

ESTUDO NUMÉRICO EM VIGAS DE MADEIRA SUBMETIDAS A ALTAS TEMPERATURAS

TAWANE HONMA MILHAN

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Da Construção

Dezembro de 2020

ESTUDO NUMÉRICO EM VIGAS DE MADEIRA SUBMETIDAS A ALTAS TEMPERATURAS

TAWANE HONMA MILHAN

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.^a Dr.^a Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira

Prof.^o Dr. Luís Manuel Ribeiro Mesquita

Orientador da Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.^o Dr. Marcelo Rodrigo Carreira

Dezembro de 2020

Dedico este trabalho a minha família.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus e Nossa Senhora de Fátima pela proteção e saúde, a minha família que foi fundamental para a conclusão deste trabalho, especialmente aos meus pais Lidia e Paulo por toda confiança e apoio a mim conferidos ao longo dessa jornada, os meus irmãos Henrique e Rodolfo pelo companheirismo e incentivo, agradeço também ao Peri e a Solange.

Aos meus orientadores do Instituto Politécnico de Bragança, Prof.^a Dr.^a Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira e Prof.^o Dr. Luís Manuel Ribeiro Mesquita, pelos ensinamentos, disponibilidade e compreensão ao longo de todo desenvolvimento desta tese. Ao meu coorientador da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Prof.^o Dr. Marcelo Rodrigo Carreira pelo apoio e disposição em ajudar.

Agradeço aos amigos do Brasil que apesar da distância se fizeram muito presentes nessa fase da minha vida acadêmica, por todos os conselhos e apoio, em especial Ana Paula, Jocileila Lima, Nathalia Menardi e Marco Antônio, aos meus amigos de Portugal pela companhia e por se tornarem minha segunda família, Barbara Sena, Bruno Mourad, Felipe Macedo, Karolina Rodrigues, Larissa Ghirro, Laura Nogueira e Letícia Cabrera.

Meu agradecimento especial ao João Victor pela paciência e ajuda prestada ao longo dessa jornada, e ao meu amigo Luiz Miguel por compartilhar seu conhecimento e por todos os ensinamentos passados para iniciar este trabalho.

Por fim, deixo aqui meu agradecimento ao Instituto Politécnico de Bragança e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela parceria entre as instituições que me proporcionou crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo principal investigar o comportamento de vigas de madeira submetidas à flexão em temperatura ambiente e também em condições térmicas variadas, para temperaturas constantes em toda a secção transversal e sob tempos de exposição ao fogo. As simulações numéricas foram realizadas com o uso do software *Ansys* em conformidade com as propriedades definidas para o material.

Foram desenvolvidos três modelos de cálculo numérico via elementos finitos, o primeiro realizando uma análise mecânica com carga incremental à temperatura ambiente, o segundo para análise mecânica com carga incremental em diferentes valores de temperatura constante e o terceiro para uma análise térmica de exposição à curva de incêndio ISO834 acoplada à análise mecânica com carga incremental.

Foi realizada uma simulação numérica de um ensaio experimental e as demais simulações contemplaram 2 geometrias de viga, cada uma delas analisadas em 6 valores de temperatura constante e 6 tempos de exposição diferentes. Para análises a respeito do máximo carregamento aplicado, do momento resistente, da espessura de carbonização e da taxa de carbonização, conforme necessário.

Os resultados obtidos numericamente foram comparados com o ensaio experimental fornecendo resultados coerentes, e com o método simplificado proposto pelo Eurocódigo 1995-1-2 que no geral mantém-se a favor da segurança ao determinar as propriedades de resistência da madeira por meio do método da secção reduzida.

Palavras Chave: *Ansys, Vigas de madeira, Resistência ao fogo, Comportamento térmico, Simulações numéricas, Elementos finitos.*

Abstract

The main objective of this work is to investigate the behavior of wooden beams submitted to bending for room temperature and also for varied thermal conditions, under constant temperatures across the entire cross section and under exposure to fire. The numerical simulations were performed using the Ansys software, in accordance with the proprieties defined of the material.

Three numerical calculation models by finite elements were developed, the first performing a mechanical analysis with increment load at room temperature, the second for a mechanical analysis with an increment load at different values of constant temperature and the third for a thermal analysis of exposure to the curve of fire ISO834 coupled to mechanical analysis with incremental load.

Was realized the numerical simulation of an experimental test, and the others for 2 beam geometries, each of which was analyzed at 6 constant temperature values and 6 different exposure times. Analyzes were made regarding the maximum applied load, the resistant moment, the carbonization thickness and the carbonization rate, as necessary.

The results obtained numerically were compared with the experimental test providing coherent results, and with the simplified method proposed by Eurocode 1995-1-2 which in general remains in favor of safety when determining the strength properties of the wood through the method of reduced section.

Keywords: Ansys, Wooden beams, Fire resistance, Thermal behavior, Numerical simulations, Finite elements.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	IV
ÍNDICE	V
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XVII
NOMENCLATURA	XX
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	2
1.2 OBJETIVOS PROPOSTOS	3
1.3 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	4
CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE	5
2.1 CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA.....	5
2.1.1 <i>ESTRUTURA MACROSCÓPICA</i>	5
2.1.2 <i>ESTRUTURA MICROSCÓPICA</i>	7
2.1.3 <i>CLASSIFICAÇÃO BOTÂNICA</i>	8
2.2 MADEIRA COMO MATERIAL CONSTRUTIVO SUSTENTÁVEL	9
2.2.1 <i>APLICAÇÕES DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL</i>	11
2.3 DEFEITOS DA MADEIRA.....	13
2.3.1 <i>DEFEITOS NATURAIS</i>	13
2.3.2 <i>DEFEITOS DE PROCESSAMENTO</i>	15
2.4 DESEMPENHO FRENTE AO FOGO.....	17
CAPÍTULO 3: COMPORTAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA	19
3.1 AÇÃO TÉRMICA.....	19
3.1.1 <i>MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR</i>	20
3.1.2 <i>CURVAS DE INCÊNDIO NOMINAL</i>	23
3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS	25
3.2.1 <i>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO</i>	25
3.2.2 <i>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO</i>	27

3.2.3 RESISTÊNCIA AO CORTE.....	28
3.2.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	29
3.2.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	31
3.2.6 COEFICIENTE DE POISSON.....	33
3.2.7 MÓDULO DE RIGIDEZ AO CORTE.....	34
3.2.8 DUREZA.....	35
3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS.....	35
3.3.1 TEOR DE HUMIDADE.....	36
3.3.2 DENSIDADE.....	36
3.3.3 VARIABILIDADE DIMENSIONAL.....	38
3.3.4 DURABILIDADE.....	38
3.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	39
3.4.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	39
3.4.2 CALOR ESPECÍFICO.....	40
3.4.3 COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA.....	41
3.4.4 TAXA DE CARBONIZAÇÃO.....	43
3.4.5 COEFICIENTE DE EMISSIVIDADE.....	44
3.5 CRITÉRIOS DE ROTURA.....	44
3.5.1 CRITÉRIO DE HILL.....	45
3.5.2 CRITÉRIO DE TSAI-HILL.....	47
3.5.3 CRITÉRIO DE TSAI-WU.....	47
3.6 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO SEGUNDO OS MÉTODOS SIMPLIFICADOS DO EUROCÓDIGO 1995-1-2.....	47
3.6.1 MÉTODO DA SECÇÃO REDUZIDA.....	47
3.6.2 MÉTODO DA REDUÇÃO DAS PROPRIEDADES.....	49
3.7 DETERMINAÇÃO DA TENSÃO MÁXIMA DE FLEXÃO.....	49
3.7.1 REGIME ELÁSTICO.....	51
3.7.2 REGIME PLÁSTICO.....	51
CAPÍTULO 4: DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO.....	53
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	53
4.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	54
4.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL.....	56
CAPÍTULO 5: RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÕES.....	61
5.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO TESTE EXPERIMENTAL.....	61
5.1.1 COMPARAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL.....	63
5.1.2 COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL E ANALÍTICA.....	66
5.2 SIMULAÇÃO MECÂNICA A TEMPERATURA CONSTANTE.....	67
5.2.1 SIMULAÇÃO MECÂNICA PARA A VIGA DE SECÇÃO TRANSVERSAL MENOR À TEMPERATURA CONSTANTE.....	68

5.2.2 SIMULAÇÃO MECÂNICA PARA A VIGA DE SECÇÃO TRANSVERSAL MAIOR À TEMPERATURA CONSTANTE	75
5.3 SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA DE SECÇÕES EXPOSTAS À CURVA DE INCÊNDIO ISO834...83	
5.3.1 SIMULAÇÃO TÉRMICA EM REGIME TRANSIENTE PARA AS VIGAS DE SECÇÃO TRANSVERSAL MENOR E MAIOR.....	85
5.3.2 SIMULAÇÃO MECÂNICA ACOPLADA À EXPOSIÇÃO TÉRMICA TRANSIENTE PARA A VIGA DE SECÇÃO TRANSVERSAL MENOR.....	90
5.3.3 SIMULAÇÃO MECÂNICA ACOPLADA À EXPOSIÇÃO TÉRMICA TRANSIENTE PARA A VIGA DE SECÇÃO TRANSVERSAL MAIOR.....	93
5.3.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS COM O MÉTODO DA SECÇÃO REDUZIDA SEGUNDO O EUROCÓDIGO 1995-1-2	97
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	101
6.1 CONCLUSÕES GERAIS	101
6.2 TRABALHOS FUTUROS.....	102
REFERÊNCIAS.....	104
ANEXOS	108

Lista de Figuras

Figura 1 –Eixos principais da madeira em relação a orientação das fibras, [1] adaptado.	5
Figura 2 – Anéis de crescimento em um elemento de madeira, fonte autoral.	6
Figura 3 – Distinção entre cerne e alborno (esq.), [17]. Componentes de uma secção de tronco (dir.), [17]	6
Figura 4 – Ilustração esquemática de um difusor acústico e sua aplicação, [30].	11
Figura 5 – Cobertura do Pavilhão Atlântico, Lisboa, (esq.), [33] / Metropol Parasol, Sevilha, (dir.), [32].	12
Figura 6 - Ponte construída no ano de 1333 em Lucerna, Suíça, [34].	12
Figura 7 – Peça em madeira com nó morto, fonte autoral.	13
Figura 8 – Desvio da Inclinação do Fio, [16].	14
Figura 9 – Lenhos de Reação, [36].	14
Figura 10 – Tronco com rachaduras em forma de anel (esq.), [35]. Madeira processada com surgimento de fendas (dir.), fonte autoral.	15
Figura 11 – Diferentes tipos de empeno, [38].	16
Figura 12 – Descaio e presença de casca do toro na peça de madeira, [2].	16
Figura 13 - Viga carbonizada, [3].	17
Figura 14 - Vigas em aço e madeira após incêndio, [41].	18
Figura 15 – Camada carbonizada em peça de madeira, [15].	19
Figura 16 – Sobreposição das curvas nominais de incêndio, [44].	24
Figura 17 – Compressão paralela às fibras (esq.) e perpendicular as fibras (dir.), [20].	26
Figura 18 – Variação da resistência à compressão paralela ao grão em função da temperatura segundo o comparativo realizado por [47], adaptado.	26
Figura 19 – Tração paralela às fibras (esq.) e perpendicular as fibras (dir.), [20].	27

Figura 20 – Variação da resistência à tração paralela ao grão em função da temperatura, [47], adaptado.	28
Figura 21 – Corte paralelo às fibras (esq.) e transversal às fibras (dir.), [48].	28
Figura 22 – Fator de redução para resistência paralela ao grão de madeiras macias.	29
Figura 23 – Flexão de três pontos, [20]	30
Figura 24 – Rotura por tração na peça submetida a flexão estática, [5].	30
Figura 25 – Variação do módulo de elasticidade da madeira com a temperatura, [47].	32
Figura 26 – Efeito da temperatura sobre o módulo de elasticidade paralela ao grão em madeiras macias, [9].	32
Figura 27 – Retração nos eixos da madeira, [40].	38
Figura 28 – Redução da secção transversal da viga carbonizada, [9].	48
Figura 29 – Representação do ensaio de flexão em três pontos (esq.) e ensaio de flexão em quatro pontos (dir.).....	50
Figura 30 – Geometria e localização dos nós no elemento SOLID 185, [61].	54
Figura 31 – Malha gerada para a viga de geometria 65x70x1330 mm.	61
Figura 32 – Condições de contorno da análise mecânica para a viga 65x70x1330mm, A, D e E são restrições de deslocamento, B e C são os pontos de aplicação da carga.....	62
Figura 33 – Gráfico Força aplicada x Deslocamento a meio vão para os ensaios experimentais e simulação numérica.	64
Figura 34 – Gráfico Tensão instalada x Deslocamento a meio vão para os ensaios experimentais e simulação numérica.	64
Figura 35 – Gráfico Tensão instalada x Deslocamento a meio vão obtidos nos ensaios experimentais e analiticamente.	67
Figura 36 – Malha gerada para a viga de geometria 75x150x6000 mm.	68
Figura 37 – Condições de contorno da análise mecânica para a viga 75x150x6000 mm, A, B e C são restrições de deslocamento, D é o ponto de aplicação da carga.	69
Figura 38 – Gráfico Força aplicada x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 75x150x6000 mm a 20 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C.	71
Figura 39 – Gráfico Momento instalado x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 75x150x6000 mm a 20 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C.	71
Figura 40 – Gráfico Tensão normal de flexão x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 75x150x6000 mm a 20 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C.	72

Figura 41 – Relação entre momentos resistentes para temperatura constantes, viga 75x150x6000 mm.	73
Figura 42 – Malha gerada para a secção transversal da viga 250x300x6000 mm.	75
Figura 43 – Condições de contorno da análise mecânica para a viga 250x300x6000 mm, A, B e C são restrições de deslocamento, D é o ponto de aplicação da carga.....	76
Figura 44 – Gráfico Força aplicada x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 250x300x6000 mm a 20 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C.....	78
Figura 45 – Gráfico Momento instalado x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 250x300x6000 mm a 20 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C.	78
Figura 46 – Gráfico Tensão normal de flexão x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 250x300x6000 mm a 20 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C.....	79
Figura 47 – Relação entre momentos resistentes para temperatura constantes, viga 250x300x6000 mm.	81
Figura 48 – Malha gerada para a secção transversal de ¼ da viga 75x150x6000 mm.....	84
Figura 49 – Malha gerada para a secção transversal de ¼ da viga 75x150x6000 mm.....	85
Figura 50 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 75x150x6000 mm para intervalos de exposição ao fogo de 5 em 5 minutos.....	86
Figura 51 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 250x300x6000 mm para intervalos de exposição ao fogo de 10 em 10 minutos.....	86
Figura 52 – Comparação entre os campos de temperaturas obtidos para 30 minutos de exposição em secções transversais diferentes, 75x150 mm (esq.) e 250x300 mm (dir.).....	87
Figura 53 – Arredondamento dos cantos segundo o Eurocódigo 1995-1-2 (esq.), [9], e segundo o Ansys aos 30 minutos de exposição da viga de secção 75x150 mm (dir.).....	87
Figura 54 – Local de aplicação da carga e restrição de deslocamento e rotação no apoio para ¼ da viga 75x150x6000 mm.	90
Figura 55 – Gráfico Força aplicada x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 75x150x6000 mm sob 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos de exposição.....	91
Figura 56 – Gráfico Momento instalado x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 75x150x6000 mm sob 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos de exposição.	92
Figura 57 – Gráfico Tensão normal de flexão x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 75x150x6000 mm sob 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos de exposição.	92
Figura 58 Local de aplicação da carga e restrição de deslocamento e rotação no apoio para ¼ da viga 250x300x6000 mm.	94
Figura 59 – Gráfico Força aplicada x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 250x300x6000 mm sob 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos de exposição.....	95

Figura 60 – Gráfico Momento instalado x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 250x300x6000 mm sob 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos de exposição.	95
Figura 61 – Gráfico Tensão normal de flexão x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 250x300x6000 mm sob 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos de exposição.	96
Figura 62 – Relação entre momentos resistentes para tempos de exposição fixos, viga 75x150x6000 mm.	99
Figura 63 – Relação entre momentos resistentes para tempos de exposição fixos, viga 75x150x6000 mm.	100
Figura 64 – Representação do ensaio experimental simulado numericamente, [2].	108
Figura 65 – Curva tensão deformação elástica perfeitamente plástica introduzida no modelo numérico, <i>Ansys</i>	109
Figura 66 – Comparação entre a curva tensão-deformação verdadeira e curva tensão-deformação de engenharia, [62] adaptado.	109
Figura 67 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 20 °C, viga 75x150x6000 mm.	111
Figura 68 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 100 °C, viga 75x150x6000 mm.	111
Figura 69 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 150 °C, viga 75x150x6000 mm.	112
Figura 70 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 200 °C, viga 75x150x6000 mm.	112
Figura 71 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 250 °C, viga 75x150x6000 mm.	113
Figura 72 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 300 °C, viga 75x150x6000 mm.	113
Figura 73 – Vista frontal do deslocamento direcional em y a 20 °C, viga 75x150x6000 mm.	114
Figura 74 – Vista isométrica do deslocamento total a 20 °C, viga 75x150x6000 mm.	114
Figura 75 – Vista isométrica da tensão normal de flexão a 20 °C, viga 75x150x6000 mm. .	114
Figura 76 - Vista frontal do deslocamento direcional em y a 100 °C, viga 75x150x6000 mm.	115
Figura 77 - Vista isométrica do deslocamento total a 100 °C, viga 75x150x6000 mm.	115
Figura 78 - Vista isométrica da tensão normal de flexão a 100 °C, viga 75x150x6000 mm.	115

Figura 79 - Vista frontal do deslocamento direcional em y a 150 °C, viga 75x150x6000 mm.	116
Figura 80 - Vista isométrica do deslocamento total a 150 °C, viga 75x150x6000 mm.	116
Figura 81 - Vista isométrica da tensão normal de flexão a 150 °C, viga 75x150x6000 mm.	116
Figura 82 - Vista frontal do deslocamento direcional em y a 200 °C, viga 75x150x6000 mm.	117
Figura 83 - Vista isométrica do deslocamento total a 200 °C, viga 75x150x6000 mm.	117
Figura 84 - Vista isométrica da tensão normal de flexão a 200 °C, viga 75x150x6000 mm.	117
Figura 85 - Vista frontal do deslocamento direcional em y a 250 °C, viga 75x150x6000 mm.	118
Figura 86 - Vista isométrica do deslocamento total a 250 °C, viga 75x150x6000 mm.	118
Figura 87 - Vista isométrica da tensão normal de flexão a 250 °C, viga 75x150x6000 mm.	118
Figura 88 - Vista frontal do deslocamento direcional em y a 300 °C, viga 75x150x6000 mm.	119
Figura 89 - Vista isométrica do deslocamento total a 300 °C, viga 75x150x6000 mm.	119
Figura 90 - Vista isométrica da tensão normal de flexão a 300 °C, viga 75x150x6000 mm.	119
Figura 91 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 20 °C, viga 250x300x6000 mm.	120
Figura 92 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 100 °C, viga 250x300x6000 mm.	120
Figura 93 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 150 °C, viga 250x300x6000 mm.	121
Figura 94 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 200 °C, viga 250x300x6000 mm.	121
Figura 95 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 250 °C, viga 250x300x6000 mm.	122
Figura 96 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 300 °C, viga 250x300x6000 mm.	122
Figura 97 – Vista frontal do deslocamento direcional em y a 20 °C, viga 250x300x6000 mm.	123
Figura 98 – Vista isométrica do deslocamento total a 20 °C, viga 250x300x6000 mm.	123
Figura 99 – Vista isométrica da tensão normal de flexão a 20 °C, viga 250x300x6000 mm.	123

Figura 100 – Vista frontal do deslocamento direcional em y a 100 °C, viga 250x300x6000 mm.	124
Figura 101 – Vista isométrica do deslocamento total a 100 °C, viga 250x300x6000 mm. ...	124
Figura 102 – Vista isométrica da tensão normal de flexão a 100 °C, viga 250x300x6000 mm.	124
Figura 103 – Vista frontal do deslocamento direcional em y a 150 °C, viga 250x300x6000 mm.	125
Figura 104 – Vista isométrica do deslocamento total a 150 °C, viga 250x300x6000 mm. ...	125
Figura 105 – Vista isométrica da tensão normal de flexão a 150 °C, viga 250x300x6000 mm.	125
Figura 106 – Vista frontal do deslocamento direcional em y a 200 °C, viga 250x300x6000 mm.	126
Figura 107 – Vista isométrica do deslocamento total a 200 °C, viga 250x300x6000 mm. ...	126
Figura 108 – Vista isométrica da tensão normal de flexão a 200 °C, viga 250x300x6000 mm.	126
Figura 109 – Vista frontal do deslocamento direcional em y a 250 °C, viga 250x300x6000 mm.	127
Figura 110 – Vista isométrica do deslocamento total a 250 °C, viga 250x300x6000 mm. ...	127
Figura 111 – Vista isométrica da tensão normal de flexão a 250 °C, viga 250x300x6000 mm.	127
Figura 112 – Vista frontal do deslocamento direcional em y a 300 °C, viga 250x300x6000 mm.	128
Figura 113 – Vista isométrica do deslocamento total a 300 °C, viga 250x300x6000 mm. ...	128
Figura 114 – Vista isométrica da tensão normal de flexão a 300 °C, viga 250x300x6000 mm.	128
Figura 115 - Vista do interior da viga dividida longitudinalmente segundo o plano de simetria yz, deslocamento fixo segundo x – viga 75x150x6000 mm.	129
Figura 116 – Vista do interior da viga dividida longitudinalmente segundo o plano de simetria yz, deslocamento fixo segundo x – viga 250x300x6000 mm.	129
Figura 117 – Vista do interior da viga particionada a meio vão segundo o plano de simetria xy, deslocamento fixo segundo z e rotação nula entorno de y e z – viga 75x150x6000 mm.	130
Figura 118 - Vista do interior da viga particionada a meio vão segundo o plano de simetria xy, deslocamento fixo segundo z e rotação nula entorno de y e z – viga 75x150x6000 mm.	130

Figura 119 – Campo de temperaturas para 5 minutos de exposição, ¼ da secção 75x150 mm.	131
Figura 120 – Campo de temperaturas para 10 minutos de exposição, ¼ da secção 75x150 mm.	131
Figura 121 – Campo de temperaturas para 15 minutos de exposição, ¼ da secção 75x150 mm.	132
Figura 122 – Campo de temperaturas para 20 minutos de exposição, ¼ da secção 75x150 mm.	132
Figura 123 – Campo de temperaturas para 25 minutos de exposição, ¼ da secção 75x150 mm.	133
Figura 124 – Campo de temperaturas para 30 minutos de exposição, ¼ da secção 75x150 mm.	133
Figura 125 – Campo de temperaturas para 10 minutos de exposição, ¼ da secção 250x300 mm.	134
Figura 126 – Campo de temperaturas para 20 minutos de exposição, ¼ da secção 250x300 mm.	134
Figura 127 – Campo de temperaturas para 30 minutos de exposição, ¼ da secção 250x300 mm.	135
Figura 128 – Campo de temperaturas para 40 minutos de exposição, ¼ da secção 250x300 mm.	135
Figura 129 – Campo de temperaturas para 50 minutos de exposição, ¼ da secção 250x300 mm.	136
Figura 130 – Campo de temperaturas para 60 minutos de exposição, ¼ da secção 250x300 mm.	136
Figura 131 – Caminho para medição dos dados de temperatura no interior da secção transversal 75x150 mm.....	137
Figura 132 – Caminho para medição dos dados de temperatura no interior da secção transversal 250x300 mm.....	137
Figura 133 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 75x150x6000 mm para 5 minutos de exposição.....	138
Figura 134 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 75x150x6000 mm para 10 minutos de exposição.....	138
Figura 135 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 75x150x6000 mm para 15 minutos de exposição.....	139

Figura 136 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 75x150x6000 mm para 20 minutos de exposição.....	139
Figura 137 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 75x150x6000 mm para 25 minutos de exposição.....	140
Figura 138 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 75x150x6000 mm para 30 minutos de exposição.....	140
Figura 139 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 250x300x6000 mm para 10 minutos de exposição.....	141
Figura 140 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 250x300x6000 mm para 20 minutos de exposição.....	141
Figura 141 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 250x300x6000 mm para 30 minutos de exposição.....	142
Figura 142 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 250x300x6000 mm para 40 minutos de exposição.....	142
Figura 143 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 250x300x6000 mm para 50 minutos de exposição.....	143
Figura 144 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 250x300x6000 mm para 60 minutos de exposição.....	143
Figura 145 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 5 minutos da viga 75x150x6000 mm.....	145
Figura 146 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 10 minutos da viga 75x150x6000 mm.....	145
Figura 147 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 15 minutos da viga 75x150x6000 mm.....	146
Figura 148 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 20 minutos da viga 75x150x6000 mm.....	146
Figura 149 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 25 minutos da viga 75x150x6000 mm.....	147
Figura 150 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 30 minutos da viga 75x150x6000 mm.....	147
Figura 151 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 10 minutos da viga 250x300x6000 mm.....	148
Figura 152 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 20 minutos da viga 250x300x6000 mm.....	148

Figura 153 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 30 minutos da viga 250x300x6000 mm. 149

Figura 154 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 40 minutos da viga 250x300x6000 mm. 149

Figura 155 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 50 minutos da viga 250x300x6000 mm. 150

Figura 156 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 60 minutos da viga 250x300x6000 mm. 150

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Consumo energético de alguns materiais construtivos, [26].....	10
Tabela 2 – Tensões resistentes a tração e compressão paralelos ao grão [MPa], [1].	27
Tabela 3 – Fator de redução $k\theta$ para resistência à tração, cisalhamento e compressão.	29
Tabela 4 – Relação entre os módulos de elasticidade para madeiras macias, [1]	31
Tabela 5 – Fator de redução $k\theta$ para o módulo de elasticidade a tração e compressão, [9]. ...	33
Tabela 6 – Coeficiente de Poisson para folhosas e resinosas com aproximadamente 12% de teor de humidade, [1].	34
Tabela 7 – Relação entre módulo de rigidez e módulo de elasticidade para madeiras macias, [1].	35
Tabela 8 – Fator de modificação da densidade para variação de temperatura, [9].	37
Tabela 9 - Condutividade térmica para madeira e a camada carbonizada, [9].	40
Tabela 10 – Condutividade térmica para materiais diversos, [5].	40
Tabela 11 – Calor específico da madeira macia para classe de serviço 1, [9].	41
Tabela 12 – Valores médios de calor específico para materiais diversos, [5].	41
Tabela 13 – Coeficiente de dilatação térmica da madeira, [47].	42
Tabela 14 – Taxas de carbonização β_0 e β_n para madeira macia, [9].	43
Tabela 15 - Emissividade para materiais diversos, [43].	44
Tabela 16 – Eixos e planos correspondentes aos subscritos de R_{ij} para o critério de Hill.	46
Tabela 17 – Fator de superfície, [9].	48
Tabela 18 – Dimensões das vigas em estudo.	54
Tabela 19 – Variação da máxima tensão de tração para altas temperaturas.	57
Tabela 20 - Variação da máxima tensão de compressão para altas temperaturas.	57

Tabela 21 - Variação da máxima tensão de cisalhamento para altas temperaturas.	58
Tabela 22 – Taxa de rendimento para a tração.	58
Tabela 23 – Taxa de rendimento para o cisalhamento.	58
Tabela 24 – Determinação do Módulo de Elasticidade tangencial e radial.	58
Tabela 25 – Variação do Módulo de Elasticidade à tração para altas temperaturas.	59
Tabela 26 – Determinação do Módulo de Rigidez.	59
Tabela 27 – Variação do Módulo de Rigidez à tração para altas temperaturas.	59
Tabela 28 – Coeficiente de Poisson constante para altas temperaturas.	59
Tabela 29 – Variação da densidade aparente para altas temperaturas.	60
Tabela 30 – Condição de apoio da viga 65x70x1330 mm.	62
Tabela 31 – Carregamento aplicado no ensaio de flexão de quatro pontos.	65
Tabela 32 – Tensão normal de flexão experimental e numérica.	66
Tabela 33 – Condição de apoio da viga 75x150x6000 mm.	69
Tabela 34 – Configuração da viga 75x150x6000 mm no limite elástico.	70
Tabela 35 – Resultados de carga aplicada e momento resistente segundo o Eurocódigo 5 e o Ansys, viga 75x150x6000mm.	74
Tabela 36 – Condição de apoio da viga 250x300x6000 mm.	76
Tabela 37 - Configuração da viga 250x300x6000 mm no limite elástico.	77
Tabela 38 – Resultados de carga aplicada e momento resistente segundo o Eurocódigo 5 e o Ansys, viga 250x300x6000 mm.	82
Tabela 39 – Comparação entre a profundidade de carbonização e a taxa de carbonização segundo o Eurocódigo e segundo análise numérica, para secções 75x150 mm e 250x300 mm.	88
Tabela 40 – Momento resistente determinado numericamente para os tempos de exposição da viga 75x150x6000 mm.	93
Tabela 41 – Momento resistente determinado numericamente para os tempos de exposição da viga 250x300x6000 mm.	97
Tabela 42 – Comparação entre os valores de momento resistente segundo o Eurocódigo e segundo análise numérica, para secções 75x150 mm e 250x300 mm.	98
Tabela 43 – Força máxima, tensão de flexão e deslocamento para o ensaio experimental, [2].	108

Tabela 44 – Resultados para força aplicada, momento instalado, deslocamento vertical a meio vão e tensão normal de flexão para a viga 65x70x1330 mm à temperatura ambiente. 110

Tabela 45 - Taxa de carbonização para 30 minutos de exposição à três frentes de fogo, [4]. 144

Tabela 46 – Aplicação do método da secção reduzida para a viga 75x150x6000 mm. 151

Tabela 47 – Aplicação do método da secção reduzida para a viga 250x300x6000 mm..... 151

Nomenclatura

Letras Latinas Minúsculas

b	Base ou menor dimensão da secção transversal	[mm]
c	Calor específico	[kJ/Kg.K]
d	Altura ou maior dimensão da secção transversal	[mm]
d_0	Espessura da camada de resistência zero	[mm]
d_{ef}	Profundidade efetiva de carbonização	[mm]
$d_{char,n}$	Profundidade da camada carbonizada	[mm]
f	Tensão de flexão instalada	[MPa]
$f_{d,fi}$	Resistência ao fogo	[MPa]
f_{20}	20% da resistência da madeira à temperatura ambiente	[MPa]
$f_{m,k}$	Valor característico da resistência à flexão	[MPa]
h_{net}	Fluxo de calor líquido na superfície exposta	[W/m ²]
$h_{net,c}$	Fluxo de calor líquido devido à convecção	[W/m ²]
$h_{net,r}$	Fluxo de calor líquido devido à radiação	[W/m ²]
k_{θ}	Fator de redução	-
k_0	Fator de superfície	-
k_{fi}	Coeficiente a depender do tipo de madeira	-
$k_{mod,fi}$	Fator de modificação para a madeira em situação de fogo	-
t	Tempo	[min] ou [s]
w	Deslocamento a meio vão na flexão	[mm]

Letras Latinas Maiúsculas

E_L	Módulo de elasticidade longitudinal	[MPa]
-------	-------------------------------------	-------

E_R	Módulo de elasticidade radial	[MPa]
E_T	Módulo de elasticidade tangencial	[MPa]
F	Carregamento aplicado	[kN]
F_{el}	Máxima força resistida no regime elástico	[kN]
F_{pl}	Máxima força resistida no regime plástico	[kN]
F_{max}	Carga de colapso	[kN]
G_{LR}	Módulo de rigidez no plano Longitudinal-Radial	[MPa]
G_{LT}	Módulo de rigidez no plano Longitudinal-Tangencial	[MPa]
G_{RT}	Módulo de rigidez no plano Radial-Tangencial	[MPa]
L	Comprimento ou dimensão longitudinal da viga	[mm]
M	Momento instalado	[kN.m]
$M_{Rd,0min}$	Momento resistente para 0 minutos de exposição	[kN.m]
$M_{Rd,20°C}$	Momento resistente a 20°C	[kN.m]
$M_{Rd,T}$	Momento resistente à temperatura T	[kN.m]
$M_{Rd,t}$	Momento resistente para o tempo de exposição t	[kN.m]
R_{ij}	Taxa de rendimento nas coordenadas ij	-
W_{el}	Módulo elástico da secção	[mm ³]
W_{pl}	Módulo plástico da secção	[mm ³]

Símbolos gregos

α	Coeficiente de dilatação térmico	[m/m/°C]
α_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² .K]
β_0	Taxa de carbonização para um lado de exposição ao fogo	[mm/min]
β_n	Taxa de carbonização considerando os efeitos do arredondamento	[mm/min]
	Fator parcial de segurança em situação de fogo	[W/m ² .K ⁴]
σ	Constante de Stephan Boltzmann	[W/m ² .K ⁴]
σ_i^y	Tensão de escoamento na direção indicada por i	[MPa]
σ_y	Tensão de escoamento isotrópica	[MPa]
ε	Emissividade	-
ε_m	Emissividade da superfície do elemento	-
ε_f	Emissividade do fogo	-
θ_g	Temperatura do gás que envolve o membro exposto	[°C]

θ_m	Temperatura da superfície do elemento exposto ao fogo	[°C]
θ_r	Temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio	[°C]
λ	Condutividade térmica	[W/m.K]
μ_{LR}	Coeficiente de Poisson no plano Longitudinal-Radial	-
μ_{LT}	Coeficiente de Poisson no plano Longitudinal-Tangencial	-
μ_{RL}	Coeficiente de Poisson no plano Radial-Longitudinal	-
μ_{RT}	Coeficiente de Poisson no plano Radial-Tangencial	-
μ_{TL}	Coeficiente de Poisson no plano Tangencial-Longitudinal	-
μ_{TR}	Coeficiente de Poisson no plano Tangencial-Radial	-
Φ	Fator de forma	-
ω	Teor de humidade	[%]

Capítulo 1: Introdução

Uma vez que o trabalho a ser desenvolvido é baseado em uma análise numérica, é fundamental que as propriedades e características do material tenham sido determinadas por estudos e ensaios previamente desenvolvidos. Os principais dados utilizados para a definição das propriedades ortotrópicas da madeira foram extraídos da literatura disponibilizada na décima edição de *Wood Handbook – Wood as Engineering Material*. As informações contidas no manual são resultado de muitas investigações científicas realizadas ao longo dos anos, com o intuito de servir como uma referência primária sobre o uso da madeira em variadas aplicações, fornecendo aos profissionais que aplicam o material, uma fonte de informações sobre várias propriedades da madeira, [1].

A dissertação de mestrado de Luiz Miguel Vilche Lopes, *Caracterização das Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira de Abeto de Douglas*, desenvolvida no Instituto Politécnico de Bragança – Portugal, além de contribuir com informações acerca da madeira, com ênfase ao seu caráter natural e a anisotropia do material, contribui também com a ficha técnica do Abeto de Douglas determinada com base em dados obtidos experimentalmente, [2].

O estudo desenvolvido por Ricardo Samuel Alberto Anastácio, *Especificações de Protecção ao Fogo para Estruturas de Madeira*, permitiu fazer considerações importantes acerca do comportamento térmico da madeira com destaque ao processo de carbonização do material, [3].

Pedro José Vieira Gouveia, em *Resistencia ao Fogo de Estruturas em Madeira com e sem Protecção*, ao realizar uma análise numérica em *Ansys* para vigas expostas ao fogo, forneceu resultados para a taxa de carbonização, importantes para fundamentar a comparação com os dados obtidos no presente estudo, [4].

Considerações importantes a serem adotadas ao longo da modelagem numérica do problema, foram retiradas da apostila *Propriedades da Madeira*, especialmente relacionadas com o ensaio de flexão estática e a rotura típica a ser provocada em uma situação laboratorial, assim como alguns conceitos das propriedades térmicas da madeira, [5].

A complexidade de se representar numericamente um material de origem natural e de propriedades ortotrópicas, inclui a determinação de um método de rotura a ser aplicado no software *Ansys Workbench*, para permitir simular a rotura do material. Vários critérios de rotura

são referenciados por autores afim de prever a força máxima de rotura em materiais compósitos, como por exemplo no artigo de Z.W. Guan e E.C. Zhu, em que o critério de Hill foi adotado para simular o comportamento elastoplástico anisotrópico em vigas de madeira com abertura, no qual se obteve boa correlação entre os resultados experimentais e as simulações, [6].

Por fim, ressalta-se que as principais Normas Europeias que regem este trabalho são o Eurocódigo 1 e 5, a EN 1991-1-2:2002 descreve as ações térmicas e mecânicas para o projeto estrutural de edificações expostas ao fogo. A EN1995-1-1:2004 é específica para projetos de estruturas de madeira, com ênfase nos requisitos de segurança, manutenção e durabilidade, enquanto a EN 1995-1-2:2004 descreve os princípios, requisitos e regras para o projeto estrutural de edifícios expostos ao fogo, [7]–[9].

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

Em termos globais, a construção civil representa um setor de alto consumo de recursos materiais e energéticos, tanto no processo construtivo, quanto ao longo da vida útil das edificações. A preocupação com o desenvolvimento sustentável do setor, assim como a escassez de recursos disponíveis, favorecem o desenvolvimento de pesquisas acerca da aplicação da madeira como uma alternativa para aliar sustentabilidade, eficiência e disponibilidade de material especialmente na União Europeia, [10].

Trata-se de um material de grande aplicabilidade no âmbito da construção civil, podendo abranger desde as pequenas até as grandes e pesadas estruturas em seu estado natural ou na forma de seus derivados. Ainda que se apresente como um material indiscutivelmente vantajoso, sob o ponto de vista ecológico e construtivo, as estruturas em madeira perderam espaço para obras de betão, aço e alvenaria, esse fator pode ser influenciado devido à falta de estudos aprofundados e incentivo acerca da correta aplicação do material, [11]–[13].

Entre diversas qualidades, por se tratar de um elemento natural, a madeira apresenta uma grande variabilidade de características mecânicas e físicas a depender das condições de crescimento da árvore, sua estrutura interna complexa e de caráter anisotrópico. Em vista disso, os estudos a serem realizados se mostram bastante específicos para cada espécie, condições do material e direção de análise, possibilitando uma ampla vertente de estudos acerca da madeira, [14], [15].

Frente à grande quantidade de variáveis que o estudo da madeira como material construtivo apresenta, uma boa solução para incentivar a pesquisa e contribuir para o

conhecimento de novas propriedades e comportamentos da madeira, é a utilização de simulações numéricas, que para além de garantirem agilidade e redução de custos com preparo de provetes e execução de ensaios específicos, também é uma solução adequada para análises termomecânicas.

Problemas de transferência de calor são complexos de serem estudados analiticamente e a realização de ensaios experimentais envolve altos custos para uma obtenção de resultados limitada, portanto, é comum que sejam realizados estudos numéricos buscando abranger diferentes condições de exposição ao calor, reduzindo despesas e tempo de ensaio.

1.2 OBJETIVOS PROPOSTOS

Inicialmente são apresentados conceitos importantes para compreender as características da madeira, sua aplicação como material construtivo de cunho sustentável, além de abordar os defeitos comuns ao material. O comportamento termomecânico da madeira é abordado para fundamentar o estudo numérico a ser desenvolvido.

Com base em informações encontradas na literatura, são determinadas as propriedades físicas, mecânicas e térmicas do material, além o modo de rotura adequado. Equações do calor previamente definidas e especificações das Normas Europeias também permitem que as simulações possuam maior representatividade.

Com o auxílio do *Ansys Workbench*, este trabalho visa desenvolver modelos numéricos para simular o comportamento de vigas de madeira sob temperaturas constantes e sob exposição ao fogo de modo a permitir que seja realizada uma análise da influência da temperatura sobre a variação da resistência do material.

Uma análise adicional foi realizada para a calibração do modelo numérico, que é a simulação de um ensaio realizado experimentalmente para uma viga do mesmo material investigado neste trabalho.

Serão determinadas as propriedades de resistência para vigas de madeira de duas geometrias diferentes, sob temperaturas constantes em toda a secção transversal de 20 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C. Além disso, baseada em uma exposição térmica de acordo com a curva ISO834, considerando a evolução da temperatura na secção da viga ao longo do tempo de exposição de 5 em 5 minutos até alcançar 30 minutos para a viga de geometria menor e de 10 em 10 minutos até os 60 minutos para a viga de geometria maior, será determinada também a espessura carbonizada na secção transversal e a taxa de carbonização.

1.3 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA TESE

O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução com alguns estudos relacionados com o tema deste trabalho, seguida do contexto e motivação para o desenvolvimento da pesquisa, além dos objetivos propostos e organização da tese.

No segundo capítulo a madeira é abordada desde as suas características macro e microscópicas assim como sua classificação botânica, aplicabilidade na construção civil, possíveis defeitos e o desempenho do material frente ao fogo.

O terceiro capítulo contempla uma análise focada no comportamento da madeira exposta a altas temperaturas, abordando ações térmicas, as propriedades mecânicas e físicas juntamente das suas respectivas variações em função da temperatura, as propriedades térmicas da madeira, os critérios de rotura, os métodos simplificados do Eurocódigo para a determinação da resistência ao fogo e a metodologia aplicada para o cálculo da tensão máxima de flexão.

No quarto capítulo é descrita a metodologia de cálculo adotada para a realização das simulações numéricas no *Ansys*, são feitas as considerações iniciais, descrição do método dos elementos finitos e forma como foi realizada a determinação das propriedades ortotrópicas da madeira estudada.

No quinto capítulo estão organizados os resultados discussões com base na análise numérica do ensaio experimental, comparando os dados obtidos numericamente, experimentalmente e analiticamente. Seguido dos valores de resistência obtidos para simulações à temperatura constante comparados com o esperado conforme a modelação do material para altas temperaturas. E por fim, as análises térmicas e mecânica acopladas forneceram valores para a resistência e profundidade de carbonização para as vigas expostas ao fogo. Este capítulo inclui as comparações realizadas através da aplicação do método simplificado do Eurocódigo 1995-1-2.

No sexto capítulo constam as conclusões obtidas ao longo da realização deste estudo, além das sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2: Estado da Arte

2.1 CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA

2.1.1 ESTRUTURA MACROSCÓPICA

Devido ao seu caráter natural e origem biológica, a madeira possui características próprias como a heterogeneidade e anisotropia, ou seja, afim de desempenhar diferentes funções enquanto ser vivo, as células que formam o material possuem diferentes tipos morfológicos (heterogeneidade), além de apresentar propriedades diferentes a depender do eixo analisado em relação a orientação de suas fibras, podendo ser longitudinal, radial ou tangencial (anisotropia), ver Figura 1, [16].

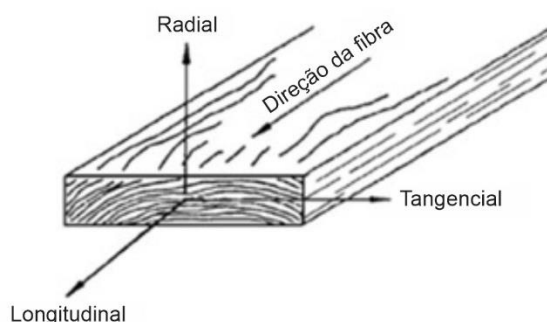


Figura 1 –Eixos principais da madeira em relação a orientação das fibras, [1] adaptado.

Como consequência do seu caráter anisotrópico, a madeira apresenta maior ou menor resistência depender do sentido de análise, de modo que o eixo longitudinal apresenta maior resistência se comparado aos eixos radial e tangencial, [2].

Enquanto ser vivo, a madeira desempenha funções como suprimento da planta em seiva bruta, estocagem de reserva e sustentação da mesma. A medida que cresce, a árvore forma anualmente camadas concêntricas ao redor do tronco, denominadas de anéis de crescimento, nas quais a camada mais clara corresponde ao lenho inicial ou primaveril, correspondente a estação do ano de crescimento intenso, e a camada de tonalidade mais escura é chamada de lenho tardio ou secundário, por se tratar de uma fase de crescimento lento, [17],[18], [19].

No entanto, a periodicidade de formação de anéis de crescimento varia conforme a espécie, idade e condições ambientais, de forma que pode ocorrer a formação de múltiplos anéis

em uma única estação, ou até mesmo anéis ausentes, por este motivo não se deve adotar o termo “anel de crescimento anual”, [18].



Figura 2 – Anéis de crescimento em um elemento de madeira, fonte autoral.

