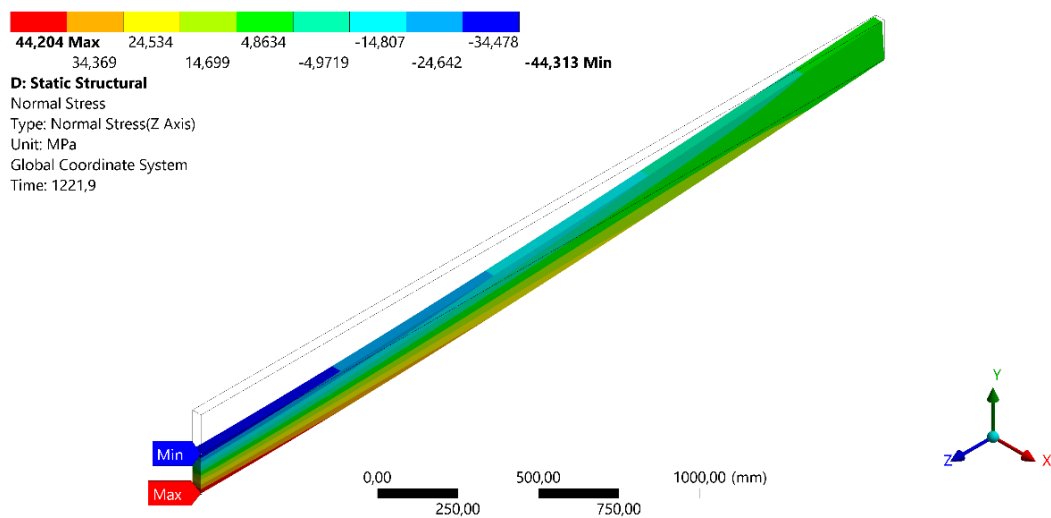


Figura 46 – Distribuição da tensão normal no instante de tempo correspondente a força máxima no regime elástico, Viga 1.

O mesmo consegue ser verificado para a Viga 2, na Figura 47.

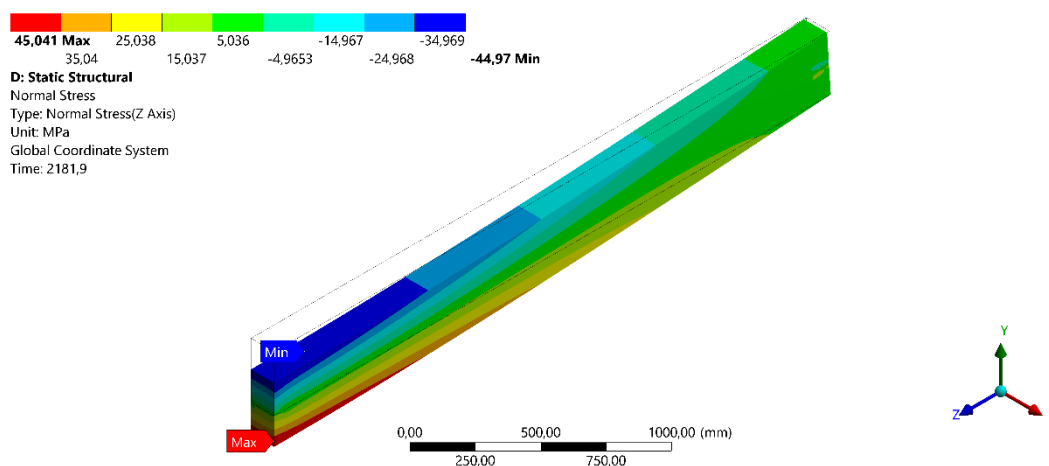


Figura 47 – Distribuição da tensão normal no instante de tempo correspondente a força máxima no regime elástico, Viga 2.

No Anexo 5 e Anexo 6, encontram-se os resultados obtidos para o deslocamento total, deslocamento direcional no eixo  $Y$ , tensão equivalente de von Mises e tensão normal no eixo  $Z$ , para o último instante de tempo de cada simulação.

Por fim, a carga de colapso determinada numericamente pode ser comparada com os resultados do método simplificado de cálculo do Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), calculados com a resistência de projeto ao fogo e com a resistência característica, todo procedimento do cálculo simplificado se encontra na seção 3.1 desta tese e as tabelas de cálculo se encontram no Anexo 1. A Tabela 22 apresenta os valores de comparação para os dois modelos de vigas.

Tabela 22 – Comparação do resultado numérico e o método simplificado de cálculo para carga de colapso e grau de utilização.

	Grau de utilização %	Força Ansys $F_{el}$ [N]	Força EN 1995 1-2		Erro Relativo	
			$F_{d,fi}$ [N]	$F_d$ [N]	$F_{d,fi}$ %	$F_d$ %
<b>Viga 1</b>  b = 75 mm d = 150 mm L = 6000 mm	Carga de colapso	8146,0	10427,3	8341,9		
	20	1629,2	2085,5	1668,4		
	30	2443,8	3128,2	2502,6		
	40	3258,4	4170,9	3336,8		
	50	4073,0	5213,7	4170,9	21,9	2,3
	60	4887,6	6256,4	5005,1		
	70	5702,2	7299,1	5839,3		
	80	6516,8	8341,9	6673,5		
	90	7331,4	9384,6	7507,7		
<b>Viga 2</b>  b = 250 mm d = 300 mm L = 6000 mm	Carga de colapso	121216,7	139031,3	111225,0		
	20	24243,3	27806,3	22245,0		
	30	36365,0	41709,4	33367,5		
	40	48486,7	55612,5	44490,0		
	50	60608,3	69515,6	55612,5	12,8	9,0
	60	72730,0	83418,8	66735,0		
	70	84851,7	97321,9	77857,5		
	80	96973,3	111225,0	88980,0		
	90	109095,0	125128,1	100102,5		

Com base na tabela anterior, foram plotados dois gráficos, sendo um para o modelo de Viga 1 e outro para o modelo de Viga 2.

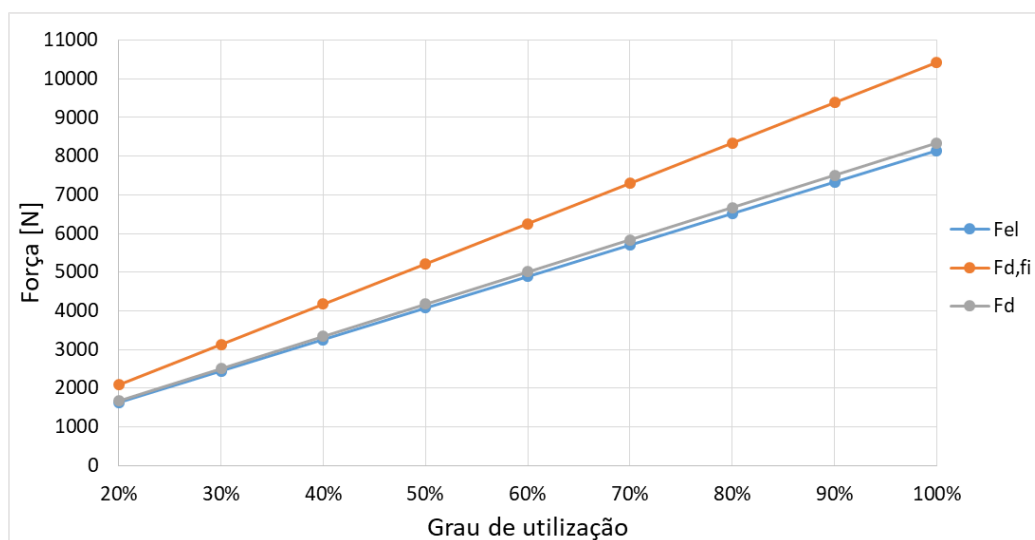


Figura 48 – Comparação do resultado numérico e o método de cálculo simplificado para carga de colapso e grau de utilização, Viga 1.

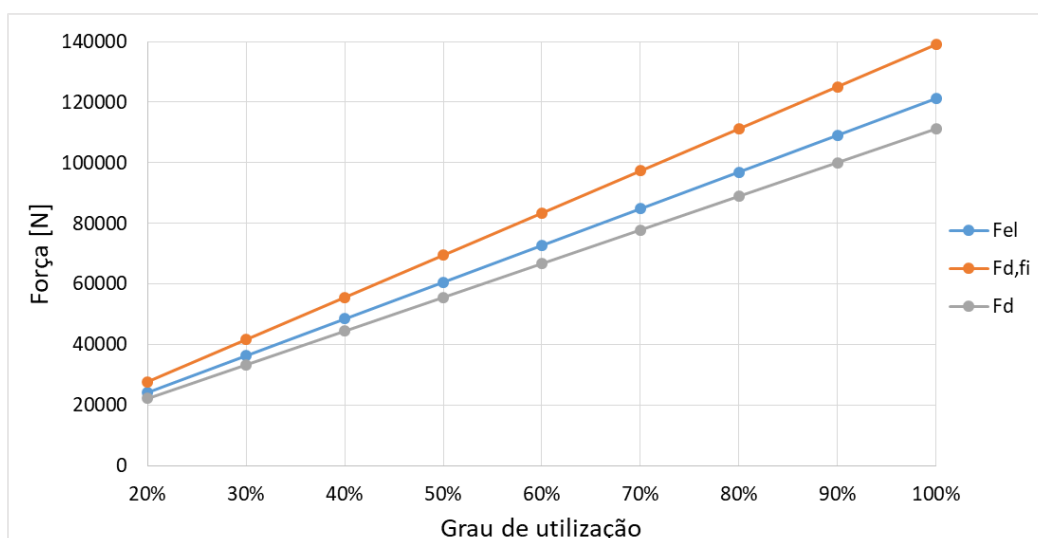


Figura 49 – Comparação do resultado numérico e o método de cálculo simplificado para carga de colapso e grau de utilização, Viga 2.

Com fundamento nos valores do método simplificado de cálculo para as cargas apresentadas, podemos dizer que o método de cálculo que considera a resistência característica se assemelha mais aos resultados numéricos, como comprova o baixo erro relativo encontrado para estas forças.

Comparando os valores de erro relativo para as forças calculadas com a resistência característica para os dois modelos de viga, temos um erro maior para Viga 2. Este erro está relacionado com a tensão de corte.

Como a seção transversal da Viga 2 é maior e mais compacta em comparação com a seção transversal da Viga 1, a tensão de corte passa a ser mais significativa para esta viga, diminuindo a parcela de tensão normal, sendo necessário uma força maior para atingir o limite do regime elástico quando analisado os resultados numéricos. Já o método de cálculo simplificado não considera a tensão de corte para o cálculo da tensão de flexão e por isso a força determinada é menor.

Apesar do erro relativo entre a força numérica e a força determinada pela resistência característica ser pequeno para a Viga 1, este erro pode ter ocorrido devido ao incremento de tempo adotado para esta simulação, como dito anteriormente a escolha do ponto que representa o limite do regime elástico segue dois fatores, um deles é que este ponto seja o último ponto que antecede o patamar de tensão, e este quesito é atendido pelo ponto selecionado. Mas o outro fator é, apresentar um valor de tensão normal próximo ao valor da tensão de cedência de 44,49 [MPa], o ponto selecionado para Viga 1 exibe uma tensão

normal de 44,12 [MPa], ou seja, se o incremento de tempo adotado fosse menor poderia ser obtida uma tensão normal mais próxima da tensão de cedência, obtendo uma força mais próxima da carga de colapso determinada pelo método de cálculo simplificado.

Essa diferença entre os erros relativos também pode estar relacionada com as diferenças das malhas utilizadas em cada modelo numérico.

## 5.2 ANÁLISE TÉRMICA

A análise térmica foi realizada com o intuito de avaliar a distribuição e evolução da temperatura no interior das vigas, determinar a redução da seção transversal dos elementos e definir a taxa de carbonização para cada viga.

Neste subcapítulo são apresentados os resultados dos dois modelos de vigas com as faces inferior, superior e laterais expostas ao fogo. São calculadas a espessura da camada carbonizada e a taxa de carbonização para cada modelo de viga e em seguida comparadas com o Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004).

Na Figura 50 e Figura 51, estão representadas a distribuição e evolução da temperatura ao longo da seção transversal da Viga 1 (75x150x6000 [mm]), para 6 instantes de tempo de 5 [min], 10 [min], 15 [min], 20 [min], 25 [min] e 30 [min].

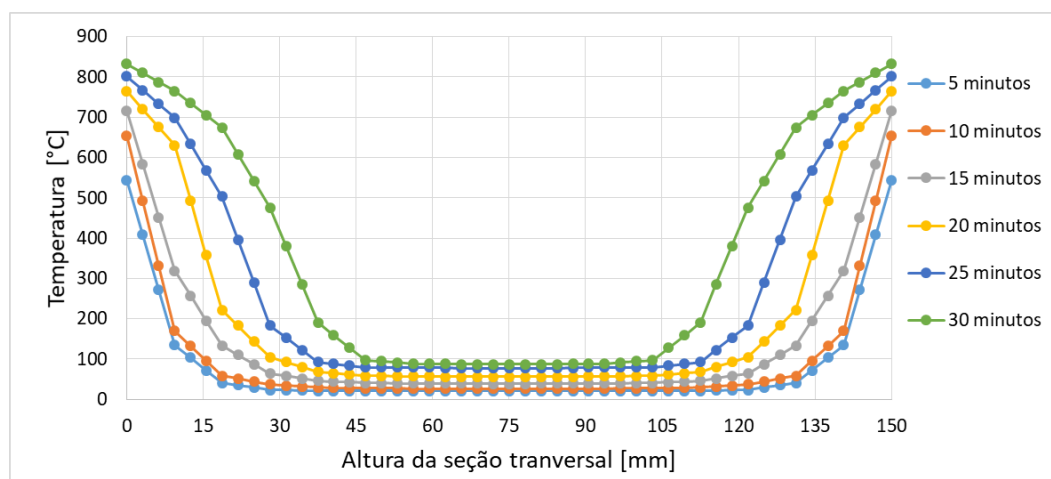


Figura 50 – Distribuição da temperatura ao longo da altura da seção transversal da Viga 1.

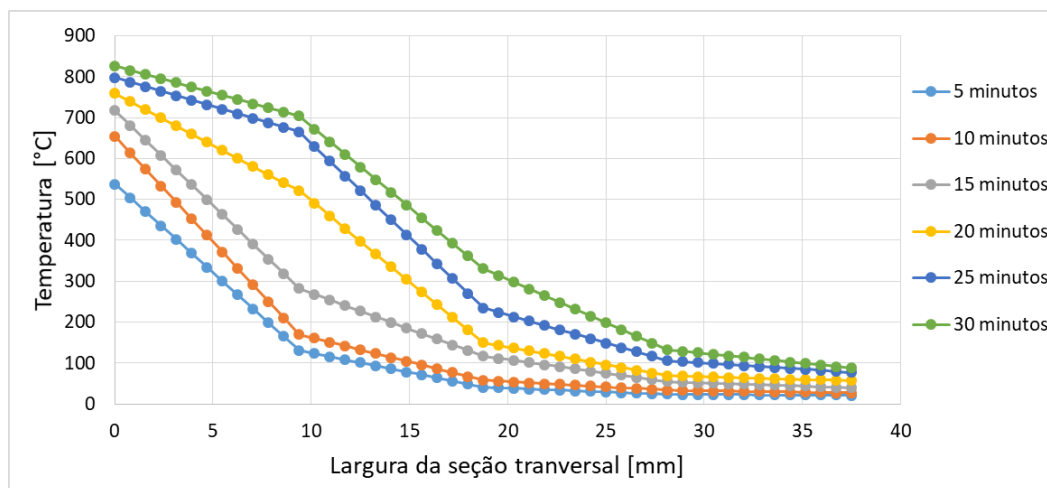


Figura 51 – Distribuição da temperatura ao longo da largura da seção transversal da Viga 1.

A Figura 52 e Figura 53 exibem a distribuição e evolução da temperatura ao longo da seção transversal da Viga 2 (250x300x6000 [mm]), para 8 instantes de tempo de 10 [min], 20 [min], 30 [min], 40 [min], 50 [min], 60 [min], 70 [min] e 80 [min].

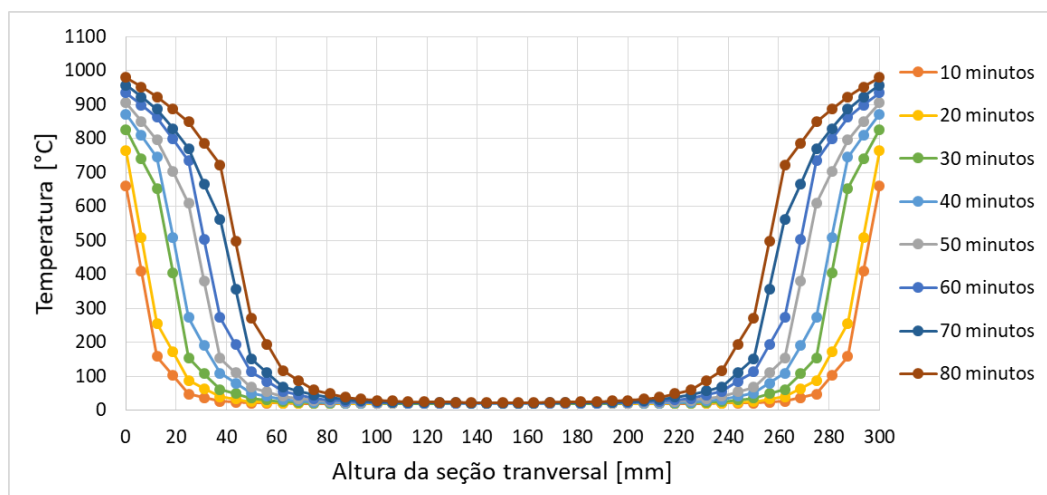


Figura 52 – Distribuição da temperatura ao longo da altura da seção transversal da Viga 2.

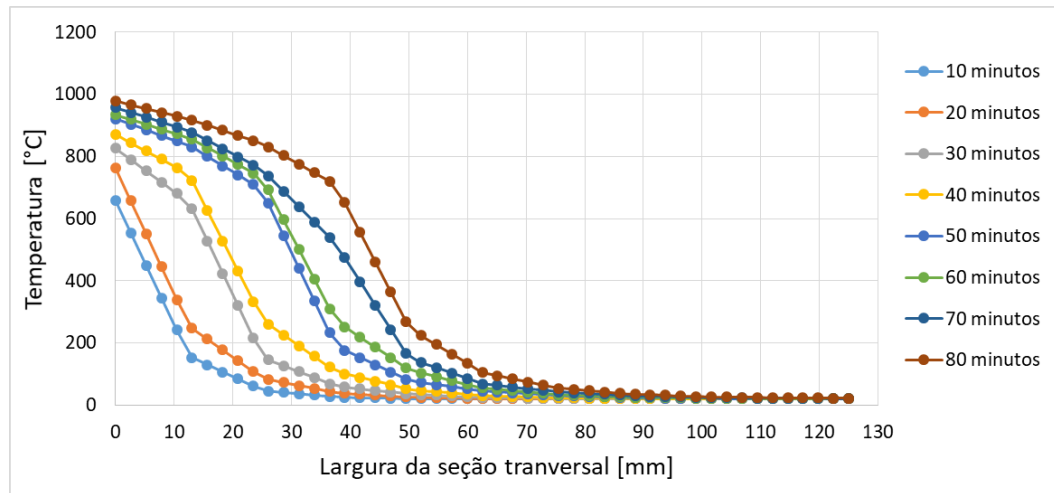


Figura 53 – Distribuição da temperatura ao longo da largura da seção transversal da Viga 2.

Para exemplificar a metodologia empregada a Figura 54 apresenta um exemplo para o cálculo da espessura da camada carbonizada e a taxa de carbonização para os dois modelos de vigas no mesmo instante de tempo. No Anexo 7 e Anexo 8, se encontram para todos os instantes de tempo a distribuição da temperatura ao longo da seção transversal das vigas.