Tal como anéis de crescimento que podem ser vistos a olho nu na secção de uma peça de madeira, as duas principais componentes do lenho, o cerne e o alburno também são visivelmente distintas, sendo o cerne, localizado na porção central, de coloração mais escura e o alburno, posicionado na periferia da secção, próximo a casca do material e de coloração mais clara, conforme nota-se na Figura 3, [17].

Além do cerne e alburno, existem outros elementos da secção, como a casca e o câmbio, notados na Figura 3. A região do câmbio está localizada entre a casca e o alburno, e diferentemente das outras três componentes da secção, esta é visível apenas sob análise em microscópio, [17].



Figura 3 – Distinção entre cerne e alburno (esq.), [17]. Componentes de uma secção de tronco (dir.), [17]

Cada um dos componentes citados anteriormente apresenta diferentes funções para a árvore e conseqüentemente diferentes propriedades físicas e mecânicas devido à configuração microscópica dos tecidos, abordada a seguir neste capítulo.

O cerne ou lenho inativo corresponde a parte mais antiga do tronco sendo formado por células mortas que conferem a capacidade de suporte e estabilidade à árvore, devido à rigidez proporcionada especialmente pela lignina impregnada no material, garantindo melhores características à madeira, como por exemplo uma maior durabilidade natural e resistência à agentes xilófagos, [17]. [20].

O alburno contempla as células do lenho que ainda apresentam atividade metabólica, parte responsável pela condução de seiva, armazenamento e síntese de compostos bioquímicos, podendo ser denominado de lenho ativo. Ao longo da vida da árvore, o alburno sofre uma transição gradual para cerne, assim como a quantidade de alburno nas proximidades da casca também aumenta, [1], [17].

O câmbio, visível a nível microscópico, desempenha a função de produzir novos tecidos, sendo assim, responsável pelo crescimento transversal da árvore, [16].

Por fim, a casca da árvore que engloba o floema e o ritidoma, garante a proteção contra agentes agressivos, além de levar nutrientes das folhas até os locais de crescimento, [2], [17].

2.1.2 ESTRUTURA MICROSCÓPICA

A madeira é constituída por conjuntos de tecidos vivos, que por sua vez compreende um aglomerado de células posicionadas justapostas visíveis a nível microscópico. Cada célula que constitui os tecidos desempenha uma determinada função para garantir a sobrevivência da árvore, seja por meio do transporte de água e nutrientes, pela elaboração, armazenamento e transformação de substâncias, ou pela proteção, [21].

De maneira geral têm-se para cada função desempenhada uma célula ou tecido específico, podendo-se destacar os traqueídeos, células de parênquima, parede celular e raios lenhosos suas respectivas funções e disposições ao longo dos tecidos estão especificados a seguir.

Traqueídeos: células responsáveis pelo transporte de nutrientes e suporte da árvore, interiormente ocas para permitir a condução das raízes até as folhas, posicionadas no sentido longitudinal ao eixo do tronco, com aberturas denominadas de pontuações que garantem a troca de nutrientes com as células em diversas camadas, [20].

Células de parênquima: fundamentais para a sobrevivência das árvores por se tratar de uma reserva de substâncias nutritivas, garantindo o armazenamento, elaboração e transformação química dos nutrientes, a disposição das células se dá radial e longitudinalmente [20].

Parede celular: a rigidez e suporte da estrutura se deve a espessura desse componente, de modo que quanto mais espessa a parede celular, maior a sua capacidade de suporte, [20].

Raios lenhosos: fazem a ligação entre as células posicionadas longitudinalmente e transversalmente, permitindo que os nutrientes circulem entre as camadas e paredes celulares, quanto maior a quantidade de raios lenhosos existentes na madeira, menor é o fenômeno de retração sofrido por variação de umidade, [20], [22].

Como será abordado ainda neste capítulo, existem duas grandes classes botânicas de madeira, as resinosas e as folhosas que apresentam algumas distinções no nível microscópico, como por exemplo o nível de complexidade da estrutura microscópica para cada classe botânica, [22].

As resinosas podem apresentar canais secretores, responsáveis pela produção e transporte de resina, o que confere o nome à classe, canais estes presentes na forma de cavidades longitudinais cercadas por células de parênquima, que surgem de forma natural durante a formação do lenho, ou então como resposta a traumas que a árvore seja submetida, [21].

Uma característica marcante da microestrutura das folhosas é a existência de uma estrutura interna mais complexa, devido à sua evolução. Os vasos condutores e fibras lenhosas são os elementos presentes em maior quantidade, além da estrutura interna do lenho poder ser dividida em duas partes, sendo elas a parte interna e externa. Além disso, na microestrutura das folhosas verifica-se uma porosidade entre cada anel de crescimento, particularidade esta que pode levar à perda de capacidade resistente, [22], [23].

2.1.3 CLASSIFICAÇÃO BOTÂNICA

As árvores são divididas em duas classes amplas, sendo elas as Gimnospermas e Angiospermas, comumente designadas de coníferas e folhosas, respectivamente. A literatura estrangeira pode abordar essas classes botânicas através da nomenclatura “softwoods” e “hardwoods”, do inglês, madeira macia e madeira dura, esses nomes não significam necessariamente que as madeiras provenientes das coníferas são menos duras do que a madeira de folhosas, [17], [23].

Botanicamente as Gimnospermas, coníferas, softwoods ou ainda resinosas, apresentam folhas sempre verdes na forma de escamas ou agulhas, as árvores possuem de médio a grande porte e apresentam resistência para sobreviver em ambientes secos, são exemplo o pinheiro, o abeto e o cedro. Por sua vez, as Angiospermas, folhosas ou hardwoods, apresentam em sua grande maioria folhas largas que se desprendem nas estações de outono e inverno, com exceção

de regiões temperadas, com relação ao porte dessa classe botânica, se mostra bastante variável, abrangendo desde pequenas espécies até grandes árvores frutíferas, [1].

É importante ressaltar que existem cerca de 30.000 espécies de madeira conhecidas pelo mundo, incluindo as resinosas e folhosas, e que cada categoria abrange ainda centenas de espécies de interesse comercial, tanto para aproveitamento estrutural como matéria prima para trabalhos de carpintaria. As madeiras direcionadas para o uso estrutural podem ser aplicadas diretamente na forma de madeira maciça, com alto desempenho mecânico, ou ainda como alternativa para contornar a variabilidade das propriedades do material, há ainda a possibilidade do uso dos derivados estruturais, [16].

Além da grande variabilidade de espécies que interfere na estrutura e nas propriedades da madeira, as condições de crescimento a que a árvore é submetida também têm grande influência. Dessa forma, para que seja possível universalizar conceitos, desenvolveu-se a necessidade de estudar a madeira de modo a reunir informações sobre as espécies seguindo determinados métodos de classificação padronizados, [16].

O agrupamento das peças de madeira em classes de resistência permite o acesso rápido às propriedades mecânicas mais relevantes do material, de forma a facilitar a aplicação da madeira para diversos fins, especialmente o estrutural no âmbito da construção civil.

2.2 MADEIRA COMO MATERIAL CONSTRUTIVO SUSTENTÁVEL

Por sustentabilidade entende-se como a utilização racional do meio ambiente de modo a atender as gerações atuais preservando-o para que as gerações futuras possam usufruir dos recursos existentes. É importante ressaltar que o conceito de sustentabilidade envolve além dos aspectos ambientais, as questões econômicas, sociais e culturais, de modo a buscar um equilíbrio entre eles de maneira eficiente, [15].

A madeira é um material de cunho sustentável e ecológico, ainda assim costuma-se associar ao material situações negativas como desmatamento e perda de biodiversidade, entretanto a realidade é oposta, desde que seja feito um processo de gestão eficaz. As florestas quando exploradas de forma sustentável, garantem a preservação do dinamismo ecológico e a fixação de dióxido de carbono na forma de matéria prima para posterior utilização, [12], [24].

A madeira utilizada na construção apresenta-se como um material com potencial para a armazenagem de grandes quantidades de carbono por longos períodos de tempo, visto que o carbono é retido na estrutura celular da madeira em estado “dormente” até que passe por um

processo de queima ou biodegradação, processo este, que aliado a durabilidade das construções, faz com que esse material se torne uma boa alternativa para a racionalização ecológica das construções, pois ajuda a prevenir o aquecimento global, mantém a qualidade do ar e reduz o impacto ambiental. Deve-se incentivar, portanto, o uso da madeira visando gerar o aumento da indústria florestal sustentável, [12], [25].

Visto que a madeira é um material biodegradável, renovável e reciclável, faz com que ela se destaque em relação aos outros materiais de construção como betão, aço e alumínio, além de contar com um baixo consumo energético para sua produção e processamento, Tabela 1, [12], [26].

Tabela 1 – Consumo energético de alguns materiais construtivos, [26].

Material	kWh/kg	kWh/m³
Madeira serrada	0,7	300
Madeira laminada	2,4	1200
Cimento	1,4	1750
Concreto	0,3	700
Tijolo	0,8	13600
Aço	5,9	46000
Plástico PVC	18,0	24700
Alumínio	52,0	141500

Outro ponto positivo da madeira frente aos outros materiais está relacionado com a grande maioria dos elementos construtivos serem provenientes de fontes não renováveis, sob este aspecto, a possibilidade de reposição da madeira na natureza garante a efetiva renovação do material. Como por exemplo por meio da exploração da madeira em florestas plantadas e a exigência do cumprimento das políticas da indústria florestal, que entre outras, destaca-se a renovação das florestas por meio do plantio de duas árvores após o abatimento de uma, [12], [15].

O incentivo ao uso de materiais proveniente de fontes renováveis, tal como a reflorestação de madeira, é uma opção viável, sobretudo quando comparado com outras soluções como betão e aço, [11], [26].

Deve-se levar em consideração também a menor geração de resíduos, devido ao fato de a madeira apresentar a possibilidade de ser reciclada e reutilizada para novos fins. Conclui-se, portanto, que a madeira é uma matéria prima bastante apropriada para a construção associada ao baixo impacto ambiental, [11], [26].

2.2.1 APLICAÇÕES DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A madeira é empregada para fins de aproveitamento temporário ou a longo prazo, como por exemplo a aplicação em cofragens, cimbres, andaimes, esquadrias, estruturas de cobertura, forros, pisos e também para fins de acabamentos, [27].

Muitas vezes devido ao desconhecimento das propriedades da madeira e ao manuseio inadequado do material, acaba-se criando uma situação de extremo desperdício do material nos estaleiros. Como exemplo a madeira de uso temporário que após o seu aproveitamento durante a execução da obra, é descartada, gerando resíduos, [27], [28].

Trata-se de uma preocupação mundial, as questões da sustentabilidade e controle da geração de resíduos, visto que a construção civil, mesmo sendo uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento da sociedade, é também causadora de grandes impactos ambientais além de representar uma potencial geração de resíduos de construção e demolição, portanto é importante que seja feito o manuseio correto do material além do conhecimento da sua capacidade e propriedades, [29].

A existência de um projeto de corte que otimize o consumo de material no canteiro de obras para execução principalmente das cofragens é fundamental para a racionalização do uso da madeira, além de contribuir também para o aumento da produtividade e maior segurança durante a realização dos cortes nas peças, [28].

Acabamentos internos como revestimentos também são possíveis de serem executados em madeira, podendo ter finalidade apenas decorativa ou então de correção acústica, isolamento térmico, e execução de detalhes arquitetônicos. A exemplo dessa aplicação existem painéis acústicos confeccionadas em madeira especialmente aplicados em ambientes fechados como salas de conferência, de espetáculos e auditórios, conforme representado na Figura 4, [30], [31].

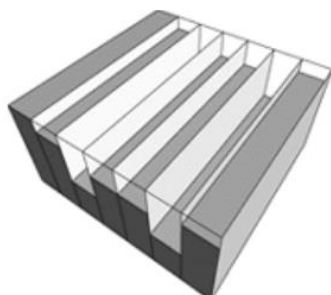


Figura 4 – Ilustração esquemática de um difusor acústico e sua aplicação, [30].

A madeira como material estrutural não se limita a construções residenciais, podendo abranger inclusive o campo de obras especiais, pois permite desenvolver soluções criativas, inovadoras, robustas e de alta qualidade, vencendo desafios arquitetônicos e estruturais, [32].

A exemplo de grandes obras estruturais em madeira e seus derivados, pode-se citar a primeira grande estrutura em madeira lamelada colada executada em Portugal, a cobertura do Pavilhão Atlântico em Lisboa. Também a obra construída em Sevilha, na praça de *La Encarnación*, o Metropol Parasol, reconhecida pela imprensa internacional como a maior estrutura de madeira do mundo, executada em madeira micro lamelada, ver Figura 5, [32].



Figura 5 – Cobertura do Pavilhão Atlântico, Lisboa, (esq.), [33] / Metropol Parasol, Sevilha, (dir.), [32].

Existe a possibilidade de se construir pontes em madeira, trata-se de uma solução antiga adotada para transpor barreiras naturais, a exemplo da aplicabilidade aliada a durabilidade do material, como por exemplo a ponte localizada na cidade de Lucerna, na Suíça, uma das pontes mais antigas da Europa que com o auxílio de medidas de reabilitação, encontra-se conservada desde o ano de sua construção, em 1333, ver Figura 6, [33].



Figura 6 - Ponte construída no ano de 1333 em Lucerna, Suíça, [34].

Destaca-se ainda que o edifício finalizado em março de 2020 em Brumunddal, na Noruega possui 18 andares e pouco mais de 85 metros de altura, recebendo o título de construção em madeira mais alta do mundo.

2.3 DEFEITOS DA MADEIRA

Todo e qualquer tipo de irregularidade na constituição da madeira que comprometa sua aplicação em geral, principalmente quanto à resposta às solicitações mecânicas e físicas é entendido como um defeito. A diversidade de defeitos encontrados na madeira é ampla, mas de maneira geral pode-se citar anomalias de origem natural, que ocorrem durante o crescimento da árvore, ou então ser resultado da realização de procedimentos de maneira inadequada durante a extração, corte, secagem e usinagem do material, [16], [35].

2.3.1 DEFEITOS NATURAIS

Os defeitos naturais são aqueles desenvolvidos durante a fase de crescimento da madeira enquanto árvore, quando é especialmente submetida a fenômenos biológicos e agentes externos. Englobam-se nesta categoria de defeitos os nós, bolsas de resina, casca inclusa, desvio da inclinação do fio e lenho de reação, [16].

Os nós além de comprometerem a resistência mecânica da madeira, dificultam o processamento das peças e desvalorizam o material afetado. Os nós formados pela base de um galho quando morre, é denominado de nó morto e o tecido entorno dele cresce sem nenhuma conexão, causando descontinuidade nos tecidos e eventualmente desprendimento do restante da peça durante a secagem, ver Figura 7, [35].



Figura 7 – Peça em madeira com nó morto, fonte autoral.

As bolsas de resina são defeitos de crescimento formados por cavidades no interior da madeira, onde está contida resina na fase líquida ou sólida, de forma a comprometer, além das características mecânicas, também o aspecto da superfície das peças obtidas, [16].

A casca inclusa tem origem no crescimento irregular do tronco da árvore, no qual ocorre a formação de uma casca no interior do lenho, situação que favorece o apodrecimento da madeira a longo prazo, [16].

Quanto ao desvio da inclinação do fio da madeira, notado na Figura 8, a origem está associada aos ventos dominantes aos quais a árvore foi submetida ao longo do seu desenvolvimento, e ainda podem ocorrer desvios durante o momento da serragem das peças, de forma a comprometer a resistência das peças, [16].

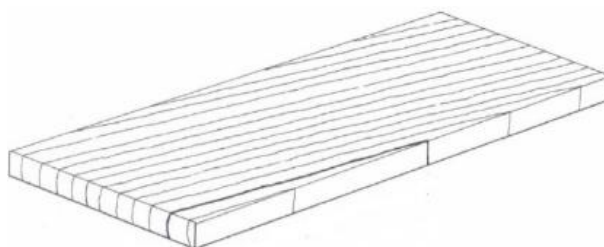


Figura 8 – Desvio da Inclinação do Fio, [16].

O lenho de reação nada mais é que um deslocamento na direção de crescimento natural do tronco da árvore, seja por ação do vento ou iluminação desigual, de forma a se desenvolverem os lenhos de compressão e de tração, conforme representado na Figura 9.

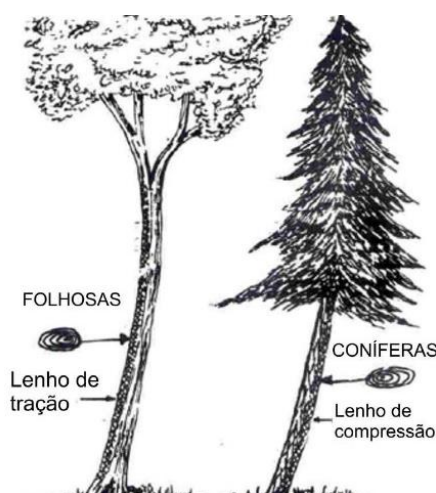


Figura 9 – Lenhos de Reação, [36].

Anomalia esta que provoca um comportamento desigual na madeira, comprometendo seu uso estrutural por favorecer a fissuração no lenho de compressão, além de dificultar a trabalhabilidade e variação na coloração do lenho de tração.

2.3.2 DEFEITOS DE PROCESSAMENTO

As rachaduras internas, são defeitos decorrentes do processo de secagem das peças de madeira e a formação se deve pela variação de humidade interna da peça, especialmente associada ao processo de retração, ou seja, quando o teor de humidade do material baixa a um nível inferior ao ponto de saturação das fibras, fenómeno este que se comporta de maneira anisotrópica, com diferentes intensidades a depender da direção do eixo em análise, [35].

Além das rachaduras internas que ocorrerem antes do corte e da secagem, as rachaduras em forma de anel, ver Figura 10, e em forma de arco são devido às tensões de crescimento, [35].

As fendas são defeitos ocasionados pelo surgimento de tensões frente ao fenómeno da retração do tecido lenhoso interior e exterior, tensões estas que são capazes de abrir a madeira no plano radial, reduzindo assim, a secção resistente da peça, comprometendo principalmente seu desempenho sob solicitações à compressão, uma vez que causa o afastamento das fibras, ver Figura 10, [16].



Figura 10 – Tronco com rachaduras em forma de anel (esq.), [35]. Madeira processada com surgimento de fendas (dir.), fonte autoral.

Empenamento é termo utilizado para se referir a variação no formato geométrico da madeira, seja por encurvamento, arqueamento, encanoamento ou torcimento. Este defeito pode ocorrer em relação ao eixo de menor ou maior inércia, denominando-se encurvamento e arqueamento respectivamente; o encanoamento, por sua vez, se verifica na secção transversal da peça, podendo ter configuração côncava ou convexa; por fim, o torcimento é definido como

uma combinação de empenamentos entorno de ambos os eixos, de maior e menor inércia, configurando a peça uma aparência de espiral. Diferentes tipos de empeno estão representados na Figura 11, [37].

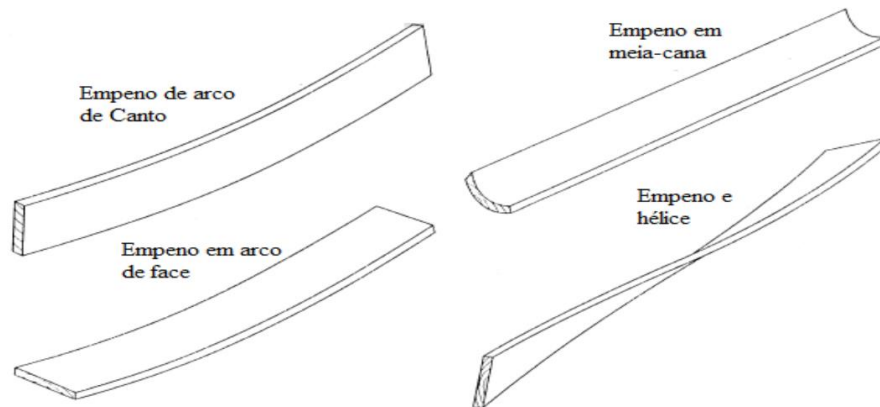


Figura 11 – Diferentes tipos de empeno, [38].

O descaio é resultado do processo de corte da madeira realizado de maneira inadequada, de forma que a superfície e a casca da madeira ficam presentes na peça mesmo após o processamento, dessa maneira compromete-se a durabilidade e a resistência da peça visto que a secção transversal apresenta-se reduzida e a presença da casca favorece ao ataque biológico e degradação da peça, defeito notado na Figura 12, [38].



Figura 12 – Presença de casca do toro na peça de madeira, [2].

A presença do lenho juvenil na peça de madeira configura a medula, comprometendo seu desempenho devido às características de resistência inferiores, seu surgimento está relacionado sobretudo a desdobros mal executados e implica na exclusão da madeira de uma classe de qualidade elevada, mesmo que a peça não possua outros defeitos, [38].

2.4 DESEMPENHO FRENTE AO FOGO

Vários parâmetros interferem no desempenho da madeira ao fogo como por exemplo, teor de humidade, composição química, geometria da peça, densidade, além das condicionantes externas como a intensidade da exposição ao calor e a distância entre as chamas e a superfície da madeira, [39].

A madeira quando submetida a um fluxo de calor, sofre decomposição, liberando gases combustíveis e provocando a formação de uma camada de carvão na superfície do material. Mesmo sendo um material combustível, a formação dessa camada carbonizada com características isolantes, permite que a porção interior de madeira mantenha-se a uma temperatura consideravelmente inferior a superfície exposta diretamente ao fogo, além de reduzir a taxa de propagação das chamas, contribuindo para que a estrutura suporte um maior tempo de exposição sem perder significativamente sua capacidade resistente, [33], [39].

A porção mais interna da secção da peça, chamada de secção útil ou secção residual, corresponde a porção do elemento que conserva suas propriedades físicas inalteradas, visto que é isolada da zona de combustão, pela camada carbonizada e por uma outra intermediária, a camada de pirolise, correspondente à parte do material que sofreu alteração pela temperatura, mas que não se encontra completamente destruída pelo fogo, [3].

Na Figura 13, observa-se uma viga de madeira exposta ao fogo durante 30 minutos, e é possível identificar a evolução do aumento da temperatura na secção transversal, com destaque para a formação da camada carbonizada, de pirólise e a porção intacta do material, [3]. Nota-se também, o fenómeno do arredondamento dos cantos, típico da madeira e considerado na determinação da profundidade de carbonização segundo o Eurocódigo 1995-1-2.

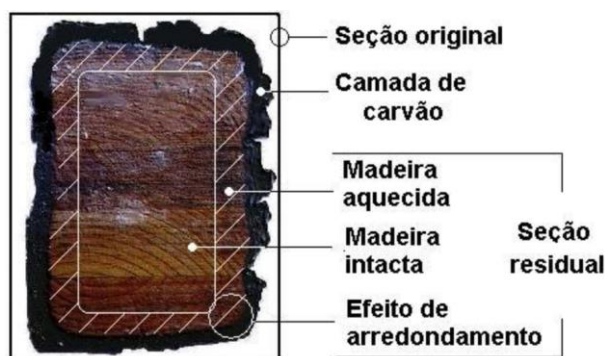


Figura 13 - Viga carbonizada, [3].

Ao tratarmos de elementos construtivos, um aspecto de muita importância no quesito segurança estrutural, é a resistência ao fogo, definida no Eurocódigo 1991-1-2 como sendo a capacidade de uma estrutura, parte dela, ou um membro, de cumprir suas funções exigidas para um determinado nível de carga e exposição ao fogo em um período de tempo especificado, sem a ocorrência do colapso da estrutura, [7].

Quando comparada aos materiais construtivos convencionais, a madeira se apresenta com uma excelente resistência ao fogo, uma vez que a perda da capacidade de suporte se dá apenas quando a secção resistente é completamente carbonizada, ao contrário de materiais que sofrem redução nas propriedades mecânicas ao longo do aumento da temperatura e levam a estrutura ao colapso, [3].

A Figura 14 apresenta perfis metálicos retorcidos devido à perda de resistência do aço frente a exposição a altas temperaturas, perfis estes, que encontram-se apoiados sobre uma viga de madeira, submetida à mesma situação de incêndio e que manteve resistência mecânica suficiente para suportar seu peso próprio, além dos esforços gerados pelo material apoiado sobre ela, [40], .



Figura 14 - Vigas em aço e madeira após incêndio, [41].

A madeira é um material vantajoso se comparado com o betão, aço e cerâmica, por se tratar de um isolante térmico, pois além do conforto térmico garantido às edificações, a baixa condutividade térmica do material, confere a ela um bom desempenho estrutural ao dificultar a elevação da temperatura em zonas próximas as que se encontra o fogo, além de evitar a dilatação excessiva da estrutura. Esta propriedade se deve ao fato das trocas de calor entre a madeira e o ambiente serem relativamente lentas quando comparadas aos materiais convencionais, [3], [12],

Capítulo 3: Comportamento Térmico da Madeira

3.1 AÇÃO TÉRMICA

Para melhor compreender a ação do fogo sobre a madeira, e por sua vez, a forma como a variação de temperatura interfere nas propriedades térmicas, de resistência e de rigidez do material, é importante compreender inicialmente o conceito de fogo. Trata-se da oxidação de um material combustível que envolve a liberação de calor, luz e componentes como CO_2 e H_2O . A depender da forma como a reação ocorre, o fogo pode resultar em situações de incêndio causando danos materiais, [3].

A madeira quando submetida ao contato com o fogo, decompõe-se em gases que alimentam a chama e contribuem para o aquecimento das partes não atingidas diretamente por ele, este processo envolve o fenômeno da combustão, reação exotérmica em que um agente combustível e um comburente submetidos a uma energia de ativação, promovem a liberação de calor. A madeira configura-se como o material combustível, enquanto o oxigênio, na maioria das vezes, é o comburente responsável por alimentar a reação, [3].

É importante ressaltar que a combustão superficial do material forma uma camada carbonizada, a qual retarda o fluxo de calor para o interior da secção, sob essa camada, existe ainda uma estreita camada cujas propriedades mecânicas foram afetadas pelo calor, seguida de um núcleo que se mantém frio devido à baixa condutividade térmica do material, conservando após o tempo de exposição ao fogo, uma parte significativa da sua capacidade resistente original, ver Figura 15, [3], [42].



Figura 15 – Camada carbonizada em peça de madeira, [15].

De modo a garantir o correto desempenho de uma estrutura submetida a ação do fogo, o Eurocódigo 1995-1-2 descreve os princípios, requisitos e regras para formulação do projeto estrutural de construções em madeira expostas ao fogo, afim de reduzir os riscos oferecidos em caso de incêndio por meio da determinação e cumprimento dos requisitos de segurança e projeto. Priorizando, assim, a proteção ao indivíduo, à sociedade, às propriedades vizinhas e, quando possível, às edificações diretamente expostas, em situações de incêndio, [9].

São especificados no Eurocódigo 1991-1-2 algumas considerações a serem feitas durante a análise do projeto estrutural de incêndio, estabelecendo a determinação das ações atuantes sobre estruturas com exposição ao fogo. Ressaltando a variação do comportamento mecânico, conforme a influência das ações térmicas e seus efeitos sobre as propriedades do material, [7].

Ainda no Eurocódigo 1995-1-2, são abordados métodos para quantificar a interferência da exposição ao fogo para peças de madeira. A determinação da resistência dos elementos estruturais pode ser realizada pelo método da secção transversal reduzida, no qual é determinada a profundidade de carbonização, resultando na secção final efetiva pós incêndio. E também pela redução das propriedades mecânicas do material em função da geometria da secção transversal, [9].

3.1.1 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Para a realização de um estudo termomecânico da madeira submetida a uma variação de temperatura, é importante compreender o fenômeno de transferência de calor, ou seja, as formas que a energia térmica é passada de um meio com temperatura mais alta, para um meio de temperatura inferior, até que ambos se encontrem em equilíbrio, [43].

Convecção, radiação e condução são os três mecanismos básicos compreendidos no fenômeno de transferência de calor, a semelhança entre eles é a existência de um gradiente de temperatura. Para a condução e convecção há a necessidade de um meio material para que ocorra a troca de energia térmica, já no caso da radiação, a transferência de calor se dá por meio de ondas eletromagnéticas, podendo ocorrer na ausência de material, inclusive no vácuo, [43].

A Equação (1), aplicada na determinação da quantidade de calor transferida entre corpos, definida conforme o Eurocódigo 1991-1-2 para um fluxo de calor que incide na superfície de um elemento, pode ser aplicada tanto para superfícies do lado diretamente exposto ao calor, quanto para o lado não exposto, variando os valores dos coeficientes de transferência de calor por convecção conforme adequado a cada situação de exposição.

$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (1)$$

Onde:

h_{net} - Fluxo de calor líquido na superfície exposta [W/m²];

$h_{net,c}$ - Fluxo de calor líquido devido à convecção [W/m²];

$h_{net,r}$ - Fluxo de calor líquido devido à radiação [W/m²].

Fluxo de calor líquido deve ser entendido como sendo a energia definitivamente absorvida pelos membros, por unidade de tempo e área de superfície, de acordo com o Eurocódigo 1991-1-2, [7].

O fenômeno da transferência de calor por convecção, compreendido em uma das parcelas do fluxo líquido de calor de uma superfície ($h_{net,c}$), envolve a troca de energia térmica na interface entre uma superfície sólida e um fluido, sendo ele líquido ou gasoso, e ocorre devido à movimentação do fluido ao redor da superfície, podendo ser uma movimentação gerada por uma força externa, ocasionando, assim, uma convecção forçada, ou então o próprio gradiente de temperatura do fluido gera uma variação na sua densidade, de forma a ocorrer a convecção natural, [44]

O fenômeno da transferência de calor pode compreender mais de um mecanismo simultaneamente, de forma que, junto com a troca de energia por convecção, ocorra juntamente a condução, ou seja, além da movimentação do fluido, que quanto maior, mais rápido será a taxa de transferência de calor por convecção, há também, na área de contato entre superfície e o fluido, o fenômeno da condução, especialmente em um líquido ou gás sem qualquer movimento, em que a troca de calor se dá unicamente por condução.

O Eurocódigo 1991-1-2 define a parcela do fluxo líquido de calor convectivo pela expressão indicada na Equação (2).

$$h_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2)$$

Onde:

$h_{net,c}$ - Fluxo de calor líquido devido à convecção [W/m²];

α_c - Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m².K];

θ_g - Temperatura do gás que envolve o membro exposto [°C];

θ_m - Temperatura da superfície do elemento exposto ao fogo [°C].

Os valores a serem adotados para o coeficiente de transferência de calor variam entre $\alpha_c = 4$ [W/m².K] para uma análise do lado não exposto ao fogo, $\alpha_c = 9$ [W/m².K] para análises em que os efeitos da transferência de calor por radiação são considerados, $\alpha_c = 25$ [W/m².K] segundo a curva de incêndio ISO834, ou $\alpha_c = 50$ [W/m².K] segundo a curva de incêndio para hidrocarbonetos, [7].

O fenômeno da transferência de calor por radiação, correspondente à segunda parcela do fluxo líquido de calor de uma superfície ($h_{net,r}$), envolve uma emissão contínua de energia sob a forma de radiação, englobando todo o espectro desde a infravermelha, visível e ultravioleta, propagando-se em todas as direções através do espaço, e não requer, obrigatoriamente, um meio intermediário de propagação, [3].

A componente do fluxo de calor por radiação segundo o Eurocódigo 1991-1-2 é determinada pela Equação (3).

$$h_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3)$$

Onde:

$h_{net,r}$ - Fluxo de calor líquido devido à radiação [W/m²];

Φ - Fator de forma;

ε_m - Emissividade da superfície do elemento;

ε_f - Emissividade do fogo;

σ - Constante de Stephan Boltzmann [=5,67.10⁻⁸ W/m².K⁴];

θ_r - Temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio [°C];

θ_m - Temperatura da superfície do elemento exposto ao fogo [°C].

O Eurocódigo 1991-1-2 fornece algumas notas importantes na determinação das variáveis acima, define que o valor da emissividade fogo a ser considerada é igual a 1, e que o fator de forma, quando não especificado, pode ser considerado igual a 1. A emissividade para a madeira é igual a 0,8.

O terceiro mecanismo de transferência de calor a ser abordado, é o fenômeno de transferência de calor por condução, que assim como a convecção, depende da existência de um meio para se propagar, podendo ocorrer em meio sólido, líquido ou gasoso. A troca de energia por condução é feita entre moléculas com diferentes níveis de energia térmica, realizando a transferência de calor das parcelas mais energizadas para o meio em contato e

menos energizado, por meio da interação das partículas, mas sem haver movimentação de matéria entre elas, [44].

Quanto maior o gradiente de temperatura e menor a espessura da camada de transferência de energia, mais alta será a taxa de condução de calor, propriedade representada pela Lei de Fourier, representada pela Equação (4), [44].

$$h_{cond} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (4)$$

Onde:

h_{cond} - Fluxo de calor líquido devido à condução [W/m²];

λ - Condutividade térmica [W/m.K];

$\frac{dT}{dx}$ - Gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor [K/m].

O valor da condutividade térmica é uma característica própria do material e sabendo que as propriedades da madeira se alteram com a variação de temperatura, o valor da condutividade térmica também varia, conforme as indicações do Eurocódigo 1995-1-2, conforme apresentado no capítulo 3.4 através da Tabela 9, [9].

3.1.2 CURVAS DE INCÊNDIO NOMINAL

As curvas de incêndio nominal devem ser entendidas como a relação temperatura-tempo representada por gráficos que expressam a temperatura no compartimento em chamas ao longo do desenvolvimento do tempo. Podem ser adotadas para a classificação ou verificação da resistência ao fogo, sem tomar como base modelos de incêndio e parâmetros físicos específicos, como seria feito em uma análise paramétrica.

O Eurocódigo 1991-1-2 define três curvas nominais de incêndio, sendo elas a curva de incêndio padrão ISO834, a curva de incêndio para elementos exteriores e a curva de incêndio de hidrocarbonetos, representadas na Figura 16 de maneira sobreposta para fins comparativos, [7], [44].

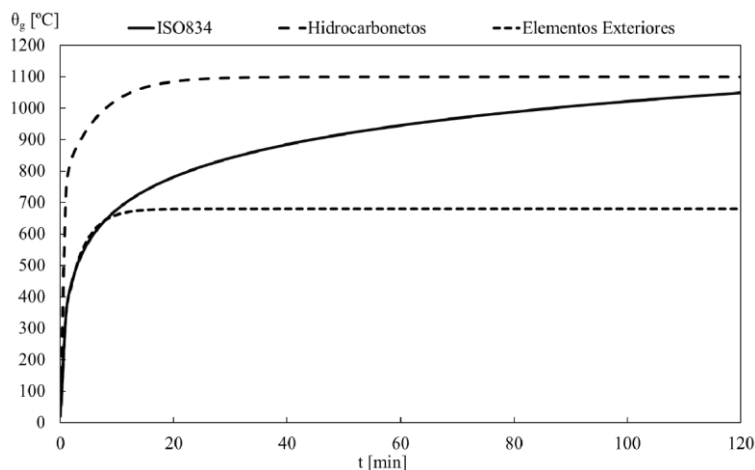


Figura 16 – Sobreposição das curvas de incêndio nominal, [44].

A curva padrão ISO834 representa um modelo de incêndio totalmente desenvolvido em um compartimento, a curva para elementos exteriores, como o próprio nome sugere, destina-se ao exterior das paredes externas de separação podendo ser expostas ao fogo de diferentes partes da fachada, por fim, a curva de fogo de hidrocarbonetos representa os efeitos de um incêndio de materiais compostos quimicamente por átomos de carbono e hidrogênio, tais como petróleo, gás natural, óleo mineral, plásticos, ceras, solventes e óleos derivados, [7], [45].

Neste trabalho, o desenvolvimento da temperatura ao longo do tempo será considerado de acordo com a curva de incêndio padrão ISO834, estabelecida pela norma americana ASTM E119 fornece especificações em relação a ação do fogo sobre os materiais e procura facilitar o estudo dos materiais submetidos a altas temperaturas, com base em modelos matemáticos e curvas típicas do desenvolvimento de um incêndio. A curva de incêndio padrão ISO834 é definida pela Equação (5) e representação gráfica demonstrada na Figura 16.

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10} (8 \cdot t + 1) \quad (5)$$

Onde:

θ_g - Temperatura dos gases no compartimento em chamas [°C];

t - Tempo em minutos.

Relacionando temperatura e tempo, a curva de incêndio padrão apresenta um modelo idealizado para aplicação em análises experimentais, neste modelo, independente de variáveis como carga de incêndio, propriedades térmicas dos materiais, entre outros, a temperatura sofre um aumento gradual conforme a passagem do tempo, [15].

3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Sob o ponto de vista da aplicabilidade da madeira como elemento estrutural, a caracterização de suas propriedades mecânicas é de extremo interesse para que se possa escolher a espécie mais adequada para determinados esforços submetidos e solicitações mecânicas. Garantindo a competitividade da madeira frente aos outros materiais construtivos, uma vez que o material apresenta uma variabilidade importante e a caracterização mecânica favorece o melhor aproveitamento de suas propriedades, [46].

Ressalta-se também, a necessidade de conhecer o comportamento do material frente à variação térmica, especialmente quanto à capacidade de suportar esforços, portanto, serão apresentadas a seguir as propriedades da madeira e a forma como são influenciadas pelo aumento de temperatura.

3.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão de um elemento de madeira é medida através da aplicação de uma carga na direção paralela ou perpendicular das fibras da madeira até que seja determinada a tensão de rotura. Na direção paralela às fibras a madeira atinge valores elevados de resistência, característica relevante para a utilização em pilares, ver Figura 17, [20].

Esta propriedade está diretamente relacionada com o módulo de elasticidade da madeira, uma vez que os módulos de elasticidade longitudinal, radial e transversal são obtidos através de ensaios de compressão. Para um baixo valor de resistência à compressão, verifica-se também um módulo de elasticidade reduzido, esta relação é explicada pelo fenómeno da encurvadura, ou seja, desalinhamento das fibras, que compromete a transmissão das cargas aplicadas, [2], [20].

Na direção perpendicular à fibra, a madeira apresenta baixos valores de resistência à compressão, uma vez que a quantidade de fibras nesta direção é inferior além do baixo travamento entre elas, ou seja, quando submetida a esforços perpendiculares ao grão, é comum que ocorra o esmagamento das fibras da madeira, comprometendo seu desempenho, [20].

Uma explicação é que enquanto ser vivo, a árvore é submetida essencialmente a esforços na direção da fibra, uma vez que o desenvolvimento de resistência ocorre de acordo com as solicitações a que é submetida ao longo da vida. Devido ao baixo desempenho mecânico, não é explorado o uso de elementos estruturais neste sentido de aplicação de carga, [20].

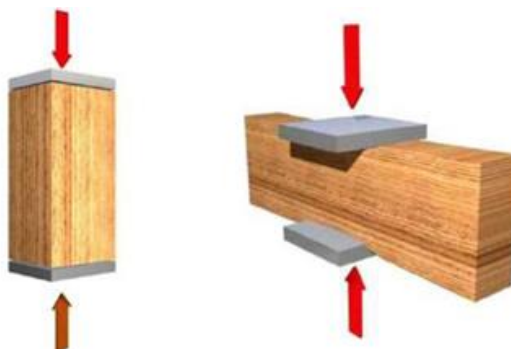


Figura 17 – Compressão paralela às fibras (esq.) e perpendicular as fibras (dir.), [20].

Uma análise térmica baseada no Eurocódigo 1995-1-2, permite concluir que a resistência à compressão para madeira na direção paralela ao grão reduz-se linearmente com o aumento da temperatura, de forma mais acentuada até os 100°C aproximadamente, como se nota através da inclinação da reta no gráfico da Figura 22. A norma ainda especifica que para a compressão perpendicular ao grão, pode ser adotado o mesmo fator de redução aplicado para a direção paralela, [9].

Conforme os dados coletados na revisão bibliográfica [47], a perda de resistência à compressão em relação a uma dada temperatura se dá, na maioria dos casos estudados, linearmente conforme o gráfico apresentado na Figura 18, exceto os resultados encontrado por Thomas, que apresenta redução de resistência apenas após os 200°C, quando se inicia uma redução acelerada até alcançar a perda total de resistência.

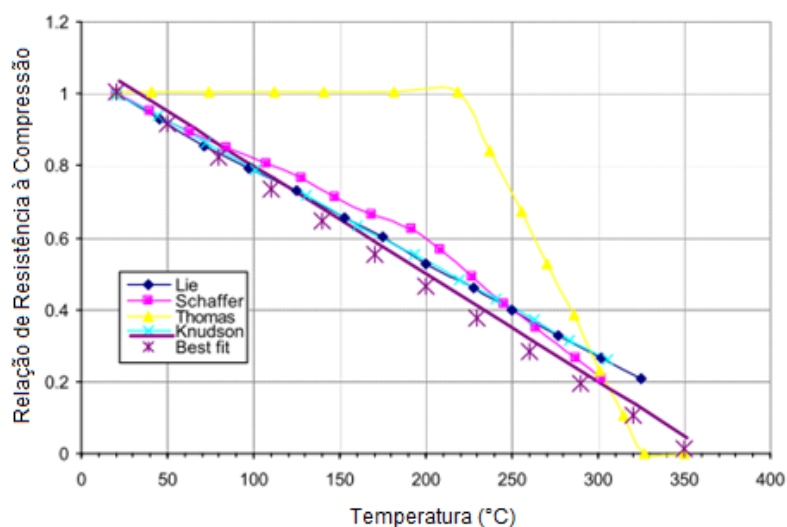


Figura 18 – Variação da resistência à compressão paralela ao grão em função da temperatura segundo o comparativo realizado por [47], adaptado.

3.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Visto que a estrutura da madeira está orientada para resistir a esforços na direção paralela às fibras, a aplicação de carga nesta direção alcança valores até três vezes superiores aos encontrados no ensaio de compressão axial demonstrado na Tabela 2, [16], [20].

Tabela 2 – Tensões resistentes a tração e compressão paralelos ao grão [MPa], [1].

Espécie	Compressão	Tração
Madeiras duras		
Álamo amarelo	38,2	109,6
Álamo de bálsamo	27,7	51,0
Faia americana	50,3	86,2
Madeiras macias		
Cedro vermelho	31,4	45,5
Abeto de Douglas	43,0	107,6
Larício	52,5	111,7

O aumento da resistência à esforços de tração comparados aos de compressão se deve ao fato de a tração provocar na peça de madeira uma maior aderência e coesão entre as fibras, favorecendo seu comportamento de modo a admitir uma aplicação maior de cargas. Propriedade importante para a utilização do material em tirantes e pendurais de asnas, [16], [20].

São obtidos valores muito baixos de resistência para a aplicação de esforço na direção perpendicular às fibras, em consequência da baixa aderência longitudinalmente. O estudo desse parâmetro é importante uma vez que a madeira é submetida a esse esforço em situações de arcos e vigas curvas, mesmo que seja aconselhável evitar a criação de esforços nessa direção, visto que esforços de tração de pequena importância podem levar ao colapso da estrutura, ver Figura 19, [16], [20].

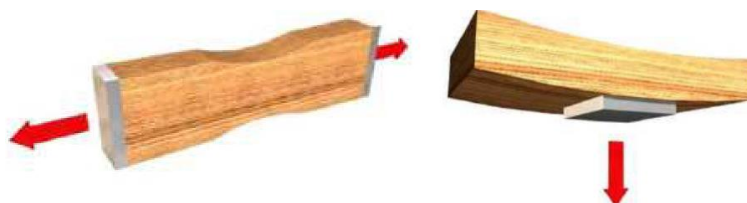


Figura 19 – Tração paralela às fibras (esq.) e perpendicular as fibras (dir.), [20].

Segundo o Eurocódigo 1995-1-2, a redução da resistência à tração de uma peça submetida ao aumento de temperatura ocorre de forma linear, conforme indicado no gráfico da Figura 22, [9].

O gráfico da Figura 20 apresenta uma revisão bibliográfica para a perda de resistência à tração da madeira paralela ao grão com relação ao acréscimo de temperatura. Observa-se um comportamento próximo ao esperado pela norma, exceto para os resultados de Thomas, que mostra uma redução mais lenta até 100°C seguida de uma taxa de diminuição ligeiramente mais acelerada até os 350°C, situação perceptível, [47].