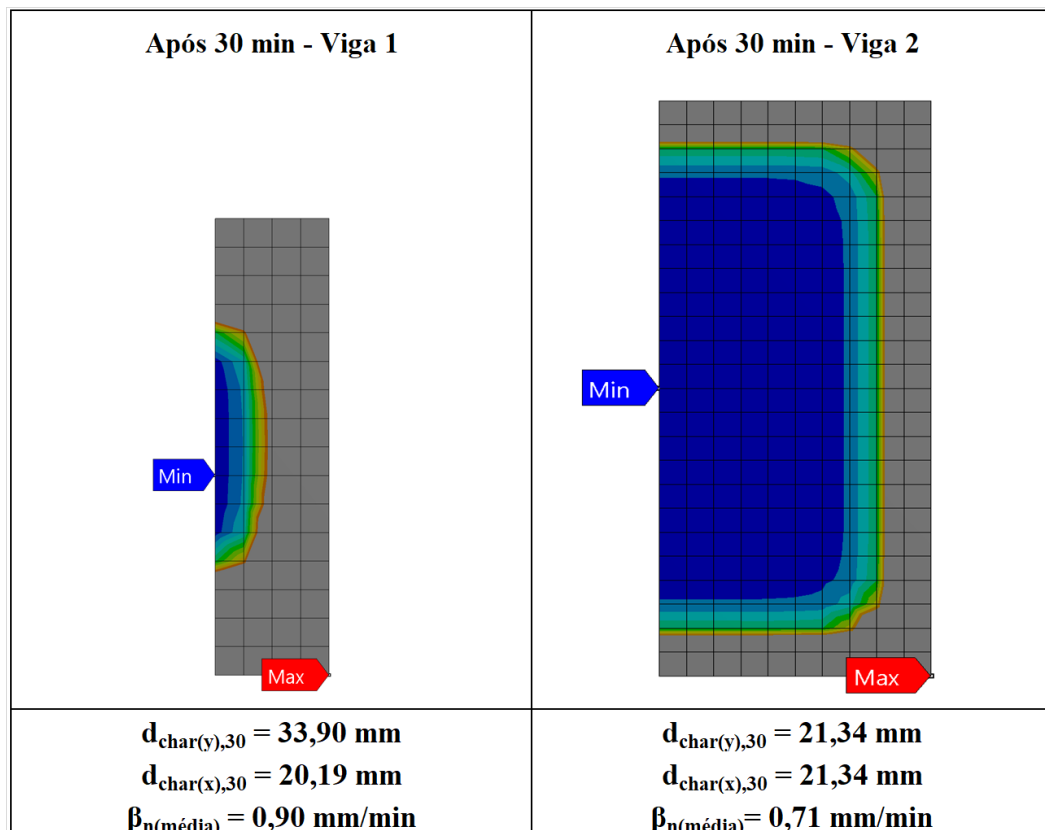


Figura 54 – Espessura carbonizada e taxa de carbonização.

Na Figura 54 as cores especificam os diversos intervalos de temperatura que cada região do elemento se encontra nos tempos selecionados. A cor azul representa temperaturas baixas, a cor laranja representa temperaturas próximas dos 300 [°C] e a cor cinza indica que a temperatura é maior ou igual a 300 [°C].

O arredondamento dos cantos da seção transversal das vigas, observados na Figura 54, é justificado pelo fato dos cantos estarem submetidos à transferência de calor em duas direções, ocorrendo mais rapidamente a carbonização nessas zonas.

Utilizando os pontos fornecidos nos gráficos da Figura 50, Figura 51, Figura 52 e Figura 53, foi possível por meio de interpolação linear determinar a espessura da camada carbonizada, tanto para altura quanto para largura da viga, para cada um dos tempos. Como indicado pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), a espessura carbonizada foi considerada como sendo a zona com temperaturas superiores a 300 [°C], representada na Figura 54 pela região em cinza, e por consequência a seção transversal residual é a região com temperaturas inferiores a 300 [°C].

A relação entre a espessura da camada carbonizada e seu instante de tempo correspondente fornece a taxa de carbonização. Essa grandeza é indispensável na análise da carbonização da madeira, sendo que a mesma representa a quantidade de madeira carbonizada, em milímetros, por unidade de tempo, em minutos.

Na tabela seguinte, estão representados os valores determinados numericamente da espessura carbonizada, a dimensão da seção residual e a taxa de carbonização, tanto para altura quanto para largura da seção transversal da viga para seu respectivo tempo.

Tabela 23 – Espessura carbonizada e taxa de carbonização numérica.

	Tempo [min]	Espessura Carbonizada		Seção residual		Taxa de carbonização	
		b	d	b <sub>fogo</sub>	d <sub>fogo</sub>	b	d
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/min]	[mm/min]
<b>Viga 1</b> b = 75 mm d = 150 mm L = 6000 mm	5	5,60	5,48	63,80	139,04	1,12	1,10
	10	6,86	6,85	61,28	136,30	0,69	0,69
	15	13,02	8,99	48,96	132,02	0,87	0,60
	20	16,96	14,96	41,08	120,08	0,85	0,75
	25	25,12	17,33	24,76	115,34	1,00	0,69
	30	33,90	20,19	7,20	109,62	1,13	0,67
<b>Viga 2</b> b = 250 mm d = 300 mm L = 6000 mm	10	8,95	8,95	232,10	282,10	0,90	0,90
	20	11,39	11,55	227,22	276,90	0,57	0,58
	30	21,34	21,34	207,32	257,32	0,71	0,71
	40	24,29	24,62	201,42	250,76	0,61	0,62
	50	33,46	34,78	183,08	230,44	0,67	0,70
	60	36,76	36,92	176,48	226,16	0,61	0,62
	70	45,47	44,97	159,06	210,06	0,65	0,64
	80	49,20	48,61	151,60	202,78	0,62	0,61

Percebemos através da Tabela 23 que quando a exposição ao fogo atua nas quatro faces do elemento estrutural retangular, a variação da espessura da camada carbonizada não é a mesma, variando de maneira diferente em função da condução de calor atuante na direção horizontal ou na vertical. Para a seção retangular, verifica-se uma camada de carbonização maior para a menor dimensão da seção transversal, como é visto na Figura 54. Neste caso, o efeito de arredondamento dos cantos da seção influencia muito no avanço da camada carbonizada.

No caso da Viga 2 que apresenta uma seção transversal de 250 [mm] de largura e 300 [mm] de altura, se aproximando de uma geometria quadrangular, a diferença da espessura carbonizada na direção horizontal e vertical é quase irrelevante, diferente da Viga 1 que dispõe de uma camada carbonizada na direção vertical mais significativa, devido a largura da viga ser metade da sua altura.

O Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), sugere que para madeira macia com densidade superior a 290 [kg/m<sup>3</sup>] a taxa de carbonização nominal ( $\beta_n$ ) seja igual a 0,8 [mm/min]. Os valores da taxa de carbonização numérica são comparados com o valor indicado pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), de acordo com a Tabela 24.

Tabela 24 – Comparação da taxa de carbonização numérica com o Eurocódigo 5, Parte 1-2.

	Tempo [min]	Taxa de carbonização	$\beta_n$ EN 1995 1-2 [mm/min]	Erro Relativo %
		Média [mm/min]		
<b>Viga 1</b>  b = 75 mm d = 150 mm L = 6000 mm	5	1,11	0,8	38,5
	10	0,69		14,3
	15	0,73		8,3
	20	0,80		0,3
	25	0,85		6,1
	30	0,90		12,7
<b>Viga 2</b>  b = 250 mm d = 300 mm L = 6000 mm	10	0,90	0,8	11,9
	20	0,57		28,3
	30	0,71		11,1
	40	0,61		23,6
	50	0,68		14,7
	60	0,61		23,3
	70	0,65		19,3
	80	0,61		23,6

De acordo com a Tabela 24, a taxa de carbonização média para Viga 1 é de 0,85 [mm/min] com um erro relativo de 6,1% em comparação com a taxa de carbonização proposta pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), enquanto para Viga 2 o valor médio foi de 0,67 [mm/min] com um erro de 16,3 %.

Avaliando a Tabela 24 é possível observar que a taxa de carbonização é maior inicialmente, estabilizando-se com o tempo, em razão da camada isolante de carvão formada durante o processo de degradação térmico da madeira. Também verifica-se que a dimensão da seção transversal da viga de madeira interfere na taxa de carbonização, ou seja, em seções transversais menores a taxa de carbonização é maior, pois a viga menor possui maior superfície específica do que a viga grande, essa situação também é averiguada no estudo de Barreira [15].

No trabalho de Barreira [15] também pode-se observar a influência da geometria da viga sobre a taxa de carbonização, assim como a massa específica das espécies de madeira. A Tabela 25 resume os valores determinados numericamente para a taxa de carbonização das espécies em estudo, considerando uma seção retangular e outra quadrada para cada

espécie. A análise foi realizada para 60 [min] de exposição ao fogo, nas quatro faces da seção transversal da madeira.

Tabela 25 – Taxa de carbonização numérica para quatro faces de exposição, [15].

Espécie	Seção [mm]	Taxa de carbonização			$\beta_n$ EN 1995 1-2 [mm/min]
		Vertical [mm/min]	Horizontal [mm/min]	Média [mm/min]	
Pinheiro	200x400	0,79	0,65	0,72	0,8
	400x400	0,67	0,67	0,67	
Cedro vermelho	200x400	1,004	0,91	0,96	0,8
	400x400	0,89	0,89	0,89	

Barreira [15] demonstra em seu trabalho que, para seção retangular a dimensão maior da seção apresenta uma taxa de carbonização com tendência linear próximos de 0,9 [mm/min], enquanto o lado menor exibe um crescimento da taxa de carbonização não linear. Também é possível notar que o cedro vermelho apresenta uma taxa de carbonização maior, isso ocorre devido a massa volúmica desta espécie ser menor, influenciando na velocidade de carbonização.

Com base nos valores observados na Tabela 24, conclui-se que as taxas de carbonização para Viga 1 de uma forma geral são mais próximas do recomendado pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), enquanto os valores da velocidade de carbonização para Viga 2 de maneira geral são menores em comparação à taxa de carbonização nominal, ou seja, esta viga possui uma taxa de carbonização mais lenta e isso significa que na simulação termomecânica ela resistirá a um tempo maior de exposição ao fogo.

A diferença entre os erros relativos também pode estar relacionada com a malha utilizada em cada modelo numérico.

### 5.3 ANÁLISE TERMOMECÂNICA

Nesta parte do trabalho, investigou-se o comportamento dos elementos estruturais de madeira expostos ao fogo e simultaneamente a aplicação de uma carga constante representativa de um determinado grau de utilização no meio do vão livre da viga, com o intuito de determinar o tempo de resistência ao fogo.

Para isso, foi executada uma simulação termomecânica não-linear em regime transiente para dois modelos de vigas caracterizados com propriedades térmicas e mecânicas da Madeira Abeto de Douglas, utilizando os fatores de reduções propostos pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004). Inicialmente foi feita uma análise térmica transiente considerando exposição ao fogo nas superfícies inferior, superior e laterais da viga, onde se obteve a distribuição e evolução da temperatura no interior da seção com o passar do tempo, e em seguida, a simulação estrutural foi efetuada, tendo como dados de entrada os resultados do modelo térmico. Os resultados da simulação térmica foram exibidos no subcapítulo anterior.

Na simulação estrutural foi inserida uma carga constante representativa de um determinado grau de utilização no meio do vão livre da viga. A Tabela 26 expõe as cargas utilizadas para seus respectivos graus de utilização, que foram determinadas na simulação estrutural em regime estacionário, citado na seção 5.1 desta tese, e o tempo de resistência ao fogo obtido numericamente em segundos completos e minutos completos.

Tabela 26 – Tempo de resistência ao fogo numérico para seus respectivos graus de utilização.

	Grau de utilização	Força [N]	Tempo de resistência ao fogo	
	%		[s]	[min]
<b>Viga 1</b>  b = 75 mm d = 150 mm L = 6000 mm	20	1629,2	1354	22
	30	2443,8	1111	18
	40	3258,4	890	14
	50	4073,0	742	12
	60	4887,6	625	10
	70	5702,2	474	7
	80	6516,8	302	5
	90	7331,4	217	3
<b>Viga 2</b>  b = 250 mm d = 300 mm L = 6000 mm	20	24243,3	4952	82
	30	36365,0	3963	66
	40	48486,7	3246	54
	50	60608,3	2519	41
	60	72730,0	2085	34
	70	84851,7	1496	24
	80	96973,3	1195	19
	90	109095,0	861	14

O cálculo simplificado do tempo de resistência ao fogo seguiu os procedimentos de projeto para resistência mecânica indicado pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004) por isso foi utilizado o método da seção transversal reduzida considerando a mesma espessura carbonizada nas direções do eixo *X* e *Y* e a mesma taxa de carbonização para as duas vigas. O procedimento de cálculo é descrito na seção 3.3 deste trabalho, enquanto as tabelas de cálculo podem ser vistas na Tabela 31 e Tabela 32 do Anexo 2. A tabela a seguir, exhibe a comparação dos resultados numéricos e do método simplificado de cálculo para o tempo de resistência ao fogo em minutos completos.

Tabela 27 – Comparação dos resultados do tempo de resistência ao fogo numérico com o Eurocódigo 5, Parte 1-2

	Grau de utilização %	Tempo de resistência ao fogo		Erro Relativo %
		Ansys [min]	EN 1995 1-2 [min]	
<b>Viga 1</b>	20	22	19	15,8
	30	18	15	20,0
b = 75 mm	40	14	12	16,7
d = 150 mm	50	12	9	33,3
L = 6000 mm	60	10	7	42,9
	70	7	5	40,0
	80	5	3	66,7
	90	3	1	200,0
<b>Viga 2</b>	20	82	64	28,1
	30	66	49	34,7
b = 250 mm	40	54	37	45,9
d = 300 mm	50	41	27	51,9
L = 6000 mm	60	34	19	78,9
	70	24	13	84,6
	80	19	8	137,5
	90	14	4	250,0

Com base na tabela anterior, foram elaborados dois gráficos, sendo um para o modelo de Viga 1 e outro para o modelo de Viga 2.

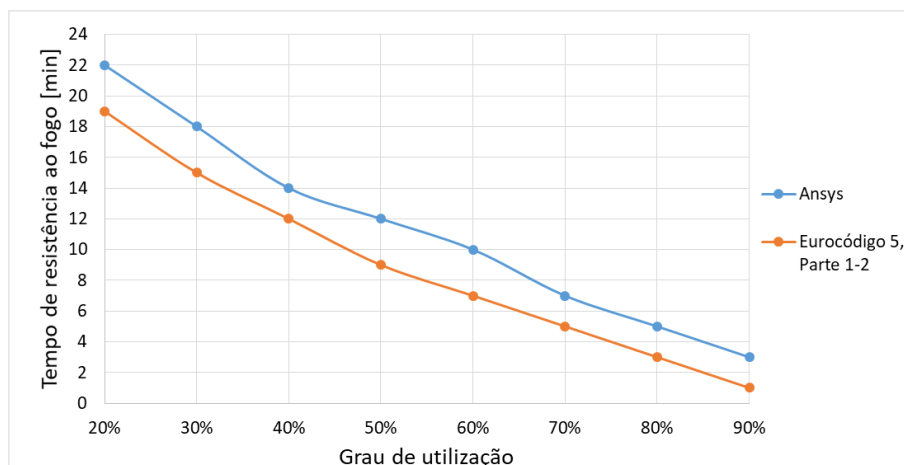


Figura 55 – Gráfico de comparação dos resultados do tempo de resistência ao fogo numérico com o Eurocódigo 5, Parte 1-2, Viga 1.

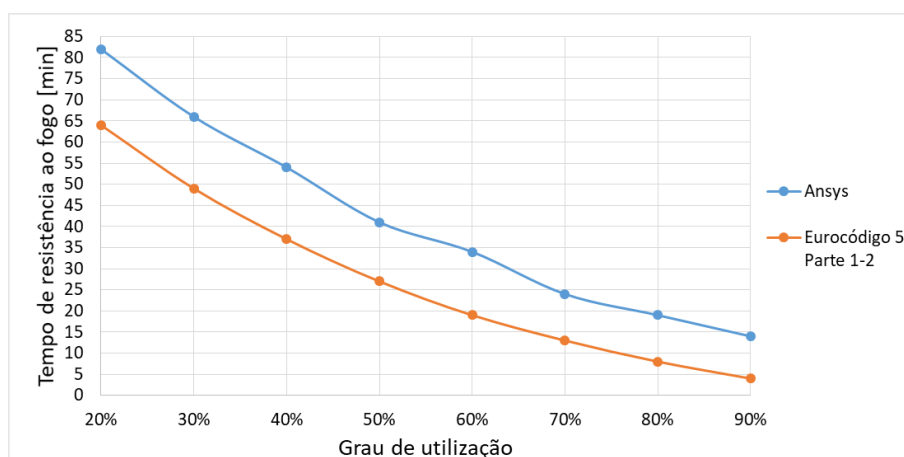


Figura 56 – Gráfico de comparação dos resultados do tempo de resistência ao fogo numérico com o Eurocódigo 5, Parte 1-2, Viga 2.

A análise dos gráficos da Figura 55 e Figura 56, permite observar que os valores numéricos são maiores que os resultados determinados pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004). Um fator que pode ter influenciado os resultados são as considerações feitas no método de cálculo simplificado, onde se admitiu a mesma espessura de carbonização nas direções do eixo  $X$  e  $Y$  e a mesma taxa de carbonização para os dois modelos de viga, porém o programa não faz essa simplificação, como mostrado no subcapítulo anterior.

Essa diferença também pode ser justificada pelo método da seção transversal reduzida, que supõe que o material próximo à linha do carvão, na camada de espessura  $k_0 d_0$ , tem resistência e rigidez igual a zero, enquanto as propriedades de resistência e rigidez da seção transversal restante são consideradas inalteradas. Logo, para o método de cálculo

simplificado a seção residual considerada é menor que na simulação numérica, uma vez que o Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004) considera a camada de carbonização efetiva como sendo a região da camada de carbonização e da camada de pirólise, enquanto o cálculo numérico considera como espessura carbonizada apenas a região que atingiu temperaturas superiores a 300 [°C].

Analisando a Tabela 27 podemos verificar que os valores do erro relativo para a Viga 2 são maiores, devido as considerações citadas anteriormente, mas também visto que a taxa média de carbonização determinada numericamente para esta viga é de 0,67 [mm/min], e a taxa de carbonização utilizada no método de cálculo simplificado foi de 0,8 [mm/min], o que permitiu que a mesma suportasse um tempo de resistência ao fogo maior.

Observando os resultados apresentados, podemos perceber que o método de cálculo simplificado é um modelo aproximado, isto mostra que este método é seguro, pois determina um tempo de resistência ao fogo menor do que realmente a viga consegue aguentar, ou seja, ele utiliza uma margem de segurança.

A Figura 57 e Figura 58 retratam a evolução temporal do deslocamento no meio do vão durante as análises, onde se considerou a aplicação de uma carga constante representativa de um determinado grau de utilização no meio do vão, simultaneamente com o avanço da frente de carbonização para o interior da seção transversal.

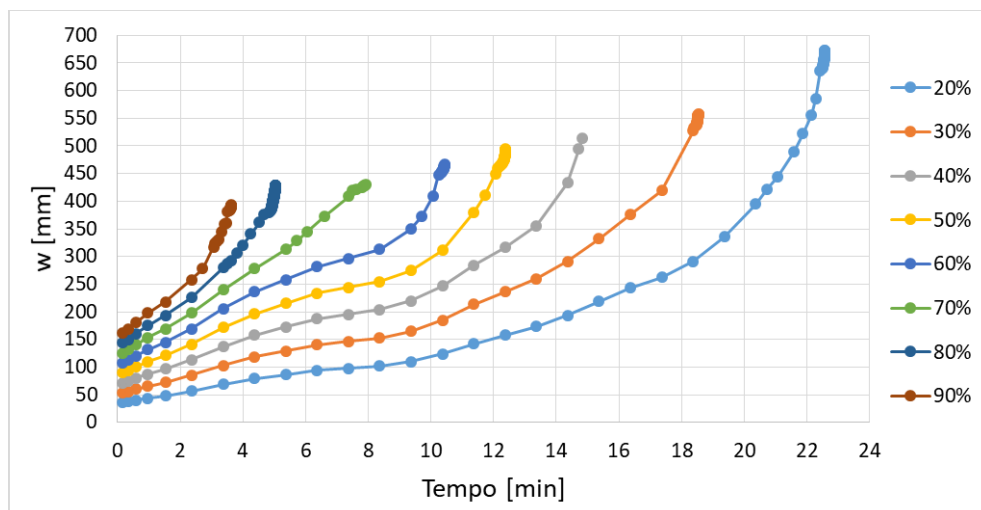


Figura 57 – Evolução temporal do deslocamento vertical no meio vão, Viga 1.

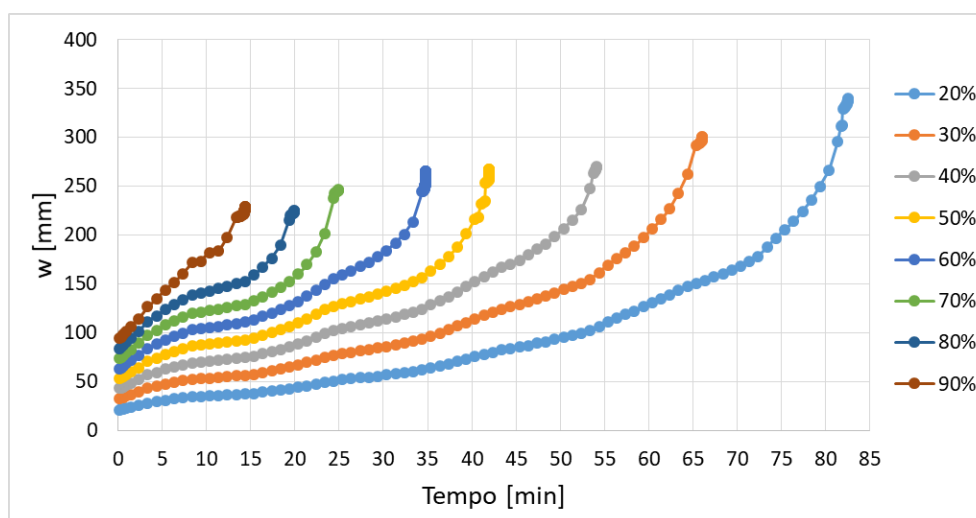


Figura 58 – Evolução temporal do deslocamento vertical no meio vão, Viga 2.