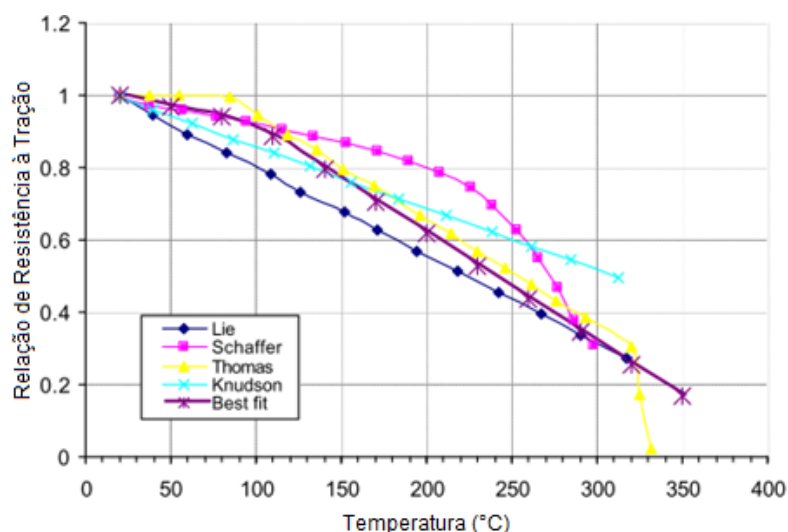


Figura 20 – Variação da resistência à tração paralela ao grão em função da temperatura, [47], adaptado.

3.2.3 RESISTÊNCIA AO CORTE

Na resistência ao corte, também denominada de resistência ao cisalhamento, as peças de madeira são submetidas à atuação de duas forças em sentidos contrários, podendo gerar tensões normais, oblíquas e paralela. No sentido de aplicação transversal, a Figura 21 mostra o esforço de corte paralelo e transversal às fibras, [16].

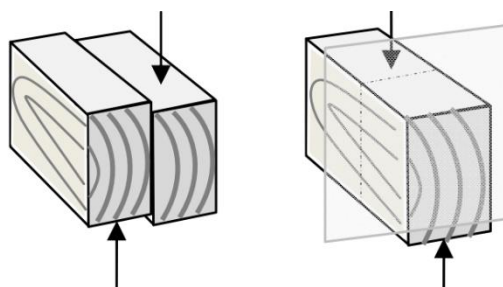


Figura 21 – Corte paralelo às fibras (esq.) e transversal às fibras (dir.), [48].

Os principais ensaios em que o fenômeno do corte paralelo ao grão é responsável por um grande número de fraturas na madeira são os de flexão e os de compressão axial. As tensões de corte podem surgir devido às tensões de compressão ou tração em sentidos opostos, ou então no mesmo sentido com diferentes intensidades, [48].

A resistência à compressão e à tração sofrem interferência com a variação térmica. O acréscimo de temperatura resulta na perda de resistência ao corte da madeira, de modo que o fator de redução para o cisalhamento apresenta um valor inferior ao fator de redução para a tração e superior ao fator de redução para a compressão. Conforme representado no gráfico da Figura 22, utilizado para obter o fator de redução k_{θ} aplicado para madeiras macias, [9].

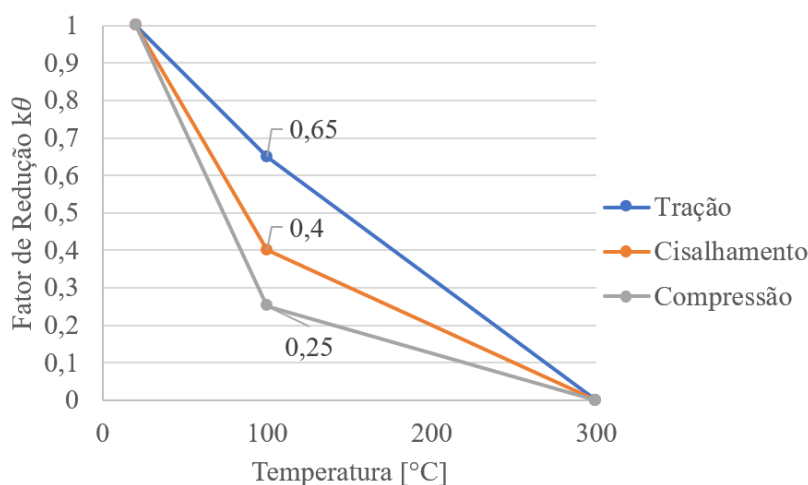


Figura 22 – Fator de redução para resistência paralela ao grão de madeiras macias.

Do gráfico indicado na Figura 22, obtém-se os valores para o fator de redução da resistência da madeira para compressão, tração e cisalhamento conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3 – Fator de redução k_{θ} para resistência à tração, cisalhamento e compressão.

Temperatura [°C]	Tração	Cisalhamento	Compressão
20	1	1	1
100	0,65	0,4	0,25
300	0	0	0

3.2.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

A flexão é um fenômeno complexo, pois envolve os fenômenos de tração, compressão e corte simultaneamente, e está presente em diversas aplicações estruturais como por exemplo em coberturas, vigas, pontes, entre outros. A situação de aplicação da carga pode ser diversa:

cargas uniformemente distribuídas, uma ou mais cargas pontuais ao longo do vão, ou até mesmo combinações com outros esforços, [48].

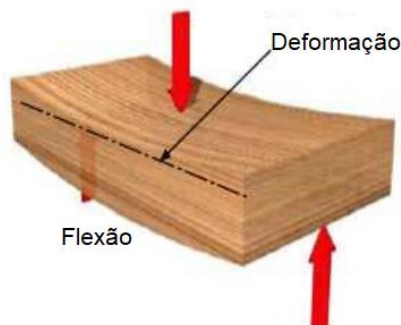


Figura 23 – Flexão de três pontos, [20]

Quando a peça de madeira é submetida a um ensaio de flexão estática em três pontos, em que o corpo de prova repousa sobre dois apoios e é aplicada uma carga na metade do seu comprimento, ver Figura 23, surgem principalmente esforços de tração nas fibras inferiores e compressão nas superiores, ambos na direção paralela às fibras, eixo de maior resistência do material, além do fenómeno de cisalhamento que surge entre os planos que estão sob tração e compressão. Uma vez que a sollicitação de esforços ocorre na direção paralela às fibras, resulta em valores elevados de resistência à flexão, comportamento especialmente verificados em vigas, [2], [20].

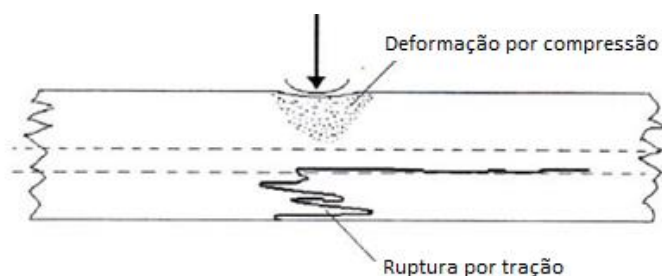


Figura 24 – Ruptura por tração na peça submetida a flexão estática, [5].

É importante ressaltar que a ruptura típica provocada no corpo de prova submetido a flexão se dá no lado oposto a aplicação da carga, ou seja, na região tracionada da peça, normalmente apresentando uma rachadura longa acompanhando o eixo neutro da peça, ver Figura 24. A porção submetida à compressão apresenta somente um amassamento devido à deformação plástica sofrida, [5].

3.2.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade é a capacidade que os materiais apresentam quando submetidos a uma determinada carga, de retornar a sua configuração inicial após ter sido retirada a carga que originou a deformação. Trata-se da máxima tensão suportada de modo que não ocorram deformações permanentes, e quanto maior o módulo de elasticidade, maior a resistência do material à deformação, [20].

Devido à anisotropia da madeira, diferentes valores para o módulo de elasticidade podem ser obtidos, a depender da direção das fibras a que é aplicada a carga, sendo eles E_T , E_R e E_L correspondente aos eixos tangencial, radial e longitudinal respectivamente. Varia também conforme o esforço, podendo ser de tração, compressão ou flexão, [20].

A Tabela 4 apresenta para algumas espécies de madeira, os valores para os módulos de elasticidade segundo os eixos radial e tangencial em relação ao módulo de elasticidade longitudinal. Na literatura o valor mais comum de ser encontrado é para o módulo de elasticidade longitudinal, [1].

Tabela 4 – Relação entre os módulos de elasticidade para madeiras macias, [1]

Espécie	E_T/E_L	E_R/E_L
Cedro Branco	0,081	0,183
Cedro Vermelho	0,055	0,081
Abeto de Douglas	0,05	0,068
Hemlock	0,031	0,058
Larício	0,065	0,079

Conhecidos os valores das razões E_T/E_L e E_R/E_L , conclui-se que acontece uma importante redução dessa propriedade nos eixos radial e tangencial, de modo que na direção paralela às fibras, o módulo de elasticidade para resinosas varia entre 7000 MPa e 16000 MPa, enquanto que na direção perpendicular, essa propriedade pode se apresentar cerca de 30 vezes inferior, variando ente 230 MPa a 530 MPa. Para as folhosas os valores se alteram para de 10000 MPa a 20000 MPa na direção paralela às fibras e 640 MPa a 1330 MPa na direção perpendicular às fibras, [20], [25].

Em comparação com outros materiais, o módulo de elasticidade da madeira se mostra inferior ao do aço e betão, por exemplo, mas considerando a densidade em relação ao módulo de elasticidade, a madeira se apresenta como um material de desempenho próximo ao do aço, [20].

Segundo alguns investigadores, a redução do módulo de elasticidade para a madeira é dada pelo gráfico da Figura 25, onde nota-se no geral, uma perda lenta desse parâmetro até os 200°C aproximadamente, e em seguida passa por uma queda mais acentuada, apenas para Thomas os resultados se alteram, onde a perda mais rápida do módulo de elasticidade ocorre entre 50°C e 125°C aproximadamente, e mantém-se praticamente constante, [47].

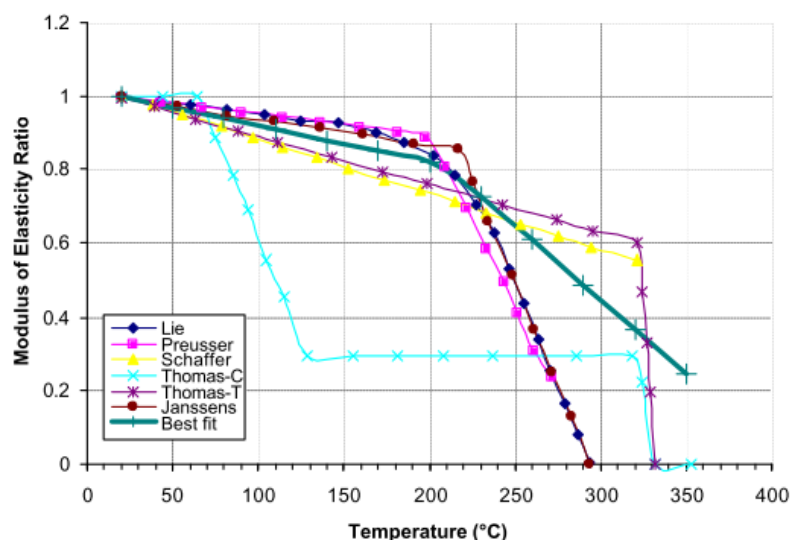


Figura 25 – Variação do módulo de elasticidade da madeira com a temperatura, [47].

Exposta a altas temperaturas, a variação do módulo de elasticidade paralelo ao grão de madeiras macias em geral apresenta uma redução rápida até 100°C tanto para esforços de compressão como de tração, e passa a sofrer uma redução mais lenta a partir dessa temperatura, conforme o gráfico da Figura 26, presente no Eurocódigo 1995-1-2, [9].

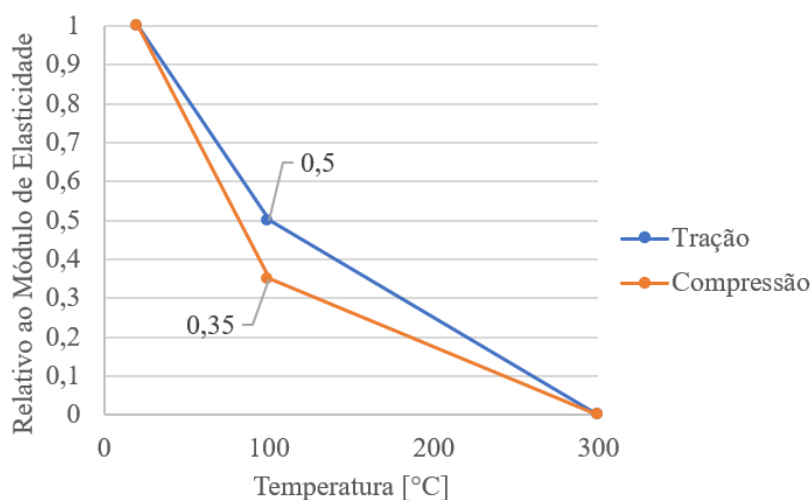


Figura 26 – Efeito da temperatura sobre o módulo de elasticidade paralela ao grão em madeiras macias, [9].

Na Tabela 5 constam os valores recomendados pelo Eurocódigo 1995-1-2, para o fator de redução (k_{θ}) do módulo de elasticidade para a madeira submetida a esforços de tração e compressão com base na variação de temperatura, [9].

Tabela 5 – Fator de redução k_{θ} para o módulo de elasticidade a tração e compressão, [9].

Temperatura [°C]	Tração	Compressão
20	1	1
100	0,5	0,35
300	0	0

3.2.6 COEFICIENTE DE POISSON

Sob aplicação de uma carga axial ao corpo de madeira, observa-se uma deformação paralela a aplicação e outra deformação perpendicular, de modo que existe uma proporcionalidade entre ambas as deformações. A razão entre essas deformações é denominado de coeficiente de poisson, [1].

Esta propriedade da madeira refere-se a uma constante elástica obtida através da razão entre a deformações de um elemento sob aplicação de uma carga. Trata-se de um coeficiente de obtenção complexa, devido ao comportamento ortotrópico da madeira, de modo que varia conforme a direção das fibras e a da aplicação da carga, [2].

A nomenclatura do coeficiente é feita seguindo uma ordem, a primeira letra subscrita refere-se a direção de aplicação da carga e a segunda letra corresponde a direção da deformação lateral, configurando-se da seguinte maneira μ_{LT} , μ_{TL} , μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{TR} , μ_{RT} , onde “L” é longitudinal, “T” tangencial e “R” radial, [2].

Alguns valores para coeficiente de Poisson estão indicados na Tabela 6, tanto para espécies de folhosas quanto para resinosas, é importante alertar que μ_{RL} e μ_{TL} são proporções muito pequenas, logo a determinação se dá com menor precisão que as demais, visto a pequena resistência da madeira a aplicação de tensões na direção normal à fibra, [1].

Tabela 6 – Coeficiente de Poisson para folhosas e resinosas com aproximadamente 12% de teor de humidade, [1].

Espécie	μ_{LR}	μ_{LT}	μ_{RT}	μ_{TR}	μ_{RL}	μ_{TL}
Madeiras duras						
Freixo branco	0,371	0,44	0,684	0,36	0,059	0,051
Álamo tremedor	0,489	0,374	-	0,496	0,054	0,022
Álamo amarelo	0,318	0,392	0,703	0,329	0,03	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
Madeiras macias						
Cedro branco	0,338	0,326	0,411	0,356	-	-
Cedro vermelho	0,337	0,34	0,458	0,345	-	-
Abeto de Douglas	0,292	0,449	0,39	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	-	-

O coeficiente de Poisson, para madeiras é considerado constante frente ao aumento de temperatura, dessa forma, o Eurocódigo 1995-1-2 não define fatores de correção a serem aplicados para essa propriedade para projetos de exposição ao fogo.

3.2.7 MÓDULO DE RIGIDEZ AO CORTE

Trata-se de propriedade elástica que a madeira apresenta. O módulo de rigidez pode ser chamado de módulo de cisalhamento, por se tratar da resistência à deflexão de uma peça de madeira quando submetida a tensões de cisalhamento. Esta propriedade é determinada por planos, sendo eles LR , LT e RT , ou seja, G_{LR} é o módulo de rigidez determinado para a tensão de cisalhamento que surge no plano longitudinal e radial, o mesmo se aplica aos demais planos, [1]

A determinação dos valores de G_{LR} , G_{LT} e G_{RT} pode ser realizada por meio da relação apresentada na Tabela 7 que correlaciona a rigidez das espécies, ao módulo de elasticidade para cada uma delas.

Tabela 7 – Relação entre módulo de rigidez e módulo de elasticidade para madeiras macias, [1].

Espécie	G_{LR}/E_L	G_{LT}/E_L	G_{RT}/E_L
Cedro Branco	0,21	0,187	0,015
Cedro Vermelho	0,087	0,086	0,005
Abeto de Douglas	0,064	0,078	0,007
Hemlock	0,038	0,032	0,003
Larício	0,063	0,069	0,007

A variação do módulo de rigidez em função do aumento da temperatura se dá pelos mesmos fatores de redução fornecidos pelo Eurocódigo 1995-1-2 para o módulo de elasticidade fornecidos na Tabela 5. Uma vez que ambas as propriedades elásticas da madeira se relacionam por meio de uma razão.

3.2.8 DUREZA

A dureza é diretamente relacionada com a densidade do material, de modo que os altos valores de dureza obtidos pelo ensaio Janka, estão associados a valores de densidade elevados. O chamado ensaio Janka consiste em um método padronizado para obtenção da força necessária para que uma esfera de 1 centímetro de diâmetro penetre na superfície da madeira, [2], [49].

Em termos de dureza, a madeira é geralmente referida como branda, medianamente dura e dura, em ordem crescente de valores para dureza do material, [2], [50].

O Eurocódigo 1995-1-2 não define nenhuma relação direta entre a dureza da madeira e a variação de temperatura. Entretanto, a dureza de Janka possui uma relação direta com a densidade da madeira, e a densidade é uma propriedade afetada pela variação de temperatura, conforme apresentado pela Tabela 8, da seção 3.3.2, [49].

3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS

O conhecimento das propriedades físicas da madeira representa grande importância, para qualquer que seja a sua aplicação, estrutural ou não, uma vez que interfere diretamente no desempenho e na resistência do material. As propriedades físicas que interferem no comportamento da madeira são variadas, tais como teor de humidade, densidade, variabilidade dimensional e durabilidade, [40].

3.3.1 TEOR DE HUMIDADE

Trata-se de uma propriedade física da madeira que relaciona o peso de água contido no interior do material e seu peso completamente seco, expresso em percentagem. A determinação do teor de humidade pode ser realizada por métodos variados, podendo ser considerado o método por pesagens como o mais usual, e o método com o auxílio de aparelhos elétricos, por sua vez mais prático e rápido, [5].

A água pode estar contida na madeira recém cortada em diferentes formas, de maneira simplificada, a água livre recebe essa nomenclatura uma vez que se encontra “livre” no interior da célula, sem ligações químicas com o material e sem influenciar significativamente nas propriedades mecânicas da madeira. Por sua vez, a água impregnada presente na parede celular da madeira, está quimicamente vinculada ao material e influencia grandemente na resistência das peças, [15].

Uma vez cortada, a árvore inicia um processo de perda rápida da água livre para então começar um processo lento de equilíbrio da sua humidade interna com a do ambiente em que está exposta, este equilíbrio envolve a retirada de água impregnada. O processo de secagem envolve uma série de cuidados para garantir a estabilidade dimensional das peças e também para evitar o surgimento de defeitos e o fenômeno da retração, [27], [40].

Juntamente com a perda de humidade da madeira, ocorre também um ganho de estabilidade dimensional e o aumento de sua resistência mecânica, isso quando o processo for realizado corretamente e mantendo-se os devidos cuidados para obtenção das peças de madeira seca, [27].

É importante considerar que o comportamento higroscópico da madeira, ou seja, a capacidade de absorver água do ambiente em que está inserida, característica que explica a necessidade de manter o material sob condições de clima constante afim de alcançar um teor de humidade de equilíbrio. Ressalta-se também a influência dos fatores temperatura, humidade relativa, pressão do ar, composição química e estrutural na estabilidade da madeira, [15].

A forma como a perda de humidade da madeira é influenciada pela variação de temperatura está inserida no Eurocódigo 1995-1-2 dentro do conceito de densidade aparente e básica, apresentada a seguir.

3.3.2 DENSIDADE

A densidade é grandemente influenciada pela variação no teor de humidade da madeira, uma vez que de maneira geral, relaciona massa e volume, dois parâmetros que variam durante

a secagem da madeira. Existem duas definições para densidade da madeira, sendo elas a densidade básica e a densidade aparente, [40]

A densidade básica refere-se a massa específica do material, ou seja, a relação entre a massa seca por volume saturado, e por sua vez, densidade aparente é obtida com base em um padrão de referência para o teor de humidade, ou seja, relaciona a massa e o volume do material quando a madeira se encontra sob 12% de humidade, [40].

A densidade básica, não depende do teor de humidade, uma vez que é obtida pela razão entre a massa seca da madeira e o volume da madeira saturada. Ao contrário dos valores para densidade aparente, correspondente a um determinado teor de humidade, de maneira simplificada considera-se densidade aparente a razão entre a massa da madeira a 12% de humidade e o volume da madeira a 12% de humidade, [40].

Conforme as recomendações do Eurocódigo 1995-1-2, para a obtenção da densidade aparente com base na densidade básica e teor de humidade da madeira, utiliza-se a relação indicada na Tabela 8.

Tabela 8 – Fator de modificação da densidade para variação de temperatura, [9].

Temperatura [°C]	Razão densidade aparente/ densidade básica
20	$1+\omega$
99	$1+\omega$
99	$1+\omega$
120	1,00
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
ω é o teor de humidade	

3.3.3 VARIABILIDADE DIMENSIONAL

A retração e inchamento são processos relacionados com a variação do teor de humidade da madeira, nos quais envolve a alteração nas dimensões da madeira, provocando uma variação no volume das peças em função da dispersão da água presente no interior do material, [5].

É importante ressaltar, que devido à anisotropia da madeira, o processo de retração ocorre de maneira distinta com relação às direções das fibras e anéis de crescimento. A maior retração é observada na direção tangencial, podendo sofrer uma variação dimensional de até 10%, fato que se não controlado, gera problemas de torção nas peças. O eixo menos afetado pela retração é o longitudinal, conforme apresenta o gráfico da Figura 27, de maneira simplificada, [2], [40].

A propriedade térmica da madeira que define a variação dimensional do material quando exposto a altas temperaturas é o coeficiente de dilatação térmica, especificado no Eurocódigo 1995-1-2 e será apresentado juntamente com as demais propriedades térmicas da madeira no capítulo seguinte pela Tabela 13.

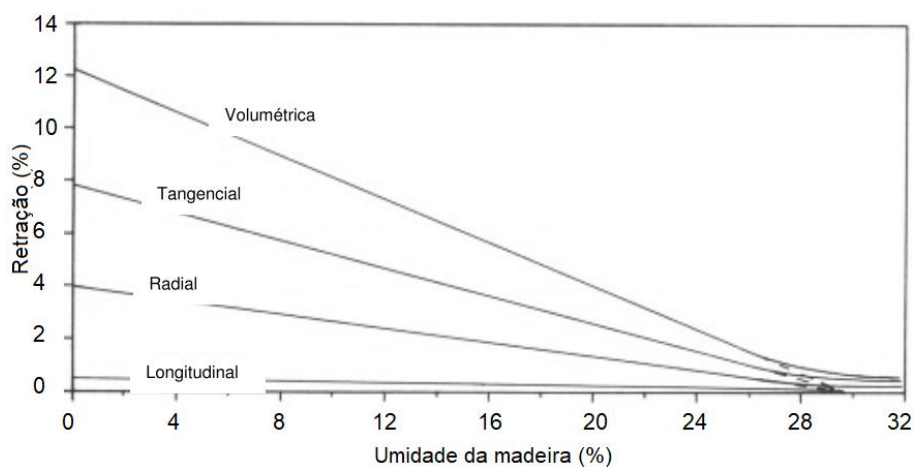


Figura 27 – Retração nos eixos da madeira, [40].

3.3.4 DURABILIDADE

A durabilidade natural de uma peça de madeira refere-se à capacidade do material de manter sua integridade e propriedades frente ao ataque biológico, ou seja, com relação a biodegradação. Trata-se de uma propriedade que sofre grande variação a depender da espécie em questão, além da região do toro em análise, uma vez que, como visto anteriormente, cerne e alburno apresentam características distintas, de forma que a durabilidade do alburno é reduzida, sendo muito mais vulnerável ao ataque de insetos e fungos, [40].

Construções em madeira são projetadas para resistirem, durante um longo prazo, à exposições como variações térmicas, alterações na sua estrutura química, temperatura, humidade, pH, radiação solar e microrganismos. Portanto, torna-se essencial garantir que a deterioração sofrida ao longo do tempo não interfira no desempenho previsto, [15], [51].

Deve-se considerar a possibilidade de impregnar as peças de madeira com substâncias que protejam o material contra o ataque de agentes xilófagos, para as situações de uso que favoreçam a biodeterioração, [5].

3.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS

O estudo do comportamento da madeira submetida a altas temperaturas requer o entendimento de algumas propriedades térmicas que o material possui, tais propriedades apresentam uma importante variação quando comparadas diferentes espécies de madeira, idade e teor de humidade.

O fluxo de calor no interior da madeira varia conforme o eixo de análise do material, resultado da sua anisotropia, além da interferência das irregularidades ao longo da peça, como por exemplo fendas e nós, [52].

3.4.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Trata-se de uma propriedade que representa a taxa de fluxo de calor no interior do material quando submetido à variação térmica, na maioria das espécies este parâmetro aumenta inicialmente até os 200 °C, sofrendo posteriormente uma queda linear até os 350 °C quando finalmente volta a apresentar um aumento, [47].

A forma como a condutividade térmica é influenciada pela variação de temperatura para a madeira, e eventualmente na camada carbonizada da peça, é definida no Eurocódigo 1995-1-2 conforme está indicado na Tabela 9.

Tabela 9 - Condutividade térmica para madeira e a camada carbonizada, [9].

Temperatura [°C]	λ [W/m.K]
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50

Para fins de comparação, a Tabela 10 apresenta valores de condutividade térmica para diferentes materiais possíveis de serem aplicados na construção civil, enfatizando a vantagem se aplicar a madeira como material construtivo isolante, ponto importante quando se trata de construções em áreas de invernos rigorosos onde o uso de aquecedores aumenta consideravelmente o consumo de energia para manutenção dos níveis de qualidade de vida as pessoas que habitam o local.

Tabela 10 –Condutividade térmica para materiais diversos, [5].

Material	λ [W/m.K]
Concreto armado	1,75
Bloco cerâmico	0,40
Alumínio	230
Pinheiro do Paraná	0,12

3.4.2 CALOR ESPECÍFICO

Trata-se da quantidade de calor necessária para que haja o aumento de temperatura em 1 °C para uma unidade de massa de um determinado material, esta propriedade é obtida geralmente por meio de um calorímetro diferencial de varredura e apresenta variações em função da temperatura, [47], [53].

Uma vez que o calor específico varia conforme a alteração da temperatura do material, a Tabela 11 apresenta os valores a serem adotados para a madeira em conformidade com o Eurocódigo 1995-1-2, [9].

Tabela 11 – Calor específico da madeira macia para classe de serviço 1, [9].

Temperatura [°C]	c [kJ/kg.K]
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

A Tabela 12 permite fazer um comparativo entre os valores de calor específico de alguns materiais. A madeira possui um valor elevado para essa propriedade em relação à grande parte dos materiais, ou seja, para uma mesma quantidade de calor aplicada, a madeira apresentará um aquecimento muito reduzido em relação ao aço e ao betão, por exemplo, [5].

Tabela 12 – Valores médios de calor específico para materiais diversos, [5].

Material	c [kJ/kg.K]
Metais	0,10
Concreto	0,18 - 0,20
Ar a 0°C	0,24
Madeira seca	0,324
Água	1,00

Outro aspecto importante presente na Tabela 12, é o fato de que a água possui um calor específico muito superior ao da madeira seca, isso implica que o teor de humidade do material interfira significativamente na variação do calor específico.

3.4.3 COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA

Trata-se da medida da alteração nas dimensões de uma peça causada pela variação da temperatura, o fenómeno de retração e expansão da madeira é grandemente influenciado pela orientação das fibras e teor de humidade do elemento em análise, de modo que são determinados

valores extremamente baixos de dilatação térmica na direção paralela às fibras, enquanto nas direções radial e tangencial verificam-se valores entre 5 a 10 vezes maiores em relação aos determinados na direção paralela às fibras, [5].

O teor de humidade em que se encontra a madeira, interfere na variação dimensional do material de modo que, quando aquecida, a madeira tende a se expandir por dilatação térmica e se contrair por perda de humidade. Para a madeira com teor de humidade entre 8% a 20%, o aumento progressivo da temperatura ocasiona uma expansão inicial, seguida de uma contração por perda de humidade durante o aquecimento, até o ponto em que a mudança dimensional resultante passa a ser negativa, [5].

A Tabela 13 apresenta os valores para o coeficiente de dilatação térmica, na qual é possível observar valores de dilatação negativos a partir dos 100 °C o que se deve ao fato de até os 80 °C a madeira dilatar e para temperaturas acima de 100 °C passa a sofrer encolhimento por perda de humidade, [47].

Tabela 13 – Coeficiente de dilatação térmica da madeira, [47].

Temperatura [°C]	α [m/m/°C]
20	0,00008
50	0,0002
100	-0,0004
150	-0,0006
200	-0,0008
250	-0,001
300	-0,0012

Em comparação com materiais como aço, por exemplo, a madeira apresenta um nível muito inferior de dilatação quando aquecido, devido à baixa expansão térmica do material, conferindo a ela uma grande vantagem, especialmente em situações de incêndio em que estruturas de madeira, por evitarem a dilatação excessiva sob ação do fogo, reduzindo então, o risco de desabamentos, [5], [33].

Esta característica do material favorece também o processo de produção de peças de madeira industrializada, como compensados, chapas aglomeradas, chapas de fibra, entre outras. Isso se deve ao fato de que durante o processamento da madeira, a expansão causada pelo aumento da temperatura é quase anulada pela retração decorrente da redução no teor de humidade, [5].

3.4.4 TAXA DE CARBONIZAÇÃO

Elementos de madeira contam com a característica de serem resistentes ao fogo devido a entre outros fatores, ao processo de carbonização quando submetidos a altas temperaturas. Trata-se de uma relação entre a profundidade de formação de carvão ao longo da superfície de madeira em função do tempo de exposição ao fogo, [47].

A taxa de carbonização varia conforme o eixo de análise da madeira, apresentando valores cerca de duas vezes maiores no sentido paralelo à fibra se comparada com o sentido transversal. Na bibliografia é comum encontrar valores para a taxa de carbonização paralela aos grãos, pois influenciam significativamente o comportamento dos membros de madeira nas estruturas, [47].

Parâmetros como densidade, teor de humidade, dimensões e formato da secção transversal da madeira também interferem no processo de carbonização. Madeiras mais densas carbonizam mais lentamente, peças com elevado teor de humidade retardam a combustão devido à presença de água em maior quantidade, elementos de secção transversal reduzida possuem maior superfície específica de exposição em relação a peças de grande dimensão, além disso, para secções retangulares a taxa de carbonização é maior que em secções circulares uma vez que a exposição ao calor nas arestas aumentam a área de exposição, [47].

Importante para a determinação da profundidade de carbonização de projeto, e consequentemente, a secção efetiva ao final de um incêndio, são os valores para a taxa de carbonização apresentados pelo Eurocódigo 1995-1-2. A diferença de valores entre β_0 e β_n está associada ao fenómeno de arredondamento dos cantos, que quando considerado deve-se aplicar a taxa de carbonização β_n . Destaca-se na Tabela 14, os valores de para a taxa de carbonização de madeiras macias lameladas e madeiras sólidas.

Tabela 14 – Taxas de carbonização β_0 e β_n para madeira macia, [9].

	β_0 [mm/min]	β_n [mm/min]
Madeira laminada com densidade característica superior a 290 kg/m ³	0,65	0,70
Madeira sólida com densidade característica superior a 290 kg/m ³	0,65	0,80

O Eurocódigo 1995-1-2 define também, um fator muito importante para a determinação da taxa de carbonização nas secções, a temperatura de carbonização, sendo recomendado o valor de 300 °C para a madeira, [9].

3.4.5 COEFICIENTE DE EMISSIVIDADE

A emissividade é uma propriedade dos materiais que determina a maior ou menor quantidade de energia que um corpo emite. Esse princípio é relevante quando se aborda a eficiência energética de uma edificação visto que está diretamente relacionada com a temperatura superficial dos elementos construtivos, [43].

O valor de emissividade é adimensional, variando entre 0 e 1, nos materiais construtivos, é comum que se encontrem valores elevados para essa propriedade, conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Emissividade para materiais diversos, [43].

Material	ϵ
Aço polido a 100°C	0,07 - 0,08
Cimento	0,54
Betão a 0 – 100 °C	0,92 - 0,94
Madeira	0,80 - 0,90
Água a 38 °C	0,67

Na natureza não se encontram corpos com capacidade de emitir 100% da radiação incidente, exceto o caso ideal de um corpo negro, em que a emissividade é igual a 1. Tratando-se, portanto, de um emissor perfeito, que absorve toda a energia de radiação infravermelha incidente, e a converte e emite totalmente como sua própria radiação, o que significa dizer que nenhum corpo pode emitir mais radiação térmica por unidade de superfície que um corpo negro, [43], [54].

O Eurocódigo 1991-1-2 define emissividade como sendo a razão entre o calor radiativo absorvido por uma determinada superfície e o calor radioativo absorvido por uma superfície de corpo negro. Por sua vez, o Eurocódigo 1995-1-2 determina o valor de emissividade a ser considerado para as madeiras igual a 0,8, [7], [9].

3.5 CRITÉRIOS DE ROTURA

A determinação da rotura da madeira é um processo complexo, por apresentar uma variedade de características especialmente a anisotropia e a dificuldade em definir o estado do material no limite elástico. Para estimar os efeitos provocados pelos esforços em uma estrutura

e simular o comportamento anisotrópico da madeira, é preciso avaliar a rotura e os respectivos danos causados na estrutura, [55].

Os chamados critérios de rotura ou critérios de resistência, foram inicialmente criados para aplicação em materiais isotrópicos, buscando indicar o momento da rotura de materiais com propriedades e comportamento semelhante independente da direção de análise. Visando abranger materiais anisotrópicos, adaptações e correções foram realizadas acerca dos critérios existentes, passando a considerar as diferentes propriedades variando conforme a orientação das fibras, além do tipo de carregamento aplicado, [56].

Assume-se que a rotura de um elemento estrutural se dá quando este perde a funcionalidade para que foi projetado, podendo variar conforme as propriedades do material ou até mesmo com o tipo de carregamento. A rotura pode se apresentar de diversas formas como por exemplo a quebra das fibras, microtrincamento da matriz, descolamento de fibras ou delaminação. Para caracterizar essa ocorrência, é necessário adotar um critério de rotura, dos quais serão abordados neste trabalho os critérios de Tsai Wu, Tsai Hill e o critério de Hill, [55], [57].

Deve-se ter o conhecimento prévio dos valores limites de tensão do material em suas direções específicas, e então, por meio da aplicação do critério mais adequado para cada situação ou material, é possível prever o estado tensão no qual a rotura irá ocorrer, [55].

Em 1947, Hill desenvolveu um trabalho em que foi aplicada uma teoria para descrever em escala macroscópica o escoamento e o fluxo plástico em materiais anisotrópicos, servindo de base para que em 1965 Azzi e Tsai propusessem um novo critério, denominado de critério de Tsai-Hill, e posteriormente, em 1971, Tsai e Wu desenvolveram o critério Tsai-Wu, [55].

3.5.1 CRITÉRIO DE HILL

Fundamentado na teoria de von Mises e adaptado para a aplicação em materiais anisotrópicos, o critério de Hill considera a interação entre as tensões no mecanismo de rotura, e depende da orientação da tensão em relação ao eixo de anisotropia do material, [58].

Trata-se do critério de rotura aplicado pelo *Ansys Workbench* para modelar materiais em que a microestrutura interfere no comportamento macroscópico do material, e uma vez que a madeira é um compósito natural formado por um arranjo complexo de celulose reforçado por uma substância polimérica, deve-se fazer uma análise de rotura do material de acordo com a complexidade que apresenta.

Este critério permite fazer a determinação das zonas elásticas e elastoplásticas na relação tensão deformação da madeira. Os parâmetros característicos da anisotropia do material, determinados para o critério são as taxas de rendimento R_{ij} , estabelecidos em função das tensões limites nas principais direções do material, conforme indicado nas Equações de (6) à (11).

$$R_{11} = \frac{\sigma_{11}^y}{\sigma_y} \quad (6)$$

$$R_{22} = \frac{\sigma_{22}^y}{\sigma_y} \quad (7)$$

$$R_{33} = \frac{\sigma_{33}^y}{\sigma_y} \quad (8)$$

$$R_{12} = \sqrt{3} \cdot \frac{\sigma_{12}^y}{\sigma_y} \quad (9)$$

$$R_{23} = \sqrt{3} \cdot \frac{\sigma_{23}^y}{\sigma_y} \quad (10)$$

$$R_{13} = \sqrt{3} \cdot \frac{\sigma_{13}^y}{\sigma_y} \quad (11)$$

Onde:

σ_i^y - Tensão de escoamento na direção indicada por i;

σ_y - Tensão de escoamento isotrópica.

Algumas considerações devem ser feitas, de modo que os subscritos 1, 2 e 3, correspondem respectivamente as coordenadas x, y e z no modelo analisado neste trabalho, assim se obtém as direções de análise de resistência conforme indicado na Tabela 16.

Tabela 16 – Eixos e planos correspondentes aos subscritos de R_{ij} para o critério de Hill.

Nomenclatura adotada		
Taxa de rendimento	Coordenada	Direção
R_{11}	xx	Normal à fibra
R_{22}	yy	Normal à fibra
R_{33}	zz	Paralela à fibra
R_{12}	xy	Normal à fibra
R_{23}	yz	Paralela à fibra
R_{13}	xz	Paralela à fibra

3.5.2 CRITÉRIO DE TSAI-HILL

Da mesma forma que Hill implementou o critério de von Mises para aplicação em materiais anisotrópicos, Azzi e Tsai por meio de correções especificaram a aplicação para lâminas unidirecionais, ou seja, o critério de Tsai-Hill é uma simplificação que considera o material transversalmente isotrópico, no caso de compósitos reforçados com fibras de modo que dois dos três eixos de análise da peça apresentam comportamento semelhante.

Uma desvantagem importante do critério Tsai-Hill é que não faz distinção direta entre os limites de resistência à tração e de resistência à compressão.

3.5.3 CRITÉRIO DE TSAI-WU

Trata-se de um critério amplamente utilizado atualmente devido à sua principal proposta de ser operacionalmente simples e de fácil implementação para a caracterização de materiais e aplicação em projetos, [59].

Entretanto deve-se ressaltar que a aplicação do critério de Tsai-Wu sozinho, não permite identificar o modo de rotura sofrido pelo material, ou seja, não explica ou prevê os mecanismos reais de rotura. Mas apesar de suas limitações é uma maneira simples de estimar a capacidade de carregamento de uma estrutura, [55].

3.6 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO SEGUNDO OS MÉTODOS SIMPLIFICADOS DO EUROCÓDIGO 1995-1-2

3.6.1 MÉTODO DA SECÇÃO REDUZIDA

No método da secção transversal reduzida, além de subtrair da secção transversal a profundidade carbonizada $d_{char,n}$, é considerada a redução de uma profundidade adicional, correspondente a uma camada de resistência zero, na qual propriedades de resistência e rigidez são desprezadas. Desse modo considera-se para a secção residual, propriedades de rigidez e resistência inalteradas. A redução da secção transversal é representada pela Figura 28 de acordo com o Eurocódigo 1995-1-2.

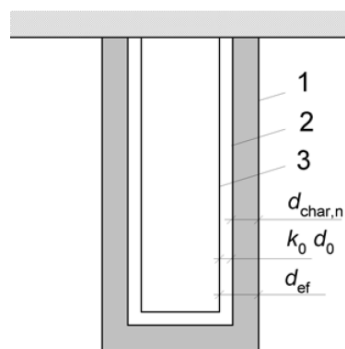


Figura 28 – Redução da secção transversal da viga carbonizada, [9].

A espessura da camada carbonizada depende da taxa de carbonização da madeira e aumenta com o passar do tempo, a expressão que determina o valor é dada pela Equação (12).

$$d_{char,n} = \beta_n * t \quad (12)$$

Onde:

$d_{char,n}$ – Profundidade da camada carbonizada [mm];

β_n – Taxa de carbonização considerando os efeitos do arredondamento dos cantos [mm/min], ver Tabela 14;

t – Tempo [minutos].

A profundidade efetiva de carbonização, incluindo a camada carbonizada e a camada de resistência zero é determinada pela Equação (13).

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 * d_0 \quad (13)$$

Onde:

d_{ef} – Profundidade efetiva de carbonização [mm];

k_0 – Fator de superfície, ver Tabela 17;

d_0 – Espessura da camada de resistência zero, [=7 mm para superfícies sem proteção].

Tabela 17 – Fator de superfície, [9].

	k₀
t < 20 minutos	t/20
t ≥ 20 minutos	1,00

3.6.2 MÉTODO DA REDUÇÃO DAS PROPRIEDADES

A determinação da resistência ao fogo de um elemento de madeira conforme o tempo de exposição, pode ser realizada por meio da redução das propriedades do material através de fatores de modificação e de segurança, conforme indicado pelo Eurocódigo 1995-1-2 e apresentado na Equação (14).

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} * \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (14)$$

Onde:

$f_{d,fi}$ – Resistência ao fogo;

$k_{mod,fi}$ – Fator de modificação para a madeira em situação de fogo;

f_{20} – 20% da resistência à temperatura ambiente;

$\gamma_{M,fi}$ – Fator parcial de segurança para a madeira em situação de fogo [=1].

O valor de f_{20} é dado pela Equação (15).

$$f_{20} = k_{fi} * f_k \quad (15)$$

Onde:

k_{fi} – Coeficiente a depender do tipo de madeira [=1,25 para madeira sólida];

f_k – Resistência característica da madeira.

3.7 DETERMINAÇÃO DA TENSÃO MÁXIMA DE FLEXÃO

A relação que determina o valor da tensão de flexão é dada pela Equação (16), por meio de parâmetros obtidos facilmente.

$$f = \frac{M}{W} \quad (16)$$

Onde:

f – Tensão de flexão instalada [MPa];

M – Momento atuante [N.mm];

W – Módulo da secção [mm³].

Por sua vez, o momento atuante é obtido através da aplicação das Equações (17) e (18), sendo a primeira aplicada no caso de um ensaio de flexão em três pontos, e a segunda para o ensaio de flexão em quatro pontos, variando entre si apenas o valor da distância entre a aplicação do carregamento e o apoio, ver Figura 29.

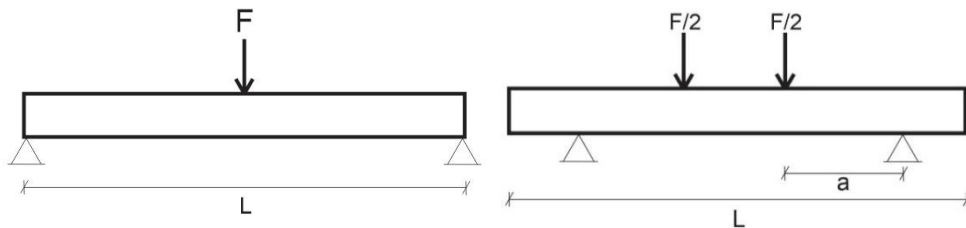


Figura 29 – Representação do ensaio de flexão em três pontos (esq.) e ensaio de flexão em quatro pontos (dir.).

$$M = \frac{F}{2} * \frac{L}{2} \quad (17)$$

Onde:

F – Carregamento aplicado a meio vão [kN];

L – Comprimento total da viga ou distância entre apoios [mm].

$$M = \frac{F}{2} * a \quad (18)$$

Onde:

F – Carregamento total aplicado em duas parcelas [kN];

a – Distância entre a aplicação do carregamento e o apoio mais próximo [mm].

A determinação da tensão de flexão instalada depende diretamente do regime em que o material se encontra, elástico ou plástico, de modo que o módulo da secção varia, ou seja, no regime elástico a distribuição de tensões ao longo da secção é linear e corresponde a uma área menor para resistir ao carregamento aplicado, se comparado ao regime plástico, em que ocorre o fenômeno de plastificação da secção, aumentando assim, a área resistente.

3.7.1 REGIME ELÁSTICO

O módulo da secção no regime elástico é calculado através da Equação (19).

$$W_{el} = \frac{b * d^2}{6} \quad (19)$$

Onde:

W_{el} – Módulo elástico da secção [mm³];

b – Base ou menor dimensão da secção transversal [mm];

d – Altura ou maior dimensão da secção transversal [mm].

Com base no valor obtido para o módulo elástico da secção e quando a tensão instalada atinge o valor da tensão de cedência, pode-se determinar o valor da máxima força elástica resistente. Desse modo obtém-se as Equações (20), (21) e (22), para o ensaio de flexão em três pontos e para o ensaio de flexão em quatro pontos, respectivamente.

$$F_{el} = \frac{4 * f_m * W_{el}}{L} \quad (20)$$

$$F_{el} = \frac{2 * f_m * W_{el}}{a} \quad (21)$$

Onde:

F_{el} – Máxima força resistida no regime elástico [kN].

W_{el} – Módulo elástico da secção [mm³];

b – Base ou menor dimensão da secção transversal [mm];

d – Altura ou maior dimensão da secção transversal [mm].

3.7.2 REGIME PLÁSTICO

Considerado um comportamento elástico perfeitamente plástico, a partir do momento em que a tensão de cedência é atingida, inicia-se o regime plástico no qual são produzidas deformações permanentes no material. O acréscimo de carregamento é suportado por meio da plastificação da secção, de modo que a tensão instalada não ultrapasse a tensão de cedência, resultando em um módulo plástico da secção calculado pela Equação (22).

$$W_{pl} = \frac{b * d^2}{4} \quad (22)$$

Onde:

W_{pl} – Módulo plástico da secção [mm³];

b – Base ou menor dimensão da secção transversal [mm];

d – Altura ou maior dimensão da secção transversal [mm].

A mesma relação utilizada para determinar as Equações (20) e (21) também se aplica para o regime plástico, variando apenas o módulo da secção, resultando na Equação (23) para o ensaio de flexão em três pontos e na Equação (24) para o ensaio de flexão em quatro pontos.

$$F_{pl} = \frac{4 * f_m * W_{pl}}{L} \quad (23)$$

$$F_{pl} = \frac{2 * f_m * W_{pl}}{a} \quad (24)$$

Onde:

F_{pl} – Máxima força resistida no regime plástico [kN].

W_{pl} – Módulo plástico da secção [mm³];

b – Base ou menor dimensão da secção transversal [mm];

d – Altura ou maior dimensão da secção transversal [mm];

f_m – Tensão resistente à flexão [MPa].

Uma consideração importante deve ser feita, sabendo que a madeira não possui capacidade de plastificação e sabendo que o regime elástico perfeitamente plástico é considerado no modelo material deste estudo somente para garantir que o material tenha um limite elástico, não é interessante considerar a força de cedência determinada no regime plástico, uma vez que esse valor para fins de projeto e para efeito de dimensionamento estaria contra a segurança.

Capítulo 4: Desenvolvimento do Modelo Numérico

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As simulações numéricas foram realizadas com o suporte do programa *Ansys Workbench* pelo método dos elementos finitos, trata-se de um dos programas de Engenharia Auxiliada por Computadores (CAE) que auxiliam na tomada de decisões especialmente nas fases de dimensionamento e validação de projetos. O *Ansys Workbench* permite a identificação visual da geometria e dos resultados graficamente, facilitando a interpretação dos dados da simulação numérica.

A respeito da aplicação do método dos elementos finitos, algumas vantagens podem ser relacionadas, como por exemplo a possibilidade de se estudar componentes de geometria complexa, diminuição dos custos associados aos protótipos, na maioria dos casos da aplicação de softwares CAE os resultados são obtidos rapidamente e com boa aproximação do método analítico e para os softwares multi-físicos, como é o caso do *Ansys Workbench*, é possível realizar análises acopladas em que um mesmo elemento é submetido a diversas condições de aplicação e exposição como mecânica, térmica, acústica, entre outras, [60].

Ao nível das simulações térmicas, o elemento finito utilizado corresponde ao SOLID 70, possuindo oito nós com apenas um grau de liberdade por nó, sendo a temperatura. O elemento possui capacidade de condução térmica e aplica-se a análises 3D em regime transiente ou estacionário. Deve-se destacar que devido ao fato do modelo térmico ser analisado também mecanicamente, o elemento SOLID 70 é substituído pelo SOLID 185, elemento estrutural equivalente, a geometria e a localização dos nós para os dois elementos finitos é a mesma, ver Figura 30.

Dessa forma, o elemento finito utilizado para a modelagem 3D da estrutura sólida na análise mecânica foi o SOLID 185, definido por oito nós com três graus de liberdade em cada nó, sendo eles: translação dos nós nas direções x , y e z . Trata-se de um elemento com capacidade de plastificação que permite grandes deflexões e deformações, além das características de fluência, enrijecimento e hiper plastificação. Destaca-se também a capacidade de simular deformações em materiais elastoplásticos quase incompressíveis e materiais hiperplásticos totalmente incompressíveis.

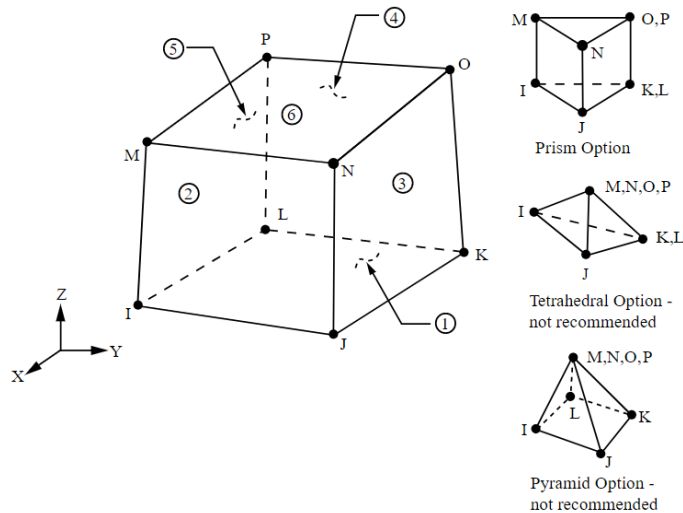


Figura 30 – Geometria e localização dos nós SOLID 70 e SOLID 185, *Ansys Help*.

Os elementos podem se apresentar inclusive nas formas de prisma, tetraedro ou pirâmide, conforme observado na Figura 30, além disso o elemento é definido pelas propriedades ortotrópicas inseridas no programa, seguindo a direção das coordenadas globais do modelo.

4.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A análise numérica pelo método dos elementos finitos envolve três etapas, sendo elas o pré-processamento, a análise em si e o pós processamento, no qual são obtidos os resultados do problema. Inicia-se o estudo pelo pré-processamento definindo a geometria, o tipo de análise, as propriedades do material, a malha e as condições de contorno, conforme indicado a seguir.

A geometria estudada é determinada por meio do *Ansys Design Modeler* no qual são estabelecidas as dimensões das vigas. As dimensões das vigas a serem estudadas estão indicadas na, onde b e d são respectivamente a base e a altura da secção, e L é o comprimento da viga.

Tabela 18 – Dimensões das vigas em estudo.

Geometria da secção [mm]		Comprimento [mm]
b	d	L
65	70	1330
75	150	6000
250	300	6000

Os tipos de análises definidos para este estudo foram a análise mecânica e a análise térmica. Inicialmente considerou-se uma temperatura constante para toda a viga, então submetida unicamente à análise mecânica, e em um segundo momento submeteu-se a viga a uma exposição térmica para intervalos de tempos pré-definidos acoplada a uma análise mecânica realizada na configuração obtida ao final do tempo de exposição.

No *Ansys Workbench* foram introduzidas as propriedades mecânicas, físicas e térmicas da madeira em análise, o Abeto de Douglas, escolhida de acordo com o trabalho realizado por L.M.V. Lopes em [2], para fins de comparação entre o modelo numérico e experimental. A forma como as propriedades ortotrópicas da madeira foram determinadas está detalhada na seção 4.3.

No *Ansys Mechanical* realizou-se a discretização da geometria, ou seja, subdividiu-se a peça em uma quantidade finita de pequenos elementos interligados por nós. Foram definidas dimensões para a malha, priorizando o refinamento da seção transversal da viga. Para cada uma das geometrias realizou-se o teste de convergência de malha, e atendendo as limitações computacionais, adotou-se a malha que menos apresentou interferência nos resultados. As dimensões de malha e imagens correspondentes para cada modelo desenvolvido serão especificadas de forma individual no Capítulo 5.

As condições de contorno para a análise mecânica, carga e a condição de apoio, foram aplicadas conforme o ensaio a se realizar. Na simulação numérica do ensaio experimental desenvolveu-se um modelo correspondente ao ensaio de flexão de quatro pontos de acordo com o que foi desenvolvido em laboratório, ver Figura 64 Anexo I. As demais simulações consistiram no ensaio de flexão de três pontos, com a aplicação de uma única carga central e definição dos apoios nas extremidades da viga. Na análise mecânica, a carga foi incrementada linearmente com o passar do tempo de simulação, até que se atingisse o instante de colapso.

Para a análise térmica as condições de contorno envolvem a aplicação da convecção e radiação nas superfícies expostas ao fogo. A evolução da temperatura ambiente foi imposta pela curva de incêndio ISO834, o coeficiente de convecção adotado foi de $25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$ para as superfícies expostas à troca de calor por convecção, e para o efeito da radiação, considerou-se um coeficiente de emissividade igual a 0,8 de acordo com o Eurocódigo 1995-1-2, a temperatura ambiente foi fixada em 20 °C .

A associação das análises foi realizada de modo a se obter o comportamento termomecânico da madeira, submetendo as vigas à exposição ao fogo para cada intervalo de tempo pré-estabelecido, e para o instante final da exposição térmica à convecção e radiação,

obteve-se o campo de temperaturas resultante e iniciou-se o ensaio mecânico, incrementando a carga linearmente.

Dessa forma, concluiu-se o pré-processamento, etapa muito importante para que as soluções do problema sejam obtidas com sucesso nas fases seguintes da simulação. A análise em si, ou etapa de processamento, envolve a configuração do programa para fornecer os resultados, de acordo com o que se busca estudar.

São determinadas nessa fase, os incrementos de tempo inicial, mínimo e máximo, adequados para a aplicação linear da carga em cada simulação. Ressalta-se que para todos os modelos numéricos, foi ativada a opção *large deformation* no *Ansys Mechanical*, por se tratar de um modelo que ultrapassa o limite elástico do material, atingindo valores elevados de deslocamento.

Além disso, adotou-se para o critério de convergência a opção *program controlled*, de modo que o programa aplica o método de Newton-Raphson, em que a cada iteração é verificada se a aproximação encontrada poderá ser considerada como a solução do problema, determinando se há a necessidade de o programa passar para a próxima iteração. A tolerância de convergência para a força e deslocamento é de 0,5%.

Na etapa de pós-processamento os dados são obtidos conforme o modelo é configurado na etapa de processamento, fornecendo dados para o tempo de simulação até o colapso do material, diretamente associado ao carregamento aplicado, ao deslocamento total e direcional e à tensão instalada. Além disso, o programa fornece também resultados gráficos e configuração final da geometria.

4.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL

O valor para tensão máxima de tração do Abeto de Douglas disponível em *Wood Handbook* [1], corresponde a 107,6 MPa, entretanto o modelo numérico foi calibrado com base nos ensaios experimentais realizados por L. M. V. Lopes em [2], uma vez que o Abeto de Douglas foi estudado experimentalmente e caracterizado conforme as recomendações da EN 408. Desse modo é priorizada a obtenção de resultados mais próximos da realidade e representativos.

Uma vez que no ensaio à flexão, o provete rompe na porção tracionada, pode-se considerar que o valor da tensão máxima de flexão determinada em [2], corresponde à tensão máxima de tração, dessa forma baseada nos resultados experimentais obtidos por L. M. V.

Lopes, foi calculada uma média aritmética das tensões encontradas no ensaio de flexão, obtendo o valor de $f_{m,k} = 44,49$ MPa para a tensão de flexão característica do Abeto de Douglas.

Ressalta-se que algumas amostras foram desconsideradas na determinação do valor de $f_{m,k}$, uma vez segundo o autor não cumpriram o tempo mínimo de ensaio além de apresentarem os menores valores de resistência. Ver Tabela 43 do Anexo I, amostras desconsideradas em destaque.

Para a tensão máxima de compressão, foi utilizado o valor de 43 MPa determinado no *Wood Handbook* [1], para o Abeto de Douglas do Interior Sul a 12% de humidade na direção paralela às fibras. Foram retirados desta mesma bibliografia os valores da tensão de tração normal às fibras igual a 2,3 MPa, da tensão de compressão normal às fibras igual a 5,10 MPa e da tensão de cisalhamento paralelo às fibras igual a 10,4 MPa. Para a tensão de cisalhamento perpendicular às fibras, recorreu-se ao Eurocódigo 1995-1-1 que determina que este valor é aproximadamente igual a duas vezes a tensão de tração perpendicular à fibra, logo adotou-se o valor de 4,6 MPa.

Todos os valores de tensão máxima resistida pela madeira para esforços de tração, compressão e cisalhamento, nos sentidos paralelo e perpendicular às fibras, estão organizados na Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21. Adotou-se um fator de redução $k_{\theta} = 1\%$ para 300 °C de modo a permitir a convergência do programa e a solução do numérica do problema, ou seja, mesmo que o material se encontre completamente carbonizado a simulação prossegue.

Tabela 19 – Variação da máxima tensão de tração para altas temperaturas.

Temperatura [°C]	k_{θ} tração	Paralela às fibras [MPa]	Normal às fibras [MPa]
20	1	44,49	2,3
100	0,65	28,92	1,5
300	0,01	0,44	0,02

Tabela 20 - Variação da máxima tensão de compressão para altas temperaturas.

Temperatura [°C]	k_{θ} compressão	Paralela às fibras [MPa]	Normal às fibras [MPa]
20	1	43	5,1
100	0,25	10,75	1,28
300	0,01	0,43	0,05

Tabela 21 - Variação da máxima tensão de cisalhamento para altas temperaturas.

Temperatura [°C]	k_0 cisalhamento	Paralela às fibras [MPa]	Normal às fibras [MPa]
20	1	10,4	4,6
100	0,4	4,16	1,84
300	0,01	0,1	0,05

Determinados as propriedades de resistência do material, foi possível calcular as taxas de rendimento do critério de Hill para a rotura do material. Os valores para R_{ij} estão apresentados na Tabela 22 e Tabela 23.

Tabela 22 – Taxa de rendimento para a tração.

Temperatura [°C]	R_{11}	R_{22}	R_{33}
20	0,052	0,052	1,000
100	0,052	0,052	1,000
300	0,052	0,052	1,000

Tabela 23 – Taxa de rendimento para o cisalhamento.

Temperatura [°C]	R_{12}	R_{23}	R_{13}
20	0,179	0,405	0,405
100	0,110	0,249	0,249
300	0,179	0,405	0,405

Sabendo que o valor do módulo de elasticidade longitudinal para o Abeto de Douglas é de 10300 MPa, foram aplicadas as relações apresentadas na Tabela 4 e para obter os valores dos demais eixos. A redução dessa propriedade para o aumento de temperatura, foi realizada aplicando o fator de redução para o módulo de elasticidade à tração indicado na Tabela 5. Os resultados obtidos estão organizados na Tabela 24 e Tabela 25.

Tabela 24 – Determinação do Módulo de Elasticidade tangencial e radial.

Relação com o Módulos de Elasticidade Longitudinal		Módulo de Elasticidade [MPa]	
E_z/E_z	1	E_z	10300
E_y/E_z	0,068	E_y	700,4
E_x/E_z	0,05	E_x	515

Tabela 25 – Variação do Módulo de Elasticidade à tração para altas temperaturas.

Temperatura [°C]	k_0 tração	E_z [MPa]	E_y [MPa]	E_x [MPa]
20	1	10300,00	704,00	515,00
100	0,5	5150,00	352,00	257,50
300	0,01	103,00	7,04	5,15

O mesmo processo se repetiu para a obtenção do módulo de rigidez, determinado para os três planos com base no valor do módulo de elasticidade através das relações estabelecidas na Tabela 7 para o Abeto de Douglas. O fator de redução aplicado para a variação de temperatura foi o mesmo utilizado para o módulo de elasticidade, presente na Tabela 5. Ver Tabela 26 e Tabela 27.

Tabela 26 – Determinação do Módulo de Rigidez.

Relação com o Módulo de Elasticidade Longitudinal		Módulo de Rigidez [MPa]	
G_{xy}/E_z	0,007	G_{xy}	72,1
G_{yz}/E_z	0,064	G_{yz}	659,2
G_{xz}/E_z	0,078	G_{xz}	803,4

Tabela 27 – Variação do Módulo de Rigidez à tração para altas temperaturas.

Temperatura [°C]	k_0 tração	G_{xy} [MPa]	G_{yz} [MPa]	G_{xz} [MPa]
20	1	72,10	659,20	803,40
100	0,5	36,05	329,60	401,70
300	0,01	0,72	6,59	8,03

Os valores adotados para o coeficiente de Poisson estão indicados na Tabela 6 para o Abeto de Douglas. Uma vez que essa propriedade da madeira não se altera com o aumento da temperatura, não foi necessário aplicar um fator de redução, mantendo-se constante. Ver Tabela 28.

Tabela 28 – Coeficiente de Poisson constante para altas temperaturas.

Temperatura [°C]	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}
20	0,374	0,036	0,029
100	0,374	0,036	0,029
300	0,374	0,036	0,029

Para a densidade básica do material, adotou-se o valor de 407 kg/m³ determinado experimentalmente por L. M. V. Lopes em [2], e a partir desse dado, aplicando a relação fornecida pela Tabela 8, foi possível obter os valores de densidade aparente variando conforme o acréscimo de temperatura de acordo com o Eurocódigo 1995-1-2. Ver Tabela 29.

Tabela 29 – Variação da densidade aparente para altas temperaturas.

Temperatura [°C]	Densidade aparente [kg/m³]
20	455,84
99	455,84
99	455,84
120	407,00
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

Os valores de condutividade térmica, calor específico e coeficiente de dilatação térmica foram inseridos no programa de acordo com a Tabela 9, Tabela 11 e Tabela 13.

É importante ressaltar que no modelo numérico adotou-se um comportamento elástico perfeitamente plástico para o material em *bilinear isotropic hardening*, apesar da madeira não possuir a capacidade de plastificação, como é possível perceber nos resultados experimentais de [2], em que os gráficos tensão deformação se apresentam em forma de reta que se inclina ligeiramente seguida da rotura, concentrando seu comportamento quase sempre no regime elástico, não apresentando patamar de plastificação, ao contrário do modelo adotado em que este patamar é determinado por um módulo tangente igual a zero, ver Figura 65 no Anexo II.

Em um modelo ideal a curva tensão deformação a ser considerada na análise numérica deve ser a curva verdadeira, ou seja, aquela que considera medições instantâneas da área da secção transversal para cada instante de tempo e não somente a área inicial, como é feito na determinação das curvas de engenharia. Entretanto, deve-se considerar que há uma grande complexidade de determinação das curvas verdadeiras, além disso, na maioria das vezes os projetos de são calculados no regime elástico e admite-se que as curvas de engenharia e as curvas verdadeiras são semelhantes para pequenos valores de deformação.

Capítulo 5: Resultados Numéricos e Discussões

5.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO TESTE EXPERIMENTAL

Nessa seção, busca-se comparar os resultados obtidos na simulação numérica do ensaio de flexão em quatro pontos da viga de geometria 65x70x1330 mm à temperatura ambiente, com os resultados obtidos no estudo experimental desenvolvido por L. M. V. Lopes em [2] para o mesmo ensaio.

A malha gerada para a geometria pode ser vista na Figura 31, em que a secção transversal foi dividida em 8 elementos em cada um dos eixos x e y , e 90 elementos no eixo z , correspondendo a uma malha de 8,125 mm em x , 8,75 mm em y e aproximadamente 14,778 mm em z .

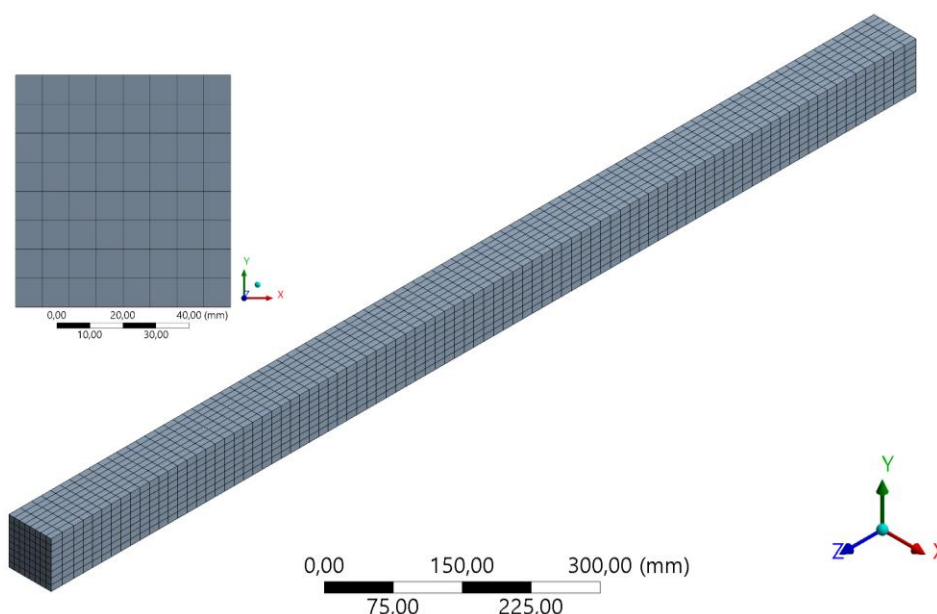


Figura 31 – Malha gerada para a viga de geometria 65x70x1330 mm.

Ressalta-se que a determinação das dimensões da malha foi influenciada pela necessidade de se obter um nó exatamente a meio vão na face inferior da viga, importante para coletar os dados de deslocamento direcional no mesmo local onde foi posicionado o medidor de deslocamento do teste experimental.

As condições de contorno para a análise mecânica estão indicadas na Figura 32, uma carga de 30 kN foi dividida em dois locais de aplicação no ensaio de flexão em quatro pontos

distando 420 mm entre cada local de aplicação, os apoios foram posicionados a 35 mm das extremidades e configurados com as restrições de deslocamento conforme apresentado na Tabela 30.

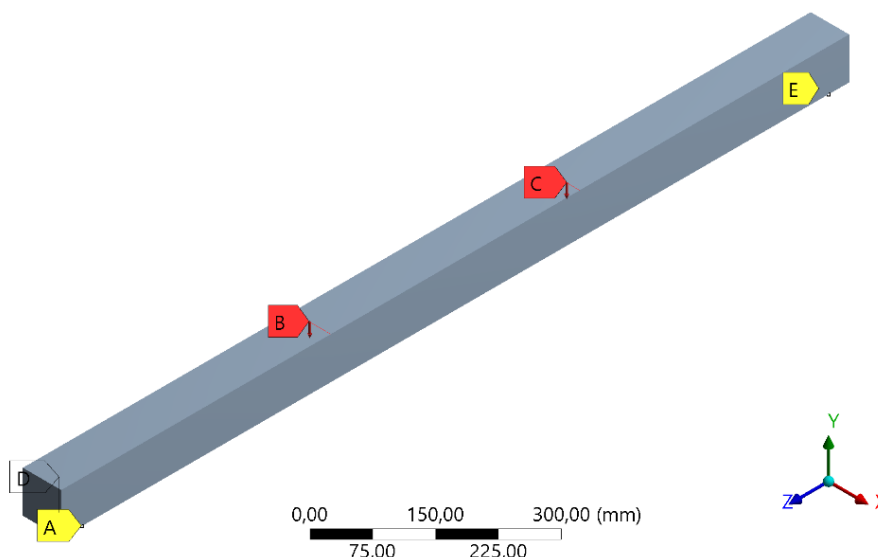


Figura 32 – Condições de contorno da análise mecânica para a viga 65x70x1330 mm, A, D e E são restrições de deslocamento dos apoios, B e C são os locais de aplicação da carga.

Tabela 30 – Condição de apoio da viga 65x70x1330 mm.

Deslocamento	Eixo		
	x	y	z
A	fixo	livre	livre
D	livre	fixo	fixo
E	livre	fixo	livre

É importante lembrar que essa análise foi realizada à temperatura ambiente, considerada no modelo como 20 °C.

Para essa simulação mecânica adotou-se um tempo total de 3600 segundos, para um incremento inicial de 20 segundos, mínimo de 0,12 segundos e máximo de 100 segundos, correspondentes respectivamente a aplicação de uma carga incremental de 166,67 N, 1 N e 833,33 N.

O máximo deslocamento vertical e a máxima tensão normal de flexão longitudinal foram determinados para um nó localizado exatamente no centro da face inferior da viga. Os resultados obtidos numericamente estão indicados na Tabela 44, Anexo III. Nesta tabela também constam os valores da força aplicada para cada instante de tempo, além do momento instalado calculado analiticamente conforme a Equação (18).

5.1.1 COMPARAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL

A primeira comparação realizada considerou a força de rotura obtida numericamente em relação às forças máximas determinadas nos ensaios experimentais realizados em [2]. Para a simulação numérica, a determinação da força instalada em função do tempo fornecido pelo *Ansys*, foi determinada com base no incremento de carga definido, sendo de 30 kN ao longo de 3600 segundos, dessa forma obtém-se a Equação (25) que relaciona carregamento aplicado pelo programa ao longo do tempo.

$$F = \frac{30000 \cdot t}{3600} \quad (25)$$

Onde:

F – Força aplicada no instante de tempo t [N];

t – Tempo [s];

Por sua vez, a máxima força determinada experimentalmente corresponde à carga aplicada no instante da rotura das amostras, medida por meio da máquina de ensaio Instron 4485, equipamento de carregamento responsável pela aplicação e medição da força aplicada ao longo do teste. Associado a este equipamento, para medir o deslocamento a meio vão, foi utilizado um transdutor para medição de deslocamento linear, um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) conforme recomendado por norma.

A curva resultante do modelo numérico foi sobreposta às curvas obtidas experimentalmente e estão representadas nos gráficos da Figura 33 e Figura 34, relacionando o carregamento aplicado em cada ensaio (F) ao deslocamento a meio vão correspondente (w), e apresentando os valores para a tensão instalada (f) em relação ao deslocamento a meio vão (w).

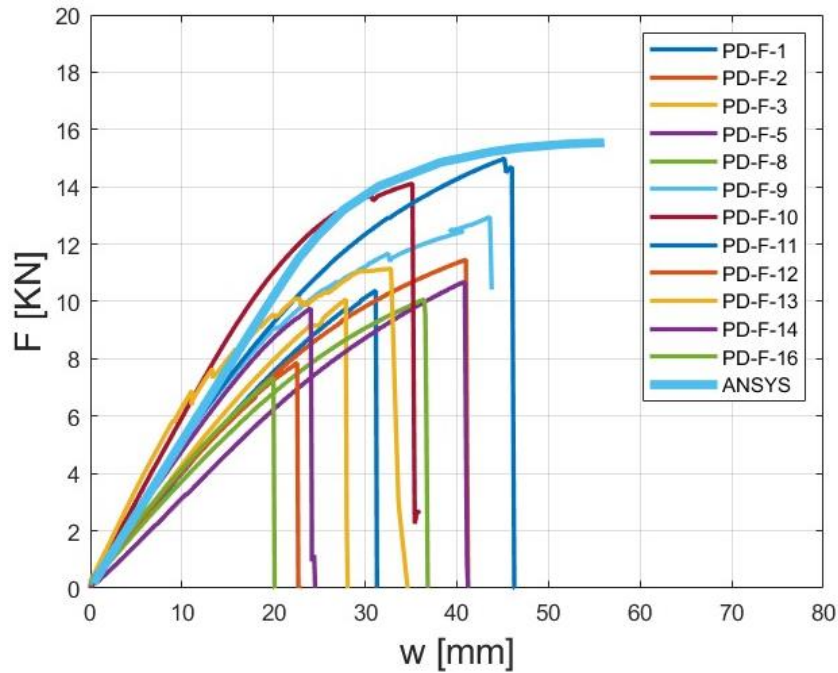


Figura 33 – Gráfico Força aplicada x Deslocamento a meio vão para os ensaios experimentais e simulação numérica.

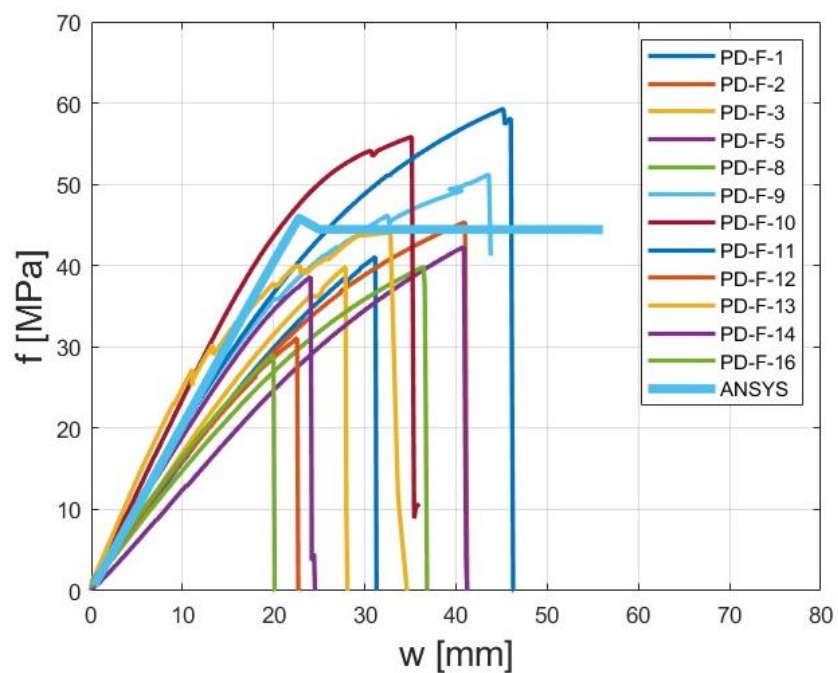


Figura 34 – Gráfico Tensão instalada x Deslocamento a meio vão para os ensaios experimentais e simulação numérica.

Calculando a média aritmética das máximas forças alcançadas experimentalmente para os provetes considerados neste estudo, ver Tabela 43 do Anexo I, obtém-se o valor de $F_{max} = 10,86$ kN. O valor determinado numericamente para a máxima força alcança o valor de $F_{pl} =$

15,54 kN para o último instante de simulação, entretanto esse valor corresponde à resistência da viga considerando a plastificação da secção, em que mesmo após alcançar a tensão máxima, a carga continua sendo incrementada ao longo do tempo até a rotura.

Sabe-se que o fenômeno de plastificação da secção transversal não se aplica à madeira, portanto, deve-se considerar a força medida no limite do regime elástico, correspondente ao instante em que é atingida a tensão normal de flexão máxima, sendo assim, o valor da força obtido numericamente corresponde à $F_{el} = 11,52$ kN.

O valor do carregamento máximo aplicado antes da rotura para cada uma das amostras do ensaio experimental e o valor numérico do carregamento corresponde te ao limite elástico da secção estão organizados na Tabela 31 com seus respectivos valores de variação percentual.

Tabela 31 – Carregamento aplicado no ensaio de flexão de quatro pontos.

Amostra	$F_{m\acute{a}x,experimental}$ [kN]	$F_{el, ANSYS}$ [kN]	Variação percentual [%]	
PD-F-1	10,36	11,52	-8,1	
PD-F-2	11,45		-0,61	
PD-F-3	10,07		-14,40	
PD-F-5	10,68		-7,87	
PD-F-8	10,06		-14,51	
PD-F-9	12,54		8,13	
PD-F-10	14,11		18,36	
PD-F-11	14,98		23,10	
PD-F-12	7,85		-46,75	
PD-F-13	11,14		-3,41	
PD-F-14	9,76		-18,03	
PD-F-16	7,35		-56,73	
Média	10,86			-6,08

A pequena variação percentual entre o valor médio de F_{max} experimental e o valor de F_{el} numérico confirma a representatividade obtida por meio do modelo numérico, os valores elevados para de variação percentual correspondem a apenas duas amostras, possivelmente com algum defeito que comprometeu a resistência do provete.

A distinção dos regimes elástico e plástico do material ao longo do ensaio numérico é nítida através da análise do gráfico indicado na Figura 34, tornando evidente a diferença do comportamento real da madeira e do modelo elástico perfeitamente plástico adotado no modelo material.

Nota-se que os resultados obtidos para a tensão até o limite do regime elástico, fornecidos pelo *Ansys*, apresentam um comportamento próximo do que foi determinado no teste experimental. Destaca-se que a tensão instalada no último instante do regime elástico da viga simulada numericamente é de $f_m = 45,85$ enquanto a média aritmética das tensões no momento da rotura para as vigas experimentais é de $f_m = 44,49$, resultando em uma variação percentual de apenas 3,06%.

Os valores para a variação percentual da tensão normal de flexão experimental e numérica estão organizados na Tabela 32, para cada uma das amostras consideradas com seus respectivos valores de variação percentual.

Tabela 32 – Tensão normal de flexão experimental e numérica.

Amostra	$f_{m,experimental}$ [MPa]	$f_{m, ANSYS}$ [MPa]	Variação percentual [%]	
PD-F-1	42	45,85	-9,17	
PD-F-2	48,03		4,54	
PD-F-3	42,05		-9,04	
PD-F-5	45,3		-1,21	
PD-F-8	39,87		-15,00	
PD-F-9	49,59		7,54	
PD-F-10	56,88		19,39	
PD-F-11	60,76		24,54	
PD-F-12	31,37		-46,16	
PD-F-13	50,2		8,67	
PD-F-14	39,37		-16,46	
PD-F-16	28,42		-61,33	
Média	44,49			-3,06

Dessa forma, além da coerência dos valores para máxima força aplicada, a proximidade do comportamento determinado experimentalmente e numericamente para o regime elástico, permitem concluir que o modelo numérico para simulações mecânicas está calibrado e fornecendo resultados representativos.

5.1.2 COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL E ANALÍTICA

A determinação analítica da força aplicada no limite elástico, com base na Equação (21), fornece o valor de $F_{el} = 11,25$ kN, e caso houvesse plastificação a força resistida aumentaria para $F_{pl} = 16,87$ kN, aplicando a Equação (24).

Dessa forma pode-se dizer que são determinados analiticamente valores coerentes aos obtidos na simulação numérica, sendo eles $F_{el} = 11,52$ kN e $F_{pl} = 15,54$ kN. Os respectivos valores de variação percentual para a carga aplicada são de 2,4% para o limite elástico e de 7,88% no regime plástico.

A determinação analítica da tensão de flexão instalada se deu com base nas Equações (16) e (18), em que para o limite elástico resultou em uma tensão instalada de $f = 45,57$ MPa, seguida de uma redução mantida constante no regime plástico para $f = 41,0$ MPa. Resultando em uma diferença percentual entre o valor médio determinado experimentalmente de $f_m = 44,49$ MPa e o valor determinado analiticamente no limite elástico de 1,47%.

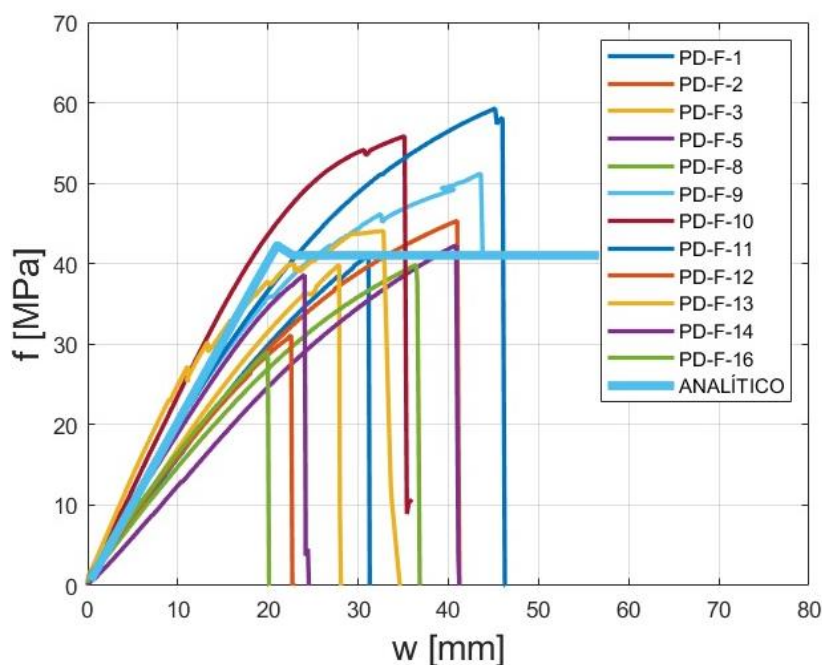


Figura 35 – Gráfico Tensão instalada x Deslocamento a meio vão obtidos nos ensaios experimentais e analiticamente.

5.2 SIMULAÇÃO MECÂNICA A TEMPERATURA CONSTANTE

Essa seção tem como objetivo apresentar os resultados obtidos nas simulações numéricas das vigas de geometria 75x150x6000 mm e 250x300x6000 mm considerando uma temperatura uniforme e constante aplicada em toda a secção.

No intervalo entre a temperatura ambiente de 20 °C e a temperatura de carbonização de 300 °C estabelecida pelo Eurocódigo 1995-1-2 as vigas foram submetidas ao esforço de flexão

em três pontos com a aplicação da força a meio vão incrementada linearmente até a rotura do material para acompanhar o comportamento da madeira em relação aos deslocamentos verticais, a carga de colapso, o momento resistente e o surgimento de tensões normais de flexão para cada uma das temperaturas constantes em duas geometrias diferentes.

Os valores de temperatura aplicados para cada uma das simulações foram de 20 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C.

5.2.1 SIMULAÇÃO MECÂNICA PARA A VIGA DE SECÇÃO TRANSVERSAL MENOR À TEMPERATURA CONSTANTE

A malha gerada para a geometria 75x150x6000 mm pode ser vista na Figura 36, em que a secção transversal foi dividida em 8 elementos no eixo x e 15 elementos no eixo y , e 400 elementos no eixo z , resultando em uma malha com dimensões de 9,375 mm em x , 10 mm em y e 15 mm em z .

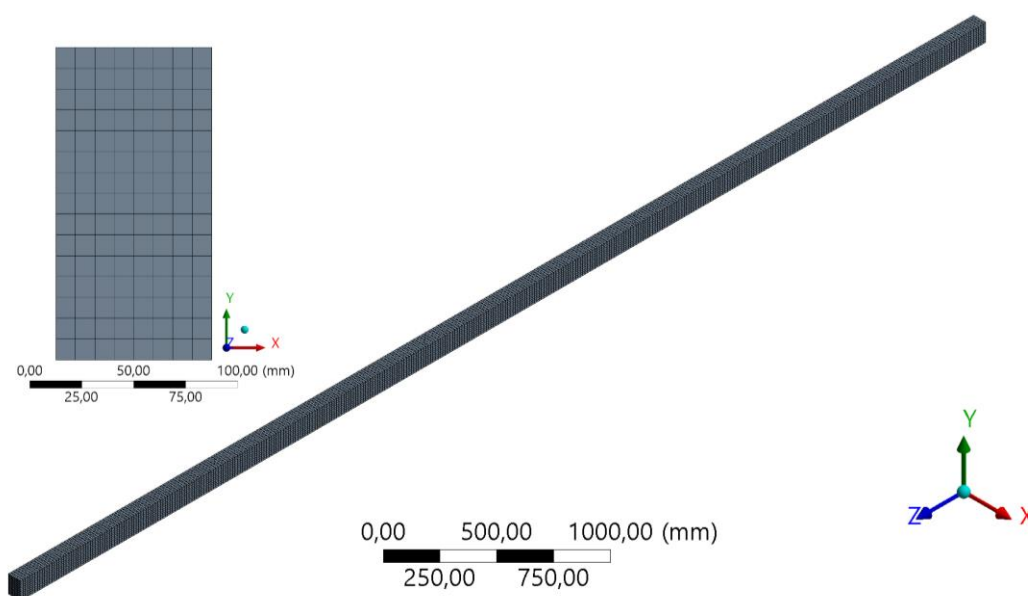


Figura 36 – Malha gerada para a viga de geometria 75x150x6000 mm.

As condições de contorno para a análise mecânica estão indicadas na Figura 37 para o ensaio de flexão em 3 pontos com a aplicação de uma carga centrada de 30 kN e apoios configurados com as restrições de deslocamento conforme apresentado na Tabela 33.

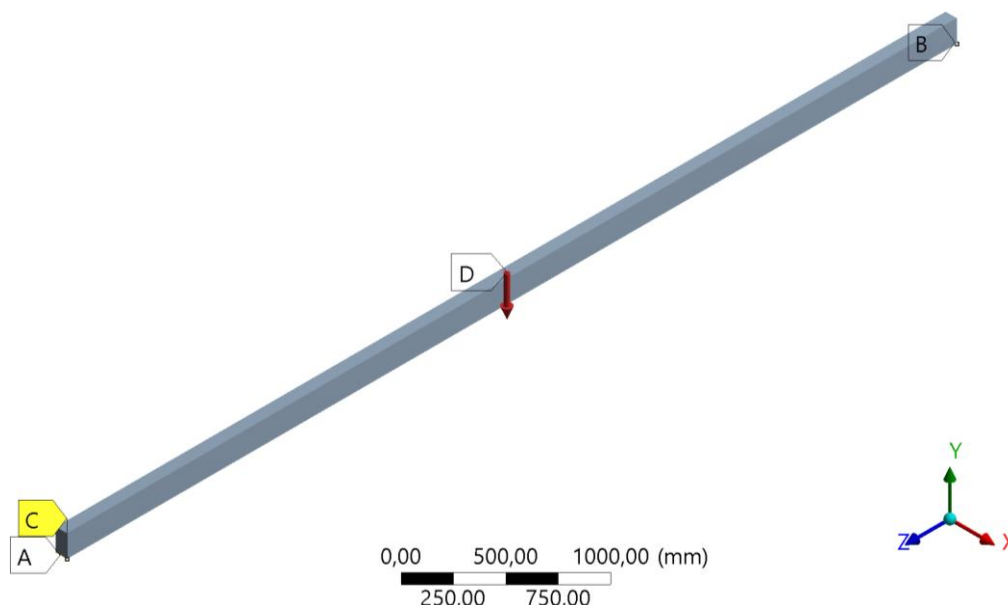


Figura 37 – Condições de contorno da análise mecânica para a viga 75x150x6000 mm, A, B e C são restrições de deslocamento, D é o ponto de aplicação da carga.

Tabela 33 – Condição de apoio da viga 75x150x6000 mm.