O comportamento apresentado nos gráficos anteriores é coerente com o esperado, conforme o tempo aumenta o deslocamento vertical no meio do vão também vai aumentando, à medida que o tempo vai se aproximando do tempo de resistência ao fogo a viga deixa de conseguir suportar a carga e exibe um aumento significativo no deslocamento, que é detetado pela formação das assíntotas de cada curva.

Podemos verificar também que para o tempo igual a zero o deslocamento não se inicia em zero, isso porque para o tempo igual a zero já existe uma carga aplicada. Logo, para o instante de tempo igual a zero o deslocamento inicial ocorre devido a carga mecânica. Por isso quanto maior o grau de utilização maior o deslocamento inicial, e depois o deslocamento passa aumentar devido a ação térmica.

A Figura 59 e Figura 60 retratam a evolução temporal da tensão normal instalada na viga durante as análises. Considerando a aplicação de uma carga constante representativa de um determinado grau de utilização no meio do vão, simultaneamente com o avanço da frente de carbonização para o interior da seção transversal.

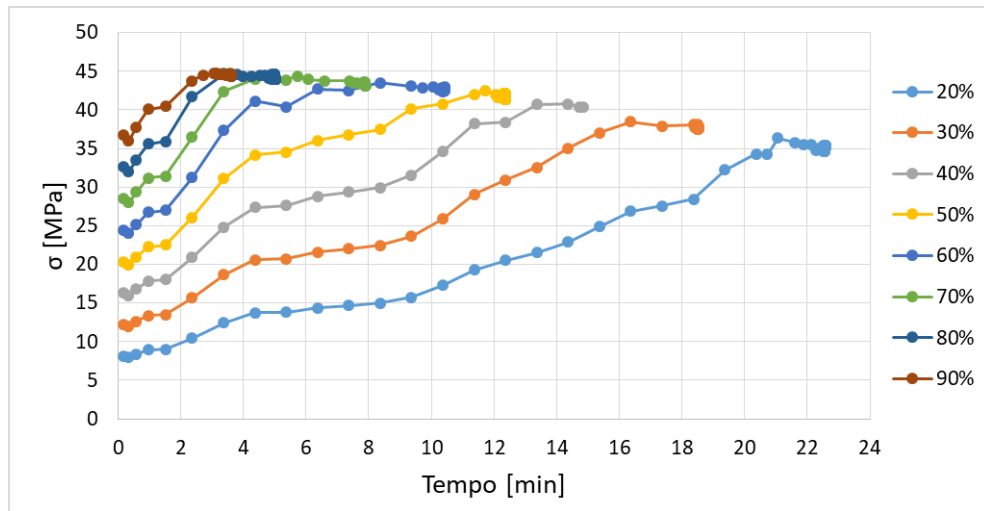


Figura 59 – Evolução temporal da tensão normal instalada na Viga 1.

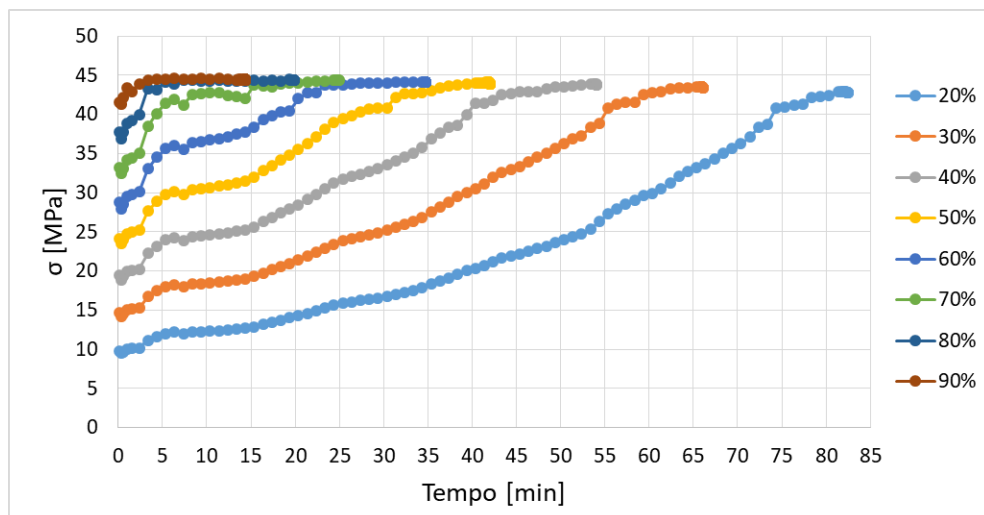


Figura 60 – Evolução temporal da tensão normal instalada na Viga 2.

Os resultados vistos nos gráficos anteriores também estão adequados. Conseguimos analisar que para o tempo igual a zero a tensão instalada não se inicia em zero, isso porque para o tempo igual a zero já existe uma carga aplicada. Logo, para o instante de tempo igual a zero a tensão instalada ocorre devido a carga mecânica aplicada e depois verifica-se o aumento da espessura carbonizada com o aumento da exposição ao fogo, acarretando a diminuição da seção resistente e aumentando o nível de tensões instaladas para uma carga constante.

Do Anexo 9 ao Anexo 24, encontram-se os resultados obtidos para o deslocamento total, deslocamento direcional no eixo  $Y$  e tensão normal no eixo  $Z$ , para o último instante de tempo de cada simulação.

## Capítulo 6: Conclusões e trabalhos futuros

---

### 6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho consistiu na caracterização do comportamento térmico e mecânico de vigas de Madeira Abeto de Douglas, por meio de simulações numéricas. Apresentam-se neste capítulo os principais resultados e conclusões obtidos com base nos resultados numéricos, nos resultados do método de cálculo simplificado, no estudo de gráficos e figuras expostos nos capítulos anteriores, assim como sugestões de pesquisas futuras com o objetivo de futuros desenvolvimentos nesta área de investigação.

Foi imprescindível o uso do Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), para caracterizar as mudanças graduais das propriedades mecânicas e térmicas da madeira exposta ao fogo, utilizando o método de cálculo avançado e também para a determinação de uma metodologia de cálculos analíticos empregando o método de cálculo simplificado.

O comportamento térmico e mecânico de elementos estruturais de Madeira Abeto de Douglas foi caracterizado por intermédio de simulações estáticas estruturais, simulações térmicas transiente e simulações termomecânicas em regime transiente, para dois modelos de vigas propostos. O modelo de Viga 1 com dimensões de 75 [mm] de largura por 150 [mm] de altura e 6000 [mm] de comprimento e o modelo de Viga 2 com 250 [mm] de largura, 300 [mm] de altura e 6000 [mm] de comprimento.

Na análise mecânica determinou-se a carga de colapso para as duas vigas simplesmente apoiada em temperatura ambiente constante de 20 [°C]. As soluções obtidas nas simulações numéricas foram fiáveis, o que significa que a diferença percentual determinada pelo erro relativo entre as forças calculadas com a resistência característica e as forças numéricas foram baixas. Desta forma, o maior erro encontrado foi de 9,0% para a

Viga 2, que possui a maior seção transversal e por isso sofreu maior influência da tensão de corte nos cálculos numéricos.

No caso da análise térmica obteve-se o principal parâmetro para caracterizar o comportamento da madeira no decurso da sua exposição ao fogo, a taxa de carbonização. O Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), sugere que para madeira macia com densidade superior a 290 [kg/m<sup>3</sup>] a taxa de carbonização nominal ( $\beta_n$ ) seja igual a 0,8 [mm/min]. Nas simulações para Viga 1, a taxa de carbonização média foi de 0,85 [mm/min] apontando um erro relativo de 6,1%, já para as simulações da Viga 2, a taxa média de carbonização foi mais lenta, sendo igual a 0,67 [mm/min] com um erro relativo de 16,3%. Novamente o motivo do erro relativo ser maior para a Viga 2 tem a ver com suas dimensões, uma vez que para seções maiores a taxa de carbonização é menor.

Para a análise termomecânica em regime transiente obteve-se o tempo de resistência ao fogo para uma carga constante representativa de um determinado grau de utilização no meio do vão livre da viga de madeira, em situação de incêndio, para os dois modelos de vigas. Neste caso, para ambos modelos de vigas os erros relativos foram bastante discrepantes. Os resultados numéricos foram maiores que os resultados determinados pelo método de cálculo. Essa diferença corresponde as considerações feitas no cálculo simplificado, onde se admitiu a mesma espessura de carbonização nas direções do eixo *X* e *Y* e a mesma taxa de carbonização para os dois modelos de viga, porém o programa não faz essas simplificações. A causa do erro relativo ser maior na Viga 2 está relacionada com a taxa de carbonização, que no método simplificado de cálculo, foi utilizado 0,8 [mm/min], mas na simulação foi usado uma taxa média de carbonização de 0,67 [mm/min], fazendo com que a viga resistisse a um tempo maior de resistência ao fogo.

De forma geral, podemos concluir que o método de cálculo simplificado proposto pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), é um método seguro, que está sempre a favor da segurança.

## **6.2 TRABALHOS FUTUROS**

Esta dissertação permitiu obter conclusões significativas com relação ao comportamento térmico e mecânico para vigas de Madeira Abeto de Douglas. Com o intuito de dar continuidade a este trabalho e fornecer novos conhecimentos nesta área de estudo, evidenciam-se situações diferentes que podem ser investigadas.

Propõem-se a realização do mesmo estudo apresentado nesta tese, porém de forma experimental, com a finalidade de comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais. Os ensaios deverão ser realizados de acordo com o Eurocódigo 5, Parte 1-2 (2004), num forno de ensaio de resistência ao fogo.

Realizar o mesmo estudo exposto neste trabalho com adição de diferentes materiais isolantes, como por exemplo fibras de vidro e lã de rocha, com o objetivo de avaliar a resistência ao fogo em vigas de madeira com proteção.

Efetuar o mesmo estudo apresentado utilizando outras espécies de madeiras, como por exemplo o pinho larício e pinho marítimo, haja vista que são espécies de madeiras mais comuns na Europa. Com o intuito de realizar a caracterização da resistência ao fogo para diferentes espécies de madeira.

## Referências

---

- [1] G. C. A. Martins, “Análise numérica e experimental de vigas de madeira laminada colada em situação de incêndio,” Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2016.
- [2] J. E. Winandy, “Wood Properties, USDA-Forest Service, Forest Products Laboratory, Wisconsin,” *Encycl. Agric. Sci.*, vol. 4, no. October, pp. 549–561, 1994.
- [3] G. N. de S. Costa, “Análise térmica de lajes em madeira com e sem proteção,” Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, 2017.
- [4] P. Palma, “Segurança contra incêndio em habitações unifamiliares de madeira,” *Rev. Construção Mag. n° 40*, pp. 48–49, 2010.
- [5] E. M. Pinto, “Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal a Grã para o *Eucalyptus Citriodora* e *Eucalyptus Grandis*,” Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2005.
- [6] M. Fragiaco, A. Menis, P. J. Moss, I. Clemente, and A. H. Buchanan, “Numerical and experimental thermal-structural behaviour of laminated veneer lumber (LVL) exposed to fire,” *11th World Conf. Timber Eng. 2010, WCTE 2010*, vol. 4, no. January 2010, pp. 3047–3056, 2010.
- [7] S. A. Lineham, D. Thomson, A. I. Bartlett, L. A. Bisby, and R. M. Hadden, “Structural response of fire-exposed cross-laminated timber beams under sustained loads,” *Fire Saf. J.*, vol. 85, pp. 23–34, 2016.
- [8] P. J. V. Gouveia, “Resistência ao fogo de estruturas em madeira com e sem proteção,” Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, 2018.
- [9] L. M. V. Lopes, “Caracterização das propriedades físicas mecânicas da Madeira de

- Abeto de Douglas,” Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, 2019.
- [10] “EN 408 - Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties.,” *Eur. Comm. Stand.*, no. August, p. 35, 2004.
- [11] P. C. B. Borges, “Caraterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira de carvalho e de castanho do nordeste transmontano,” Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, 2013.
- [12] “Abeto-de-Douglas,” *the forest time*. [Online]. Available: <https://www.the-forest-time.com/pt/guia-de-espices/abeto-de-douglas-5ac5d7c02>. [Accessed: 13-Mar-2020].
- [13] M. J. M. Figueroa and P. D. Moraes, “Comportamento da madeira a temperaturas elevadas,” *Ambient. Construído*, vol. 9, no. 4, pp. 157–174, 2009.
- [14] J. Coutinho, *Materiais de Construção I: Madeiras*. 1999.
- [15] L. M. da S. Barreira, “Estudo numérico do comportamento térmico e mecânico de estruturas em madeira,” Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, 2008.
- [16] R. M. L. Sousa, “Avaliação experimental da estabilidade dimensional de elementos em pinho bravo e madeira tratada termicamente,” Tese de Mestrado, Escola de Engenharia. Universidade do Minho, 2012.
- [17] E. M. Pinto and C. C. Junior, “Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira Eucalyptus de uso estrutural exposta ao fogo,” *Rev. Minerva*, vol. 3, no. 2, pp. 131–140, 2006.
- [18] R. H. Falk, *Wood handbook: Wood as an engineering material*, no. 10. Forest Products Laboratory: Madison, 2010.
- [19] “EN1995-1-2: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: Structural fire design,” *Brussels*, 2004.
- [20] T. F. R. M. Martins, “Dimensionamento de estruturas em madeira - Coberturas e pavimentos,” Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa, 2010.
- [21] J. A. B. Júnior, “Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de

- madeira de edifícios antigos,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- [22] M. A. Ritter, “Timber bridges: design, construction, inspection and maintenance,” *Washingt. Dep. Agric. For. Serv.*, p. 907, 1990.
- [23] J. C. Moreschi, “Propriedades da madeira,” Universidade Federal do Paraná, 2005.
- [24] S. S. C. Pereira, “Avaliação experimental das principais propriedades mecânicas de peças estruturais em madeira antiga,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [25] “EN1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings.,” vol. 1, 2004.
- [26] E. A. Nicolas, “Estudo de critérios de resistência de materiais anisotrópicos aplicados à madeira,” Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, 2006.
- [27] C. A. Diniz, “Otimização estrutural de elementos em compósitos usando redes neurais artificiais,” Tese de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2017.
- [28] D. P. Gagliardo, J. C. Gagliardo, and N. T. Mascia, “Comparação dos critérios de Rankine e de Tsai-Wu para uma viga de madeira laminada colada,” *Xiii Ebramem*, no. July 2012, 2012.
- [29] E. A. Nicolas, N. T. Mascia, and R. Todeschini, “Comparação entre o critério de resistência de Tsai-Wu e a fórmula de Hankinson na tração da madeira,” *Madeira arquitetura e Eng.*, p. 17, 2008.
- [30] G. P. Souza, “Avaliação de critérios de falhas de compósitos poliméricos reforçados aplicados a vigas sob carregamento de flexão,” Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2003.
- [31] Ansys Help, “4.4. Rate-independent plasticity.” .
- [32] K. W. Ragland, D. J. Aerts, and A. J. Baker, “Properties of wood for combustion analysis,” *Bioresour. Technol.*, vol. 37, no. 2, pp. 161–168, 1991.
- [33] A. Costa, *Coletâneas de anatomia da madeira*, UDESC: Joinville, 2001.
- [34] M. Tabaddor, P. D. Gandhi, and R. Backstrom, “Thermal and Mechanical Finite Element Modeling of WoodFloor Assemblies Subjected to Furnace Exposure,”

- Underwrit. Lab. Stand. Saf.*, pp. 1–115, 2008.
- [35] F. A. L. de Almeida, “A madeira como material estrutural – Projeto da estrutura da cobertura de um edifício,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [36] S. I. S. Franco, “Proposta de atribuição de propriedades mecânicas a elementos estruturais em madeira por inspeção visual In Situ,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [37] C. E. B. Foelkel, M. A. M. Brasil, and L. E. G. Barrichelo, “Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas,” *Ipef*, vol. 2/3, pp. 65–74, 1971.
- [38] N. B. Logsdon, “Estabilidade dimensional: estimativas a partir da densidade básica,” Madeira: arquitetura e engenharia, 2003.
- [39] F. P. Incropera, *Fundamentos de transferência de calor e de massa*, 6th ed. LTC: Rio de Janeiro, 2008.
- [40] J. P. Holman, *Heat transfer*. McGraw-Hill: Nova York, 1997.
- [41] T. B. de Oliveira, “Caracterização térmica de materiais de proteção ao fogo,” Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, 2018.
- [42] “EN1991-1-2. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actionsActions on structures exposed to fire.,” *Brussels*, 2002.
- [43] M. N. Özisik, *Transferência de calor - Um texto básico*, 8ª. Editora Guanabara Koogan S.A: Rio de Janeiro, 1990.
- [44] A. M. Guerra, J. A. Coelho, and R. E. Leitão, *Fenomenologia da combustão e extintores*, vol. VII. Escola Nacional de Bombeiros: Quinta do Anjinho, 2006.
- [45] E. M. Pinto, “Proteção contra incêndio para habitações em madeira,” Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2001.
- [46] R. M. Rowell and J. E. Winandy, *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. CRC Press: Boca Raton, 2005.
- [47] F. L. Browne, “Theories of the combustion of wood and its control,” USDA Forest Products Laboratory, Madison, W, 1958.

- [48] M. J. Manríquez, “Fatores de redução das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura,” Tese de Doutorado, Escola de Engenharia. Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
- [49] *Technical Report 10. TR10: Calculating the fire resistance of exposed wood members.* American Wood Council: Leesburg, 2003.
- [50] P. B. Cachim and J.-M. Fransseen, “Comparison between the charring rate model and the conductive model of Eurocode 5,” *Fire Mater.*, vol. 33, no. August 2008, pp. 129–143, 2009.
- [51] E. Mikkola, “Charring Of Wood Based Materials,” *Fire Saf. Sci.*, vol. 3, pp. 547–556, 1991.
- [52] E. L. Schaffer, *Charring Rate Of Selected Woods - Transverse To Grain*, no. April. 1967.
- [53] T. T. Lie, “A Method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns,” *Can. J. Civ. Eng.*, pp. 161–169, 1977.
- [54] T. Domański and K. Kmiecik, “Load-bearing capacity of the steel-to-timber connections in fire temperature,” *MATEC Web Conf.*, vol. 262, pp. 1–7, 2019.
- [55] “Ansys Mechanical APDL Element Reference,” no. November. pp. 1–1448, 2013.
- [56] F. F. Ribeiro, “Numerical simulation of composite slabs with steel deck under fire conditions,” Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, 2019.

## Anexos

### ANEXO 1 – Resultados do método de cálculo simplificado para a carga e grau de utilização

Tabela 28 – Determinação do grau de utilização com a resistência de projeto ao fogo para Viga 1 (75x150x6000 [mm]).

Grau de utilização %	Método da seção reduzida					$W_{fi,t=0}$ [mm <sup>3</sup> ]	$M_{Rd,fi,t=0}$ [kN.m]	$M_{d,fi}$ [kN.m]	$F_{d,fi}$ [N]
	$K_{mod,fi}$	$K_{fi}$	$f_k$ [MPa]	$\gamma M_{,fi}$	$f_{d,fi,t=0}$ [MPa]				
20	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	281250	15,64	3,13	2085,47
30	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	281250	15,64	4,69	3128,20
40	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	281250	15,64	6,26	4170,94
50	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	281250	15,64	7,82	5213,67
60	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	281250	15,64	9,38	6256,41
70	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	281250	15,64	10,95	7299,14
80	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	281250	15,64	12,51	8341,88
90	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	281250	15,64	14,08	9384,61
100	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	281250	15,64	15,64	10427,34

Tabela 29 – Determinação do grau de utilização com a resistência de projeto ao fogo para Viga 2 (250x300x6000 [mm]).

Grau de utilização %	Método da seção reduzida					$W_{fi,t=0}$ [mm <sup>3</sup> ]	$M_{Rd,fi,t=0}$ [kN.m]	$M_{d,fi}$ [kN.m]	$F_{d,fi}$ [N]
	$K_{mod,fi}$	$K_{fi}$	$f_k$ [MPa]	$\gamma M_{,fi}$	$f_{d,fi,t=0}$ [MPa]				
20	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	3750000	208,55	41,71	27806,25
30	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	3750000	208,55	62,56	41709,38
40	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	3750000	208,55	83,42	55612,50
50	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	3750000	208,55	104,27	69515,63
60	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	3750000	208,55	125,13	83418,75
70	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	3750000	208,55	145,98	97321,88
80	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	3750000	208,55	166,84	111225,00
90	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	3750000	208,55	187,69	125128,13
100	1,00	1,25	44,49	1,00	55,6125	3750000	208,55	208,55	139031,25

Tabela 30 – Determinação do grau de utilização com a resistência característica.