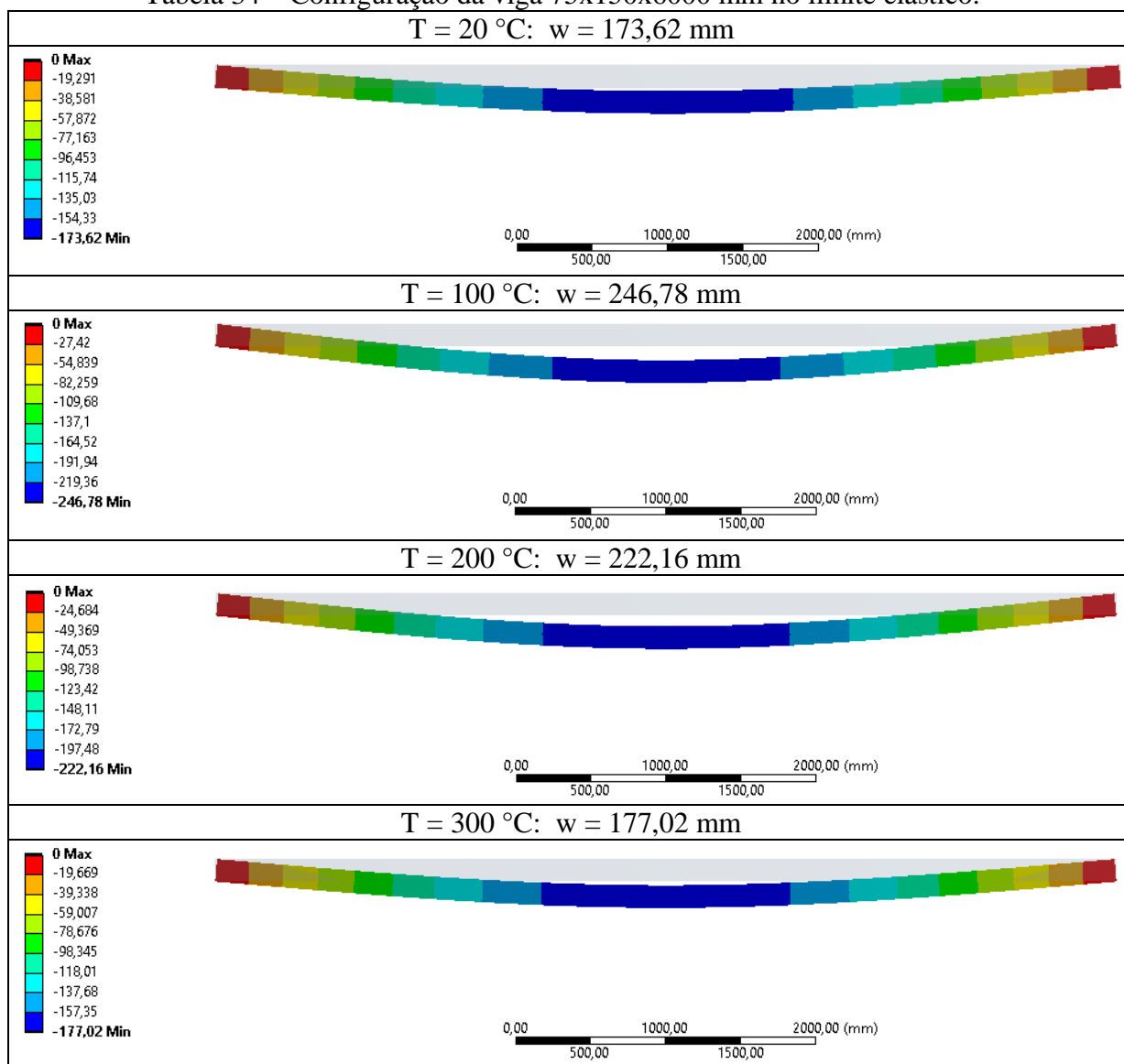
Deslocamento	Eixo		
	x	y	z
A	livre	fixo	fixo
B	livre	fixo	livre
C	fixo	livre	livre

O tempo total da simulação foi de 3600 segundos, para um incremento inicial de 20 segundos, mínimo de 0,12 segundos e máximo de 100 segundos, correspondentes respectivamente a aplicação de uma carga incremental de aproximadamente 166,67 N, 1 N e 833,33 N para as temperaturas de 20 °C e 100 °C. Aos 150 °C, 200 °C e 250 °C o incremento máximo foi reduzido para 20 segundos, logo de 166,67 N. E aos 300 °C o incremento máximo foi de 1 segundo, para um incremento de carga de 8,33 N.

Os valores de incremento de tempo foram adotados de modo a facilitar a convergência da simulação, garantir que o incremento mínimo correspondesse à aplicação de 1 N de carregamento e permitir a identificação do fim do regime elástico pelo comportamento do gráfico de tensões normais. Especificamente aos 300 °C foi necessário reduzir o incremento de tempo inicial e máximo para 1 segundo equivalente à aplicação incremental de uma carga de aproximadamente 8,33 N por segundo, uma vez que o para essa temperatura o tempo de simulação não ultrapassou pouco mais de 10 segundos, próximo de 88,7 N.

A medição do deslocamento na direção y e da tensão normal de flexão em z foi determinada para nó a meio vão no centro da face inferior da geometria. As imagens da configuração da viga ao final do regime elástico com seus respectivos valores de deslocamento vertical para algumas das temperaturas constantes estudadas, estão organizadas na Tabela 34.

Tabela 34 – Configuração da viga 75x150x6000 mm no limite elástico.



A Figura 38, Figura 39 e Figura 40 apresentam graficamente os dados obtidos para as simulações, de modo a facilitar a comparação entre o comportamento do material para cada uma das temperaturas constantes. Relacionando com o deslocamento a meio vão: a força aplicada a cada instante de tempo, o momento instalado obtido através da Equação (17) e a tensão normal de flexão numérica, respectivamente.

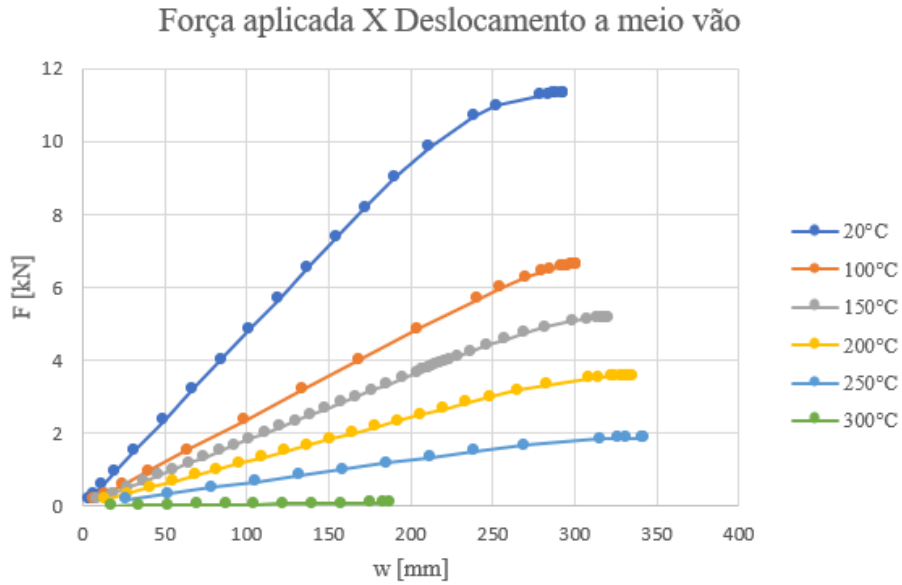


Figura 38 – Gráfico Força aplicada x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 75x150x6000 mm a 20 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C.

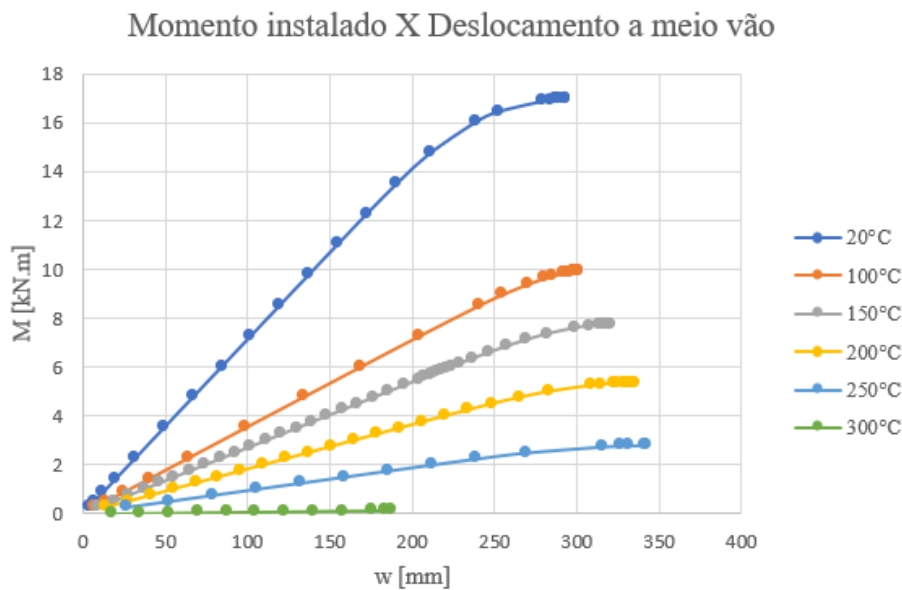


Figura 39 – Gráfico Momento instalado x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 75x150x6000 mm a 20 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C.

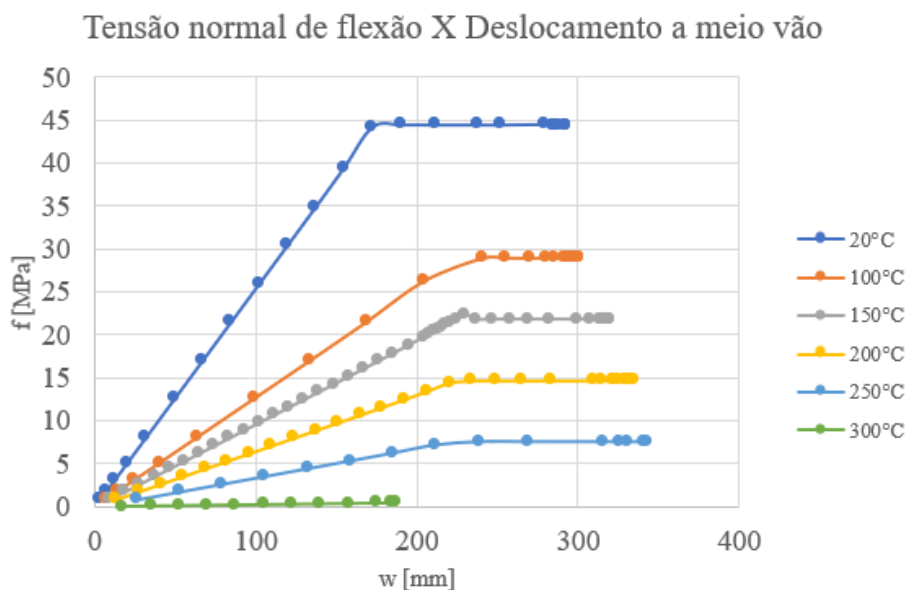


Figura 40 – Gráfico Tensão normal de flexão x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 75x150x6000 mm a 20 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C.

As curvas dos gráficos da Figura 38 e Figura 39 apresentam um comportamento mais acentuado para o deslocamento vertical nos instantes próximos da rotura, ou seja, para um pequeno acréscimo de carregamento ou momento aplicado, a viga sofre um aumento significativo no deslocamento direcional em y a meio vão.

Por meio do comportamento das curvas do gráfico da Figura 40 é possível determinar o instante da simulação correspondente ao limite do regime elástico, dado importante para a determinação do momento resistente para cada uma das temperaturas estudadas. As curvas de tensão normal de flexão por deslocamento a meio vão podem ser observadas separadamente nos gráficos da Figura 67 à Figura 72 do Anexo IV, permitindo a melhor visualização do ponto a se considerar para o final do regime elástico.

No gráfico da Figura 41, a curva $M_{Rd,ANSYS}$ relaciona os valores de momento resistente para cada uma das temperaturas ($M_{Rd,T}$), com o valor de momento resistente a 20 °C ($M_{Rd,20°C}$). Este comportamento de redução da resistência observado para os resultados numéricos se deve ao modelo material adotado, em especial ao fator de redução k_{θ} correspondente à curva $M_{Rd,EC5}$, indicado pelo Eurocódigo 1995-1-2 para a determinação analítica das propriedades de resistência à tração que foram inseridas durante a modelagem do programa.

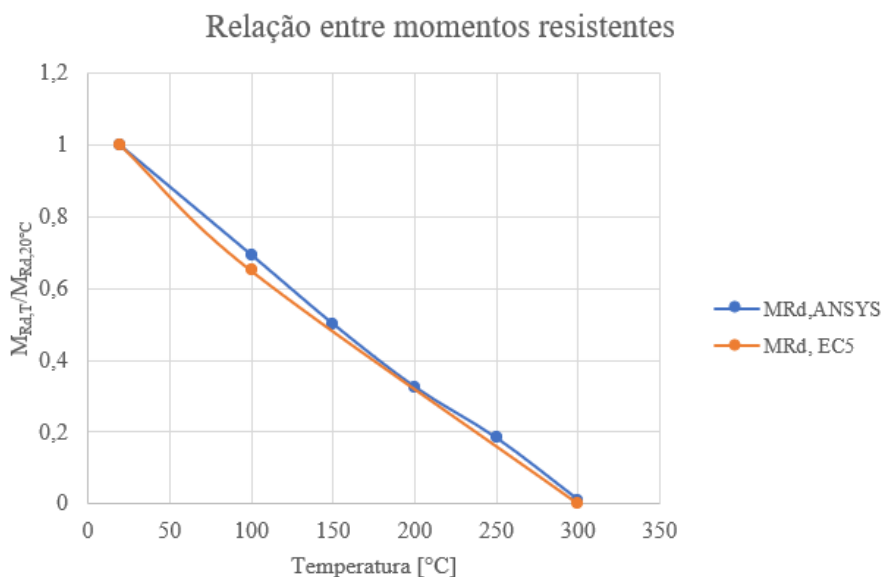


Figura 41 – Relação entre momentos resistentes para temperatura constantes, viga 75x150x6000 mm.

A proximidade da configuração das curvas do gráfico da Figura 41 permite concluir que o modelo numérico está devidamente calibrado para fornecer resultados coerentes com as propriedades determinadas para o material segundo o Eurocódigo 1995-1-2.

Numericamente determinou-se para uma temperatura constante de 100 °C, o momento resistente do material corresponde à 69,46% da resistência à temperatura ambiente de 20 °C, aos 150 °C essa relação se reduz à 50,16%, aos 200 °C à 32,57%, aos 250 °C à 18,32% e por fim, aos 300 °C atinge o valor de 1%. Sabe-se que o Eurocódigo 1995-1-2 estabelece para a madeira carbonizada resistência nula, entretanto na determinação do modelo do material foram inseridas propriedades aos 300 °C equivalentes à 1% da resistência máxima estabelecida.

Observa-se graficamente que além do ponto correspondente aos 300 °C, como já era esperado devido às propriedades inseridas no modelo do material, o momento resistente obtido numericamente apresenta-se em alguns pontos superior ao estabelecido no Eurocódigo 1995-1-2, isso se deve à dificuldade de se determinar com precisão o instante do limite elástico, uma vez que o valor do momento resistente para cada uma das temperaturas foi obtido por meio da análise gráfica dos resultados numéricos que é comprometida a depender do incremento de tempo aplicado no fim do regime elástico.

A determinação analítica da carga aplicada e do momento resistente da viga à temperatura ambiente de 20 °C para o regime elástico, baseada nas Equações (22) e (17) fornece os valores de $F_{el} = 8,34$ kN e $M_{el} = 12,51$ kN.m. Aplicando o fator de redução k_{θ} para as demais

temperaturas, foram obtidos os valores analíticos para a resistência conforme o aumento da temperatura, de acordo com o Eurocódigo 1995-1-2.

A comparação entre os valores de resistência obtidos analiticamente segundo o Eurocódigo 1995-1-2 em relação aos resultados das simulações numéricas, coletados no instante final do regime elástico para cada uma das temperaturas constantes, está organizada na Tabela 35 junto dos respectivos valores de variação percentual.

Tabela 35 – Resultados de carga aplicada e momento resistente segundo o Eurocódigo 1995-1-2 e o *Ansys*, viga 75x150x6000mm.

	T [°C]	EC5	ANSYS	Variação percentual [%]
F_{el} [kN]	20	8,34	8,19	1,80
	100	5,42	5,69	-4,98
	150	4,07	4,11	-0,98
	200	2,71	2,67	1,48
	250	1,36	1,5	-10,29
	300	0	0,0833	-
M_{el} [kN.m]	20	12,51	12,28	1,84
	100	8,13	8,53	-4,92
	150	6,1	6,16	-0,98
	200	4,07	4,00	1,72
	250	2,03	2,25	-10,84
	300	0	0,125	-

As imagens da viga inteira e os resultados da variação do deslocamento e das tensões normais de flexão para cada uma das temperaturas encontram-se apresentados no Anexo V, onde todas as configurações se apresentam para o último instante da simulação, que antecede a rotura do material.

O instante de tempo, assim como os valores máximos e mínimos de deslocamento estão indicados na legenda à esquerda da viga pra cada uma das imagens. O mesmo se aplica para as imagens que representam a geometria sob o estado de tensões normais ao longo do eixo longitudinal.

Pequenas variações entre os valores representados na legenda das figuras e os valores coletados para estudo, podem ser explicadas pelo fato das imagens terem sido obtidas para a viga inteira facilitando a visualização do comportamento total da peça, mas os resultados não são tão precisos quanto aqueles apresentados no nó posicionado a meio vão no centro da face inferior da viga, pois é incluído na análise do programa para a viga total, os efeitos localizados

como pequenas deformações dos elementos que surgem no local da aplicação da carga e das reações nos apoios.

Através da escala de cores gerada pelo programa é possível verificar as zonas mais críticas da viga tanto para o surgimento de grandes deslocamentos quanto para os esforços que surgem devido à aplicação da carga no ensaio de flexão, os valores positivos correspondem à esforços de tração e os negativos à compressão, além desses fenômenos, ocorre também o efeito do corte na zona intermediária a esses esforços.

A representação da configuração inicial da viga em cinza possibilita a comparação visual do comportamento da viga antes e depois da aplicação do carregamento.

5.2.2 SIMULAÇÃO MECÂNICA PARA A VIGA DE SECÇÃO TRANSVERSAL MAIOR À TEMPERATURA CONSTANTE

A malha gerada para a geometria 250x300x6000 mm pode ser vista na Figura 42, em que a secção transversal foi dividida em 12 elementos no eixo x e 15 elementos no eixo y , e 200 elementos no eixo z , resultando em uma malha com dimensões 20,83 mm em x , 25 mm em y e 30 mm em z .

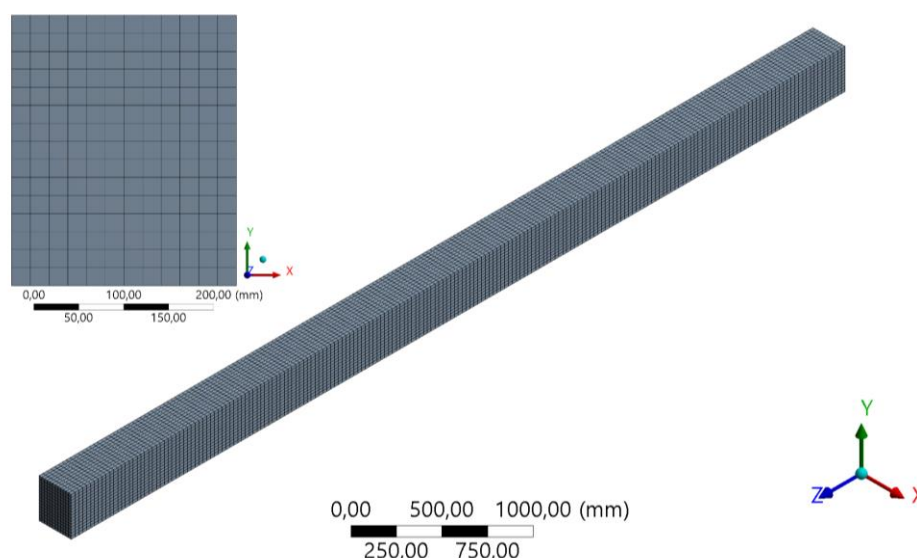


Figura 42 – Malha gerada para a secção transversal da viga 250x300x6000 mm.

A geometria robusta de 250x300x6000 mm apresenta uma maior resistência à aplicação de carga se comparada à viga de dimensões 75x150x6000 mm mais esbelta, portanto para garantir que fosse alcançada a força de rotura, modelou-se o programa para aplicar 200 kN a

meio vão no ensaio de flexão de três pontos, ver Figura 43, as demais condições de contorno relacionadas aos apoios da viga estão especificadas na Tabela 36.

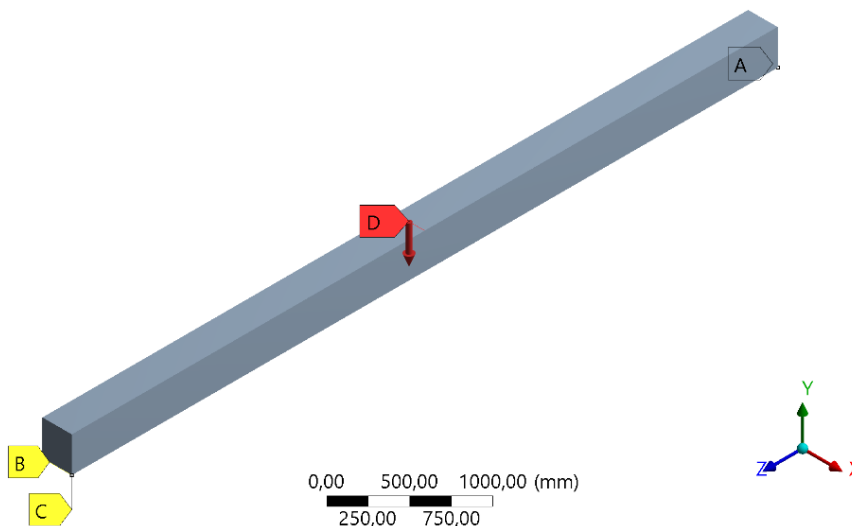


Figura 43 – Condições de contorno da análise mecânica para a viga 250x300x6000 mm, A, B e C são restrições de deslocamento, D é o ponto de aplicação da carga.

Tabela 36 – Condição de apoio da viga 250x300x6000 mm.

Deslocamento	Eixo		
	x	y	z
A	livre	fixo	livre
B	livre	fixo	fixo
C	fixo	livre	livre

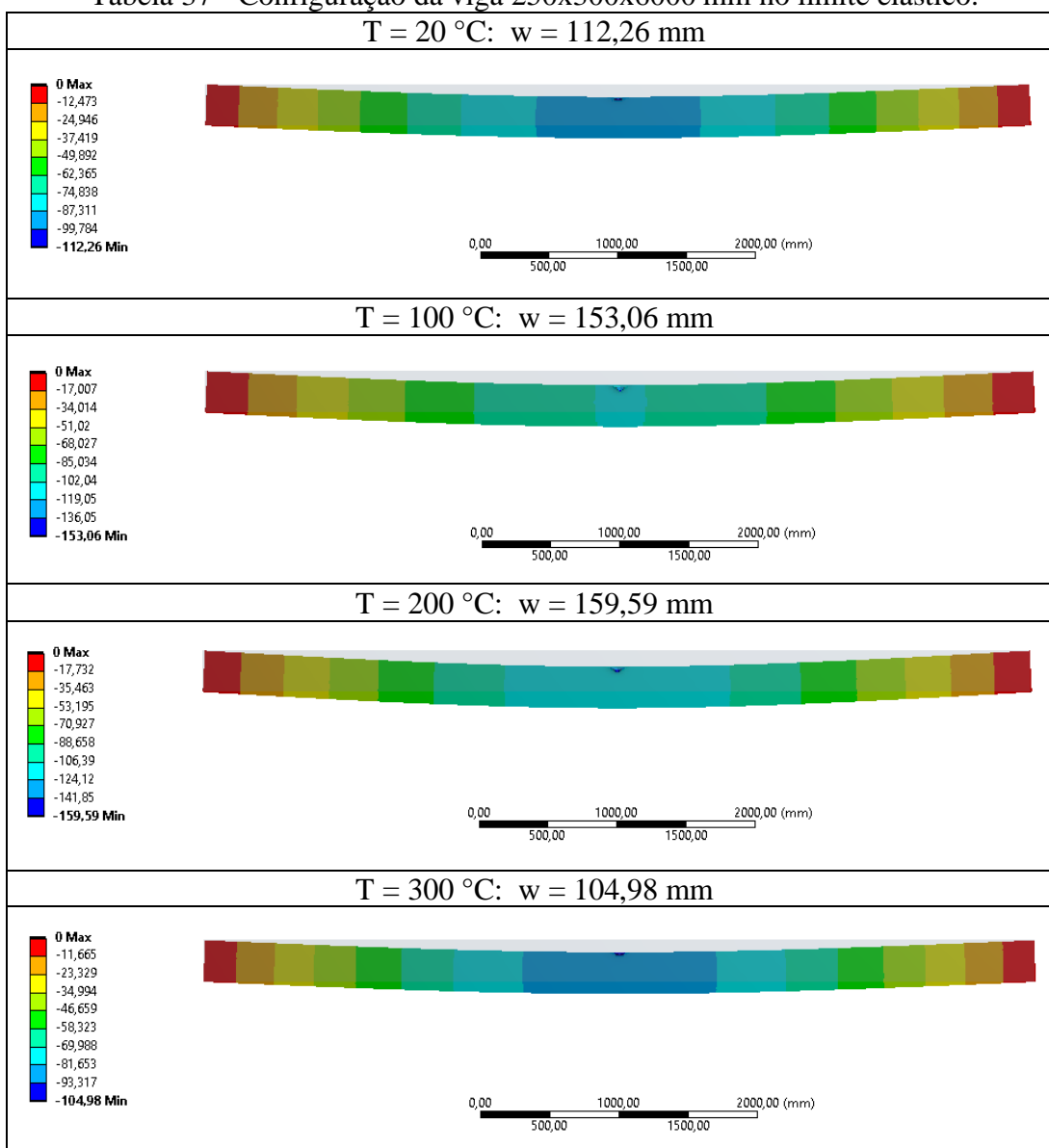
O tempo total estabelecido para a simulação foi de 3600 segundos, para um incremento de carga inicial de 20 segundos, mínimo de 0,018 segundos e máximo de 100 segundos, garantindo que o incremento mínimo correspondesse à aplicação incremental de 1 N de carregamento, inicial de 1111,11 N e máxima de 5555,55 N. Visto que a resistência da viga aos 300 °C é muito baixa, o incremento de tempo inicial e máximo foram reduzidos para 1 segundo correspondente à uma aplicação de carga incremental de 55,56 N.

Os incrementos de tempo foram determinados de modo a facilitar a convergência da simulação, garantir que o incremento mínimo correspondesse à aplicação de 1 N de carregamento e permitir a identificação do fim do regime elástico pelo comportamento do gráfico de tensões normais. A redução do incremento de tempo máximo para alguns valores de temperatura com o intuito de facilitar a observação do limite do regime elástico, assim como foi feito para a viga de secção menor, para o modelo numérico adotado para a viga mais robusta não apresentou grande melhoria na análise dos dados coletados pelo programa, portanto optou-

se por manter o valor do incremento máximo de 100 segundos, com exceção da simulação a 300 °C em que a rotura da viga se deu em aproximadamente 23 segundos de simulação, ou seja, para uma carga de aproximadamente 1286 N.

A medição do deslocamento em y e da tensão normal de flexão em z foi determinada para um nó a meio vão no centro da face inferior da geometria. As imagens da configuração da viga ao final do regime elástico com seus respectivos valores de deslocamento vertical para algumas das temperaturas constantes estudadas, estão organizadas na Tabela 37.

Tabela 37 - Configuração da viga 250x300x6000 mm no limite elástico.



A Figura 44, Figura 45 e Figura 46 apresentam graficamente os resultados obtidos para as simulações, de modo a facilitar a comparação entre o comportamento do material para cada

uma das temperaturas constantes. Relacionando com o deslocamento a meio vão: a força aplicada a cada instante de tempo, o momento instalado obtido através da Equação (17) e a tensão normal de flexão numérica, respectivamente.

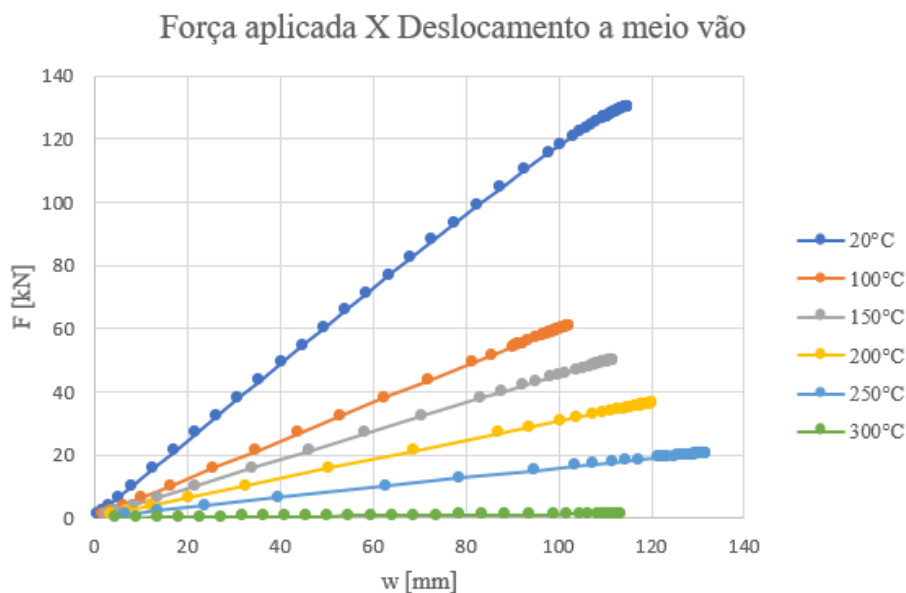


Figura 44 – Gráfico Força aplicada x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 250x300x6000 mm a 20 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C.

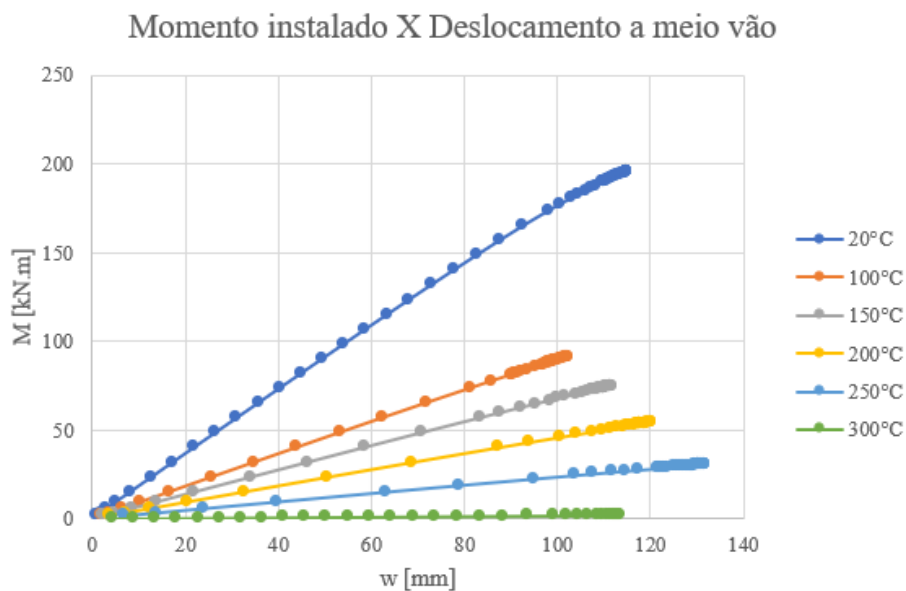


Figura 45 – Gráfico Momento instalado x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 250x300x6000 mm a 20 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C.

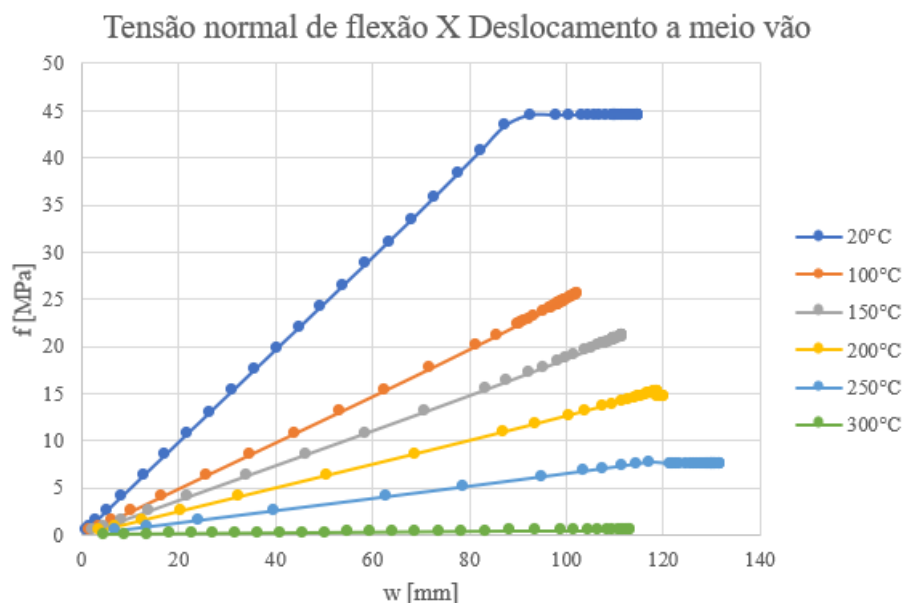


Figura 46 – Gráfico Tensão normal de flexão x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 250x300x6000 mm a 20 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C.

Nos gráficos da Figura 44 e Figura 45 observa-se um comportamento quase linear para a força aplicada por deslocamento a meio vão e para o momento instalado por deslocamento a meio vão, mesmo nos instantes próximos à rotura da viga, isso se deve ao fato da viga de geometria 250x300x6000 mm ser compacta. Dessa forma, o incremento de carga nos instantes finais da simulação não aumenta significativamente os deslocamentos direcionais medidos em y a meio vão.

Por meio do comportamento das curvas do gráfico da Figura 46 deveria ser possível determinar o instante da simulação correspondente ao limite do regime elástico, entretanto para as temperaturas de 100 °C e 150 °C não foi observada a formação do patamar de plastificação, e aos 200 °C observou-se apenas alguns pontos no momento da transição entre o regime elástico e plástico. Conclui-se, portanto, que o modelo numérico não foi capaz de analisar o comportamento do material até o limite elástico, a tentativa de realizar testes com a redução do incremento de tempo máximo para a aplicação da carga, não foi suficiente para que a simulação continuasse a fornecer mais pontos para a análise sob essas temperaturas.

Esta situação pode estar associada à forma como se deu aplicação da carga no banzo superior da viga e a amplitude do carregamento, visto que para levar a viga de geometria mais robusta à rotura foi necessário determinar um carregamento elevado, ocasionando em grandes deformações dos elementos que receberam a aplicação direta da força, em especial os elementos das extremidades. E para grandes deformações dos elementos finitos, a simulação deixa de

convergir, fornecendo resultados que não abrangeram a plastificação da secção para algumas das temperaturas estudadas.

Outro aspecto a se considerar para a ausência do patamar de plastificação é o fato de vigas mais compactas submetidas à esforços de flexão apresentarem o efeito do esforço de corte mais significativo em relação ao efeito da tensão normal, se comparadas a vigas esbeltas, em que o efeito da tensão normal é predominante em relação ao esforço de corte, não havendo dificuldades para o software convergir. Uma vez que é a tensão equivalente de von Mises que é comparada com a curva de resistência do material e para essa tensão considera-se a parcela de tensão normal e de corte.

Dessa forma, conclui-se que para as temperaturas de 100 °C e 150 °C o software não foi capaz de atingir o limite elástico, portanto, o instante considerado neste estudo corresponde ao último ponto da simulação, ver Figura 92 e Figura 93 do Anexo VI.

Aos 20 °C, 200 °C, 250 °C e 300 °C foi possível identificar o final do regime elástico e a formação do patamar de plastificação graficamente, permitindo a determinação dos resultados de resistência necessários para a comparação com os valores fornecidos pelo Eurocódigo 1995-1-2, ver Figura 91, Figura 94, Figura 95 e Figura 96 do Anexo VI.

No gráfico da Figura 47, a curva $M_{Rd,ANSYS}$ relaciona os valores de momento resistente para cada uma das temperaturas ($M_{Rd,T}$), com o valor de momento resistente a 20 °C ($M_{Rd,20°C}$). O comportamento de redução da resistência indicado pelo Eurocódigo 1995-1-2 para a determinação analítica das propriedades de resistência à tração que foram inseridas durante a modelagem do programa corresponde à curva $M_{Rd,EC5}$. Observa-se, entretanto, um desvio nos valores determinados numericamente para os pontos correspondentes à temperatura constante de 100 °C e 150 °C.

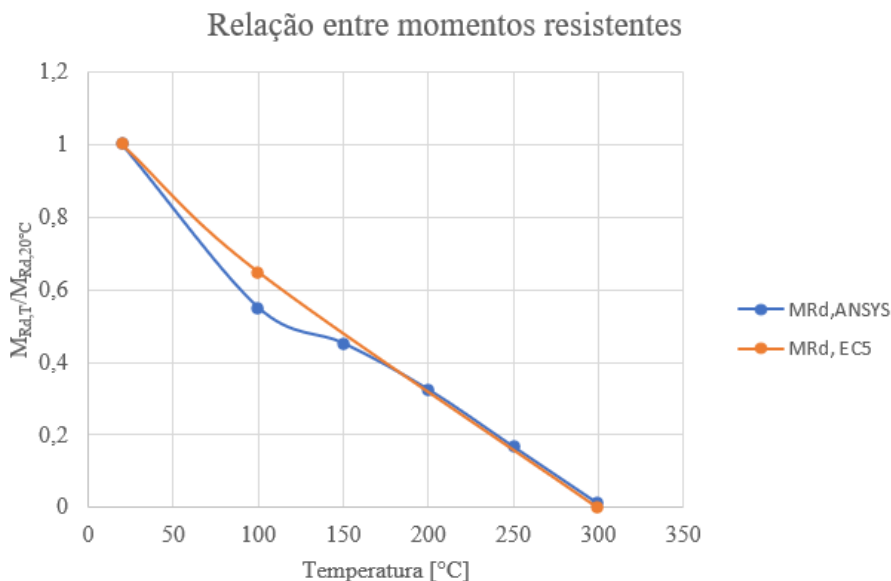


Figura 47 – Relação entre momentos resistentes para temperatura constantes, viga 250x300x6000 mm.

A variação nos resultados obtidos através do *Ansys* em relação ao que foi determinado no modelo material da simulação com base no Eurocódigo 1995-1-2, permite concluir que o modelo numérico não foi calibrado de modo a permitir a convergência da simulação até o final do teste, fornecendo resultados de resistência inferiores ao esperado para as simulações à temperatura constante de 100 °C e 150 °C.

Numericamente determinou-se para uma temperatura constante de 100 °C, o momento resistente do material corresponde à 55,11% da resistência a 20 °C, aos 150 °C essa relação se reduz à 45,32%, aos 200 °C à 32,53%, aos 250 °C à 16,73% e por fim, aos 300 °C atinge o valor de 0,96%. Sabe-se que o Eurocódigo 1995-1-2 estabelece para a madeira carbonizada resistência nula, entretanto na determinação do modelo do material foram inseridas propriedades aos 300 °C equivalentes à 1% da resistência máxima estabelecida.

Mesmo que os pontos correspondentes à 100 °C e 150 °C apresentem uma resistência menor do que o que estabelecido pelo Eurocódigo 1995-1-2, de maneira geral, a relação de momento resistente fornecidos pelo *Ansys* e o fator de redução do Eurocódigo 1995-1-2 apresentaram valores muito próximos para os demais pontos. Pequenas variações observadas associam-se à determinação do instante do limite elástico por meio da análise gráfica dos resultados numéricos que é comprometida a depender do incremento de tempo aplicado no fim do regime elástico.

A determinação analítica da carga aplicada e do momento resistente da viga à temperatura ambiente de 20 °C para o regime elástico, baseada nas Equações (22) e (17) fornece

os valores de $F_{el} = 111,225$ kN e $M_{el} = 166,837$ kN.m. Aplicando o fator de redução k_{θ} para as demais temperaturas, foram obtidos os valores analíticos para a resistência conforme o aumento da temperatura, de acordo com o Eurocódigo 1995-1-2.

A comparação entre os valores de resistência obtidos analiticamente segundo o Eurocódigo 1995-1-2 em relação aos resultados das simulações numéricas, coletados ao instante final do regime elástico ou ao último instante de simulação, para cada uma das temperaturas constantes, está organizada na Tabela 38 junto dos respectivos valores de variação percentual.

Tabela 38 – Resultados de carga aplicada e momento resistente segundo o Eurocódigo 5 e o Ansys, viga 250x300x6000 mm.

	T [°C]	EC5	ANSYS	Varição percentual [%]
F_{el} [kN]	20	111,23	110,14	0,98
	100	72,3	60,7	16,04
	150	54,22	49,92	7,93
	200	36,15	35,83	0,89
	250	18,07	18,43	-1,99
	300	0	1,056	-
M_{el} [kN.m]	20	166,84	165,21	0,98
	100	108,44	91,05	16,04
	150	81,33	74,88	7,93
	200	54,22	53,75	0,87
	250	27,11	27,65	-1,99
	300	0	1,583	-

As imagens da viga inteira e os resultados da variação do deslocamento e das tensões normais de flexão para cada uma das temperaturas encontram-se apresentados no Anexo VII, onde todas as configurações se apresentam para o último instante da simulação, que antecede a rotura do material.

As considerações a respeito das imagens coletadas para a viga de geometria 250x300x6000 mm são as mesmas feitas na seção 5.2.1 com relação à viga de geometria menor.

5.3 SIMULAÇÃO TERMOMECÂNICA DE SECÇÕES EXPOSTAS À CURVA DE INCÊNDIO ISO834

Aplicando um dos importantes recursos disponíveis no software *Ansys Workbench*, essa seção tem como objetivo apresentar os resultados obtidos para duas simulações acopladas, a térmica e a mecânica. As vigas foram submetidas à uma exposição térmica para um tempo pré-estabelecido e com base no campo de temperaturas encontrado iniciou-se a aplicação do carregamento de forma incremental até o instante do colapso. Assim, foi possível obter resistência do material a depender do tempo de exposição ao fogo e da geometria da viga.

Os tempos de exposição foram determinados com base na geometria das vigas, para a viga de secção menor, estabeleceu-se uma exposição máxima de 30 minutos, e para a viga de secção maior uma exposição de até 60 minutos. O campo de temperaturas na secção transversal, a profundidade de carbonização e a taxa de carbonização puderam ser determinados ao final da simulação térmica.

A necessidade de considerar as condições de simetria das vigas em estudo, surgiu para a análise mecânica, uma vez que a evolução do aumento da temperatura para o interior da secção leva à perda de resistência dos elementos mais externos, o que impossibilitou a aplicação do carregamento e das condições de apoios na superfície da viga, uma vez que para os elementos finitos que ultrapassassem a temperatura de carbonização sofreriam grandes deformações nos locais de aplicação e reação das cargas, comprometendo a convergência da simulação.

Sendo assim, a aplicação das condições de simetria no plano yz particionou a viga longitudinalmente em duas metades iguais, e o plano xy dividiu a geometria à meio vão, possibilitando determinar com maior facilidade os nós centrais da secção, onde as temperaturas mantiveram-se mais baixas por mais tempo. Utilizou-se, portanto, as opções de *remote force* e *remote displacement* devido à possibilidade de se fazer a aplicação da carga e condições de apoio não somente no centro das superfícies ou arestas, como também em qualquer nó da geometria.

Ao considerar apenas $\frac{1}{4}$ das vigas nas simulações numéricas, no plano de simetria yz aplicou-se restrições de deslocamento em x , permitindo apenas a movimentação vertical em y e longitudinal em z , já para o plano de simetria xy além das restrições de deslocamento, fixou-se também a rotação entorno dos eixos, resultando em uma face que não se desloca segundo o eixo z e não rotaciona entorno do eixo y e z , ficando livre para movimentar-se nos eixos x e y e entorno do eixo x .

Ver restrições definidas em cada uma das vigas no Anexo VIII, Figura 115 e Figura 116 correspondente à aplicação na face do plano de simetria yz , Figura 117 e Figura 118 correspondente à aplicação nos nós do plano de simetria xy .

A malha determinada para cada viga precisou atender ao requisito de possuir uma quantidade par de elementos na altura da secção transversal, de modo que a carga e as condições de apoio pudessem ser aplicadas em um nó à meia altura.

Portanto, em $\frac{1}{4}$ da viga de geometria menor, adotou-se a divisão da secção transversal em 4 elementos segundo o eixo x e 16 elementos segundo o eixo y , ambos com 9,375 mm, longitudinalmente aplicou-se a dimensão de 20 mm para cada elemento, resultando em 150 elementos segundo o eixo z . Ver Figura 48.

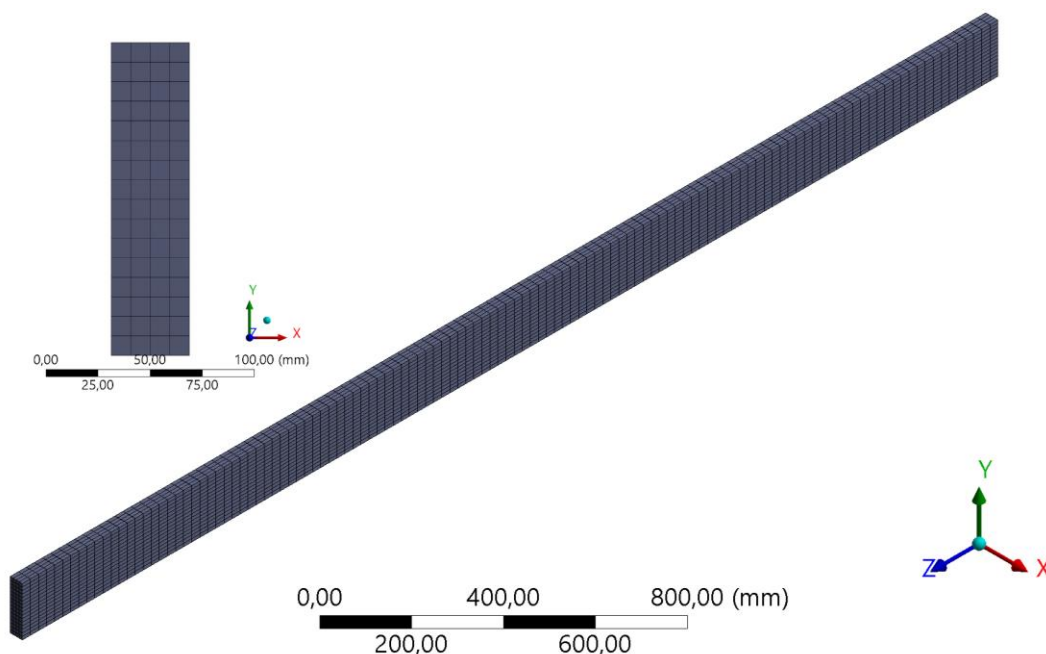


Figura 48 – Malha gerada para a secção transversal de $\frac{1}{4}$ da viga 75x150x6000 mm.

Para $\frac{1}{4}$ da viga de geometria maior, o número de elementos da secção em x foi igual a 10 e em y igual a 24, longitudinalmente o a viga dividiu-se em 150 elementos, resultando em elementos finitos de dimensões 12,5 x 12,5 x 20,0 em x , y e z respectivamente. Ver Figura 49.

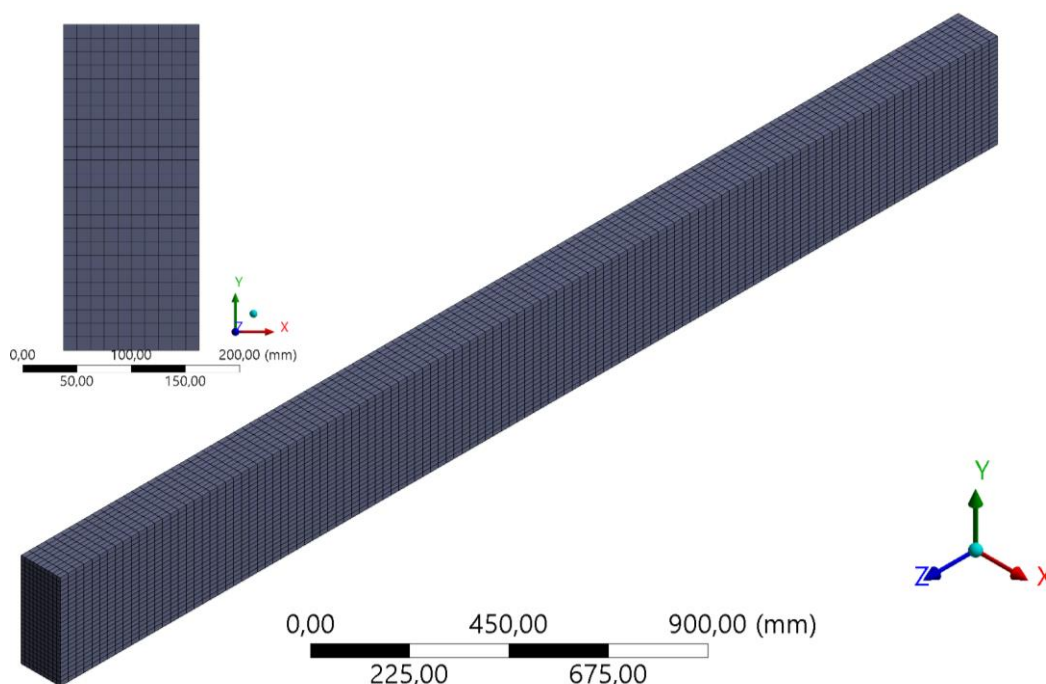


Figura 49 – Malha gerada para a secção transversal de $\frac{1}{4}$ da viga 75x150x6000 mm.

As demais condições de contorno serão abordadas separadamente para cada uma das geometrias nos tópicos a seguir.

5.3.1 SIMULAÇÃO TÉRMICA EM REGIME TRANSIENTE PARA AS VIGAS DE SECÇÃO TRANSVERSAL MENOR E MAIOR

Os resultados obtidos numericamente para a profundidade de carbonização e taxa de carbonização das vigas de geometria 75x150x6000 mm e 250x300x6000 mm e seus respectivos tempos de exposição estão organizados nessa seção.

Para a obtenção dos dados da evolução da temperatura no interior da secção transversal, foram consideradas três faces expostas à convecção e radiação, uma vez que uma das faces laterais representadas na geometria do problema numérico correspondente ao plano de simetria yz corresponde ao interior da viga.

Foram fixados 6 tempos de exposição para cada uma das geometrias, sendo para a viga de menor secção intervalos de 5 em 5 minutos, já para a viga secção maior os intervalos foram de 10 em 10 minutos. O campo de temperaturas na secção transversal obtido ao final de cada tempo de exposição à curva de incêndio ISO834 está representado no Anexo IX.

De modo a se obter o resultado da evolução da temperatura para o interior da secção transversal, posicionou-se na aresta correspondente à zona central da viga total, um caminho

para fornecer os dados de temperatura em função da profundidade atingida com relação à altura da secção, ver posicionamento na Figura 131 e Figura 132 do Anexo X.

Os resultados obtidos numericamente estão organizados no gráfico da Figura 50 para a viga de secção transversal 75x150 mm, e no gráfico da Figura 51 para a viga de secção transversal 250x300 mm. Ressalta-se que os valores de profundidade correspondentes à temperatura exata de 300 °C foram determinados por meio de interpolação linear para cada uma das curvas, os gráficos podem ser observados separadamente no Anexo XI, Figura 133 à Figura 144.

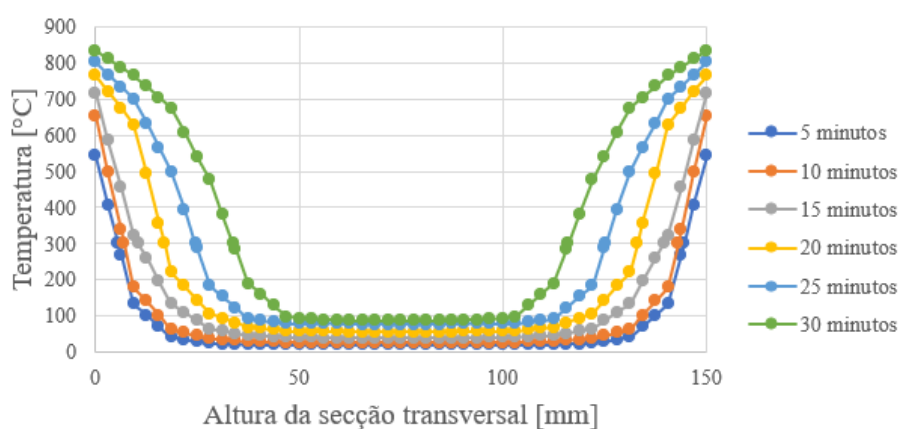


Figura 50 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 75x150x6000 mm para intervalos de exposição ao fogo de 5 em 5 minutos.

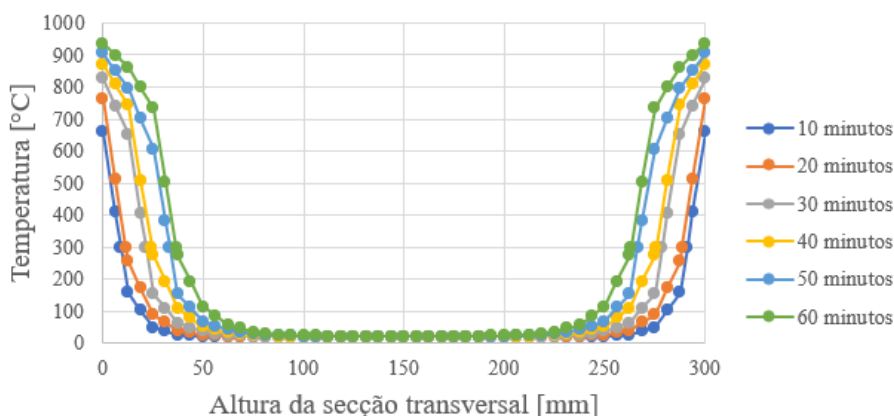


Figura 51 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 250x300x6000 mm para intervalos de exposição ao fogo de 10 em 10 minutos.

Para fins de comparação do efeito da exposição ao fogo entre as duas geometrias de viga, a representação do campo de temperaturas obtido para cada uma das secções transversais a um mesmo tempo de exposição está indicada na Figura 52.

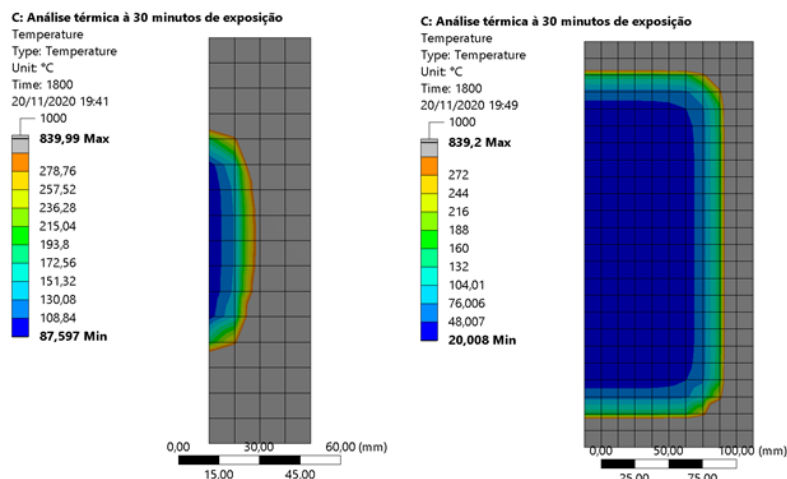


Figura 52 – Comparação entre os campos de temperaturas obtidos para 30 minutos de exposição em secções transversais diferentes, 75x150 mm (esq.) e 250x300 mm (dir.).

Observa-se graficamente que o fenômeno de arredondamento dos cantos é notado para as duas geometrias estudadas, entretanto de forma mais intensa para a viga de secção transversal menor, principalmente a partir dos 20 minutos de exposição.

Deve-se destacar que para a viga de secção 75x1500 mm, devido ao seu formato retangular com uma relação base/altura igual a $\frac{1}{2}$, quando submetida à tempos de exposição maiores, a diferença da profundidade de carbonização nas direções x e y se torna evidente, facilmente perceptível na Figura 122, Figura 123 e Figura 124 do Anexo IX, tomando como base a malha de dimensão quadrada indicada em cada uma das imagens. Esse comportamento pode ser explicado pelo fenômeno do arredondamento dos cantos que começa a interferir nos resultados obtidos, provocando uma aceleração na carbonização da dimensão menor da secção transversal.

Ver na Figura 53 a forma como o Eurocódigo 1995-1-2 considera o fenômeno do arredondamento dos cantos, em comparação com o que se obteve em uma das simulações numéricas.

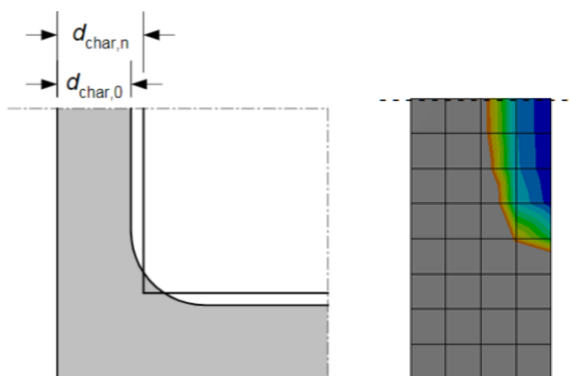


Figura 53 – Arredondamento dos cantos segundo o Eurocódigo 1995-1-2 (esq.), [9], e segundo o Ansys aos 30 minutos de exposição da viga de secção 75x150 mm (dir.).

Para a viga de secção transversal mais próxima de um quadrado, com relação base/altura de aproximadamente 0,83 o fenômeno de arredondamento dos cantos não apresenta grandes interferências uma vez que se manifesta nas duas direções de maneira mais uniforme.

Os dados coletados para a evolução da temperatura para o interior da secção transversal, correspondentes a temperaturas superiores aos 300 °C, permitem determinar a profundidade de carbonização segundo análise numérica, para cada um dos tempos de exposição das geometrias estudadas. Na Tabela 39 estão organizados os valores da profundidade de carbonização obtidos pelo *Ansys* ($d_{char,n,ANSYS}$), comparados aos valores obtidos com base no Eurocódigo 1995-1-2 ($d_{char,n,EC5}$) através da Equação (12) do método da secção reduzida, além da taxa de carbonização calculada pela relação entre profundidade carbonizada e tempo de exposição.

Tabela 39 – Comparação entre a profundidade de carbonização e a taxa de carbonização segundo o Eurocódigo e segundo análise numérica, para secções 75x150 mm e 250x300 mm.

Tempo [min]	$d_{char,n,EC5}$ [mm]	$d_{char,n,ANSYS}$ [mm]	$\beta_{n,EC5}$ [mm/min]	$\beta_{n,ANSYS}$ [mm/min]	Variação percentual [%]
Secção 75x150 mm.					
5	4	5,56	0,8	1,112	-39,00
10	8	7		0,700	12,50
15	12	10,52		0,701	12,33
20	16	16,95		0,848	-5,94
25	20	24,68		0,987	-23,40
30	24	33,91		1,130	-41,29
Secção 250x300 mm.					
10	8	8,95	0,8	0,895	-11,88
20	16	11,4		0,570	28,75
30	24	21,34		0,711	11,08
40	32	24,31		0,608	24,03
50	40	33,45		0,669	16,38
60	48	36,76		0,613	23,42

A diferença encontrada para os valores determinados analiticamente e numericamente pode ser explicada pelo fato do Eurocódigo 1995-1-2 considerar uma simplificação para o efeito do arredondamento dos cantos ocorrer de maneira uniforme em toda a secção ao se adotar a taxa de carbonização $\beta_n = 0,8$ mm/min. Além disso, os dados fornecidos pelo *Ansys* não corresponderam exatamente aos 300 °C e foi necessário realizar interpolações lineares para obter a profundidade carbonizada das secções.

Outro aspecto que interfere nesses resultados é a malha adotada para cada geometria, uma vez que o programa fornece valores de temperatura conforme a distribuição dos elementos finitos na secção gerando alguns dados com valores muito distantes dos 300 °C, o que leva à necessidade de se fazer aproximações mais grosseiras para a determinação da espessura da camada carbonizada, interferindo diretamente no valor da taxa de carbonização obtido com base nos resultados do programa.

Nota-se também que o valor estabelecido pelo Eurocódigo 1995-1-2 para a taxa de carbonização é muito genérico, uma vez que é estabelecido um único valor para uma extensa variedade de espécies de madeira, além conferir ao material um comportamento linear para a evolução da profundidade da camada carbonizada ao longo do tempo, o que não se observou na análise numérica.

Por fim, observa-se nas duas geometrias uma taxa de carbonização mais elevada no primeiro tempo de exposição, tanto aos 5 minutos para a viga de secção menor, quanto aos 10 minutos para a viga de secção maior. Para ambas as situações o valor elevado da taxa de carbonização pode ser explicado pelo comportamento da madeira frente à exposição ao fogo, em que nos primeiros minutos de incêndio, o aquecimento do interior da secção se dá mais rapidamente em relação aos minutos seguintes, uma vez que a formação da camada carbonizada na superfície da viga protege o restante do material, retardando a evolução da temperatura para o interior da secção transversal.

Após os 20 minutos de exposição da viga de geometria 75x150x6000 mm, observa-se novamente uma taxa de carbonização maior do que é apresentado pela norma, momento em que se notou a interferência mais significativa do fenômeno de arredondamento dos cantos na redução da secção transversal, principalmente na direção de menor dimensão.

Apesar de todas as considerações, no geral, para a viga de secção maior, os valores determinados para a taxa de carbonização segundo o *Ansys*, apresentam-se menores que 0,8 mm/min, dessa forma conclui-se que o método simplificado proposto pelo Eurocódigo mantém uma margem de segurança ao considerar uma taxa de carbonização maior.

Realizando uma comparação baseada nos resultados obtidos em [4] por P. J. V. Gouveia, para um estudo numérico em *Ansys* de variadas dimensões de secção transversal sob exposição ao fogo de 30 minutos, nota-se também que para a geometria da secção de 80x140 mm, a mais próxima das dimensões estudadas neste trabalho para a viga menor, o valor de β_n 21,43% superior ao estabelecido pelo Eurocódigo, destaca-se que a relação base/altura é de 0,57. Situação semelhante à observada para a viga de secção 75x150 mm, em que o valor determinado

para β_n para o mesmo tempo de exposição apresentou uma variação percentual de 41,29%, para uma relação base/altura menor, ver Tabela 45 no Anexo XII.

Observa-se ainda na Tabela 45 do Anexo XII que para as vigas de geometria maior, o valor médio da taxa de carbonização determinado pelo *Ansys* se apresentou cada vez mais distantes do valor estabelecido por norma, de modo que β_n se torna cada vez menor conforme as dimensões da secção transversal são aumentadas para um tempo de exposição fixo em 30 minutos, [4].

5.3.2 SIMULAÇÃO MECÂNICA ACOPLADA À EXPOSIÇÃO TÉRMICA TRANSIENTE PARA A VIGA DE SECÇÃO TRANSVERSAL MENOR

As condições de contorno adotadas para a análise mecânica de $\frac{1}{4}$ da viga de geometria 75x150x6000 mm estão indicadas na Figura 54.

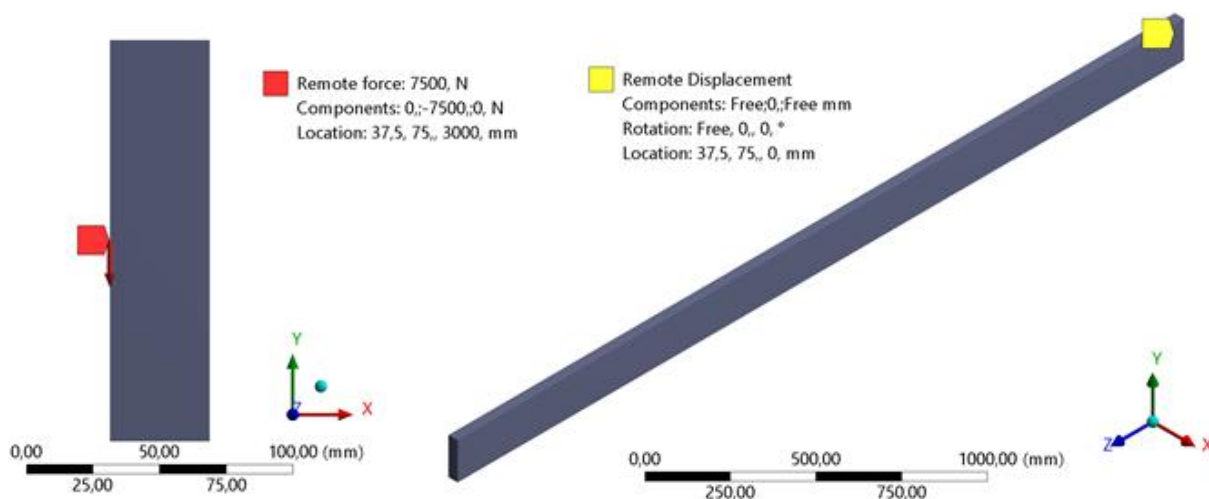


Figura 54 – Local de aplicação da carga e restrição de deslocamento e rotação no apoio para $\frac{1}{4}$ da viga 75x150x6000 mm.

Deve-se observar que a aplicação do carregamento se deu no nó correspondente ao centro da secção à meio vão para a viga inteira, manteve-se para essa geometria a aplicação de uma carga de 30 kN, logo, para $\frac{1}{4}$ de viga aplicou-se incrementalmente a carga de 7,5 kN. As restrições de deslocamento e rotação aplicadas no apoio são: rotação livre entorno do eixo x e fixa para y e z , deslocamento fixo ao longo do eixo y e livre para x e z .

O tempo total de simulação foi de 3600 segundos, para um incremento inicial de 10 segundos, mínimo de 0,01 segundos e máximo de 60 segundos para todas as análises de

diferentes tempos de exposição. Correspondentes à aplicação de uma carga incremental de 20,83 N, 0,02 N e 125 N, respectivamente.

O deslocamento direcional em y foi determinado no nó correspondente ao meio vão da viga completa, por sua vez, para determinar a tensão normal de flexão em z foi necessário realizar uma análise previa do nó mais solicitado na secção transversal para cada um dos tempos de exposição, para então estabelecer neste nó a geração de resultados.

Os resultados obtidos numericamente para o deslocamento direcional em y e tensão normal de flexão em z para cada um dos tempos de exposição, o carregamento aplicado correspondente à viga total e o momento instalado no limite do regime elástico calculado através da Equação (17), foram organizados de forma gráfica.

O gráfico da Figura 55 apresenta os valores de força aplicada, o gráfico da Figura 56 apresenta os valores de momento instalado e o gráfico da Figura 57 apresenta os valores para a tensão normal de flexão, todos eles em relação ao deslocamento correspondente ao meio vão para a geometria completa da viga.

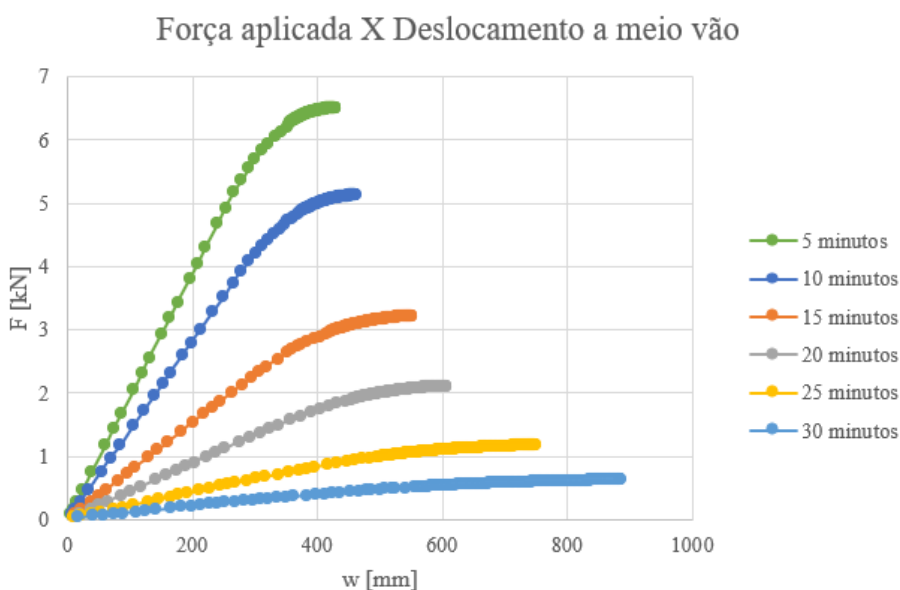


Figura 55 – Gráfico Força aplicada x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 75x150x6000 mm sob 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos de exposição.

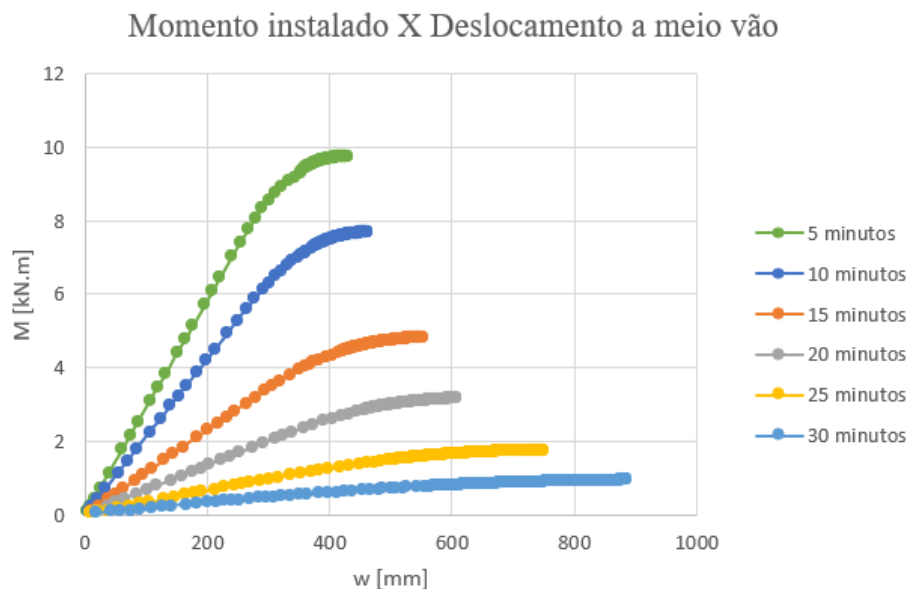


Figura 56 – Gráfico Momento instalado x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 75x150x6000 mm sob 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos de exposição.

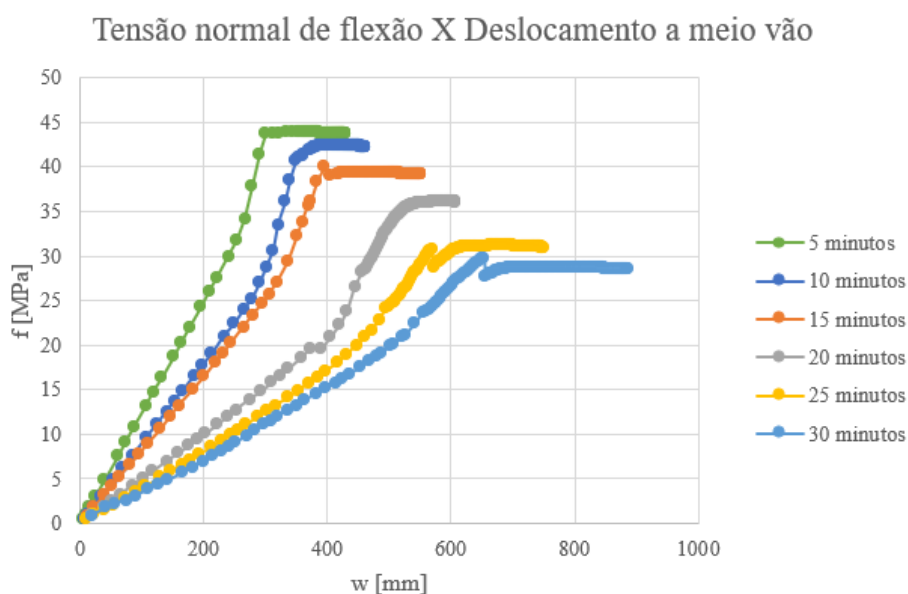


Figura 57 – Gráfico Tensão normal de flexão x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 75x150x6000 mm sob 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos de exposição.

Por meio do comportamento das curvas do gráfico da Figura 57 é possível determinar o instante da simulação correspondente ao limite do regime elástico, dado importante para a determinação do momento resistente em cada um dos tempos de exposição estudados, essas curvas podem ser observadas separadamente nos gráficos da Figura 145 à Figura 150 do Anexo XIII, permitindo a melhor identificação do ponto a se considerar para o final do regime elástico.

O momento resistente determinado ao final do regime elástico para cada um dos tempos de exposição ao fogo, por meio da Equação (17), fornece os valores apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 – Momento resistente determinado numericamente para os tempos de exposição da viga 75x150x6000 mm.

Secção 75x150 mm	
Tempo [min]	$M_{Rd,ANSYS}$ [kN.m]
0	12,28
5	8,547
10	7,007
15	4,286
20	3,084
25	1,621
30	0,853

Considerando como referência o valor de momento resistente à temperatura constante de 20 °C da Tabela 35 na qual $M_{Rd,20^{\circ}C} = 12,28$ MPa, pode-se dizer que aos primeiros 5 minutos de exposição ao fogo a resistência da viga corresponde à 69,6% da resistência à temperatura ambiente, aos 10 minutos 57,1%, aos 15 minutos 34,9%, aos 20 minutos 25,1%, aos 25 minutos 13,2% e aos 30 minutos 6,9%.

As demais considerações a respeito dos resultados obtidos numericamente serão feitas na seção 5.3.4, em comparação com o método simplificado do Eurocódigo 1995-1-2.

5.3.3 SIMULAÇÃO MECÂNICA ACOPLADA À EXPOSIÇÃO TÉRMICA TRANSIENTE PARA A VIGA DE SECÇÃO TRANSVERSAL MAIOR

As condições de contorno adotadas para a análise mecânica de ¼ da viga de geometria 250x300x6000 mm estão indicadas na Figura 58.

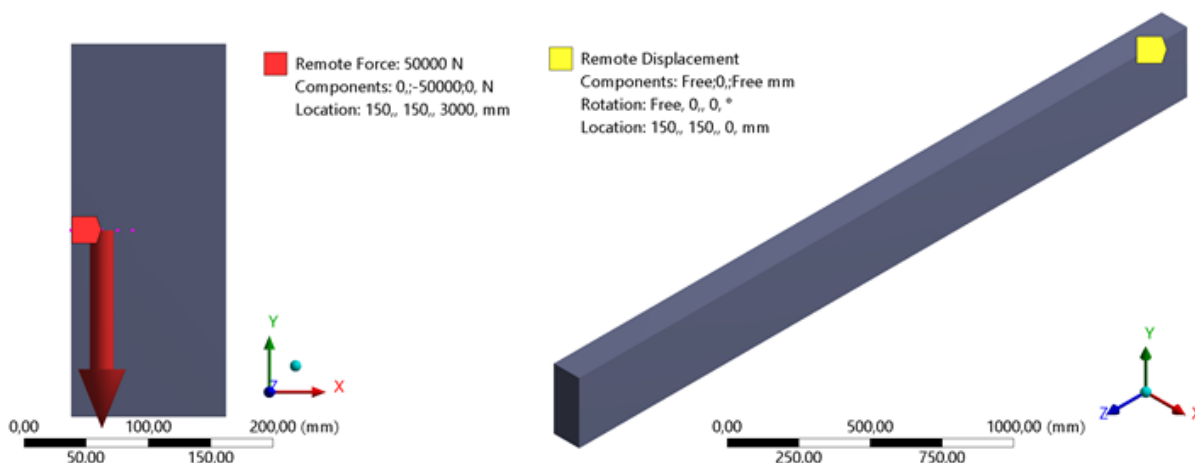


Figura 58 - Local de aplicação da carga e restrição de deslocamento e rotação no apoio para $\frac{1}{4}$ da viga 250x300x6000 mm.

Devido à amplitude da carga necessária para levar a viga de dimensões 250x300x6000 mm à rotura, a determinação de um único nó para a aplicação do carregamento resultaria em grandes deformações do elemento finito, interferindo nos resultados da análise, portanto optou-se por distribuir a carga total de 200 kN, correspondente à carga de 50 kN aplicada de modo incremental para $\frac{1}{4}$ da viga, em 5 nós centrais a meia altura da secção, garantindo que a camada carbonizada não alcançasse nenhum dos nós mesmo para tempo de exposição mais elevado.

As restrições de deslocamento e rotação determinadas para o apoio foram: rotação livre entorno do eixo x e fixa para y e z , deslocamento fixo ao longo do eixo y e livre para x e z .

O tempo total de simulação, o incremento inicial, mínimo e máximo, utilizados para a viga de geometria 250x300x6000 mm se mantiveram iguais aos considerados para a viga de geometria 75x150x6000 mm, assim como o posicionamento do local de determinação dos valores de deslocamento direcional em y e o método de análise ao determinar o nó mais solicitado para estabelecer a geração dos dados de tensão normal de flexão.

Para um incremento de tempo de 10 segundos a carga aplicada é de 138,89 N, para 0,01 segundos 0,138 N e para 60 segundos 833,33 N.

Os resultados obtidos numericamente para o deslocamento direcional em y e tensão normal de flexão em z para cada um dos tempos de exposição, o carregamento aplicado correspondente à viga total e o momento instalado no limite do regime elástico calculado através da Equação (17), foram organizados de forma gráfica.

O gráfico da Figura 59 apresenta os valores de força aplicada, o gráfico da Figura 60 apresenta os valores de momento instalado e o gráfico da Figura 61 apresenta os valores para a tensão normal de flexão, todos eles em relação ao deslocamento correspondente ao meio vão para a geometria completa da viga.

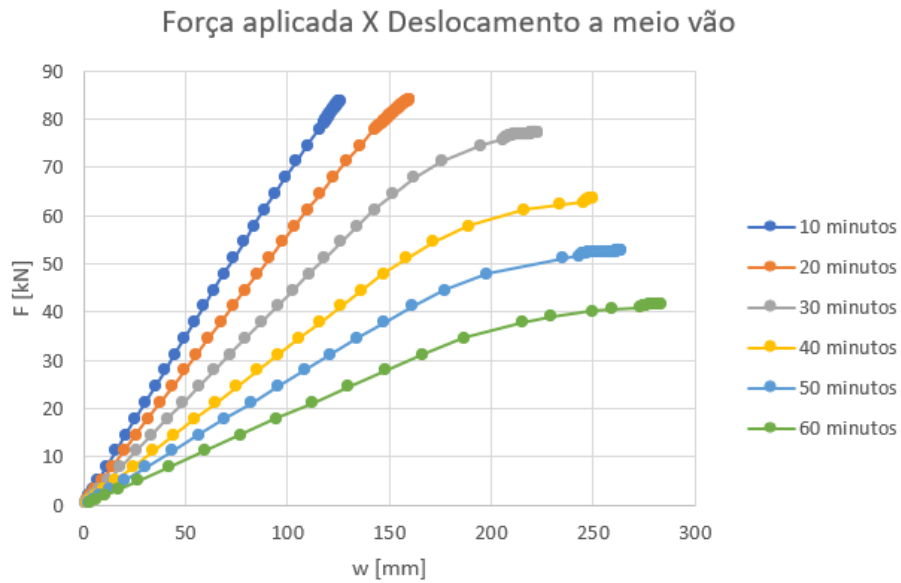


Figura 59 – Gráfico Força aplicada x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 250x300x6000 mm sob 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos de exposição.

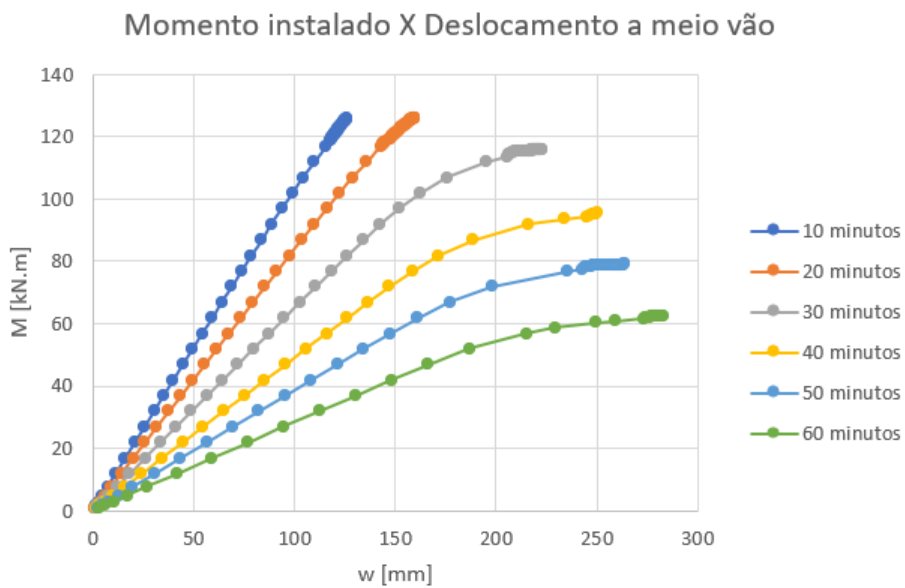


Figura 60 – Gráfico Momento instalado x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 250x300x6000 mm sob 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos de exposição.

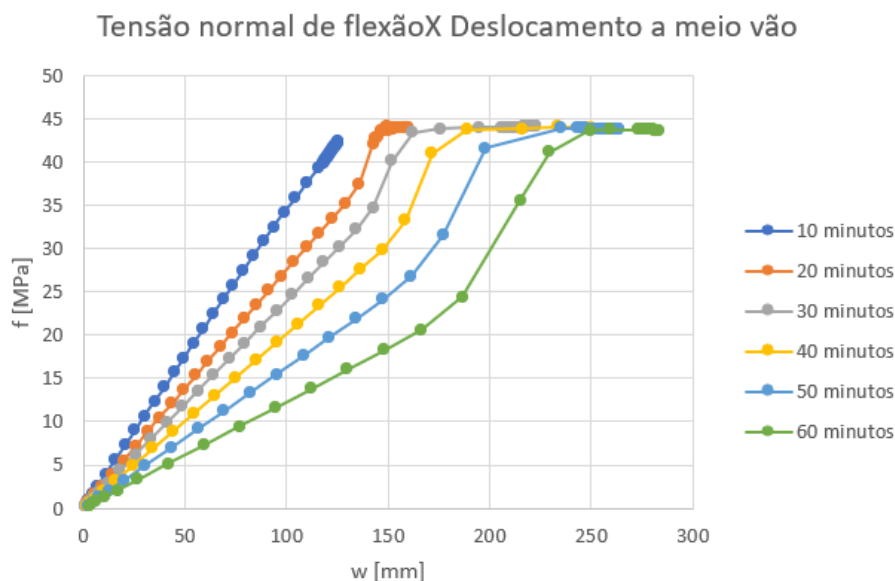


Figura 61 – Gráfico Tensão normal de flexão x Deslocamento a meio vão para a simulação numérica da viga 250x300x6000 mm sob 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos de exposição.

Por meio do comportamento das curvas do gráfico da Figura 61 deveria ser possível determinar o instante da simulação correspondente ao limite do regime elástico, entretanto para o tempo de exposição de 10 minutos não foi observada a formação do patamar de plastificação. Conclui-se, portanto, que o modelo numérico não foi capaz de analisar o comportamento do material até o limite elástico.

Como justificativa para a ausência do patamar de plastificação aos 10 minutos, pode-se considerar que para esse tempo de exposição ao fogo, a secção transversal manteve-se robusta, ao longo do aumento do tempo de exposição, a evolução da camada carbonizada para o interior da viga resultou na redução da secção transversal resistente, de forma que a viga passou a ter uma configuração menos robusta.

Quanto mais compacta a geometria da viga, mais significativa se torna o efeito dos esforços de corte na composição da tensão equivalente de von Mises, dessa forma, a parcela da tensão normal de flexão não é capaz de atingir o regime plástico.

A partir dos 20 minutos de exposição foi possível determinar o instante da simulação correspondente ao limite do regime elástico, dado importante para a determinação do momento resistente em cada um dos tempos de exposição estudados. As curvas de tensão normal de flexão por descolamento a meio vão podem ser observadas separadamente nos gráficos da Figura 151, à Figura 156 do Anexo XIV, permitindo a melhor identificação do ponto a se considerar para o final do regime elástico.

O momento resistente determinado ao final do regime elástico para cada um dos tempos de exposição ao fogo, por meio da Equação (17), fornece os valores apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 – Momento resistente determinado numericamente para os tempos de exposição da viga 250x300x6000 mm.

Secção 250x300 mm	
Tempo [min]	$M_{Rd,ANSYS}$ [kN.m]
0	165,21
10	125,275
20	120,033
30	101,825
40	86,825
50	76,823
60	60,323

Considerando como referência o valor de momento resistente à tempera constante de 20 °C da Tabela 38 na qual $M_{Rd,20^{\circ}C} = 165,21$ MPa, pode-se dizer que aos primeiros 10 minutos de exposição ao fogo a resistência da viga corresponde à 75,8% da resistência à temperatura ambiente, aos 20 minutos 72,6%, aos 30 minutos 61,6%, aos 40 minutos 52,6%, aos 50 minutos 46,5% e aos 60 minutos 36,5%.

As demais considerações a respeito dos resultados obtidos numericamente serão feitas na seção 5.3.4, em comparação com o método simplificado do Eurocódigo 1995-1-2.

5.3.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS COM O MÉTODO DA SECÇÃO REDUZIDA SEGUNDO O EUROCÓDIGO 1995-1-2

A aplicação do método simplificado proposto pelo Eurocódigo 1995-1-2 para a determinação da resistência de vigas de madeira submetidas à exposição ao fogo permitiu determinar o momento resistente para cada um dos tempos de exposição estudados para as duas geometrias, de modo a se realizar a comparação entre os resultados obtidos pelo método analítico do Eurocódigo e o método numérico do *Ansys*.

Optou-se por aplicar o método da secção reduzida, uma vez que subtraindo da secção total, o valor da camada carbonizada e da camada com resistência zero, obtém-se a secção efetiva ao final da exposição para o tempo considerado, dessa forma, é possível calcular

analiticamente o momento resistente com base no módulo da secção transversal e no valor característico de resistência à flexão adotado neste estudo.

A Tabela 46 e Tabela 47 do Anexo XV, apresentam o passo a passo de como foi aplicado o método da secção reduzida para as vigas de geometria 75x150x6000 mm e 250x300x6000 mm respectivamente. O valor adotado para a taxa de carbonização da madeira considerando o efeito do arredondamento dos cantos é de $\beta_n = 0,8$ mm/min, ver Tabela 14. A profundidade de carbonização $d_{char,n}$ foi calculada com base na Equação (12). A camada de resistência zero, conforme sugerido pelo Eurocódigo 1995-1-2 é de $d_0 = 7$ mm para superfícies não protegidas. O fator de superfície k_0 foi aplicado de acordo com a Tabela 17, a variar com o tempo de exposição. E por fim, determinou-se a profundidade efetiva de carbonização d_{ef} conforme indicado na Equação (19).

Considerando a exposição ao fogo para as quatro faces das vigas em sua geometria total, a secção efetiva residual pôde ser determinada subtraindo duas vezes o valor da camada efetiva de carbonização para cada dimensão da secção inicial.

Baseado nos resultados obtidos para as dimensões da secção efetiva determinou-se o módulo elástico da secção (W_{el}) para cada tempo de exposição, aplicando a Equação (16), na qual sabe-se que o valor característico de resistência a flexão considerado neste estudo é de $f_{m,k} = 44,49$ Mpa, resultando no valor do momento resistente para cada tempo de exposição segundo o Eurocódigo 1995-1-2, os valores obtidos estão organizados na Tabela 42, junto dos valores determinados numericamente com base nos resultados obtidos pelo *Ansys* e as respectivas diferenças percentuais entre eles.

Tabela 42 – Comparação entre os valores de momento resistente segundo o Eurocódigo e segundo análise numérica, para secções 75x150 mm e 250x300 mm.

Secção 75x150 mm				Secção 250x300 mm			
Tempo [min]	$M_{Rd,EC5}$ [kN.m]	$M_{Rd,ANSYS}$ [kN.m]	Diferença percentual [%]	Tempo [min]	$M_{Rd,EC5}$ [kN.m]	$M_{Rd,ANSYS}$ [kN.m]	Diferença percentual [%]
0	12,513	12,28	1,86	0	166,838	165,21	0,98
5	9,032	8,547	5,37	10	129,151	125,275	3,00
10	6,219	7,007	-12,67	20	97,591	120,033	-22,99
15	4,006	4,286	-6,99	30	78,963	101,825	-28,95
20	2,326	3,084	-32,59	40	62,856	86,825	-38,13
25	1,435	1,621	-12,96	50	49,087	76,823	-56,50
30	0,746	0,853	-14,34	60	37,475	60,323	-60,97

De forma geral pode-se concluir que a aplicação do método simplificado do Eurocódigo 1995-1-2 resulta em valores de resistência seguros a serem aplicados em projetos, considerando uma margem de segurança ao longo da evolução do tempo de exposição ao fogo. Observa-se somente para o primeiro tempo de exposição da viga de geometria 75x150x6000 mm, um valor de resistência inferior ao esperado, esse comportamento pode ser justificado pelo fato do método simplificado considerar um único valor para a taxa de carbonização independente do tempo de exposição, e sabe-se que nos primeiros minutos de exposição ao fogo, a madeira carboniza-se mais rapidamente, essa taxa de carbonização é reduzida para os minutos seguintes, uma vez que a camada de material acima dos 300 °C funciona como proteção para a secção interior à ela.