	Grau de utilização %	$f_m$	$W_{el}$	$M_{Rd}$	$M_d$	$F_d$
		[MPa]	[mm <sup>3</sup> ]	[kN.m]	[kN.m]	[N]
<b>Viga 1</b>  b = 75 mm d = 150 mm L = 6000 mm	20	44,49	281250	12,51	2,50	1668,38
	30	44,49	281250	12,51	3,75	2502,56
	40	44,49	281250	12,51	5,01	3336,75
	50	44,49	281250	12,51	6,26	4170,94
	60	44,49	281250	12,51	7,51	5005,13
	70	44,49	281250	12,51	8,76	5839,31
	80	44,49	281250	12,51	10,01	6673,50
	90	44,49	281250	12,51	11,26	7507,69
	100	44,49	281250	12,51	12,51	8341,88
<b>Viga 2</b>  b = 250 mm d = 300 mm L = 6000 mm	20	44,49	3750000	166,84	33,37	22245,00
	30	44,49	3750000	166,84	50,05	33367,50
	40	44,49	3750000	166,84	66,74	44490,00
	50	44,49	3750000	166,84	83,42	55612,50
	60	44,49	3750000	166,84	100,10	66735,00
	70	44,49	3750000	166,84	116,79	77857,50
	80	44,49	3750000	166,84	133,47	88980,00
	90	44,49	3750000	166,84	150,15	100102,50
	100	44,49	3750000	166,84	166,84	111225,00

**ANEXO 2 – Resultados do método de cálculo simplificado para o tempo de resistência ao fogo**

Tabela 31 – Determinação do tempo de resistência ao fogo para Viga 1 (75x150x6000 [mm]).

Grau de utilização %	$f_m$ [MPa]	Md [N.mm]	$W_{fi}$ [mm <sup>3</sup> ]	Função	Tempo de resistência ao fogo	
				EN 1995 1-2	[min]	[s]
20	44,49	2502562,5	56250	$W_{fi}=((-2,3*t+75)*(-2,3*t+150)^2)/6$	19,4	1163,8
30	44,49	3753843,8	84375	$W_{fi}=((-2,3*t+75)*(-2,3*t+150)^2)/6$	15,7	939,8
40	44,49	5005125,0	112500	$W_{fi}=((-2,3*t+75)*(-2,3*t+150)^2)/6$	12,6	755,0
50	44,49	6256406,3	140625	$W_{fi}=((-2,3*t+75)*(-2,3*t+150)^2)/6$	9,9	595,5
60	44,49	7507687,5	168750	$W_{fi}=((-2,3*t+75)*(-2,3*t+150)^2)/6$	7,6	454,1
70	44,49	8758968,8	196875	$W_{fi}=((-2,3*t+75)*(-2,3*t+150)^2)/6$	5,4	326,4
80	44,49	10010250,0	225000	$W_{fi}=((-2,3*t+75)*(-2,3*t+150)^2)/6$	3,5	209,4
90	44,49	11261531,3	253125	$W_{fi}=((-2,3*t+75)*(-2,3*t+150)^2)/6$	1,7	101,1

Tabela 32 – Determinação do tempo de resistência ao fogo para Viga 2 (250x300x6000 [mm]).

Grau de utilização %	$f_m$ [Mpa]	Md [N.mm]	$W_{fi}$ [mm <sup>3</sup> ]	Função	Tempo de resistência ao fogo	
				EN 1995 1-2	[min]	[s]
20	44,49	33367500,0	750000	$W_{fi}=((-0,8*t+118)*(-1,6*t+286)^2)/3$	64,0	3841,6
30	44,49	50051250,0	1125000	$W_{fi}=((-0,8*t+118)*(-1,6*t+286)^2)/3$	49,2	2954,6
40	44,49	66735000,0	1500000	$W_{fi}=((-0,8*t+118)*(-1,6*t+286)^2)/3$	37,4	2247,0
50	44,49	83418750,0	1875000	$W_{fi}=((-0,8*t+118)*(-1,6*t+286)^2)/3$	27,5	1648,6
60	44,49	100102500,0	2250000	$W_{fi}=((-2,3*t+250)*(-2,3*t+300)^2)/6$	19,1	1147,9
70	44,49	116786250,0	2625000	$W_{fi}=((-2,3*t+250)*(-2,3*t+300)^2)/6$	13,7	822,0
80	44,49	133470000,0	3000000	$W_{fi}=((-2,3*t+250)*(-2,3*t+300)^2)/6$	8,8	525,8
90	44,49	150153750,0	3375000	$W_{fi}=((-2,3*t+250)*(-2,3*t+300)^2)/6$	4,2	253,2

### ANEXO 3 – Resultados da simulação mecânica de calibração e validação do modelo numérico, para o último instante de tempo.

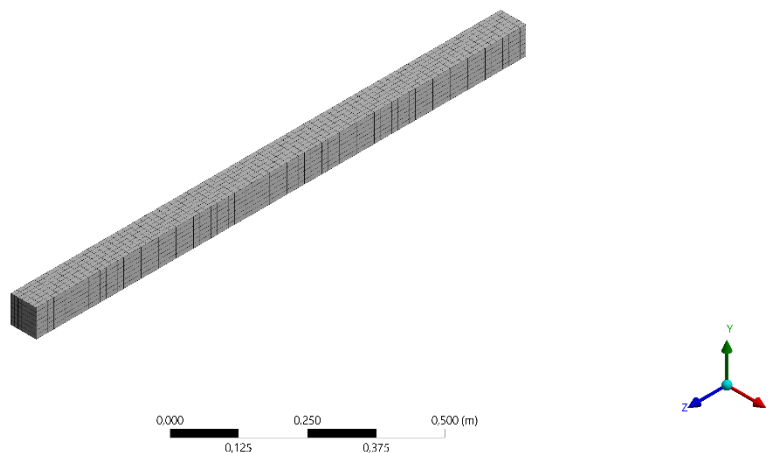


Figura 61 – Malha aplicada na viga.

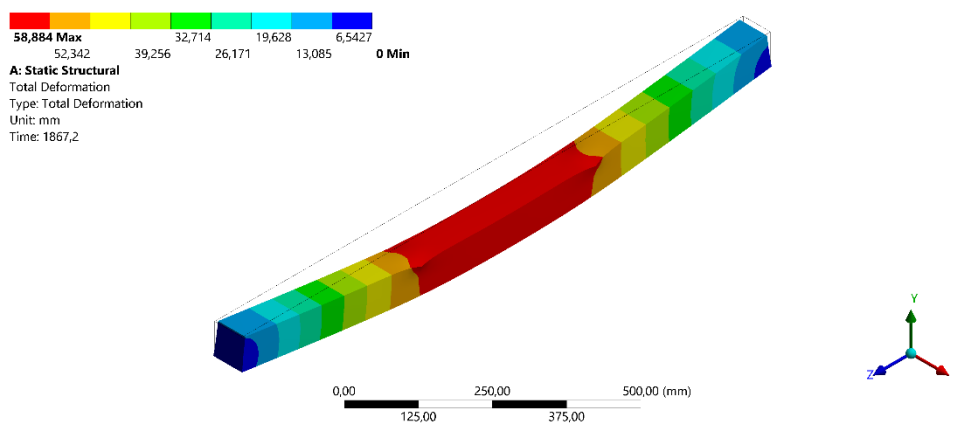


Figura 62 – Deslocamento total da viga.

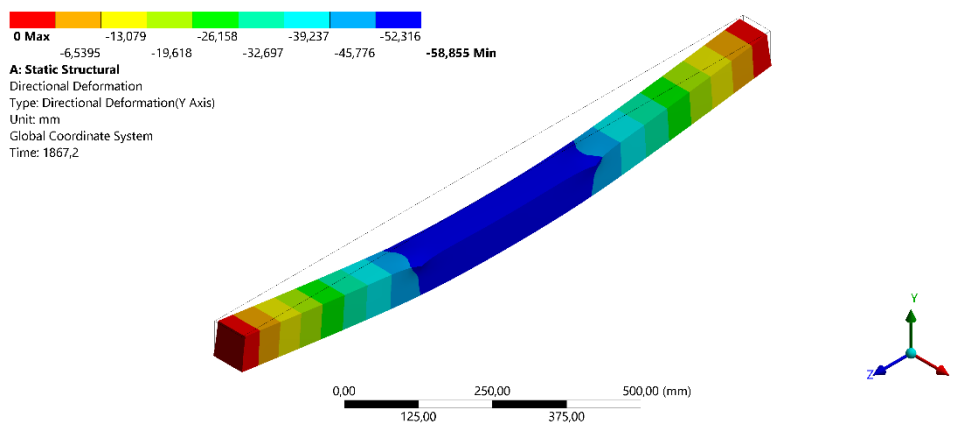


Figura 63 – Deslocamento direcional no eixo Y da viga.

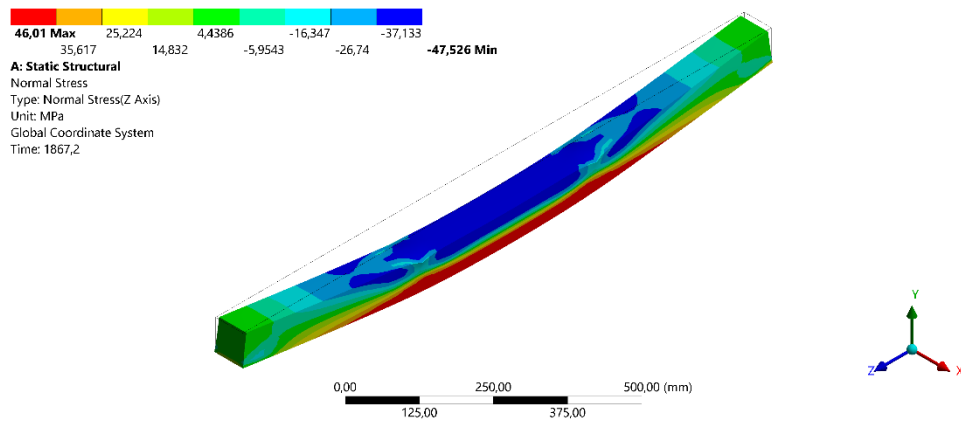


Figura 64 – Tensão normal distribuída por toda a viga.

#### ANEXO 4 – Resultados da simulação mecânica

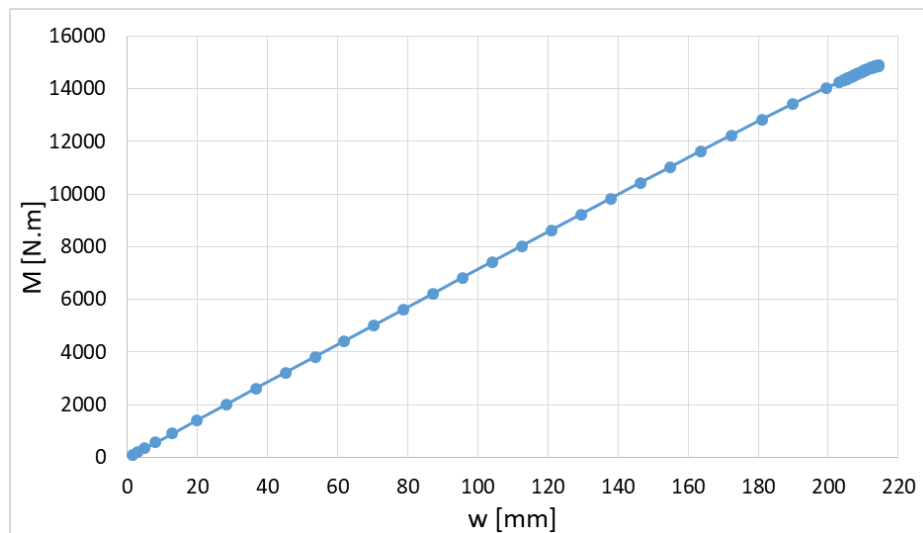


Figura 65 – Gráfico do Momento atuante x Deslocamento vertical a meio vão, Viga

1.

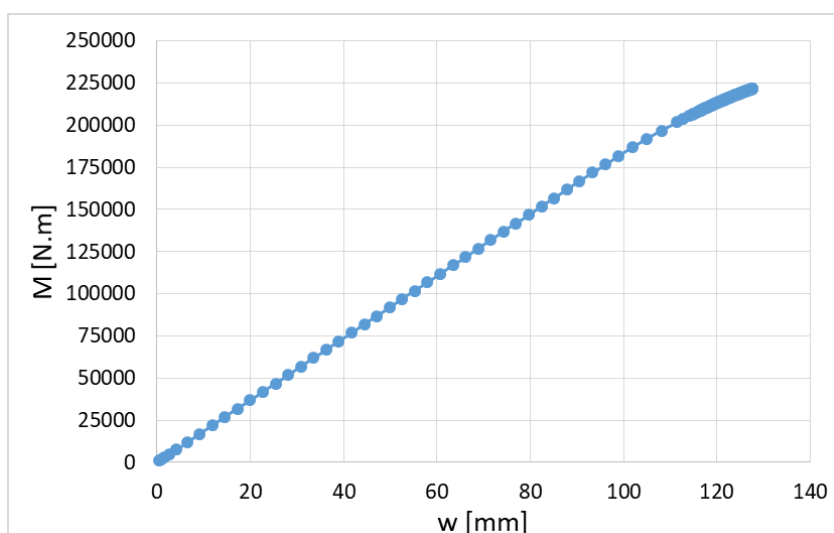


Figura 66 – Gráfico do Momento atuante x Deslocamento vertical a meio vão, Viga 2.

Tabela 33 – Comparação do resultado numérico e o método de cálculo simplificado para o momento atuante.

	Grau de utilização %	Momento Ansys	Momento EN 1995 1-2		Erro Relativo	
		$M_{el}$ [kN.m]	$M_{d,fi}$ [kN.m]	$M_d$ [kN.m]	$M_{d,fi}$ %	$M_d$ %
<b>Viga 1</b>	Carga de colapso	12,41	15,64	12,51		
	20	2,48	3,13	2,50		
	30	3,72	4,69	3,75		
	40	4,96	6,26	5,01		
	50	6,21	7,82	6,26	20,65	0,82
	60	7,45	9,38	7,51		
	70	8,69	10,95	8,76		
	80	9,93	12,51	10,01		
	90	11,17	14,08	11,26		
<b>Viga 2</b>	Carga de colapso	165,61	208,55	166,84		
	20	33,12	41,71	33,37		
	30	49,68	62,56	50,05		
	40	66,24	83,42	66,74		
	50	82,81	104,27	83,42	20,59	0,73
	60	99,37	125,13	100,10		
	70	115,93	145,98	116,79		
	80	132,49	166,84	133,47		
	90	149,05	187,69	150,15		

**ANEXO 5 – Resultados da simulação mecânica realizada na Viga 1, para o último instante de tempo.**

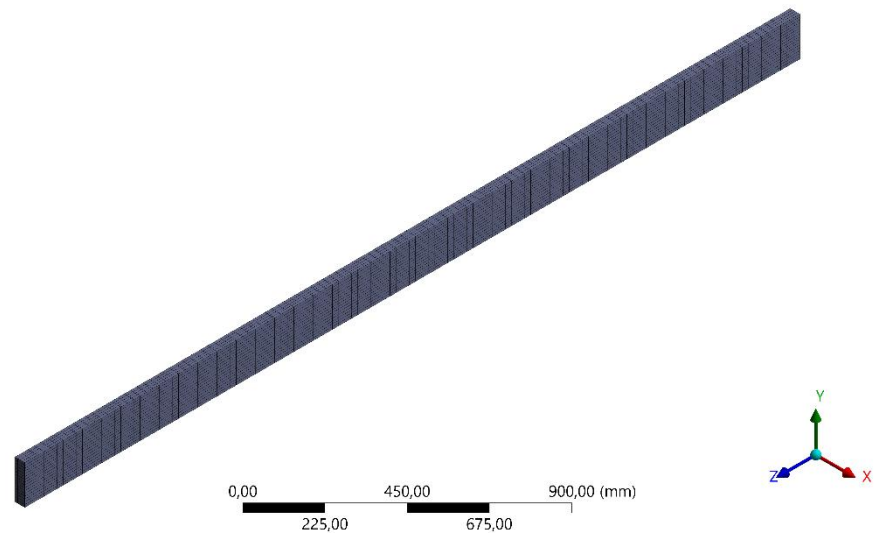


Figura 67 – Malha aplicada na Viga 1.

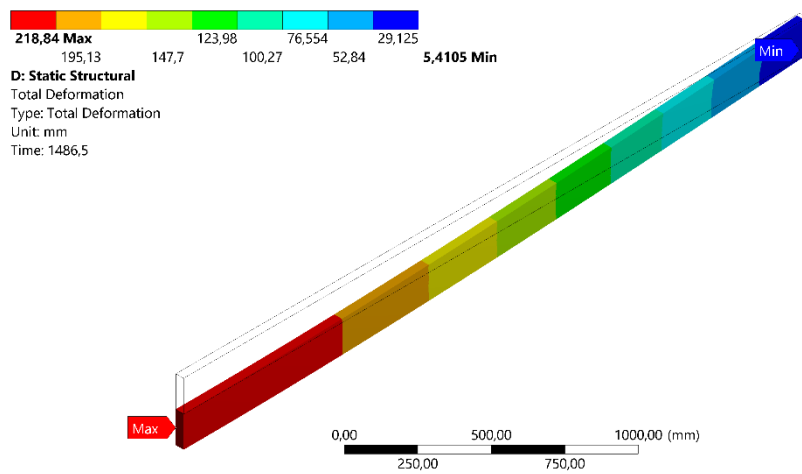


Figura 68 – Deslocamento total da Viga 1.

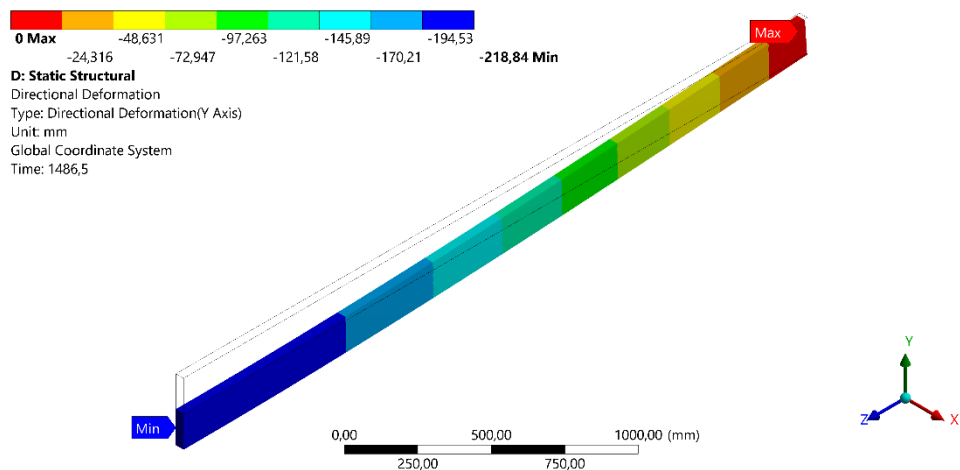


Figura 69 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 1.

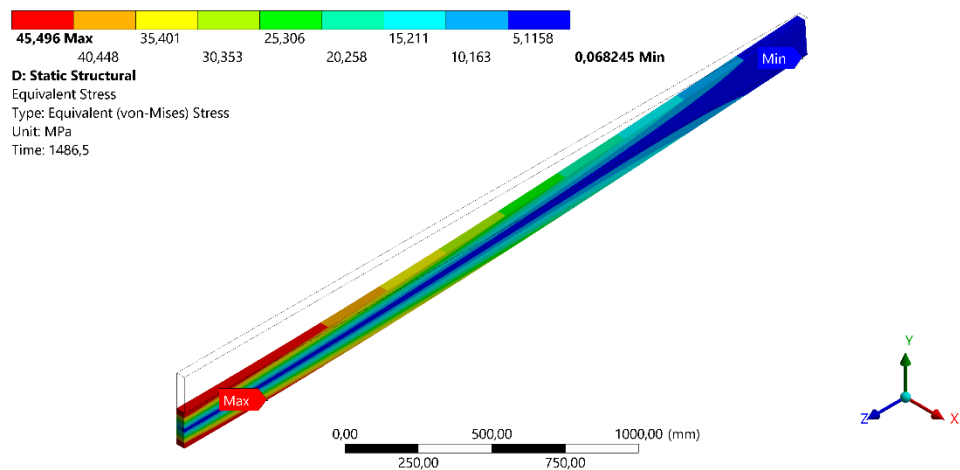


Figura 70 – Tensão equivalente distribuída por toda Viga 1.