Nos gráficos Figura 62 e Figura 63, a curva $M_{Rd,ANSYS}$ que relaciona os valores de momento resistente para cada um dos tempos de exposição ($M_{Rd,t}$) com o momento resistente à temperatura ambiente ($M_{Rd,0min}$) segundo os resultados numéricos, e a curva $M_{Rd,EC5}$ correspondente à mesma relação entre momentos resistentes porém para os valores determinados de acordo com o Eurocódigo 1995-1-2, permitem fazer uma comparação entre a resistência das vigas conforme os resultados fornecidos pelo *Ansys* e os valores calculados pelo método da secção reduzida do Eurocódigo 1995-1-2.

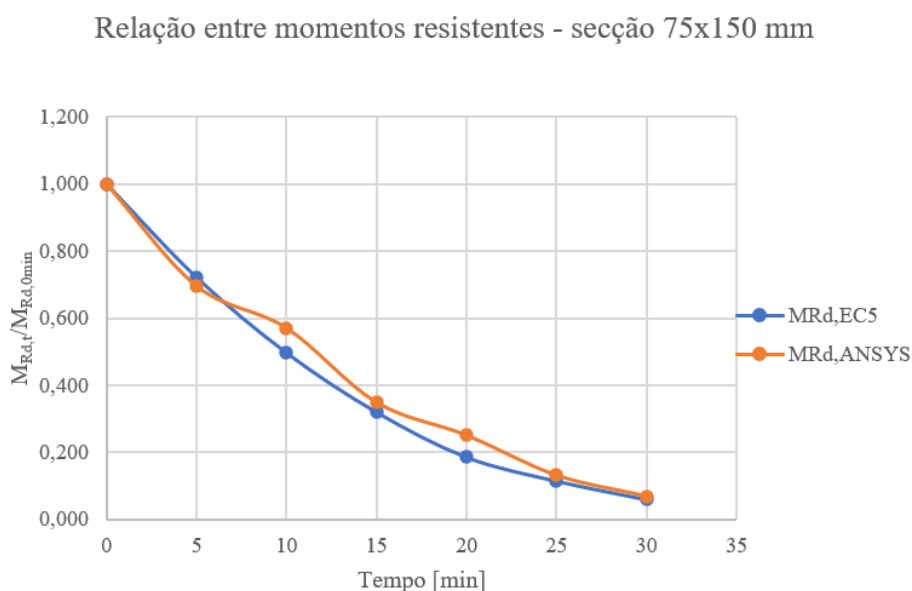


Figura 62 – Relação entre momentos resistentes para tempos de exposição fixos, viga 75x150x6000 mm.

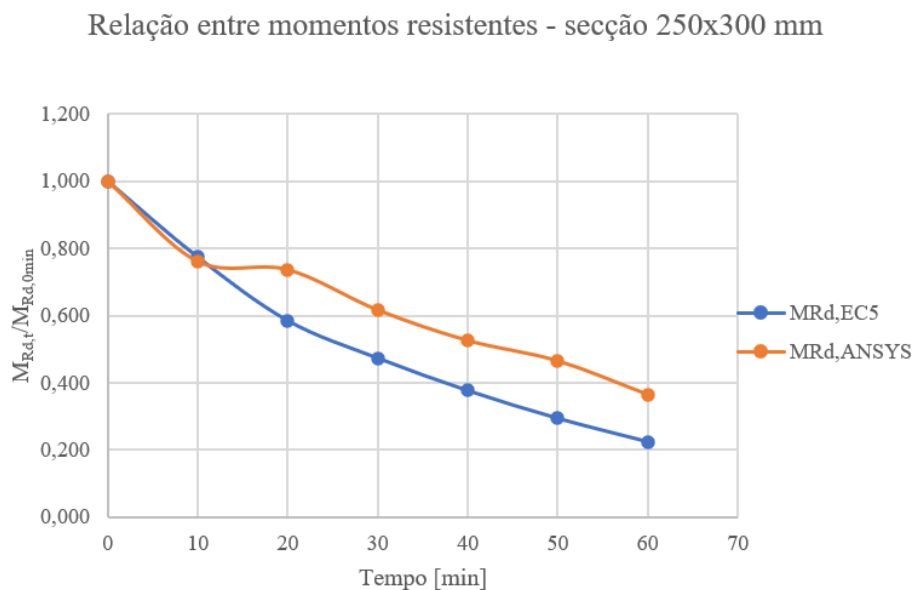


Figura 63 – Relação entre momentos resistentes para tempos de exposição fixos, viga 75x150x6000 mm.

Para a secção transversal menor, em que os valores da taxa de carbonização se apresentaram na maior parte das simulações, superiores ao valor estipulado por norma, ainda assim, observando a relação de momentos resistentes nota-se que o Eurocódigo 1995-1-2 mantém-se ao lado da segurança a partir de 10 minutos de exposição.

Para a viga de secção transversal 250x300 mm, observa-se uma margem de segurança ainda maior determinada pelo Eurocódigo 1995-1-2 em relação ao momento resistente obtido numericamente. Aos 10 minutos de exposição o ponto obtido graficamente na Figura 63 para o resultado numérico, apesar de corresponder a uma redução mais significativa do que aquela observada para o ponto determinado pelo Eurocódigo, destaca-se que o valor determinado para momento resistente ainda se apresenta superior para o método numérico, conforme indicado na Tabela 42.

É preciso destacar que a aplicação do Eurocódigo 1995-1-2 para determinar os valores de resistência é diretamente influenciada pela taxa de carbonização fornecido pelo modelo simplificado da secção reduzida, trata-se de um valor pouco especificado uma vez que busca abranger uma grande quantidade de espécies de madeira, independente da secção transversal. Esta justificativa está associada ao ponto observado abaixo da curva $M_{Rd,EC5}$ para cada uma das vigas estudadas, uma vez que na determinação numérica da taxa de carbonização das duas geometrias constatou-se uma redução mais significativa ao início da exposição.

Capítulo 6: Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

As pesquisas realizadas para a execução deste trabalho acerca da madeira como um material construtivo, ressaltam a importância de agregar ao setor da construção civil a aplicação desse material como uma alternativa sustentável, frente à utilização do betão e aço por exemplo.

O estudo do comportamento termomecânico de elementos de madeira por meio de análises numéricas se mostrou positivo, uma vez que os resultados obtidos numericamente se apresentaram coerentes em relação ao que é estabelecido pelo Eurocódigo 1995-1-2. Permitindo reduzir tempo e custos associados à ensaios experimentais para estudar o comportamento ao sob altas temperaturas de diversas espécies de madeira em laboratório, favorecendo a ampliação do conhecimento acerca desde material de origem natural e diversificado.

Para a comparação entre o método numérico e o método experimental aplicado no ensaio de flexão em quatro pontos, para a viga modelada no software *Ansys* cumprindo as mesmas condições de apoio e aplicação de carga, à temperatura ambiente, com base nos resultados obtidos pôde-se validar o método numérico, uma vez que houve coerência entre os resultados experimentais e numéricos para os valores de carregamento aplicado e o comportamento em regime elástico. A comparação dos resultados médios obtidos experimentalmente com os valores determinados analiticamente para os dados de carregamento máximo aplicado e tensão normal de flexão, apresentou valores de diferença percentual muito reduzidos para a maioria dos provetes considerados neste estudo.

Foram apresentadas comparações entre os resultados analíticos segundo o Eurocódigo 1995-1-2 e os resultados numéricos obtidos via software, para duas geometrias em estudo, com relação aos valores de resistência determinados para vigas de madeira submetidas à variação térmica, seja para temperatura constante em toda secção transversal ou para a exposição ao fogo em intervalos de tempo definidos.

Por meio das propriedades inseridas no modelo material, especificamente o fator de redução da resistência à tração k_{θ} para altas temperaturas, obteve-se o comparativo com a relação entre os momentos resistentes determinados numericamente a temperaturas constantes. Para a viga de geometria 75x150x6000 mm, o valor de variação percentual não ultrapassou

pouco mais de 10% ao longo do aumento da temperatura, já pra a viga de geometria maior, 250x300x6000 mm, o valor da variação alcançou 16%.

Para as simulações considerando tempos de exposição ao fogo segundo a curva de incêndio ISO834, foi aplicado o método simplificado disposto no Eurocódigo 1995-1-2 para a obtenção dos resultados analíticos deste trabalho, especificamente o método da secção reduzida e por meio dele determinou-se analiticamente os valores de resistência ao final da exposição ao fogo, valores para a espessura de carbonização e valores para a taxa de carbonização

A análise da evolução da temperatura para o interior de cada uma das secções permitiu concluir que a geometria da secção transversal da viga menor interferiu na medição da profundidade de carbonização, especialmente para os tempos de exposição maiores em que a espessura da camada carbonizada obtida numericamente foi superior à determinada analiticamente segundo o método da secção transversal reduzida. Por sua vez, para a viga de secção maior observou-se o comportamento contrário, em que a determinação numérica, no geral, apresentou valores inferiores aos calculados analiticamente para a profundidade de carbonização.

Por fim, os valores de resistência obtidos na análise mecânica realizada considerando o campo de temperaturas após a exposição ao fogo, permitem concluir que a aplicação do método simplificado do Eurocódigo 1995-1-2, de maneira geral, fornece valores seguros para serem aplicados em cálculos de projeto, uma vez que os momentos resistentes determinados para as vigas de geometria 75x150x6000 mm e 250x300x6000 mm são quase todos superiores quando determinados de forma numérica pelo programa *Ansys*. Pode-se dizer ainda que a margem de segurança considerada pelo Eurocódigo 1995-1-2 é mais significativa quando se trata da exposição ao fogo de vigas com secção transversal maiores.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

O estudo de elementos estruturais de madeira submetidos ao fogo é de extrema importância, visto que a perda de resistência do material e a sua carbonização comprometem o seu desempenho. Como sugestão de trabalhos futuros a serem realizados seguindo essa linha de pesquisa podem ser citados:

Propõe-se a realização experimental dos ensaios numericamente simulados considerando a exposição ao fogo, afim de obter mais um parâmetro de comparação além do método da secção reduzida do Eurocódigo 1995-1-2.

Dar continuidade ao estudo numérico de vigas de madeira expostas ao fogo para diferentes geometrias, viabilizando a análise da influência das dimensões da secção transversal na evolução da taxa de carbonização além da comparação com os valores propostos para esse parâmetro pelo Eurocódigo 1995-1-2.

Investigar o comportamento de elementos estruturais em madeira revestidos de material isolante e expostos ao fogo, para realizar uma comparação entre as resistências obtidas para a exposição de um mesmo elemento sem qualquer proteção.

Referências

- [1] R. H. Falk. et al., *Wood Handbook - Wood as an engineering material*, 100th ed. 2010.
- [2] L. M. V. Lopes, “Caracterização das propriedades físicas mecânicas da madeira de abeto de douglas,” Instituto Politécnico de Bragança, 2019.
- [3] R. S. A. Anastácio, “Especificações de Protecção Fogo para Estruturas de Madeira,” Universidade do Porto, 2010.
- [4] P. J. V. Gouveia, “Resistência ao fogo de estruturas em madeira com e sem protecção,” p. 139, 2018.
- [5] J. C. Moreschi, “Propriedades da madeira,” Universidade Federal do Paraná, 2005.
- [6] Z. W. Guan and E. C. Zhu, “Finite element modelling of anisotropic elasto-plastic timber composite beams with openings,” *Engineering Structures*, vol. 31. Elsevier Ltd, pp. 394–403, 2009.
- [7] European Committee for Standardization, “EN 1991-1-2 - Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire,” 2002.
- [8] European Committee for Standardization, “EN 1995-1-1 - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings.” 2004.
- [9] European Committee for Standardization, “EN 1995-1-2 - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design,” 2004.
- [10] J. Švajlenka and M. Kozlovská, “Evaluation of the efficiency and sustainability of timber-based construction,” *Journal of Cleaner Production*. Elsevier, 2019.
- [11] V. Ferreira and J. de Brito, “Madeira: Um material estrutural amigo do ambiente.” 2004.
- [12] L. E. Marques, “O papel da madeira na sustentabilidade da construção,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [13] J. A. Faria, “Madeira na construção - o futuro promete,” in *Semana das Engenharias*, 2006.
- [14] J. A., “Vibrational proprieties of wood as indices of quality,” *For. Prod. J.*, pp. 413–416.
- [15] L. A. A. de França, “Análise da durabilidade da reacção ao fogo da madeira e painéis

- derivados de madeira,” Instituto Politécnico de Bragança, 2019.
- [16] S. S. C. Pereira, “Avaliação experimental das principais propriedades mecânicas de peças estruturais em madeira antiga,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [17] C. B. Scremim, “Avaliação sobre a diferença de propriedades mecânicas do cerne e do alburno de mesmas espécies de madeira,” Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- [18] S. A. V. Júnior, “Madeira - propriedades, processos de fabricação e aplicações.” 2013.
- [19] A. Costa, “Coletâneas de anatomia da madeira.” UDESC, Joinville, 2001.
- [20] S. F. M. F. Martins, “Estruturas de madeira - inspeção e diagnóstico: aplicação em caso de estudo,” Universidade do Minho, 2009.
- [21] A. M. D. Fabião, *Árvores e florestas*, 2^a. Publicações Europa América, 1996.
- [22] A. Carvalho, “Estrutura anatômica, propriedades, utilizações,” vol. Vol. 1. Instituto Florestal, Lisboa, 1996.
- [23] P. C. B. Borges, “Caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira de carvalho e de castanho do nordeste transmontano,” Instituto Politécnico de Bragança, 2013.
- [24] B. K. Monteiro, “Identificação das características relevantes para a sustentabilidade de sistemas construtivos,” Universidade de São Paulo, 2002.
- [25] P. B. Cachim, “Construções em madeira - a madeira como material de construção.” Porto, 2007.
- [26] A. F. P. de Souza, “A sustentabilidade no uso da madeira de floresta plantada na construção civil,” Florianópolis, 2010.
- [27] G. J. Zenid, “Madeira na Construção civil.” .
- [28] A. S. Mossmann, L. L. Vargas, T. F. Bolzan, and A. P. Kern, “A geração de resíduo de madeirade uso temporário na fase de produção de obras de construção.” São Leopoldo, 2014.
- [29] A. B. Tessarol, J. S. de Sá, and L. B. Scremin, “Quantificação e classificação dos resíduos procedentes da construção civil e demolição no município de Pelotas, RS,” vol. 12. Porto Alegre, pp. 121–130, 2012.
- [30] R. Patraquim, P. F. C. Luz, and J. V. Patrício, “A utilização de madeira no condicionamento acústico.” 2014.
- [31] R. E. Catai, A. P. Adilha Penteadó, and P. F. Dalbello, “Materiais, técnicas e processos para isolamento acústico.” Foz do Iguaçu, 2006.

- [32] J. M. Branco, “Casa de madeira: da tradição aos novos desafios,” Universidade do Minho, 2013.
- [33] F. A. L. de Almeida, “A madeira como material estrutural - projeto de estrutura da cobertura de um edifício,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [34] “Top 25 Bridges Around The World.” [Online]. Available: <https://www.homedit.com/top-25-bridges-around-the-world/>. [Accessed: 25-Nov-2019].
- [35] N. S. R. Quiorin, “Diagnóstico de defeitos em madeira por tomografia de raios x,” Curitiba, 2004.
- [36] J. L. Gomide, “Estrutura anatômica e qualidade da madeira,” Universidade Federal de Viçosa.
- [37] M. R. Carreira, “Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus Sp,” Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- [38] S. I. S. Franco, “Proposta de atribuição de propriedades mecânicas a elementos estruturais de madeira por inspeção visual in situ,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [39] H. Hao, C. L. Chow, and D. Lau, “Effect of heat flux on combustion of different wood species,” *Fuel*, vol. 278, no. May. 2020.
- [40] C. A. Szücs, R. Fi. Terezo, A. do Valle, and P. Di. de Moraes, “Estruturas de madeira,” Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- [41] W. W. Wilcox, E. E. Botsai, and H. Kubler, “Wood as a building material: a guide for designers and builders.” New York, 1991.
- [42] M. J. M. Figueroa and P. D. de Moraes, “Comportamento da madeira a temperaturas elevadas,” no. 9. pp. 157–174, 2009.
- [43] F. V. L. Anhas, “Emissividade de materiais de construção - métodos de determinação e influência da humidade,” Universidade do Porto, 2018.
- [44] L. M. S. Prates, “Simulação numérica do comportamento ao fogo de estruturas mistas (lajes),” Instituto Politécnico de Bragança, 2018.
- [45] C. N. Costa and V. P. Silva, “Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio,” *NUTAU*, 2006.
- [46] J. E. de Melo, “Classificação mecânica de peças estruturais de madeira,” Universidade de São Paulo, 1984.
- [47] M. Tabaddor, “Thermal and mechanical finite element modelling of wood-floor assemblies subjected to furnace exposure,” *Underwriters Laboratories*. 2008.

- [48] J. A. dos Santos, “Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira,” Universidade do Minho, 2007.
- [49] W. W. Wilcox, E. E. Botsai, and H. Kubler, “Wood as a building material: a guide for designers and builders.” Campinas, 2018.
- [50] J. J. A. Botelho, “Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos,” 2006.
- [51] T. Nilsson and R. Rowell, “Historical wood-structure and properties,” *Journal of Cultural*. 2012.
- [52] R. J. D. S. Brites, “Avaliação de segurança das estruturas antigas de madeira,” Universidade do Minho, 2011.
- [53] A. Aissa, “Computational model for timber connections exposed to high temperatures construction engineering,” Instituto Politécnico de Bragança, 2017.
- [54] D. Auer, “Guia de Bolso Testo para Termografia,” *Agroscience*, vol. 1, no. 1, p. 35, 2012.
- [55] D. I. G. Costa, “Análise numérica de falhas em materiais compósitos laminados usando um critério baseado em fenômenos físicos,” Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- [56] I. M. Daniel and O. Ishai, “Engineering mechanics of composite materials,” Oxford University Press, New York, 2006.
- [57] L. Fedalto, “Análise do comportamento da fadiga em materiais compostos laminados de resina polimérica reforçada por fibras de vidro,” Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- [58] G. P. de Souza, “Avaliação de critérios de falha de compósitos poliméricos reforçados aplicados a vigas sob carregamento de flexão,” Universidade de São Paulo, 2003.
- [59] V. B. O. Campos, “Análise de critérios de falha em lâmina reforçada com tecido híbrido de fibra de vidro e carbono,” Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.
- [60] D. F. O. Azevedo, “Análise Estrutural com Ansys Workbench.” Mogi das Cruzes, 2016.
- [61] C. D. P. Pinto, “Caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira de pinho bravo e de friso do nordeste transmontano,” 2014.
- [62] Diagrama tensão - deformação: ductibilidade e fragilidade dos materiais [Online]. Disponível em <http://o-portico.blogspot.com/2015/10/diagrama-tensao-deformacao-ductibilidade.html>. Acesso em 17 de dezembro de 2020.

Anexos

Anexo I – Representação esquemática e resultados do ensaio experimental segundo L. M. V. Lopes.

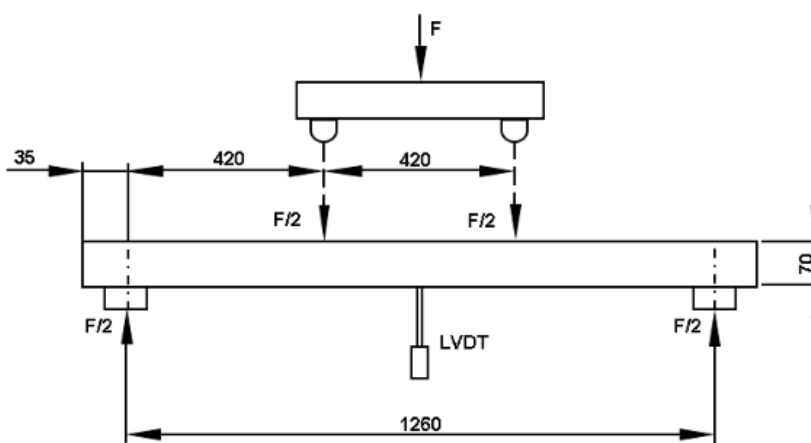


Figura 64 – Representação do ensaio experimental simulado numericamente, [2].

Tabela 43 – Força máxima, tensão de flexão e deslocamento para o ensaio experimental, [2].

Amostras	F_{\max} [kN]	f_m [MPa]	w [mm]
PD-F-1	10,36	42	31,15
PD-F-2	11,45	48,03	40,99
PD-F-3	10,07	42,05	28,07
PD-F-4	5,55	23,98	24,96
PD-F-5	10,68	45,3	41,19
PD-F-6	5,3	20,94	26,07
PD-F-7	5,3	21,12	17,75
PD-F-8	10,06	39,87	36,44
PD-F-9	12,54	49,59	46,3
PD-F-10	14,11	56,88	35,15
PD-F-11	14,98	60,76	45,2
PD-F-12	7,85	31,37	22,55
PD-F-13	11,14	50,2	35,93
PD-F-14	9,76	39,37	36,17
PD-F-15	2,91	11,35	14,56
PD-F-16	7,345	28,42	19,98
PD-F-17	4,78	17,05	20,92

Anexo II – Curvas tensão deformação verdadeira e de engenharia.

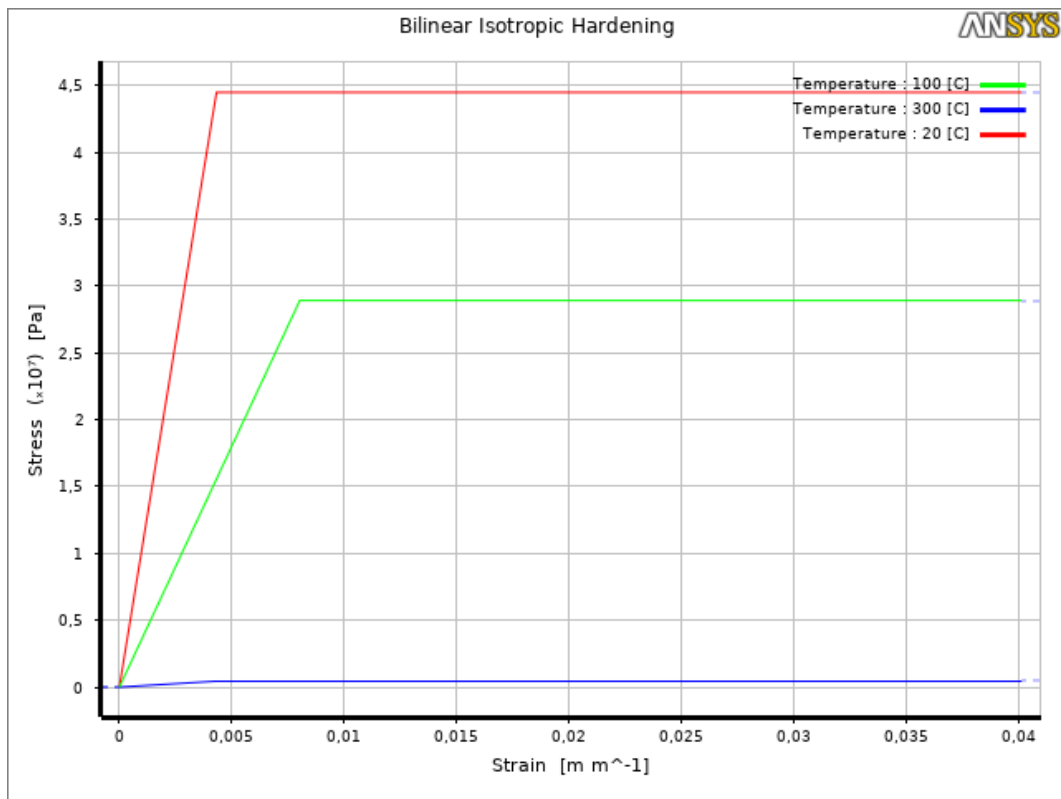


Figura 65 – Curva tensão deformação elástica perfeitamente plástica introduzida no modelo numérico, Ansys.

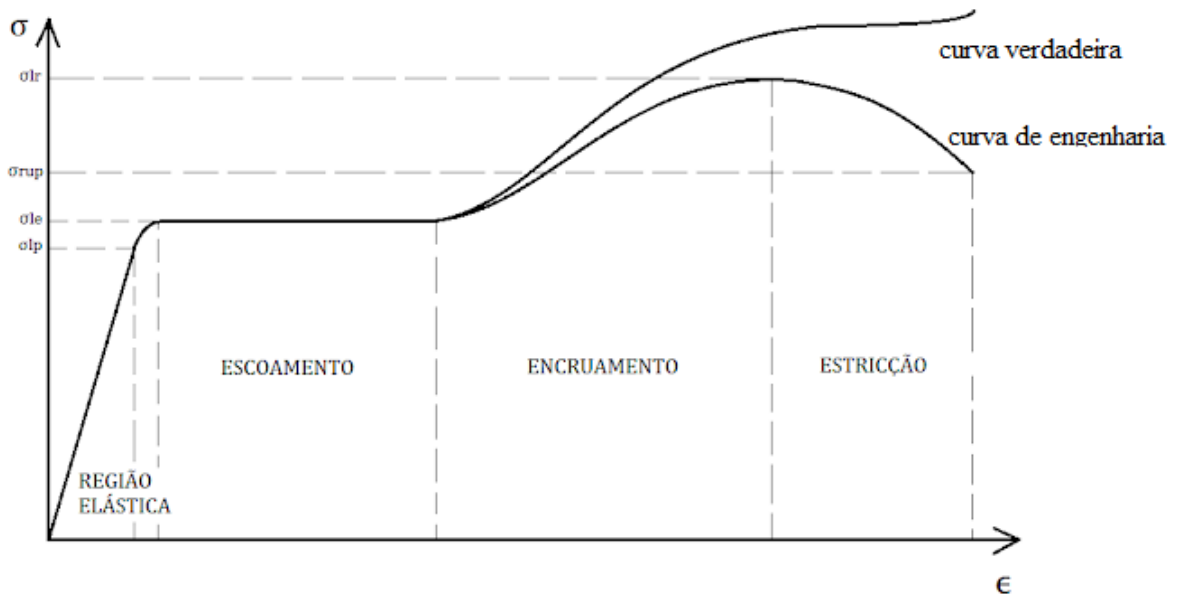


Figura 66 – Comparação entre a curva tensão-deformação verdadeira e curva tensão-deformação de engenharia, [62] adaptado.

Anexo III – Resultados da simulação numérica do teste experimental.

Tabela 44 – Resultados para força aplicada, momento instalado, deslocamento vertical a meio vão e tensão normal de flexão para a viga 65x70x1330 mm à temperatura ambiente.

20 °C				
Tempo [s]	F [kN]	M [kN.m]	w [mm]	f [MPa]
20,00	0,17	0,04	0,32	0,66
40,00	0,33	0,07	0,65	1,32
70,00	0,58	0,12	1,13	2,31
115,00	0,96	0,20	1,86	3,79
182,50	1,52	0,32	2,96	6,02
282,50	2,35	0,49	4,58	9,33
382,50	3,19	0,67	6,20	12,64
482,50	4,02	0,84	7,83	15,95
582,50	4,85	1,02	9,46	19,26
682,50	5,69	1,19	11,09	22,57
782,50	6,52	1,37	12,72	25,89
882,50	7,35	1,54	14,36	29,21
982,50	8,19	1,72	16,00	32,53
1082,50	9,02	1,89	17,65	35,86
1182,50	9,85	2,07	19,32	39,18
1282,50	10,69	2,24	21,02	42,51
1382,50	11,52	2,42	22,77	45,85
1482,50	12,35	2,59	24,96	44,47
1582,50	13,19	2,77	27,58	44,46
1682,50	14,02	2,94	31,48	44,45
1782,50	14,85	3,12	38,23	44,45
1827,50	15,23	3,20	43,86	44,45
1843,30	15,36	3,23	46,78	44,44
1859,00	15,49	3,25	51,80	44,44
1862,70	15,52	3,26	53,87	44,43
1864,00	15,53	3,26	55,15	44,43
1864,30	15,54	3,26	55,45	44,43
1864,60	15,54	3,26	55,99	44,43
1864,90	15,54	3,26	56,02	44,43
1865,10	15,54	3,26	56,11	44,43

Anexo IV – Resultados gráficos aplicados na determinação do final do regime elástico para a viga 75x150x6000 mm.

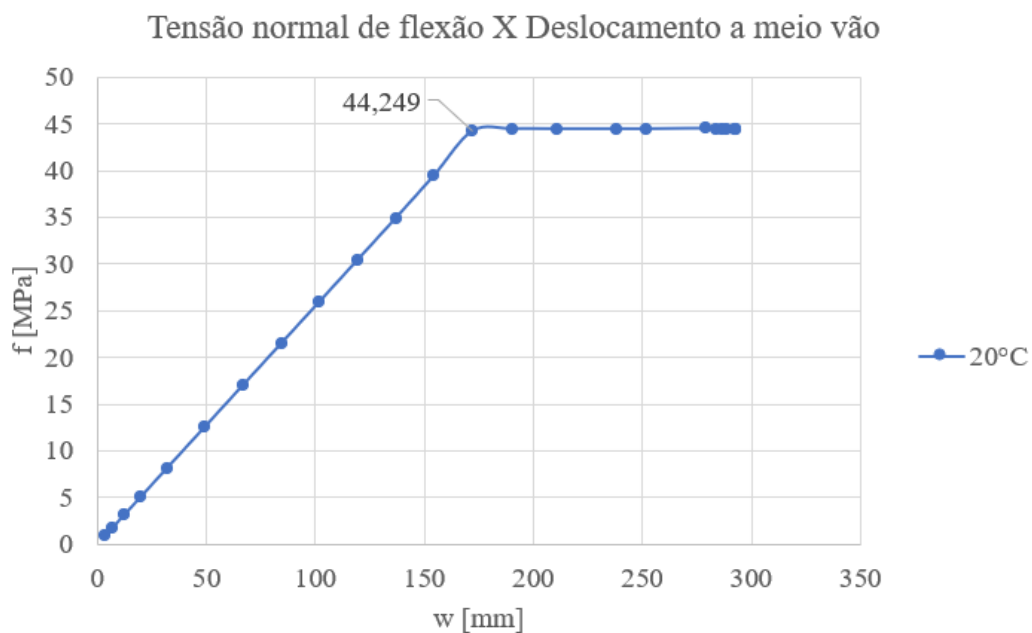


Figura 67 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 20 °C, viga 75x150x6000 mm.

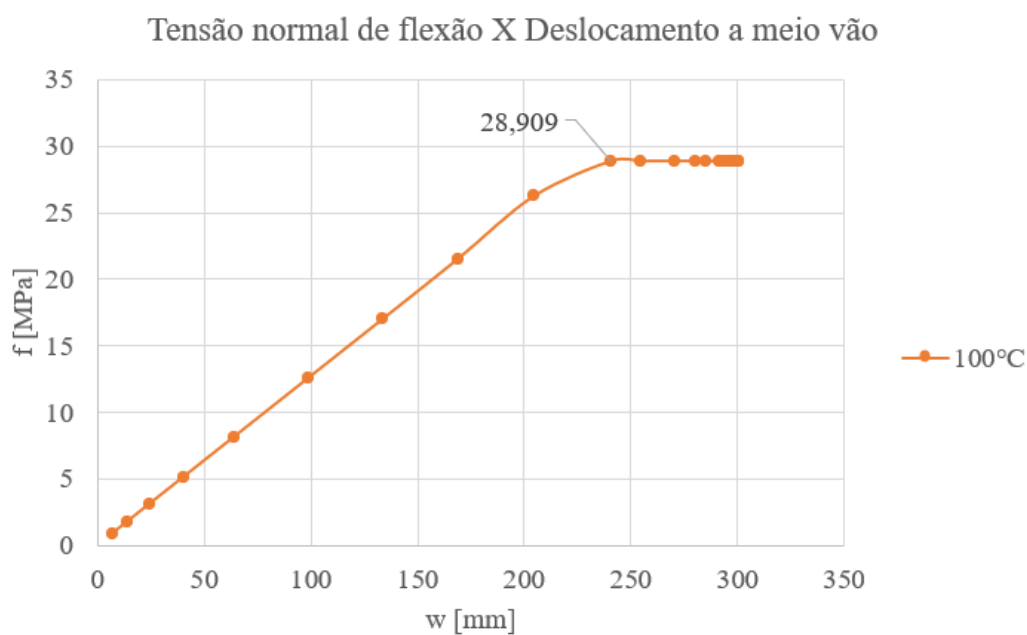


Figura 68 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 100 °C, viga 75x150x6000 mm.

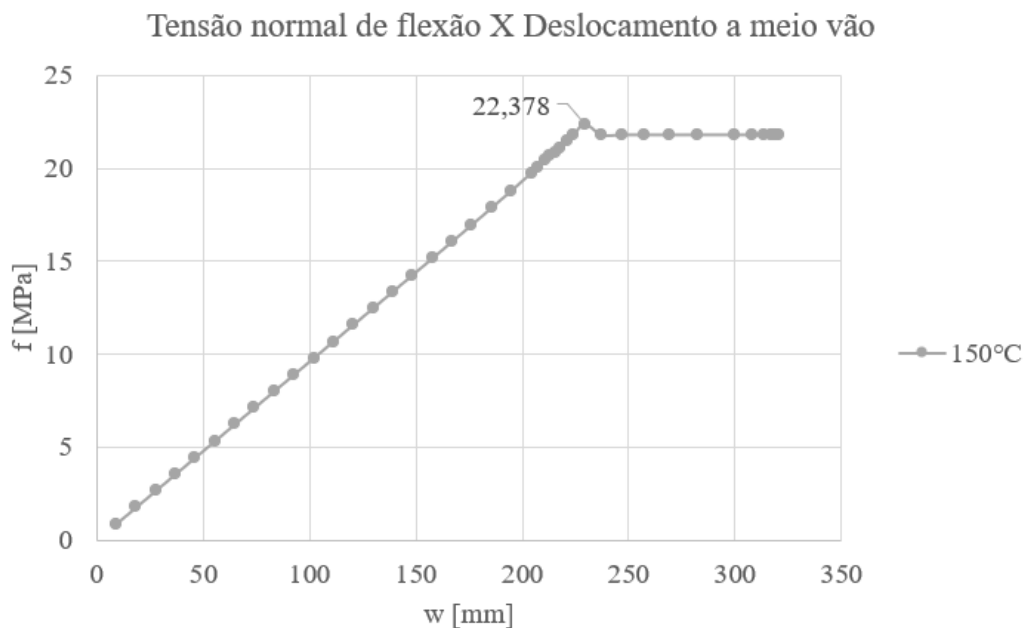


Figura 69 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 150 °C, viga 75x150x6000 mm.

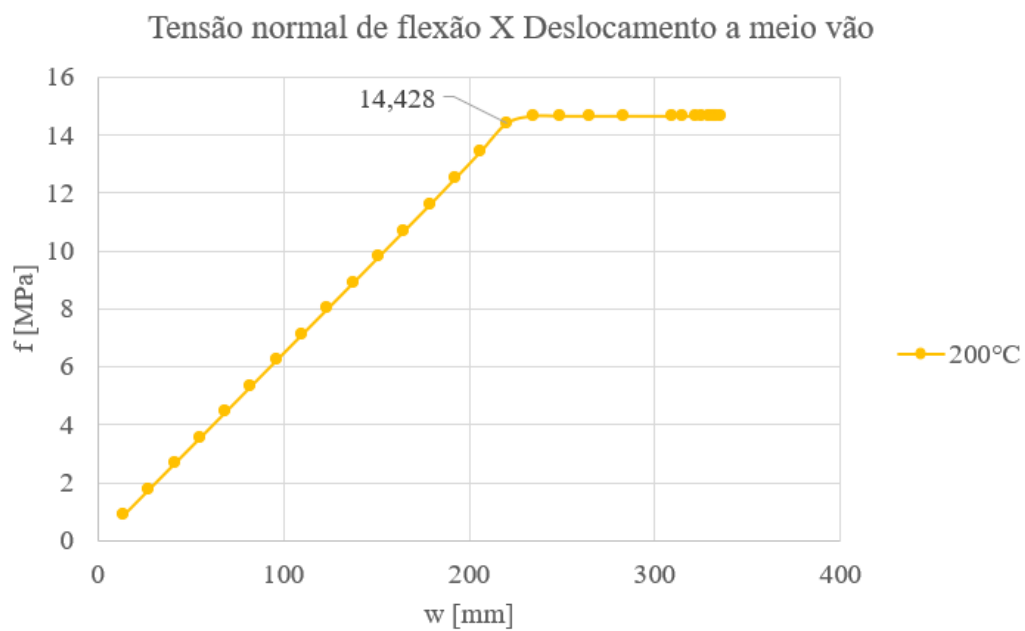


Figura 70 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 200 °C, viga 75x150x6000 mm.

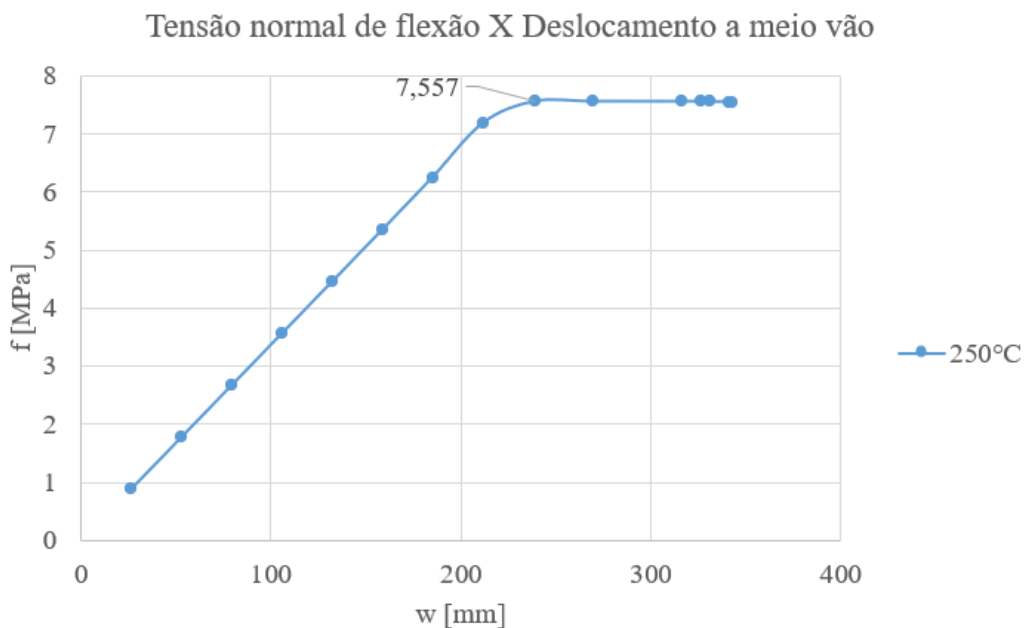


Figura 71 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 250 °C, viga 75x150x6000 mm.

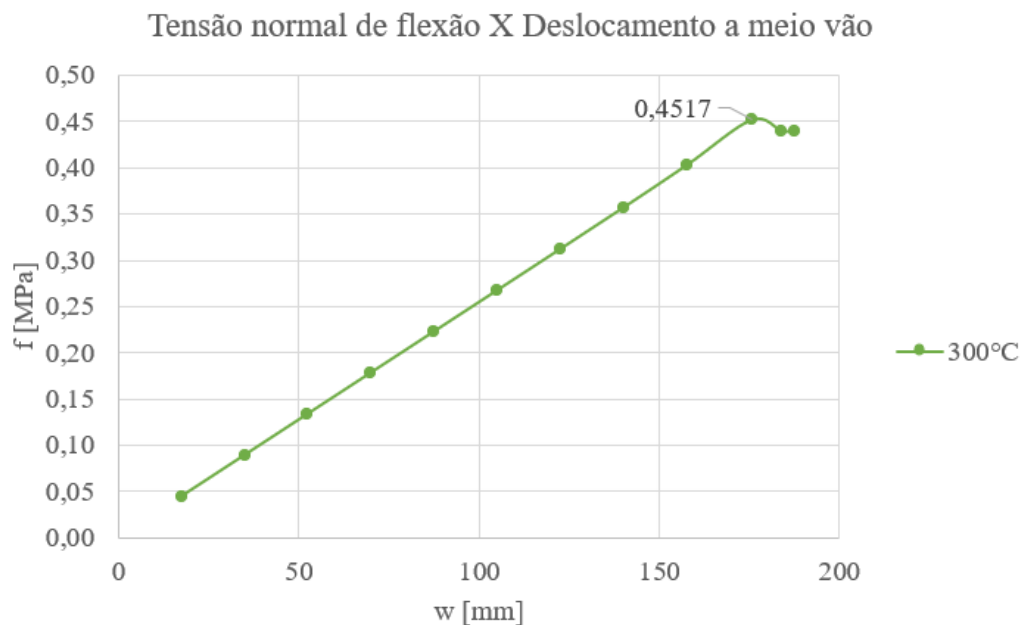


Figura 72 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 300 °C, viga 75x150x6000 mm.