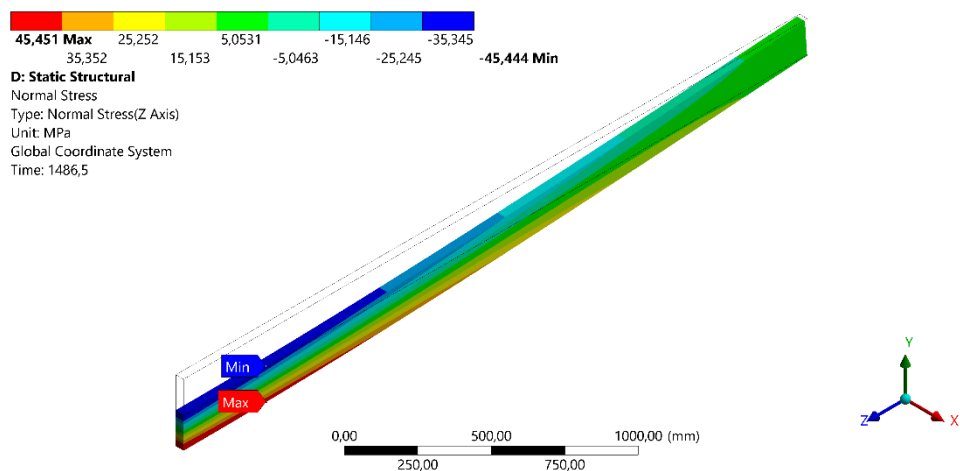


Figura 71 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1.

**ANEXO 6 – Resultados da simulação mecânica realizada na Viga 2, para o último instante de tempo.**

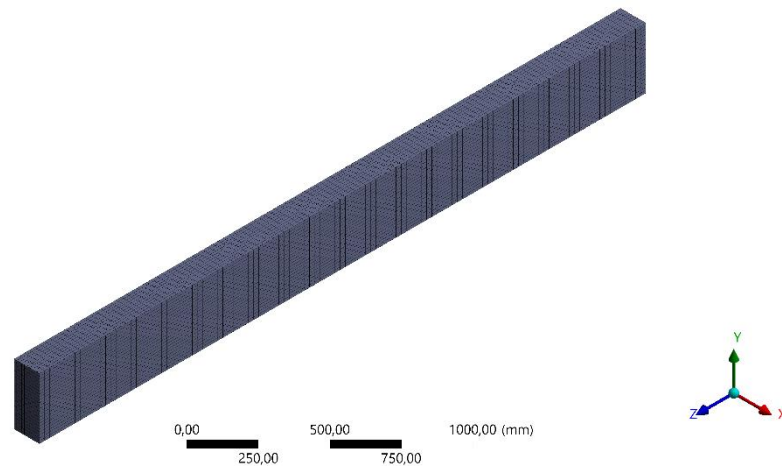


Figura 72 – Malha aplicada na Viga 2.

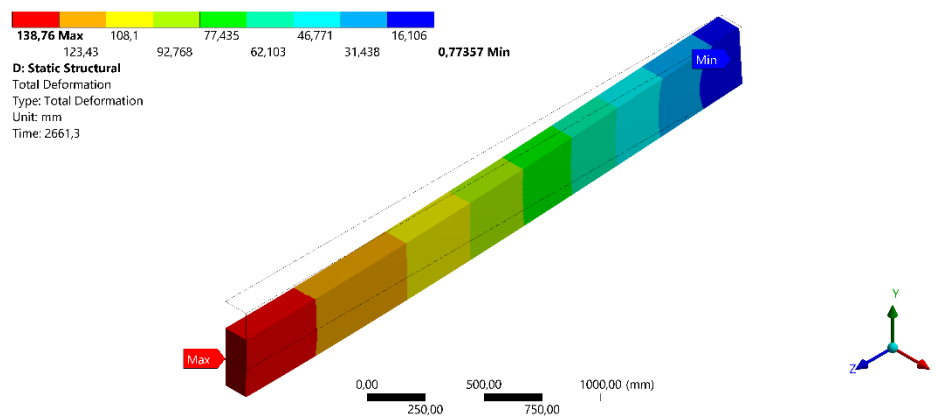


Figura 73 – Deslocamento total da Viga 2.

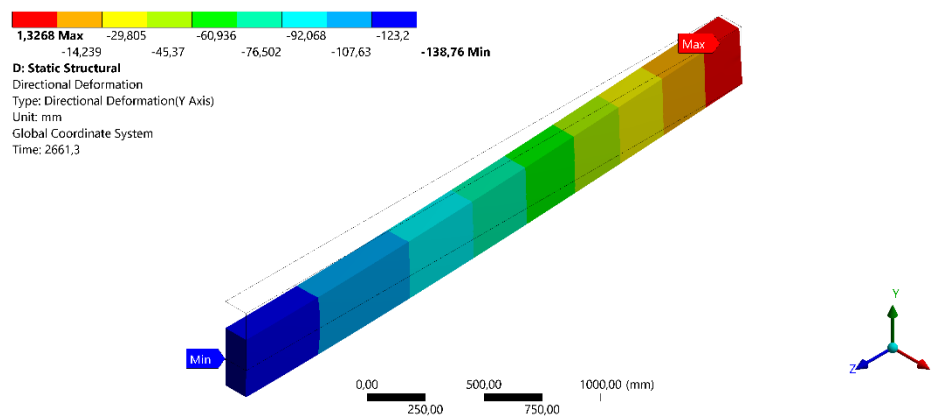


Figura 74 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 2.

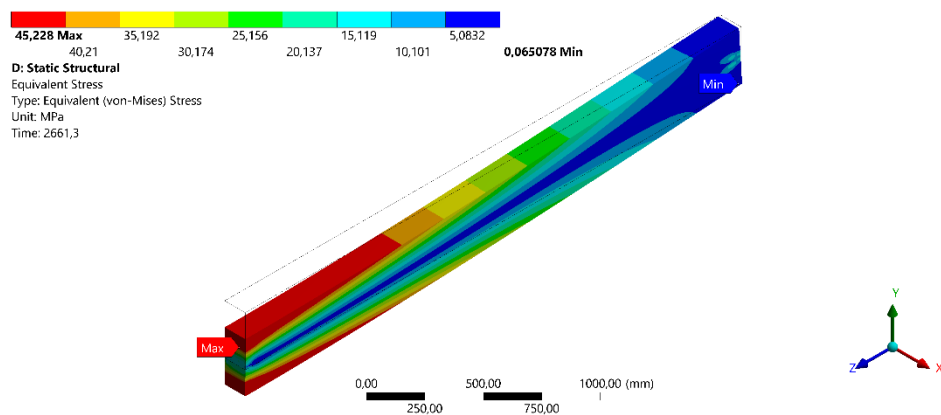


Figura 75 – Tensão equivalente distribuída por toda Viga 2.

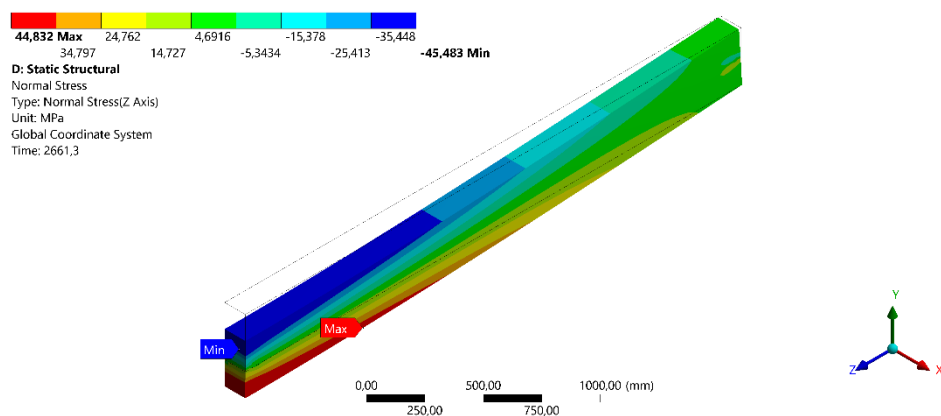


Figura 76 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2.

**ANEXO 7 – Resultados da simulação térmica realizada na Viga 1.**

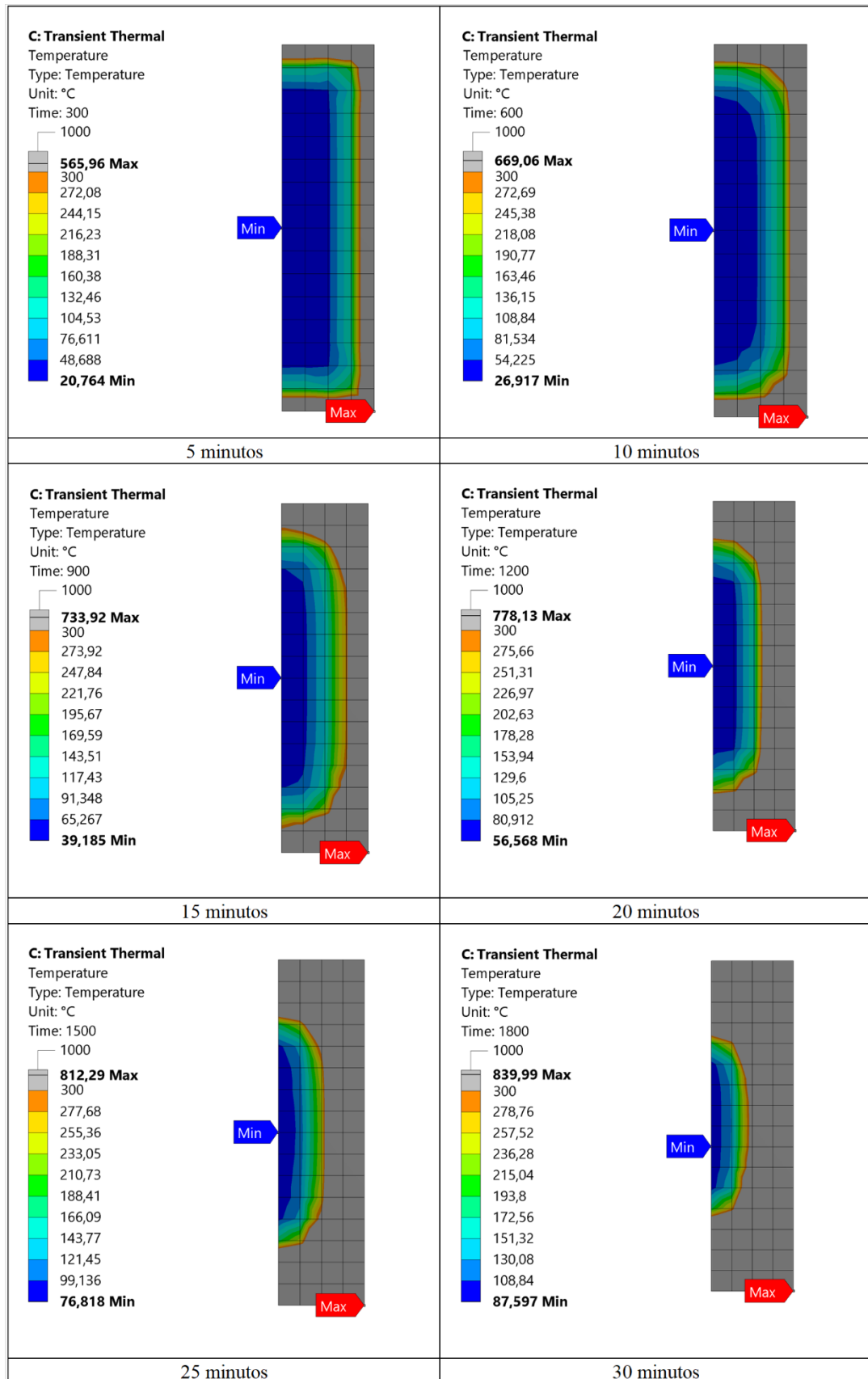


Figura 77 – Distribuição da temperatura na seção transversal da Viga 1.

**ANEXO 8 – Resultados da simulação térmica realizada na Viga 2.**

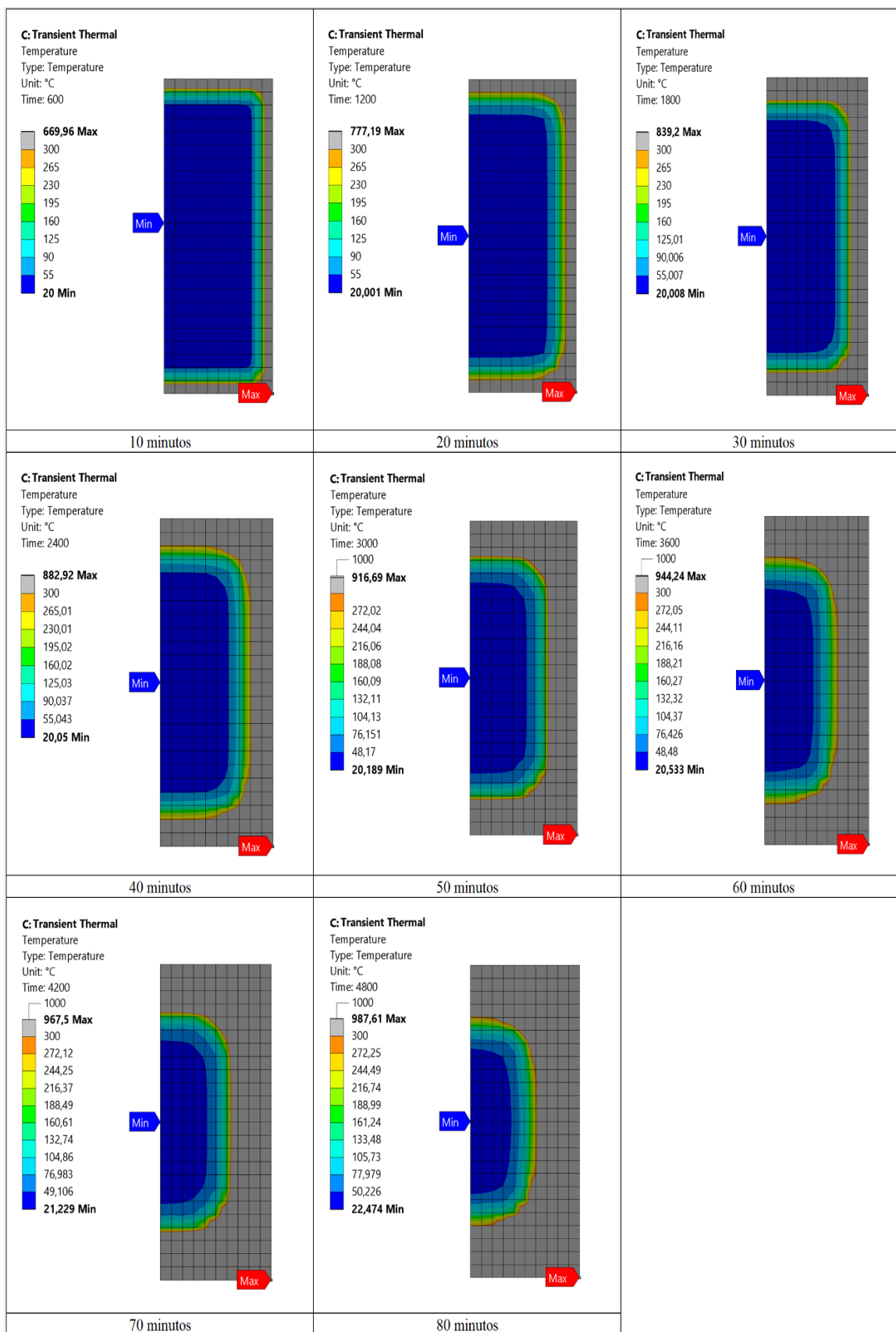


Figura 78 – Distribuição da temperatura na seção transversal da Viga 2.

**ANEXO 9 – Resultados da simulação termomecânica para 20% do grau de utilização realizada na Viga 1.**

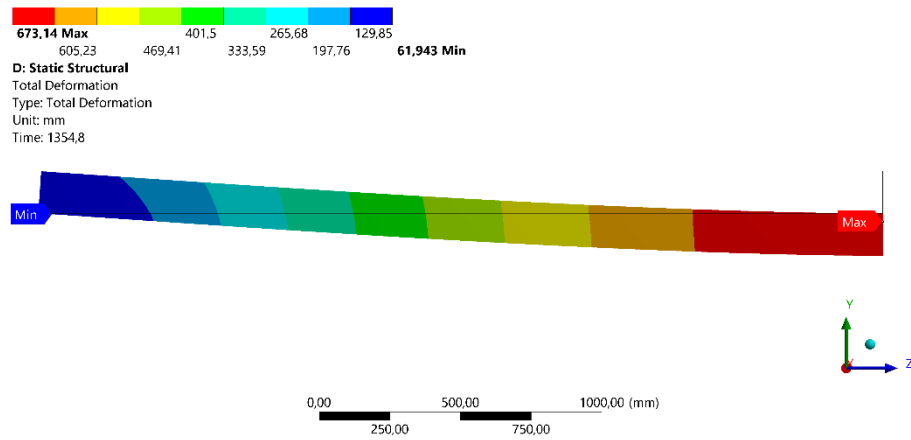


Figura 79 – Deslocamento total da Viga 1.

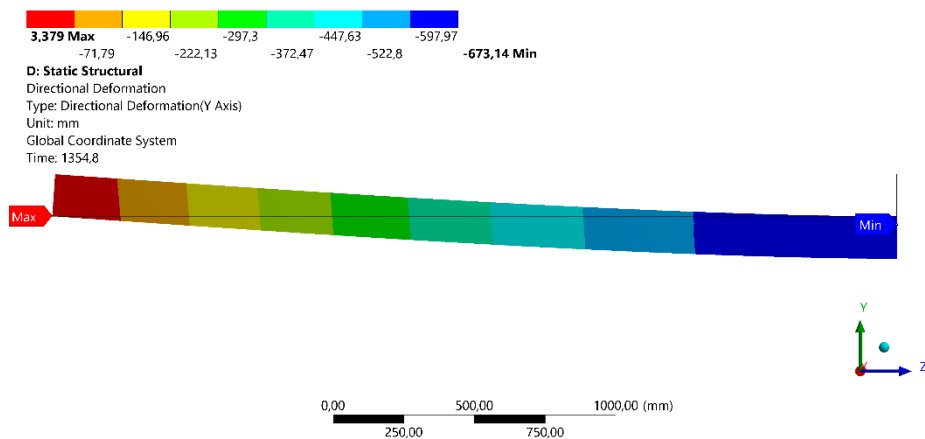


Figura 80 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 1.

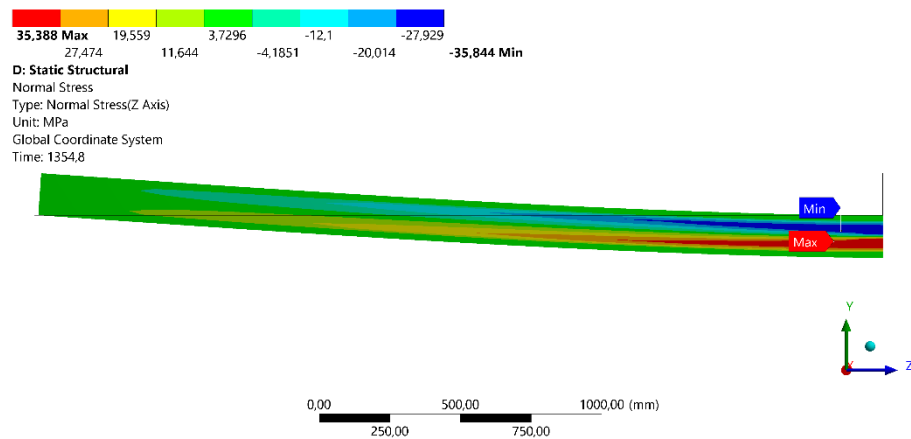


Figura 81 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1.

## ANEXO 10 – Resultados da simulação termomecânica para 30% do grau de utilização realizada na Viga 1.

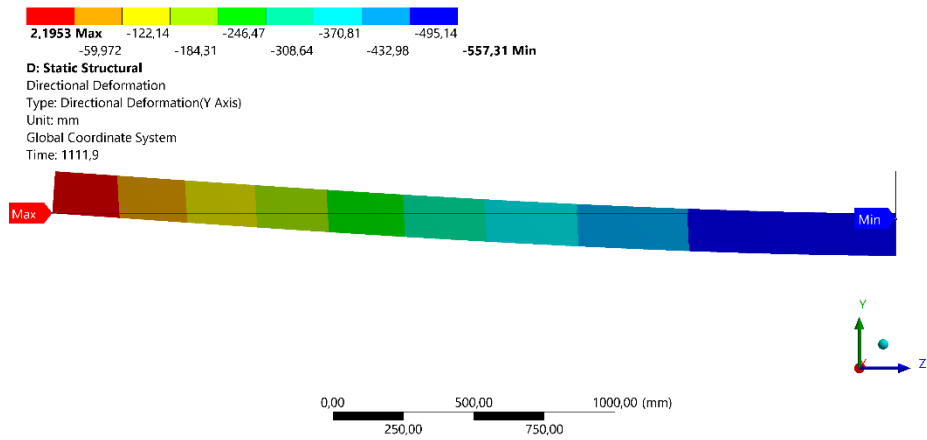


Figura 82 – Deslocamento total da Viga 1.

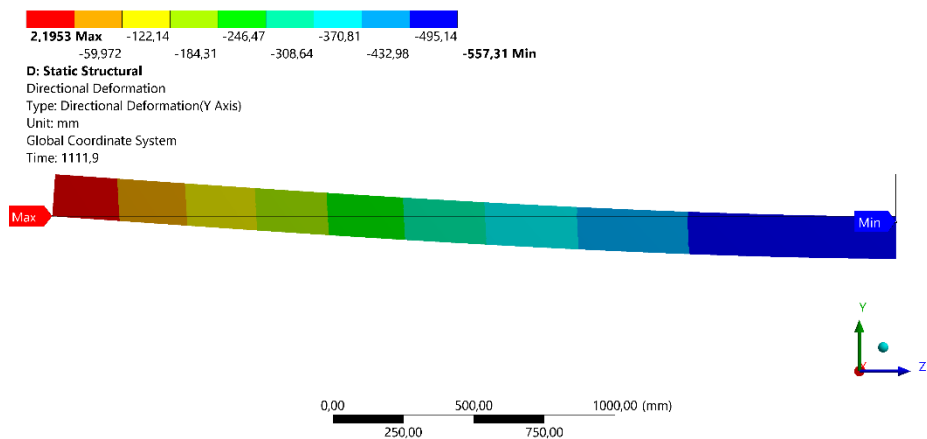


Figura 83 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 1.

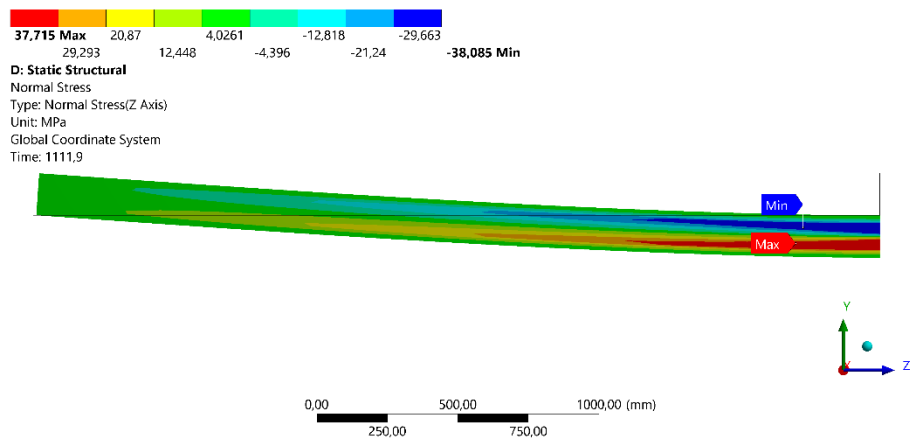


Figura 84 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1.

**ANEXO 11 – Resultados da simulação termomecânica para 40% do grau de utilização realizada na Viga 1.**

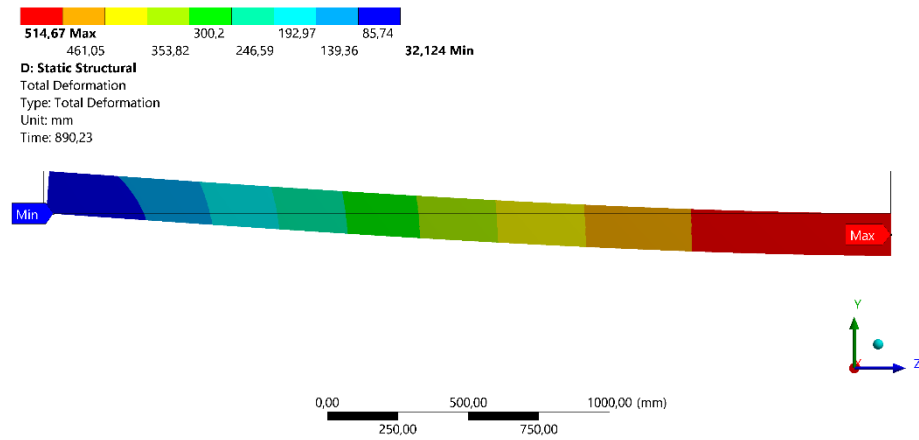


Figura 85 – Deslocamento total da Viga 1.

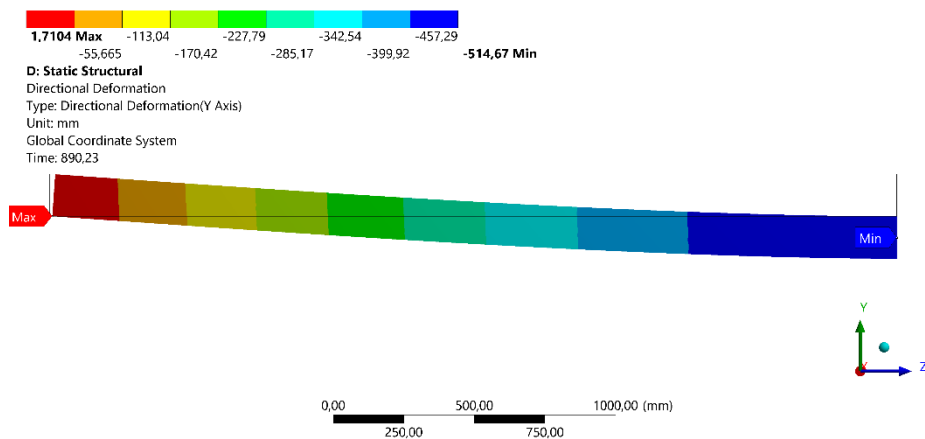


Figura 86 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 1.

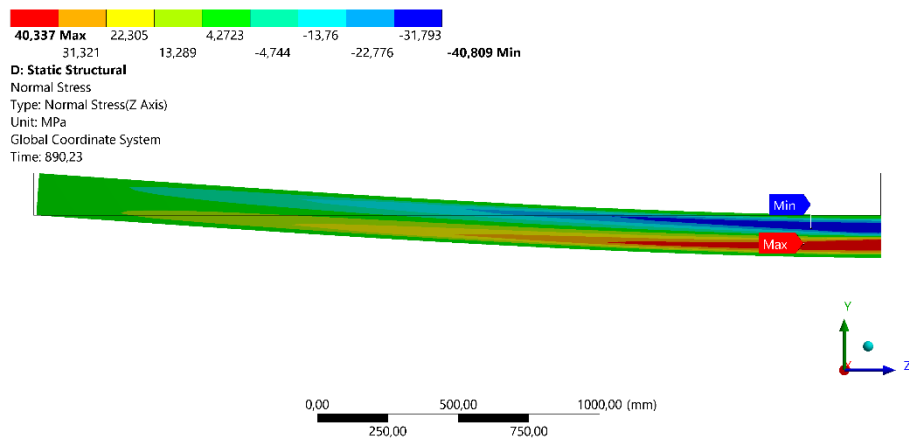


Figura 87 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1.

### ANEXO 12 – Resultados da simulação termomecânica para 50% do grau de utilização realizada na Viga 1.

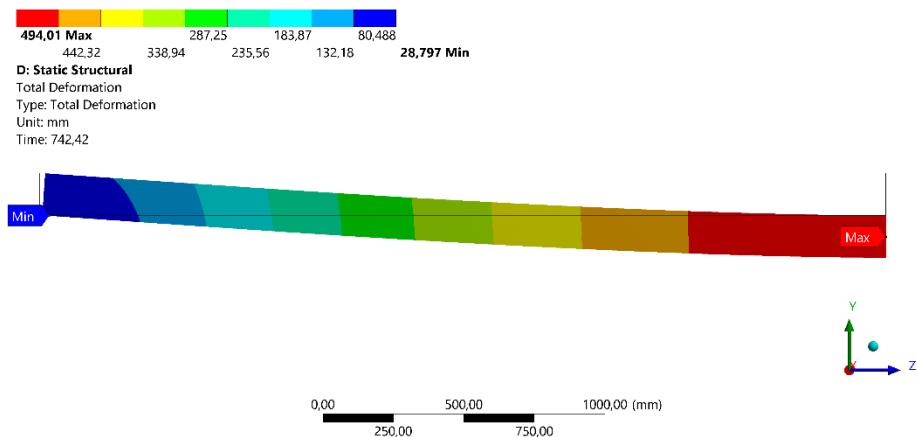


Figura 88 – Deslocamento total da Viga 1.

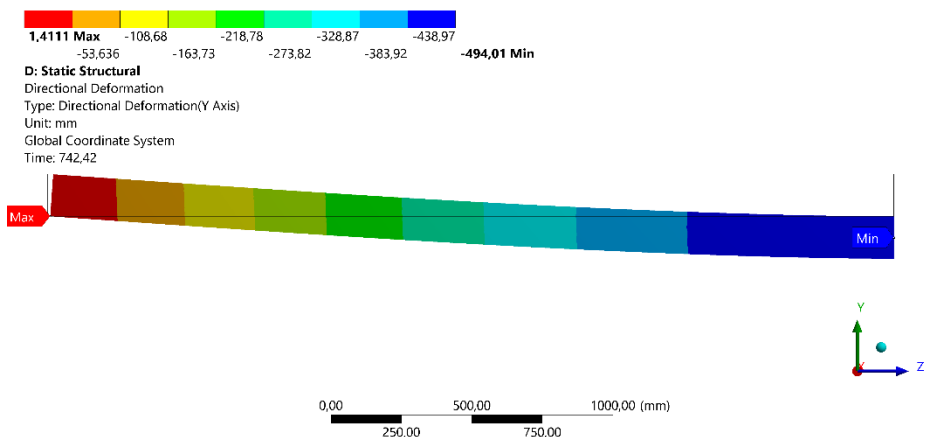


Figura 89 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 1.

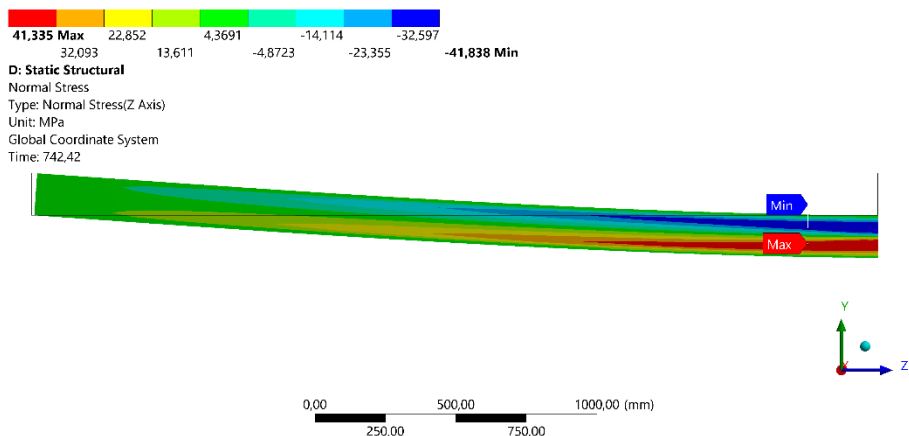


Figura 90 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1.

**ANEXO 13 – Resultados da simulação termomecânica para 60% do grau de utilização realizada na Viga 1.**

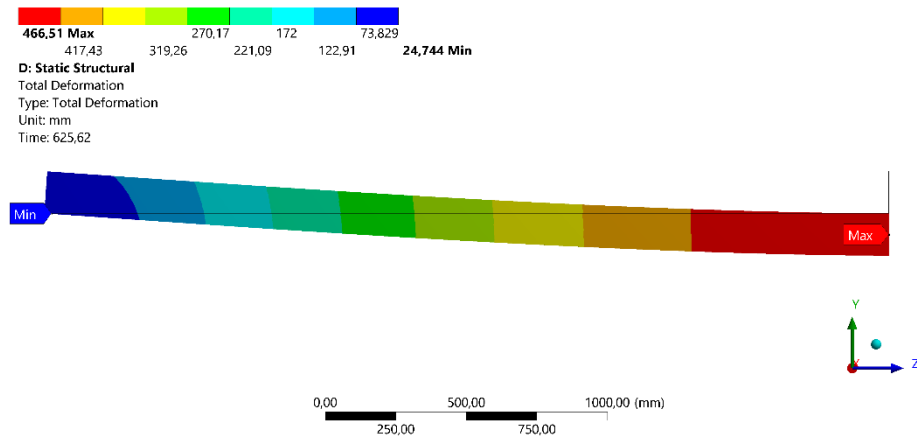


Figura 91 – Deslocamento total da Viga 1.

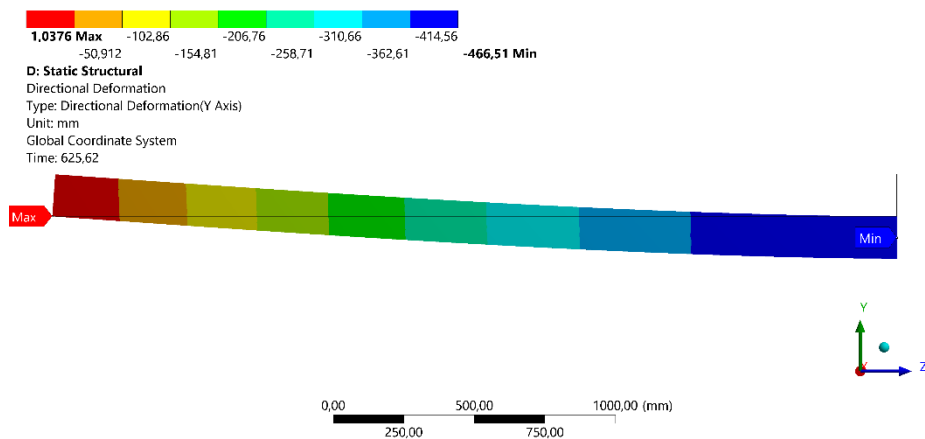


Figura 92 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 1.

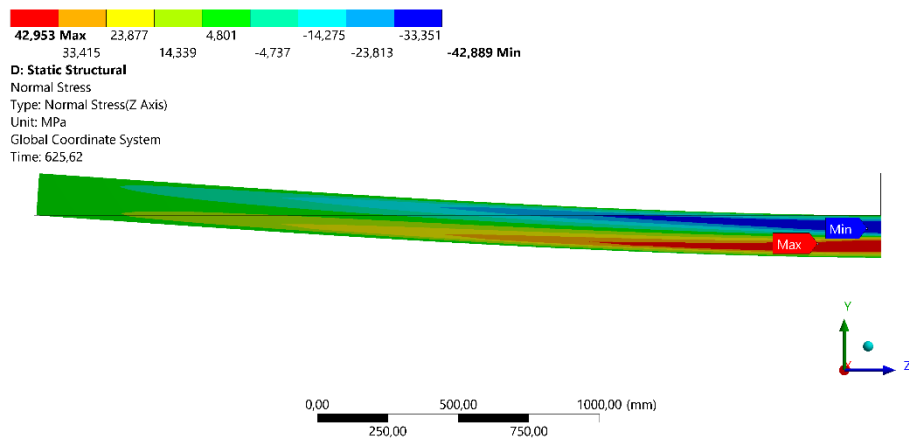


Figura 93 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1.

### ANEXO 14 – Resultados da simulação termomecânica para 70% do grau de utilização realizada na Viga 1.

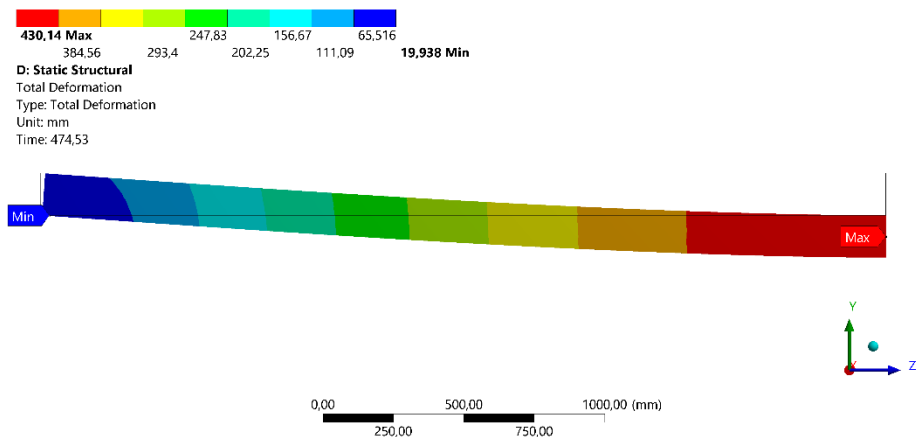


Figura 94 – Deslocamento total da Viga 1.

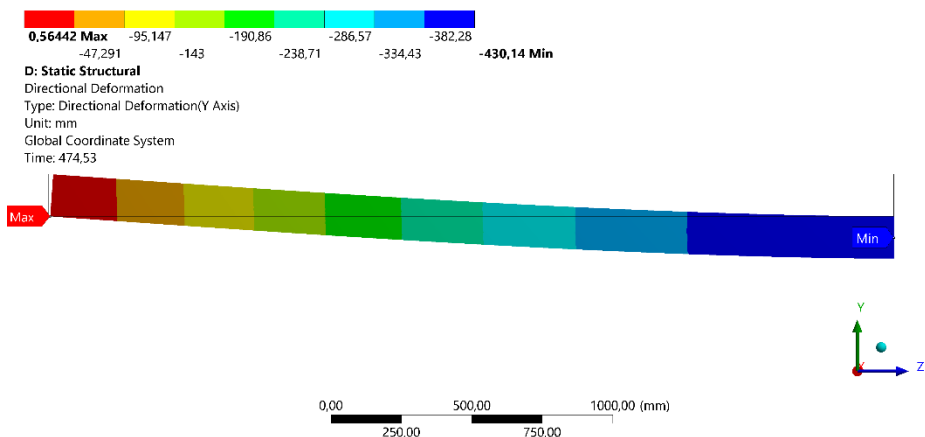


Figura 95 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 1.

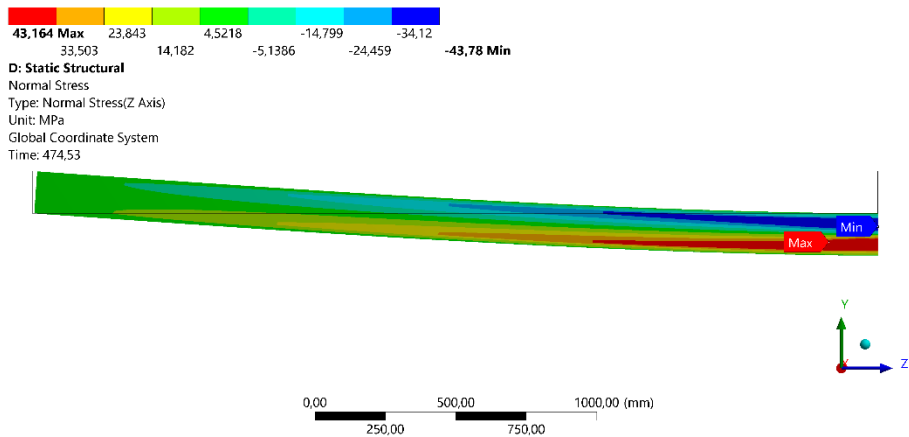


Figura 96 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1.

## ANEXO 15 – Resultados da simulação termomecânica para 80% do grau de utilização realizada na Viga 1.

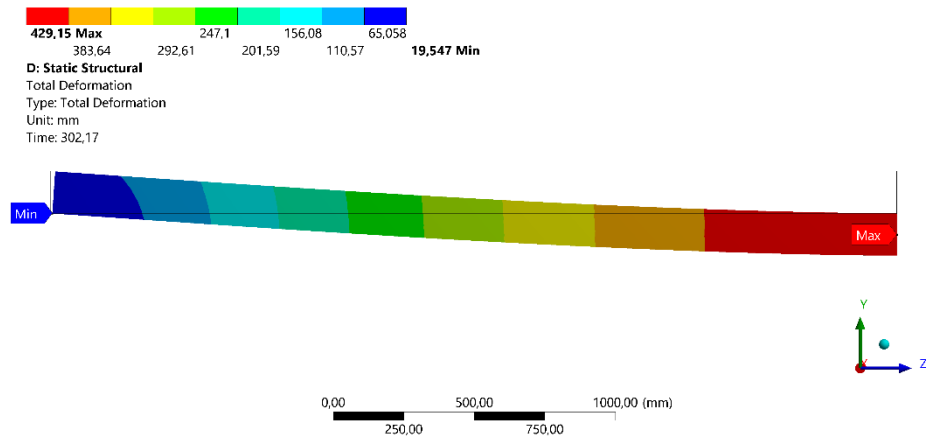


Figura 97 – Deslocamento total da Viga 1.

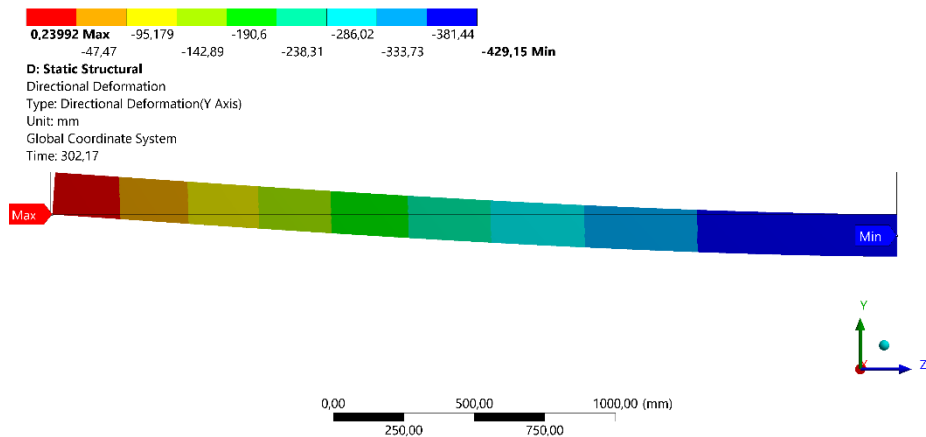


Figura 98 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 1.

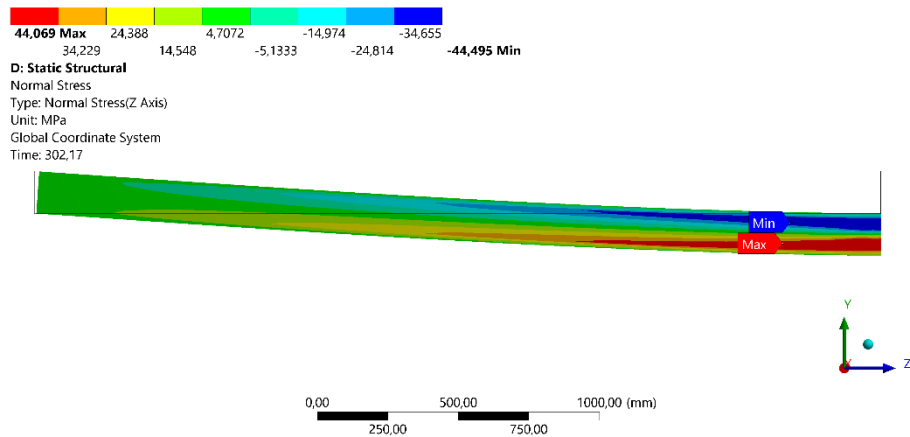


Figura 99 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1.

### ANEXO 16 – Resultados da simulação termomecânica para 90% do grau de utilização realizada na Viga 1.

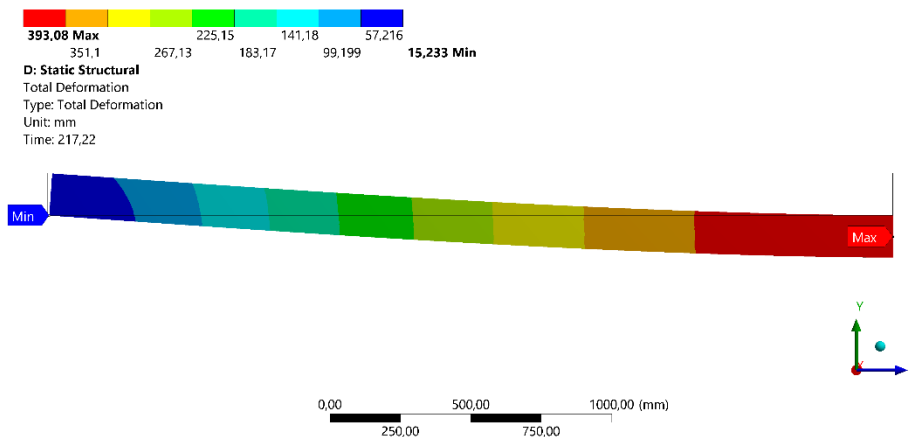


Figura 100 – Deslocamento total da Viga 1.

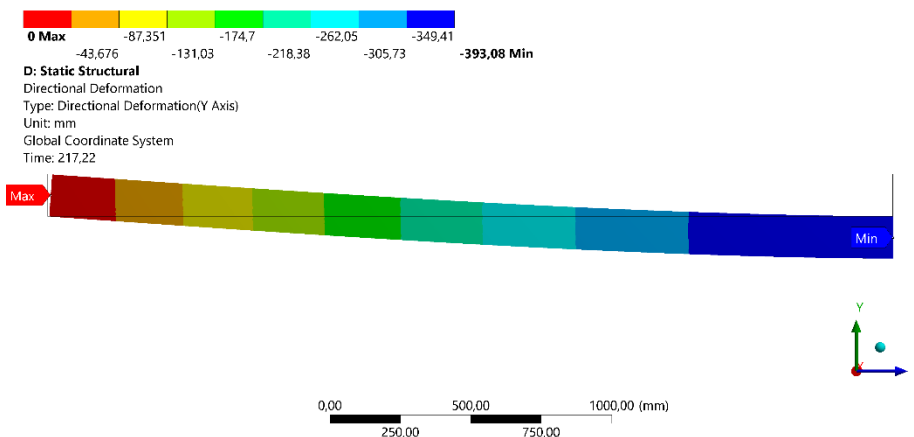


Figura 101 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 1.

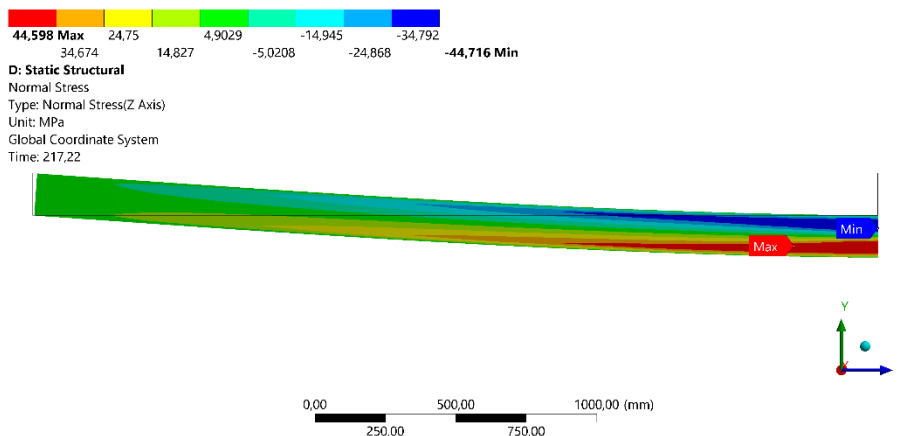


Figura 102 – Tensão normal distribuída por toda Viga 1.

**ANEXO 17 – Resultados da simulação termomecânica para 20% do grau de utilização realizada na Viga 2.**

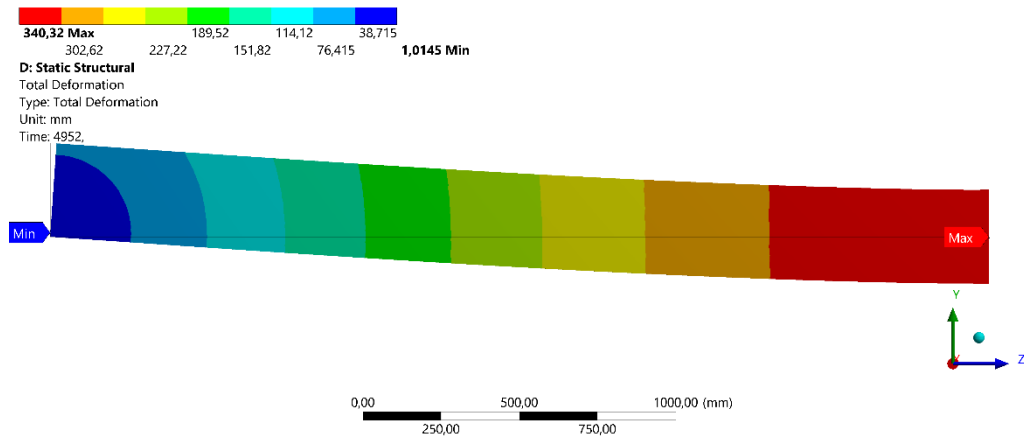


Figura 103 – Deslocamento total da Viga 2.

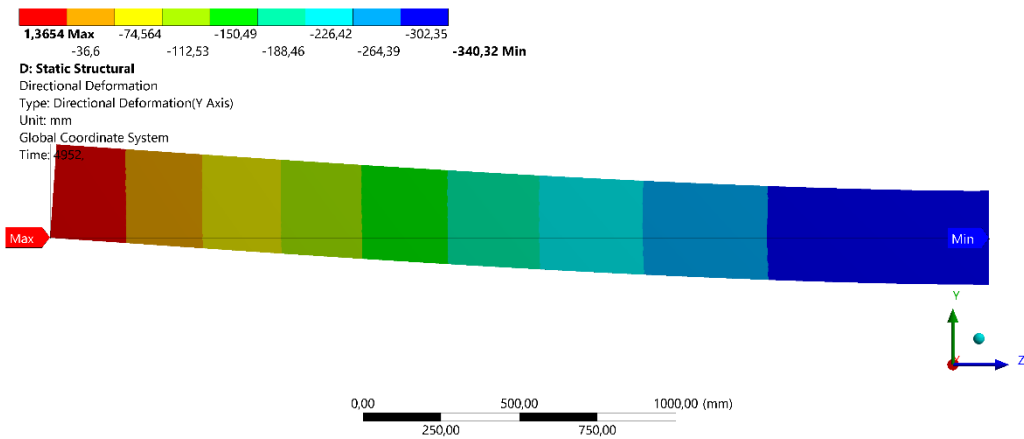


Figura 104 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 2.

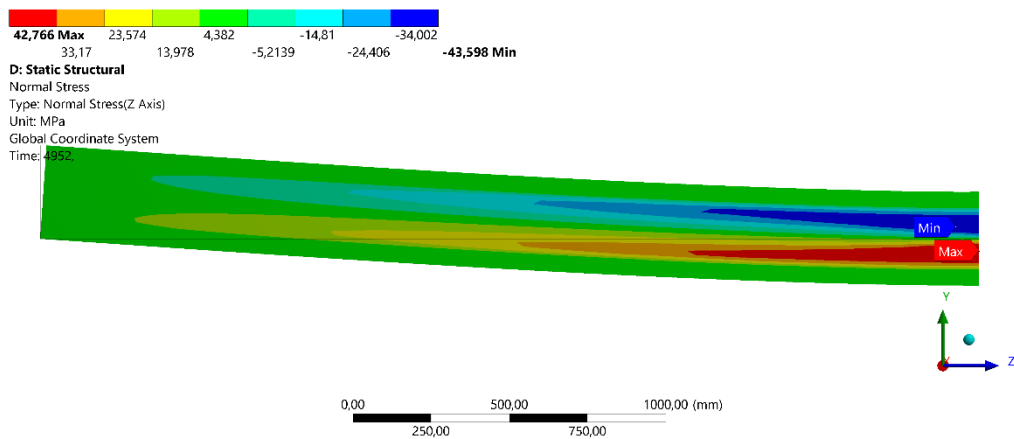


Figura 105 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2.

### ANEXO 18 – Resultados da simulação termomecânica para 30% do grau de utilização realizada na Viga 2.

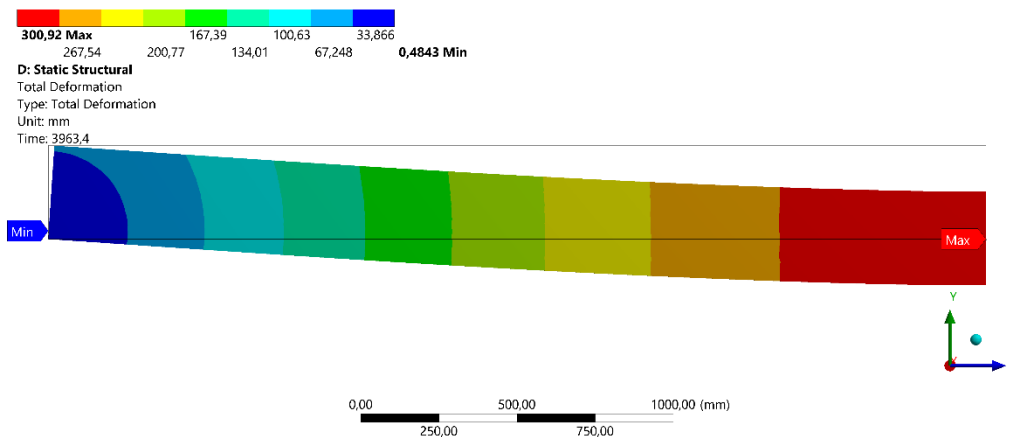


Figura 106 – Deslocamento total da Viga 2.

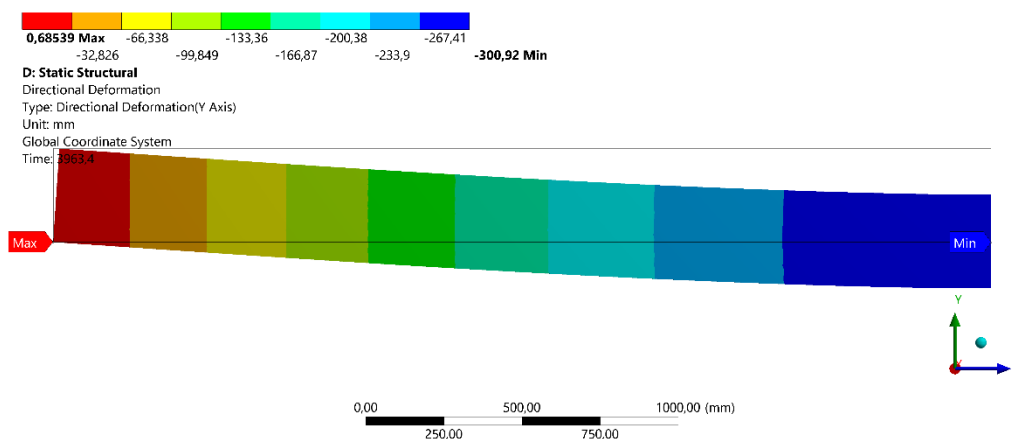


Figura 107 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 2.

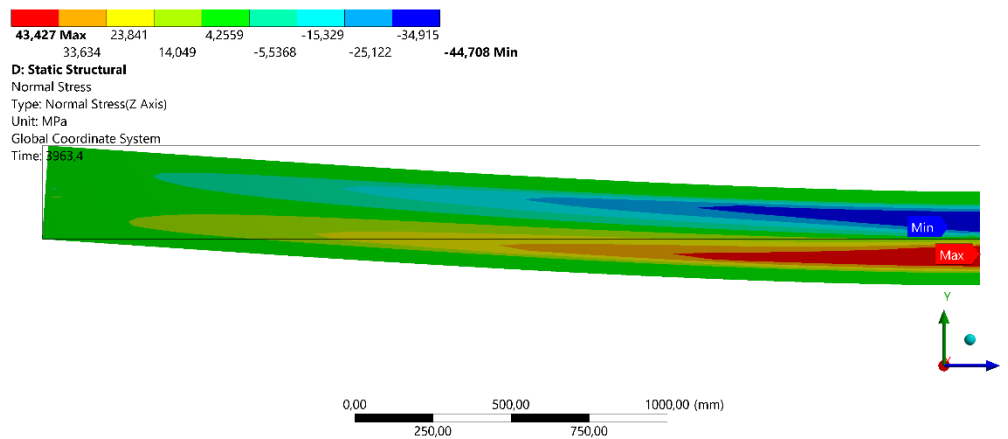


Figura 108 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2.

**ANEXO 19 – Resultados da simulação termomecânica para 40% do grau de utilização realizada na Viga 2.**

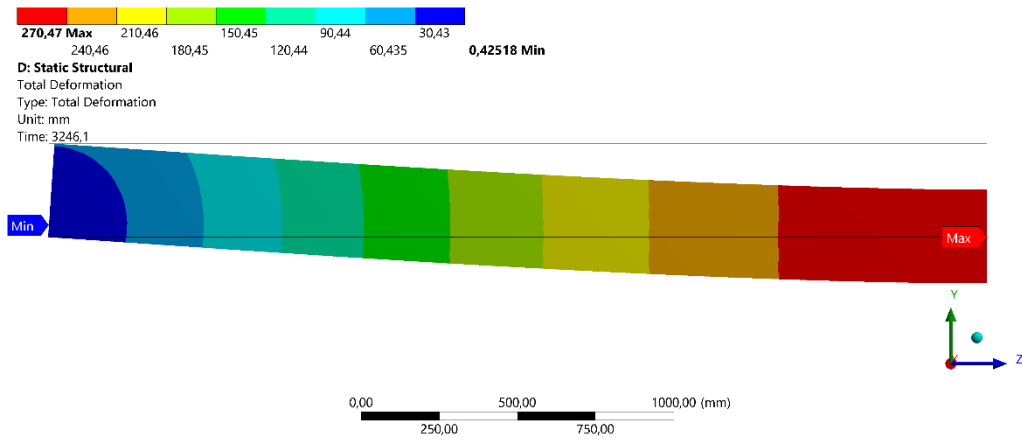


Figura 109 – Deslocamento total da Viga 2.

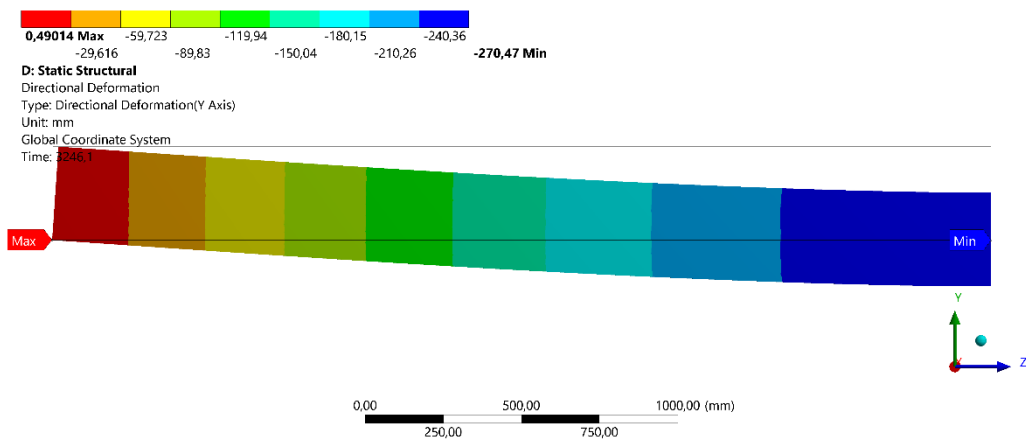


Figura 110 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 2.

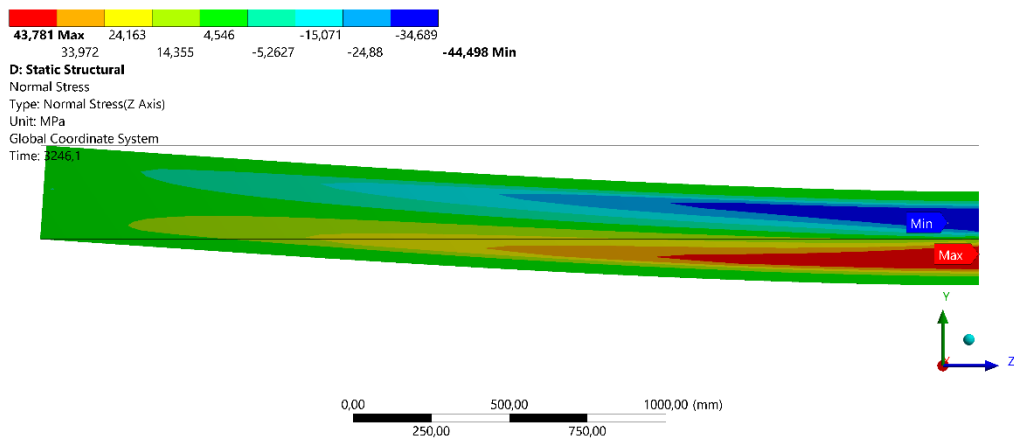


Figura 111 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2

### ANEXO 20 – Resultados da simulação termomecânica para 50% do grau de utilização realizada na Viga 2.

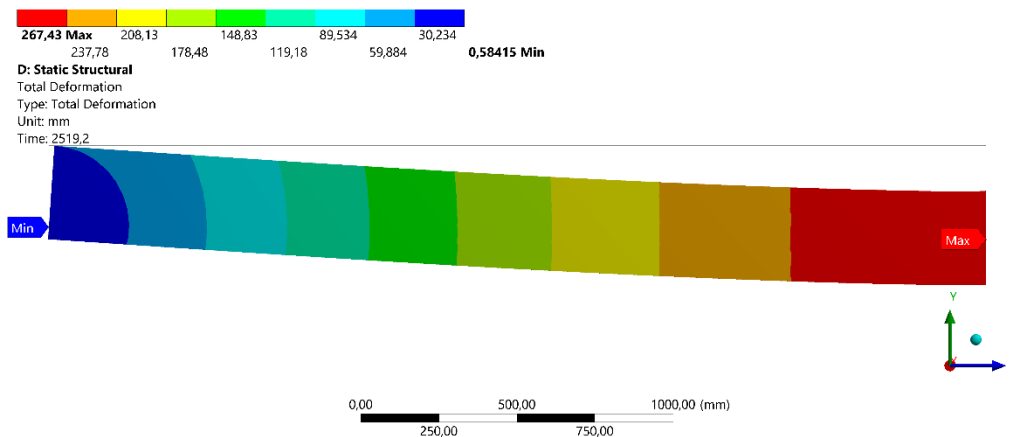


Figura 112 – Deslocamento total da Viga 2.

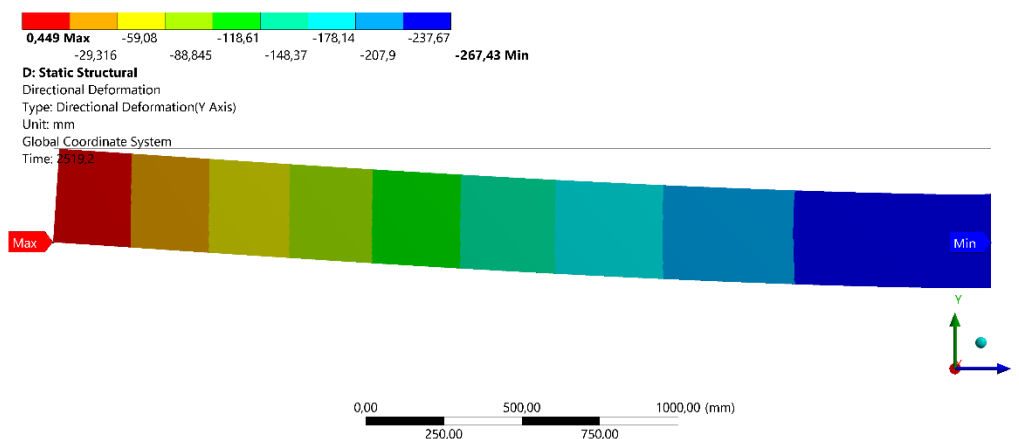


Figura 113 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 2.

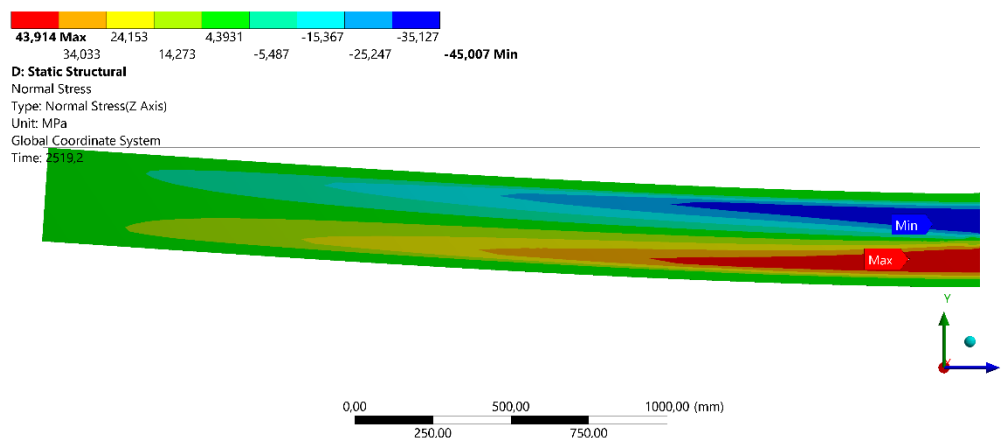


Figura 114 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2.

**ANEXO 21 – Resultados da simulação termomecânica para 60% do grau de utilização realizada na Viga 2.**

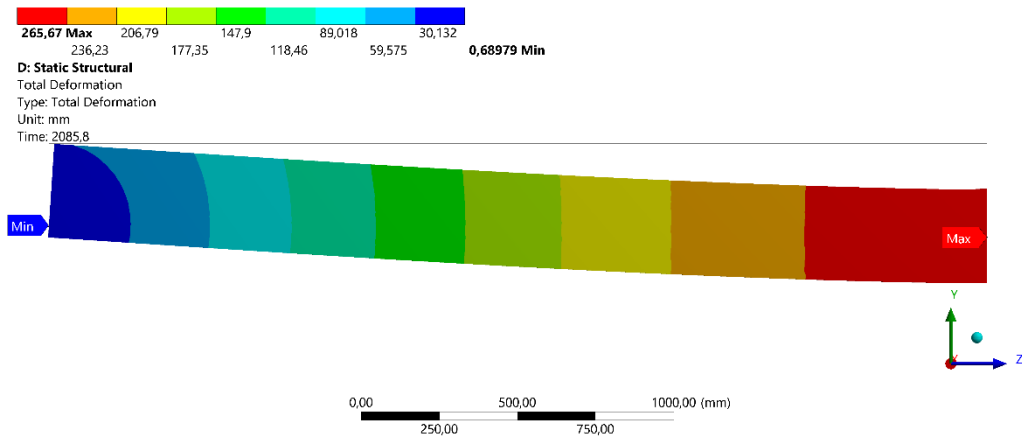


Figura 115 – Deslocamento total da Viga 2.

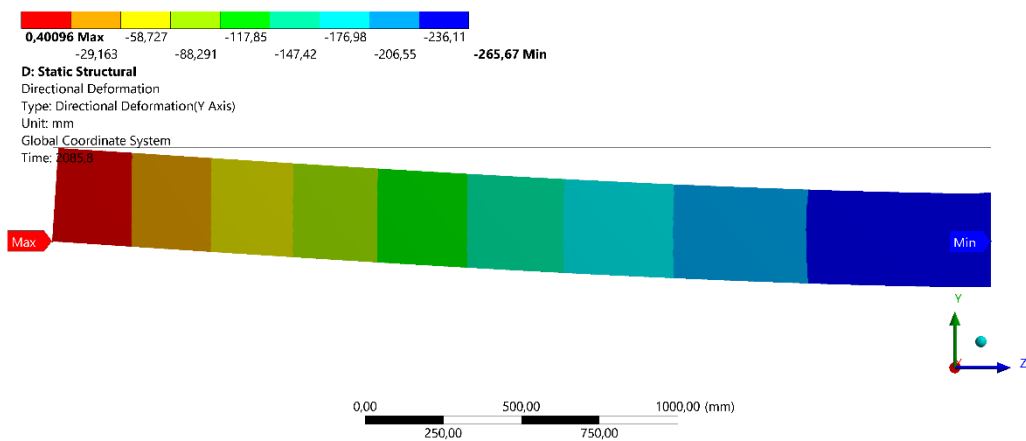


Figura 116 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 2.

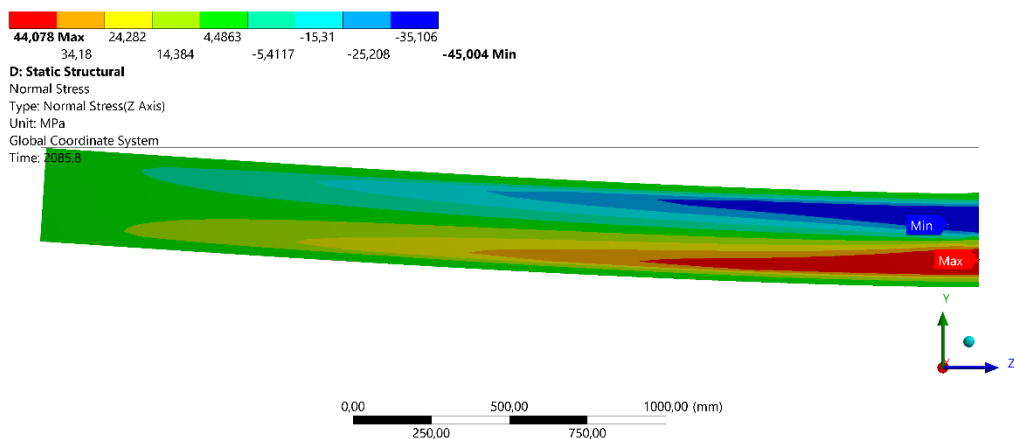


Figura 117 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2.

### ANEXO 22 – Resultados da simulação termomecânica para 70% do grau de utilização realizada na Viga 2.

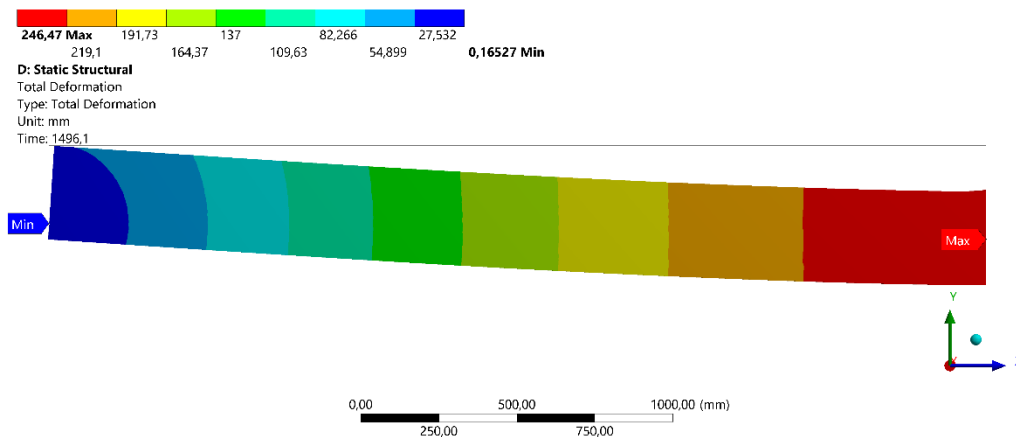


Figura 118 – Deslocamento total da Viga 2.

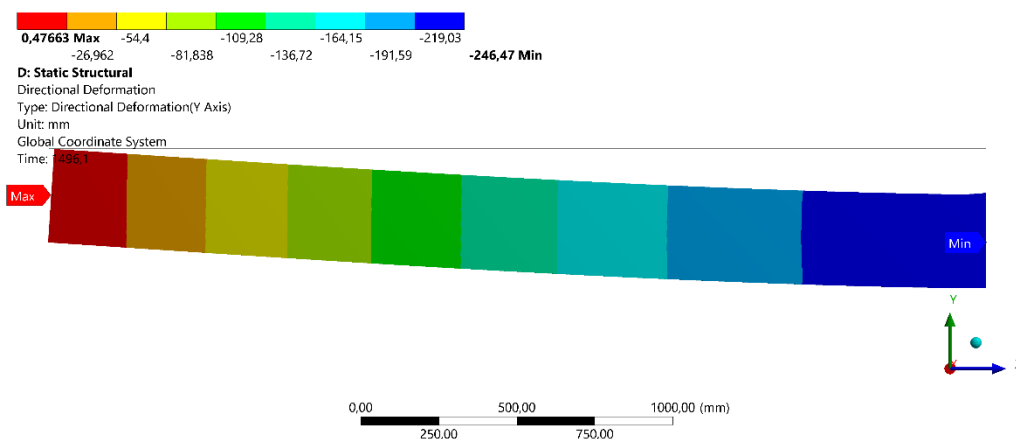


Figura 119 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 2.

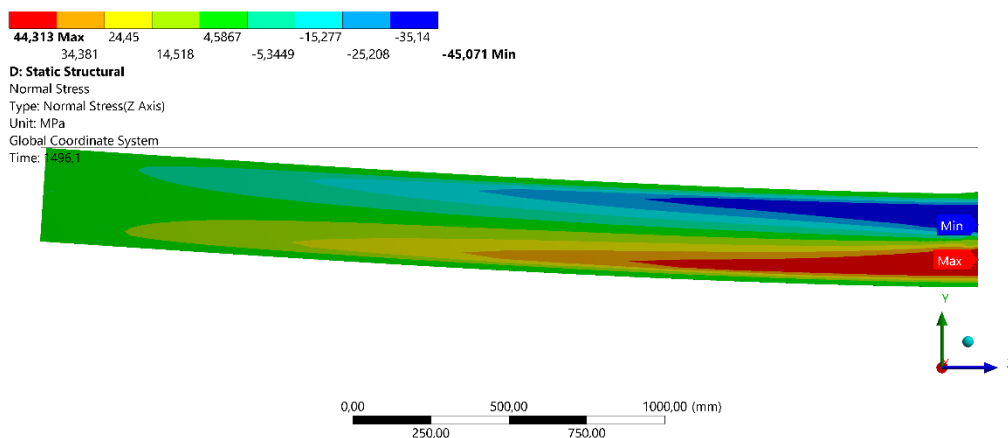


Figura 120 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2.

**ANEXO 23 – Resultados da simulação termomecânica para 80% do grau de utilização realizada na Viga 2.**

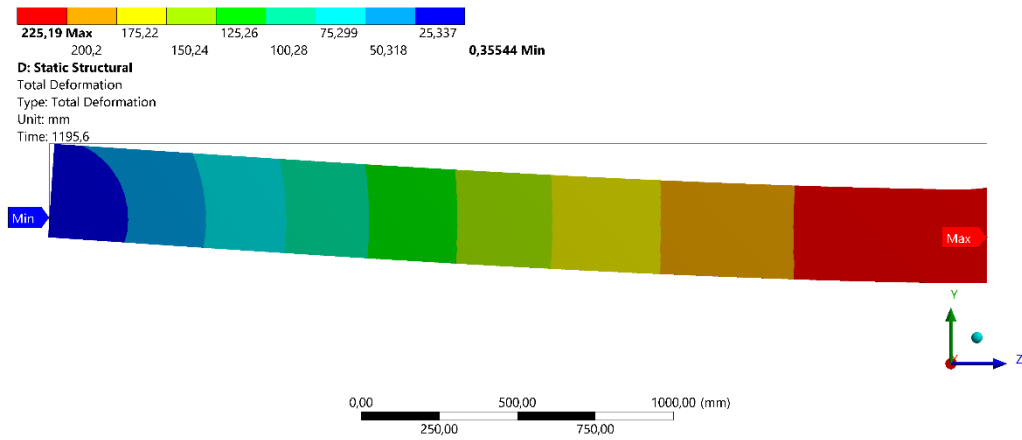


Figura 121 – Deslocamento total da Viga 2.

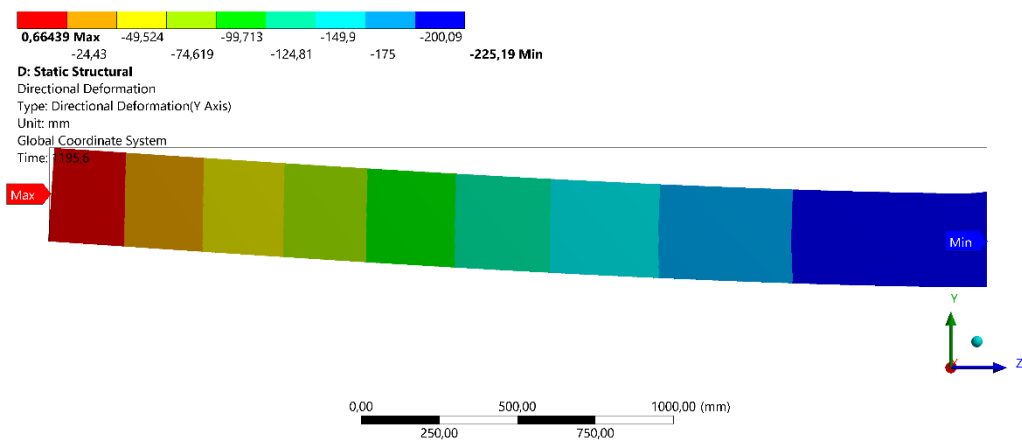


Figura 122 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 2.

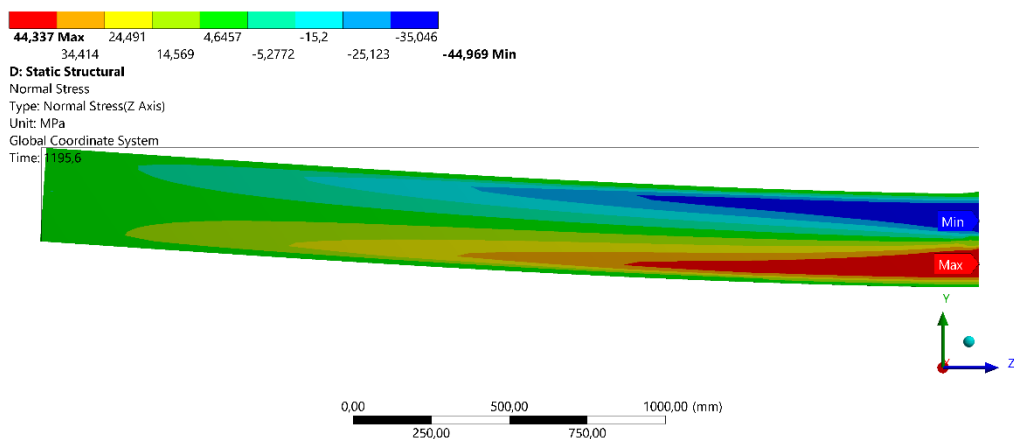


Figura 123 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2.

### ANEXO 24 – Resultados da simulação termomecânica para 90% do grau de utilização realizada na Viga 2.

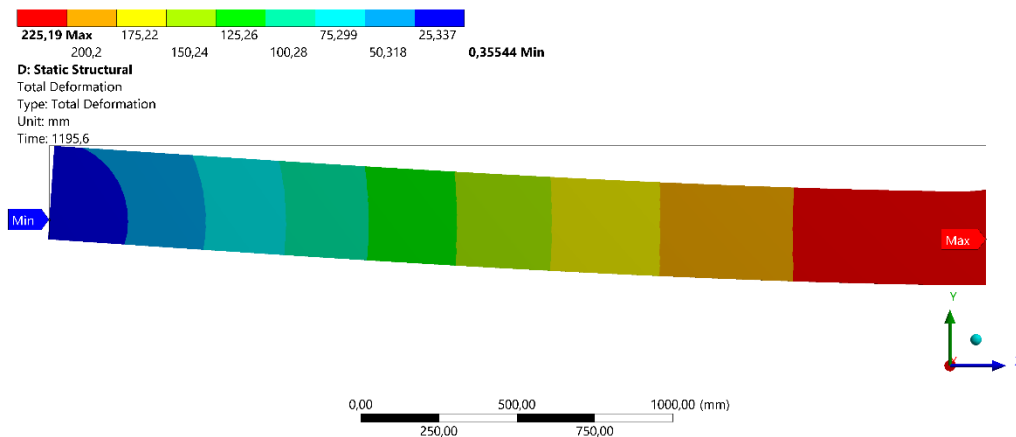


Figura 124 – Deslocamento total da Viga 2.

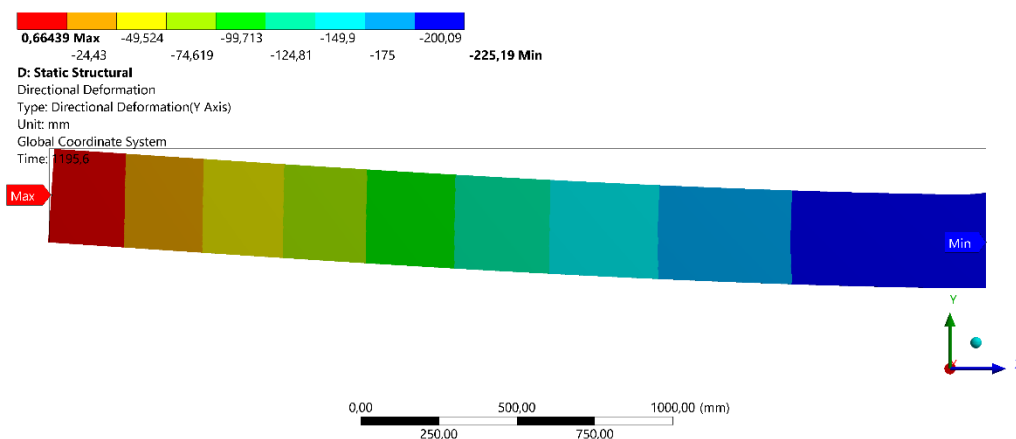


Figura 125 – Deslocamento direcional no eixo Y da Viga 2.

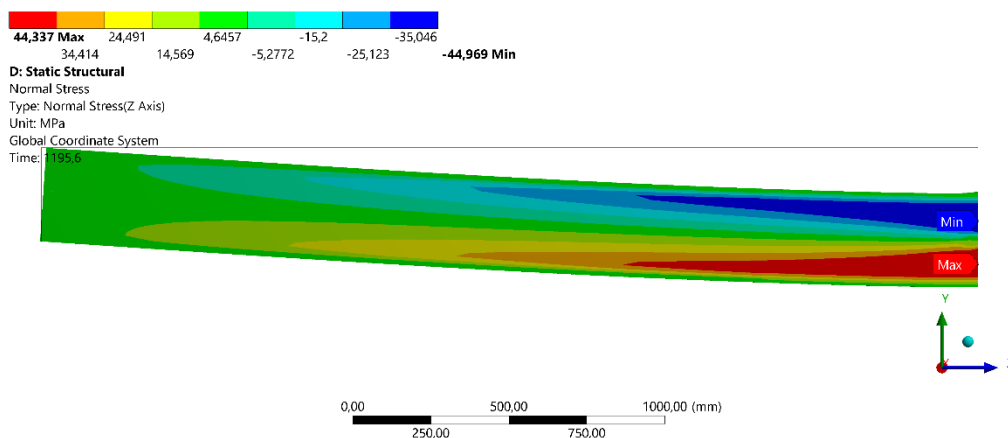


Figura 126 – Tensão normal distribuída por toda Viga 2.