Anexo V – Deslocamento total e tensões normais de flexão da viga 75x150x6000 mm ao final da simulação para temperatura constante

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 20°C

Directional Deformation 2

Type: Directional Deformation(Y Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 1358,1

18/11/2020 15:38

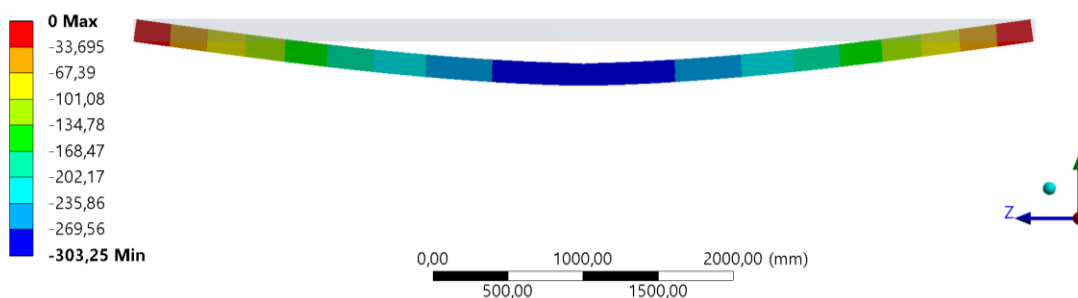


Figura 73 – Vista frontal do deslocamento direcional em y a 20 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 20°C

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1358,1

10/11/2020 01:38

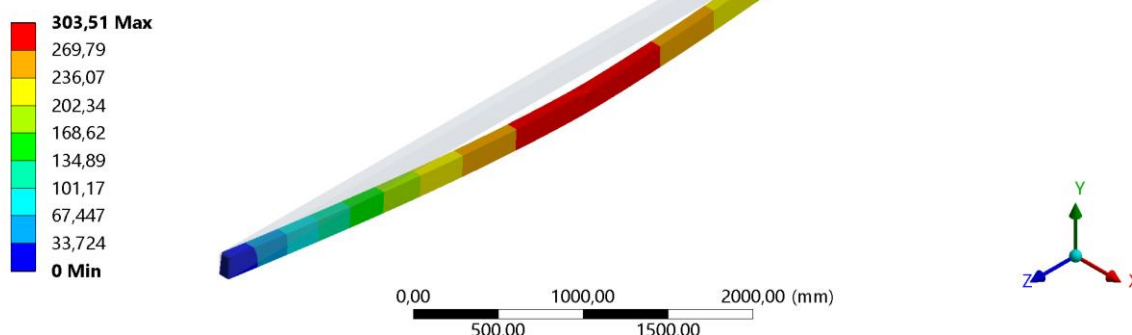


Figura 74 – Vista isométrica do deslocamento total a 20 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 20°C

Normal Stress 3

Type: Normal Stress(Z Axis)

Unit: MPa

Global Coordinate System

Time: 1358,1

10/11/2020 01:36

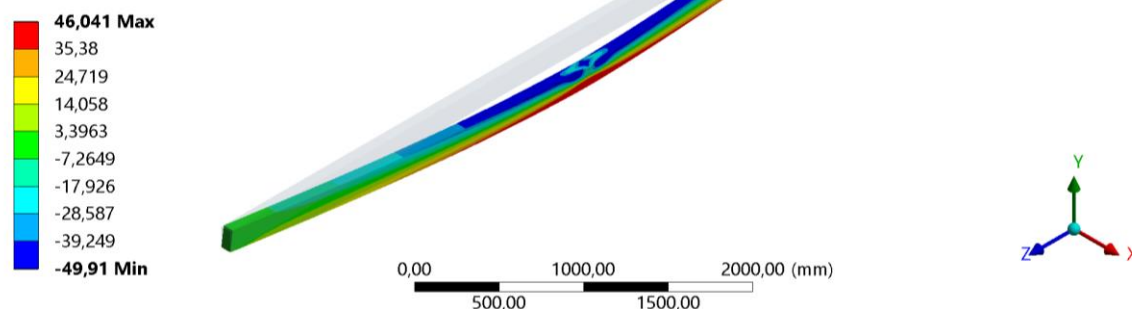


Figura 75 – Vista isométrica da tensão normal de flexão a 20 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 100°C

Directional Deformation 2
 Type: Directional Deformation(Y Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 794,17
 18/11/2020 15:48

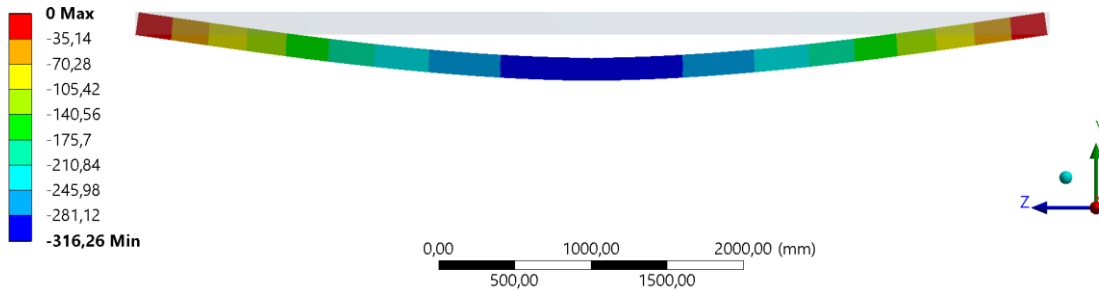


Figura 76 - Vista frontal do deslocamento direcional em y a 100 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 100°C

Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 794,17
 10/11/2020 03:50

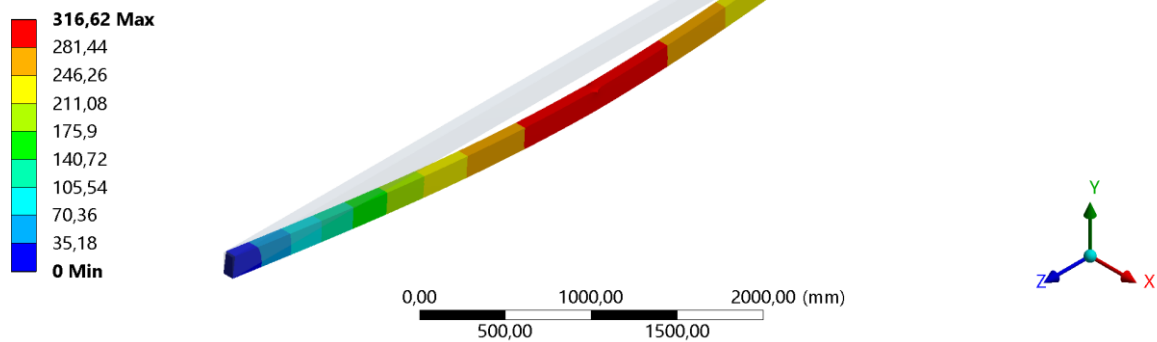


Figura 77 - Vista isométrica do deslocamento total a 100 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 100°C

Normal Stress 3
 Type: Normal Stress(Z Axis)
 Unit: MPa
 Global Coordinate System
 Time: 794,17
 10/11/2020 04:26

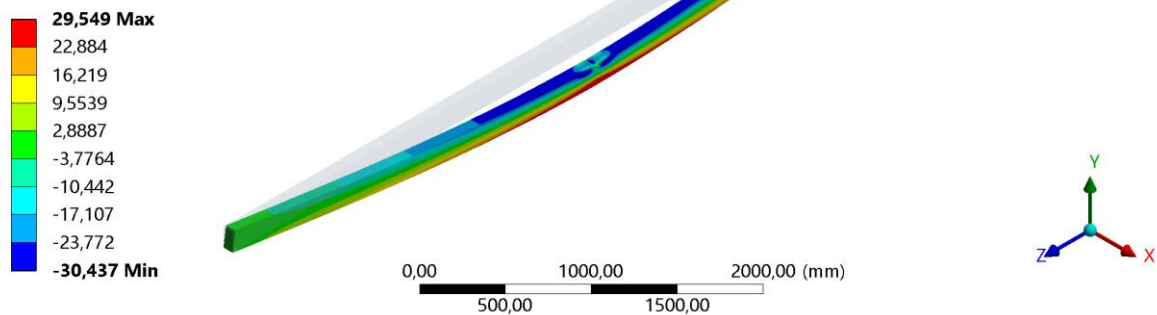


Figura 78 - Vista isométrica da tensão normal de flexão a 100 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 150°C

Directional Deformation 2
 Type: Directional Deformation(Y Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 3600 (Unconverged)
 18/11/2020 15:53

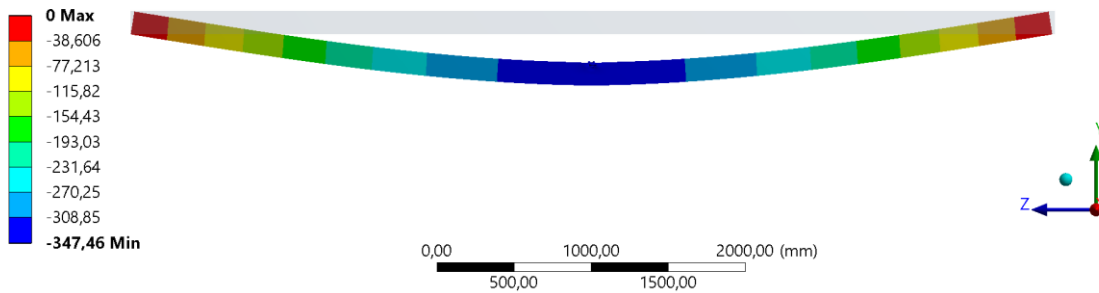


Figura 79 - Vista frontal do deslocamento direcional em y a 150 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 150°C

Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 620,93
 17/11/2020 14:04

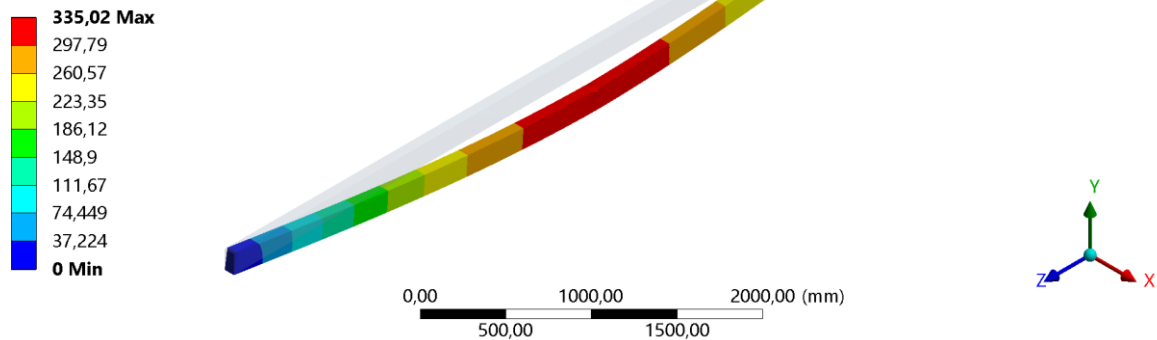


Figura 80 - Vista isométrica do deslocamento total a 150 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 150°C

Normal Stress 3
 Type: Normal Stress(Z Axis)
 Unit: MPa
 Global Coordinate System
 Time: 620,93
 17/11/2020 14:03

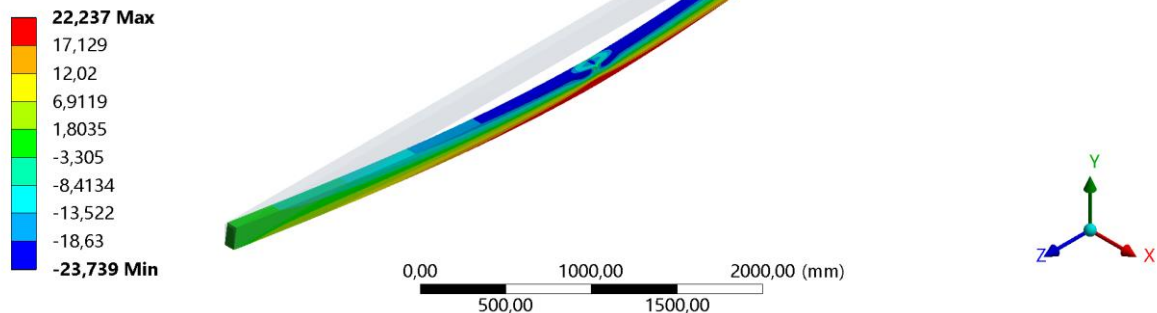


Figura 81 - Vista isométrica da tensão normal de flexão a 150 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 200°C

Directional Deformation 2
 Type: Directional Deformation(Y Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 429,03
 18/11/2020 15:57

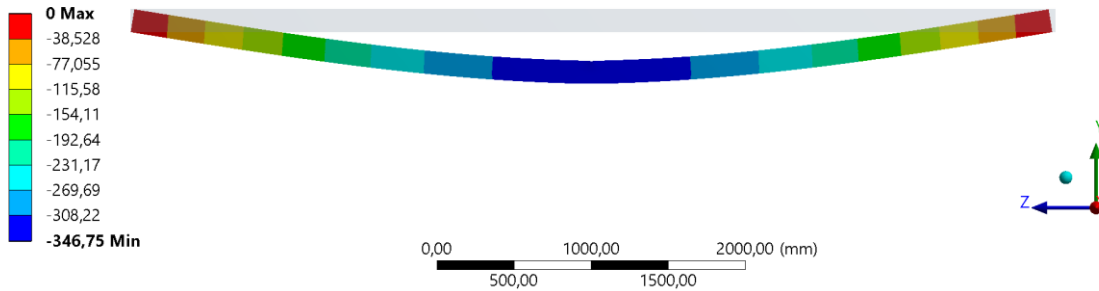


Figura 82 - Vista frontal do deslocamento direcional em y a 200 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 200°C

Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 429,03
 17/11/2020 13:53

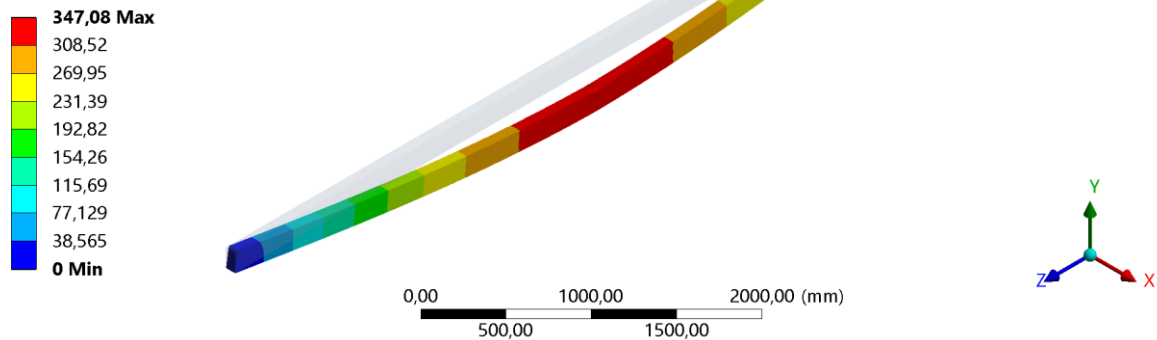


Figura 83 - Vista isométrica do deslocamento total a 200 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 200°C

Normal Stress 3
 Type: Normal Stress(Z Axis)
 Unit: MPa
 Global Coordinate System
 Time: 429,03
 17/11/2020 13:54

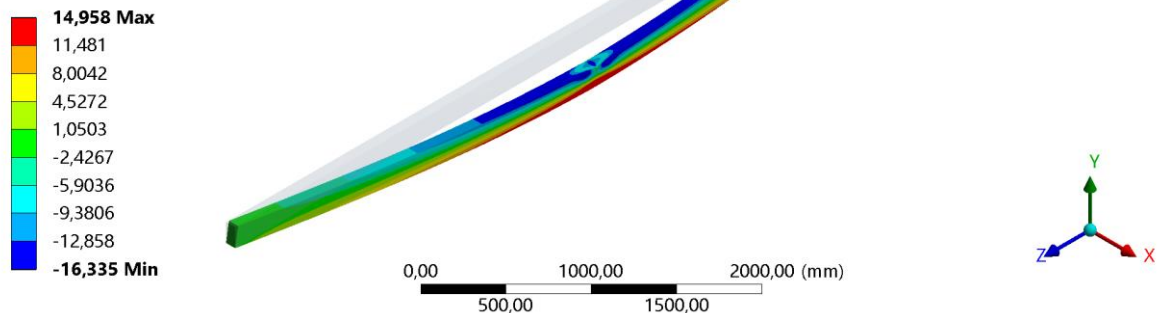


Figura 84 - Vista isométrica da tensão normal de flexão a 200 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 250°C

Directional Deformation 2
 Type: Directional Deformation(Y Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 224,28
 18/11/2020 16:00

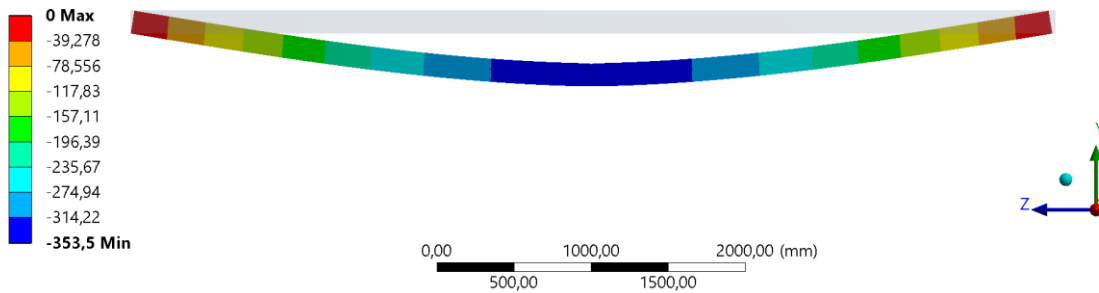


Figura 85 - Vista frontal do deslocamento direcional em y a 250 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 250°C

Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 224,28
 17/11/2020 13:56

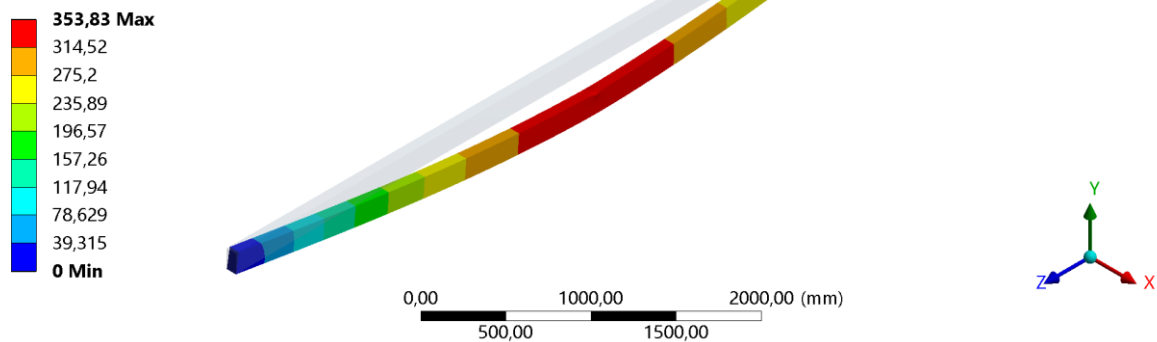


Figura 86 - Vista isométrica do deslocamento total a 250 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 250°C

Normal Stress 3
 Type: Normal Stress(Z Axis)
 Unit: MPa
 Global Coordinate System
 Time: 224,28
 17/11/2020 13:58

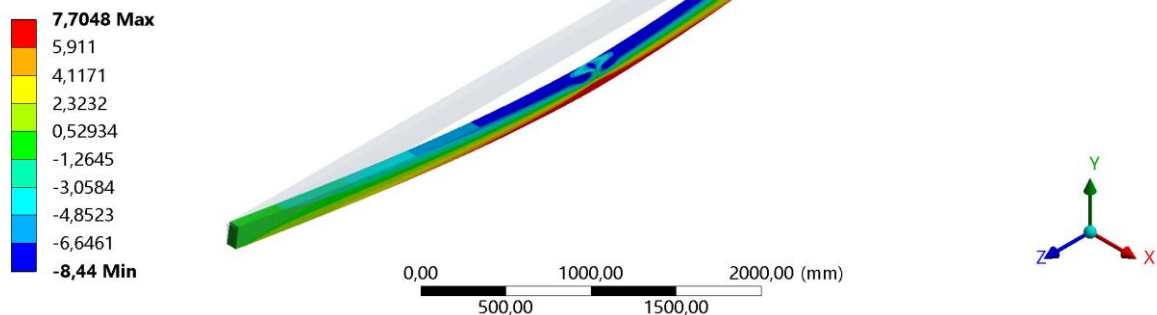


Figura 87 - Vista isométrica da tensão normal de flexão a 250 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 300°C

Directional Deformation 2
 Type: Directional Deformation(Y Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 10,652
 18/11/2020 16:03

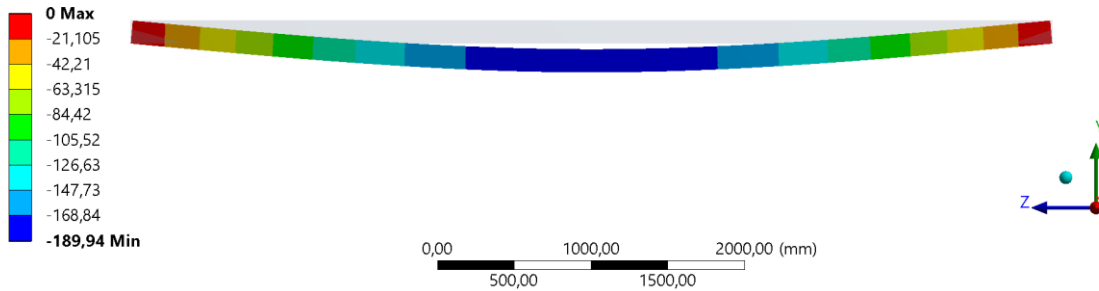


Figura 88 - Vista frontal do deslocamento direcional em y a 300 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 300°C

Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 10,652
 10/11/2020 04:11

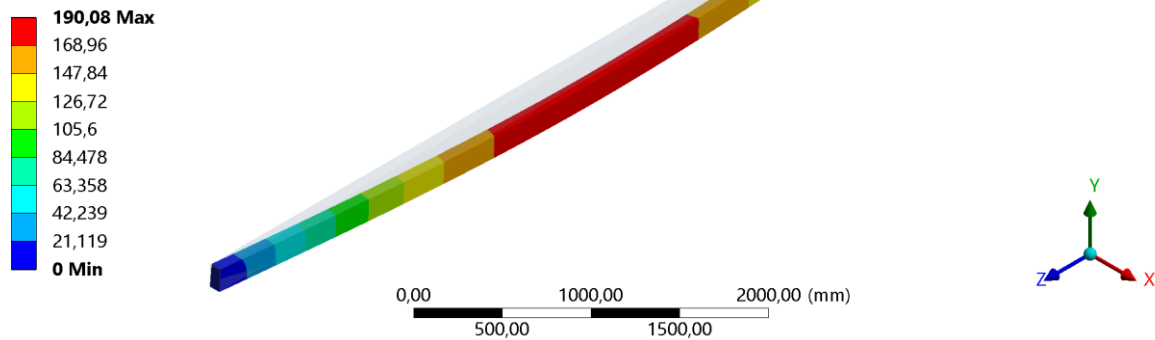


Figura 89 - Vista isométrica do deslocamento total a 300 °C, viga 75x150x6000 mm.

C: Análise para a viga 75x150x6000mm, temperatura constante de 300°C

Normal Stress 4
 Type: Normal Stress(Z Axis)
 Unit: MPa
 Global Coordinate System
 Time: 10,652
 10/11/2020 04:11

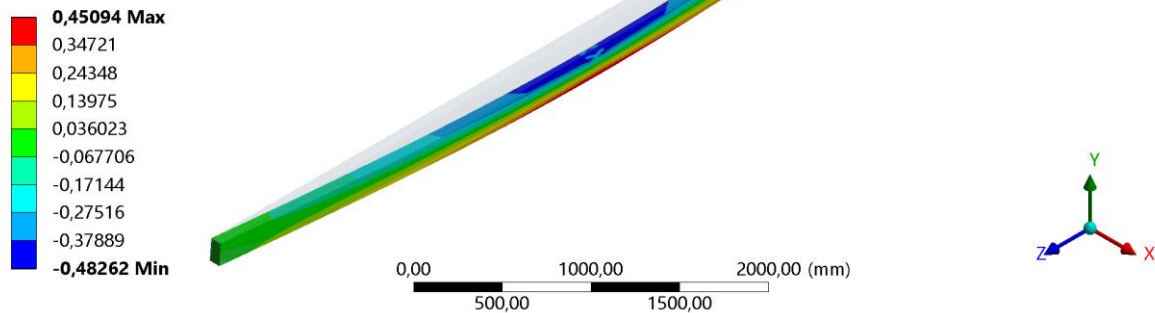


Figura 90 - Vista isométrica da tensão normal de flexão a 300 °C, viga 75x150x6000 mm.

Anexo VI – Resultados gráficos aplicados na determinação do final do regime elástico para a viga 250x300x6000 mm.

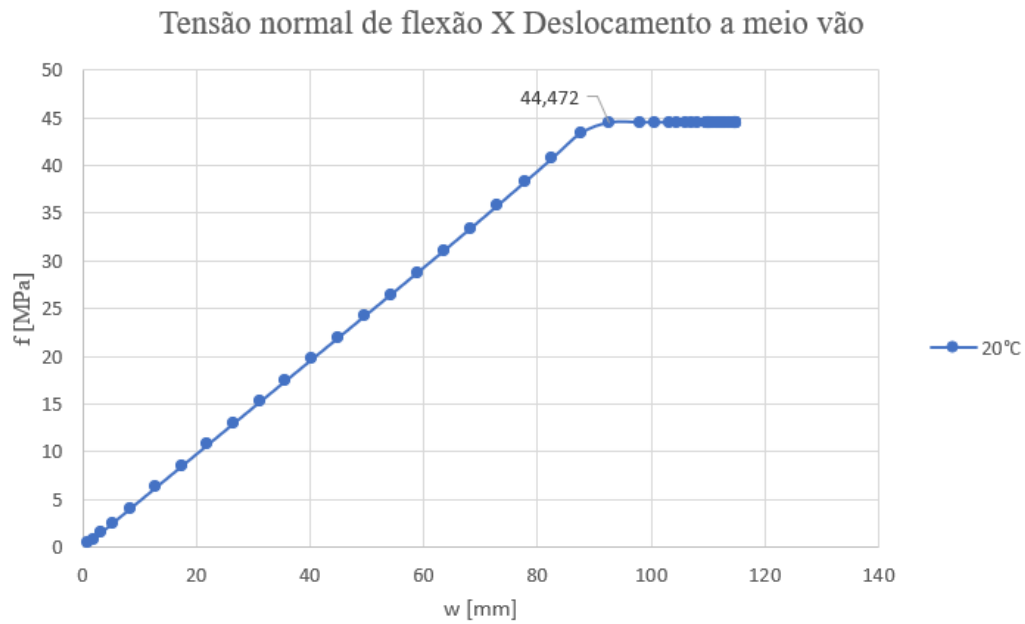


Figura 91 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 20 °C, viga 250x300x6000 mm.

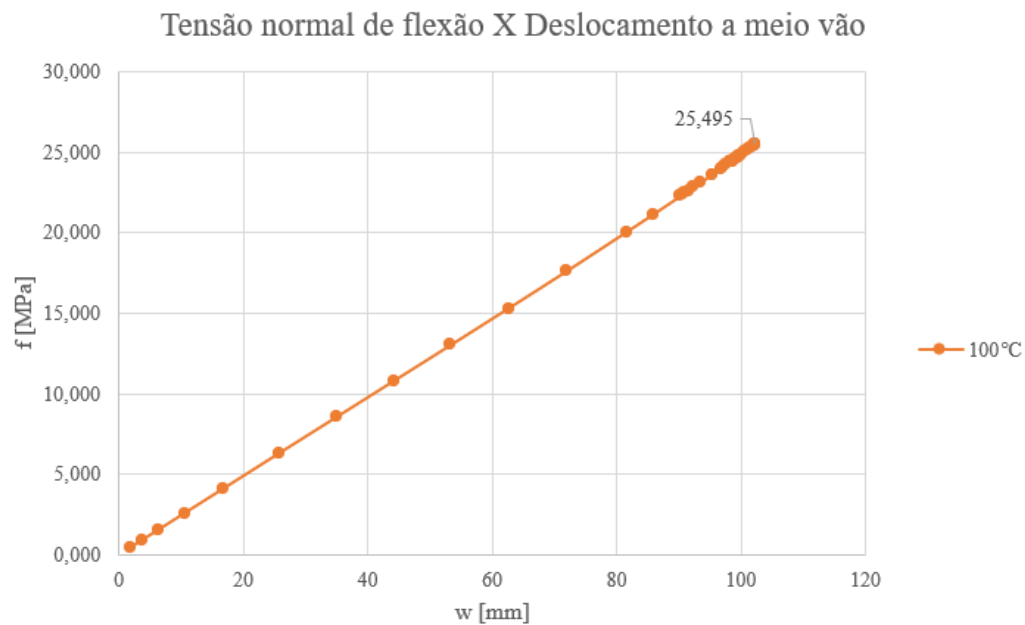


Figura 92 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 100 °C, viga 250x300x6000 mm.

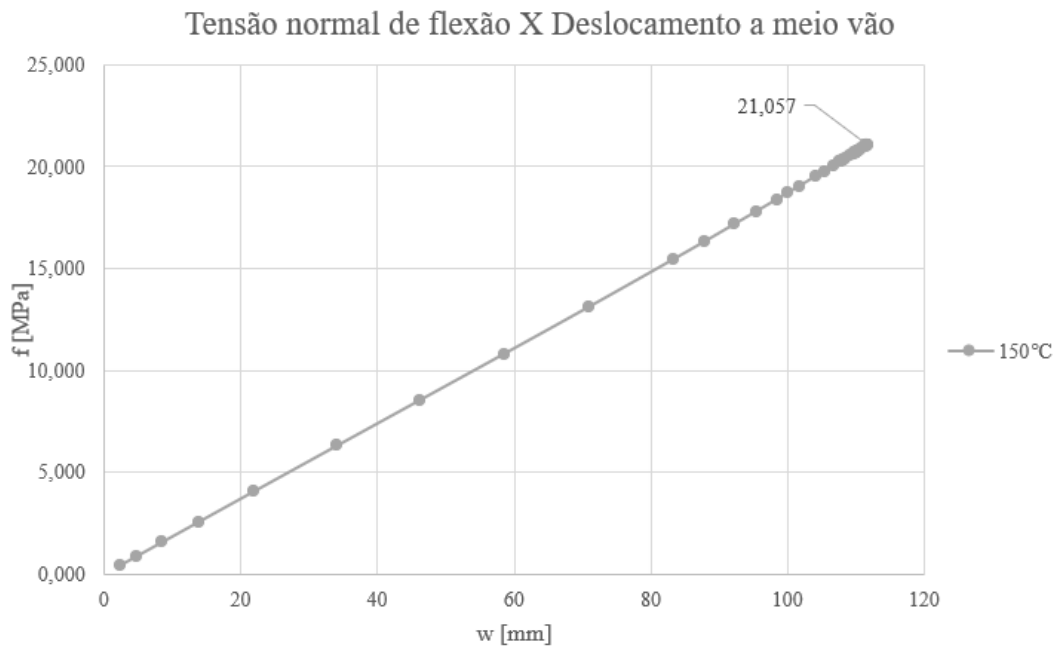


Figura 93 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 150 °C, viga 250x300x6000 mm.

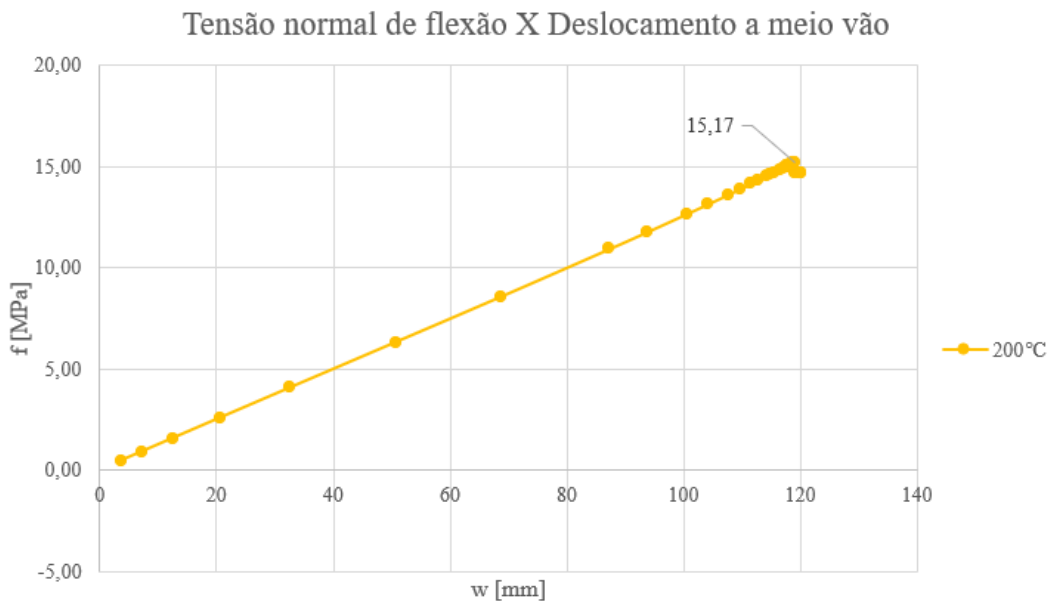


Figura 94 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 200 °C, viga 250x300x6000 mm.

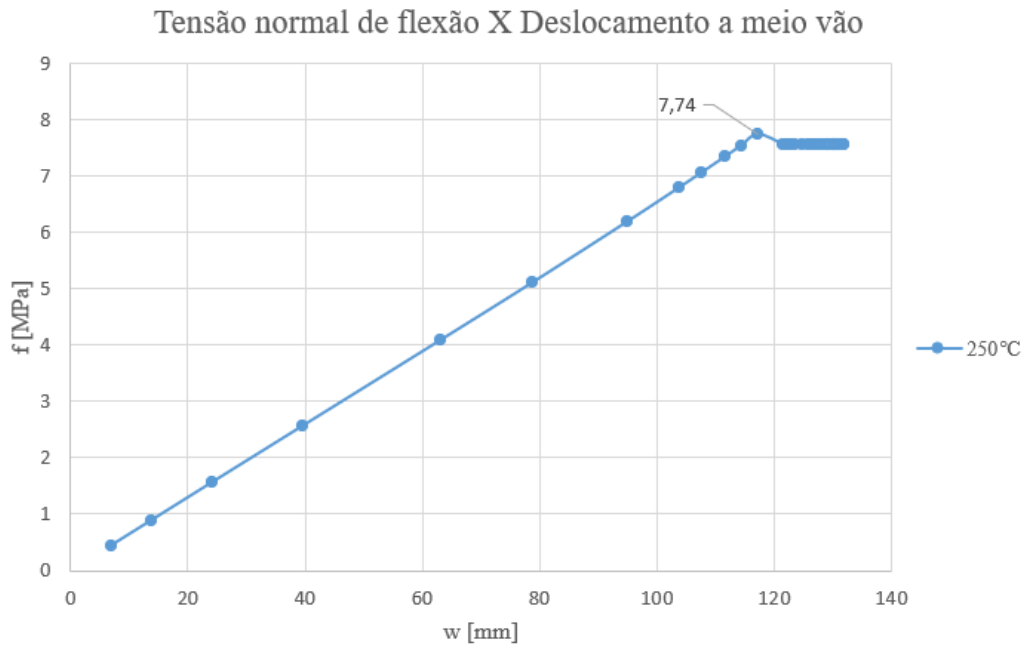


Figura 95 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 250 °C, viga 250x300x6000 mm.

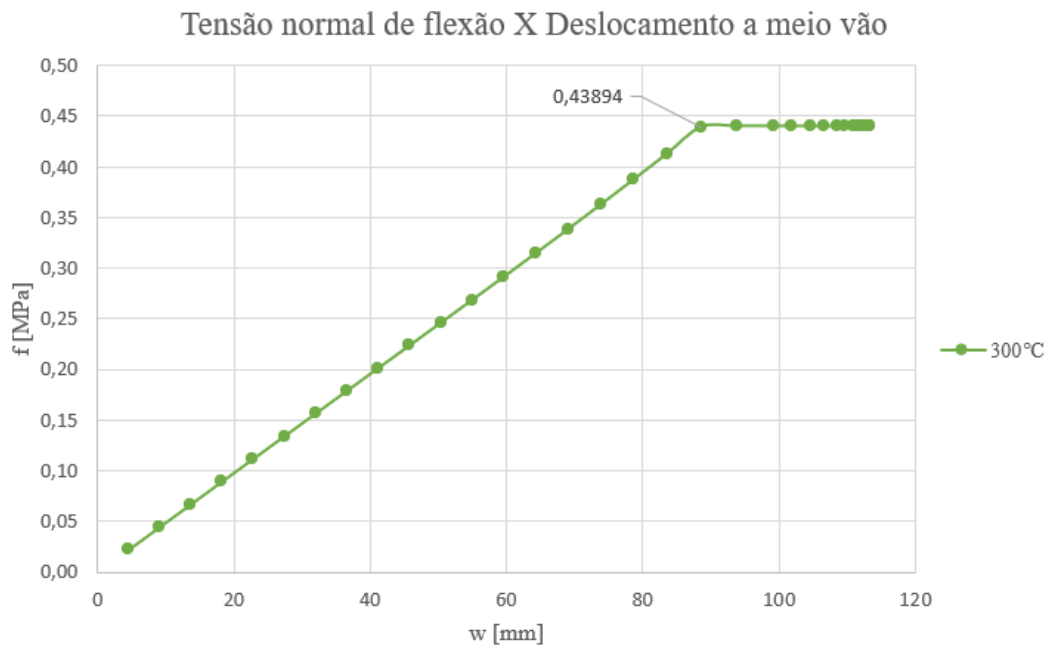


Figura 96 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para a temperatura constante de 300 °C, viga 250x300x6000 mm.

Anexo VII – Deslocamento total e tensões normais de flexão da viga 250x300x6000 mm ao final da simulação para temperatura constante

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 20°C

Directional Deformation 2
Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 2343,9
18/11/2020 16:23

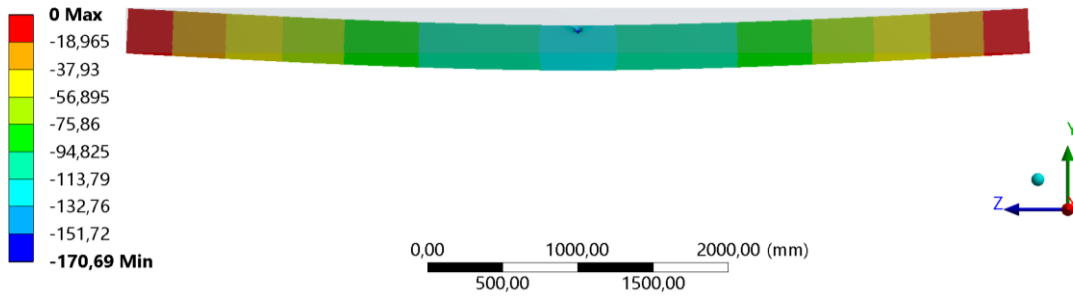


Figura 97 – Vista frontal do deslocamento direcional em y a 20 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 20°C

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 2343,9
10/11/2020 15:22

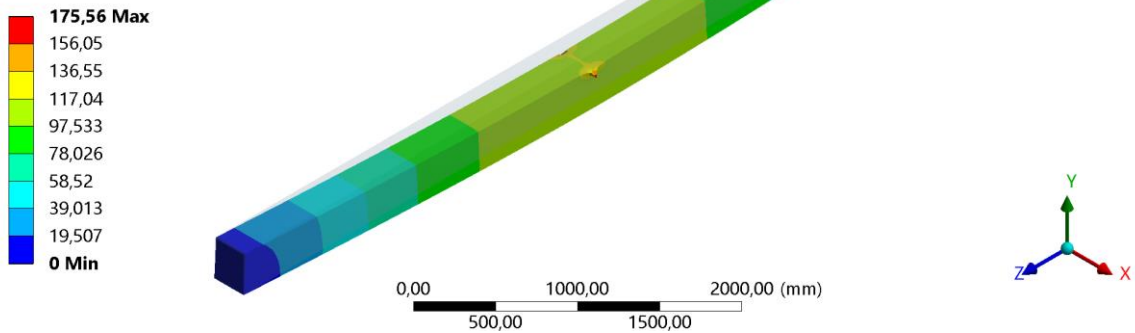


Figura 98 – Vista isométrica do deslocamento total a 20 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 20°C

Normal Stress 3
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 2343,9
10/11/2020 15:23

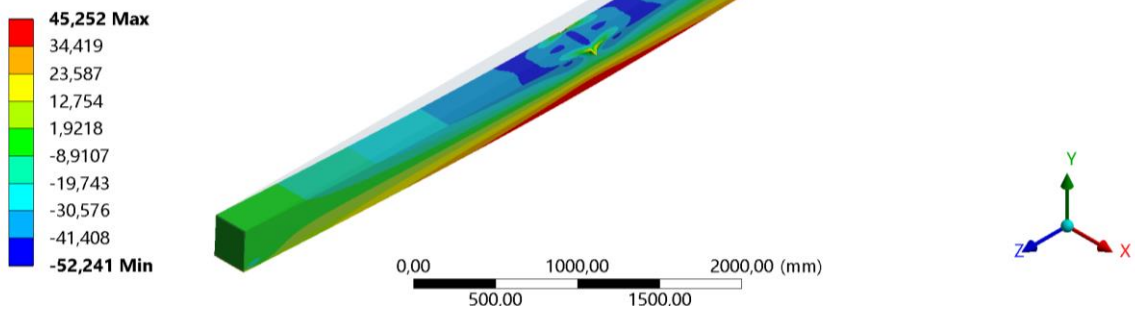


Figura 99 – Vista isométrica da tensão normal de flexão a 20 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise da viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 100°C

Directional Deformation 2
 Type: Directional Deformation(Y Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1092,6
 18/11/2020 16:28

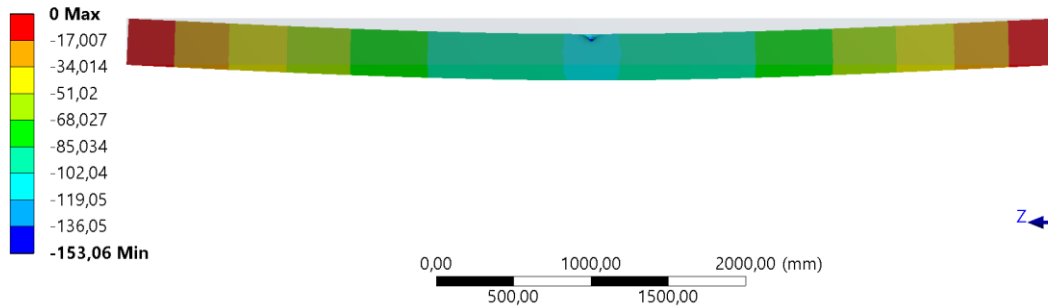


Figura 100 – Vista frontal do deslocamento direcional em y a 100 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise da viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 100°C

Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1092,6
 10/11/2020 15:58

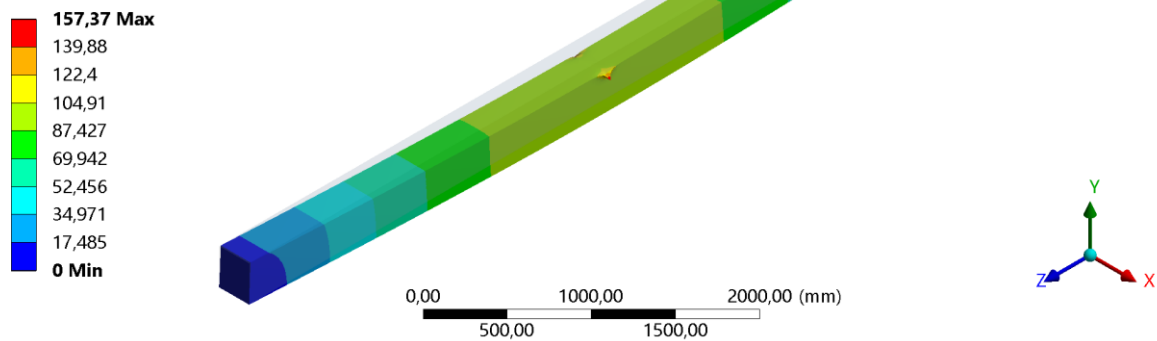


Figura 101 – Vista isométrica do deslocamento total a 100 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise da viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 100°C

Normal Stress 3
 Type: Normal Stress(Z Axis)
 Unit: MPa
 Global Coordinate System
 Time: 1091,2
 10/11/2020 15:57

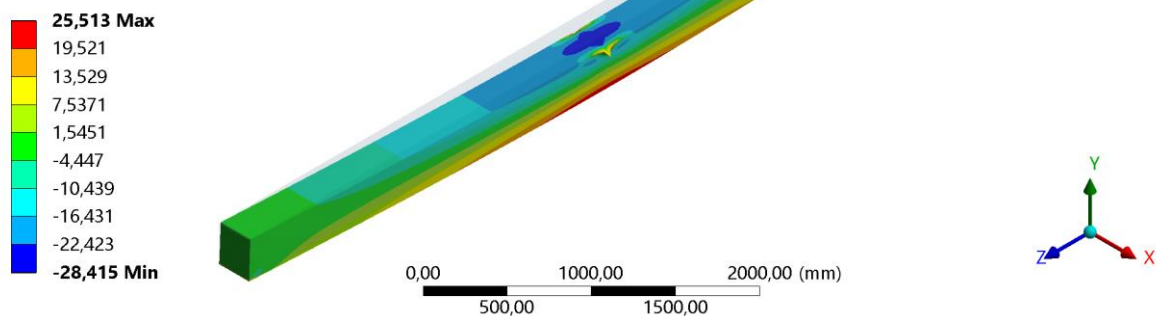


Figura 102 – Vista isométrica da tensão normal de flexão a 100 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 150°C

Directional Deformation 2
Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 898,56
18/11/2020 16:32

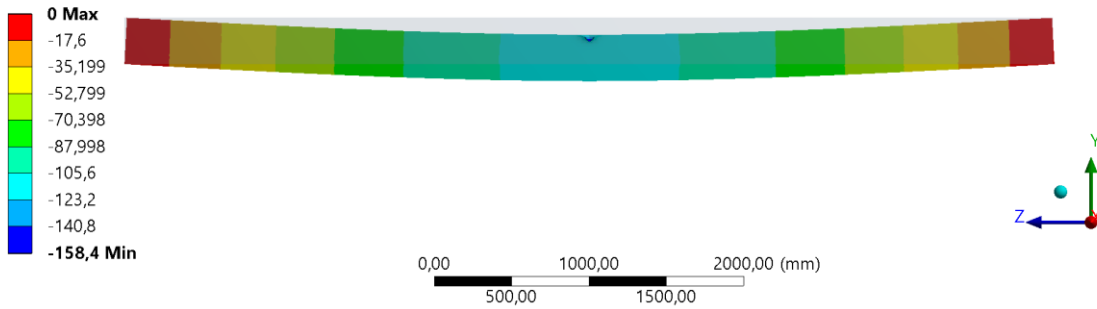


Figura 103 – Vista frontal do deslocamento direcional em y a 150 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 150°C

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 898,56
10/11/2020 15:02

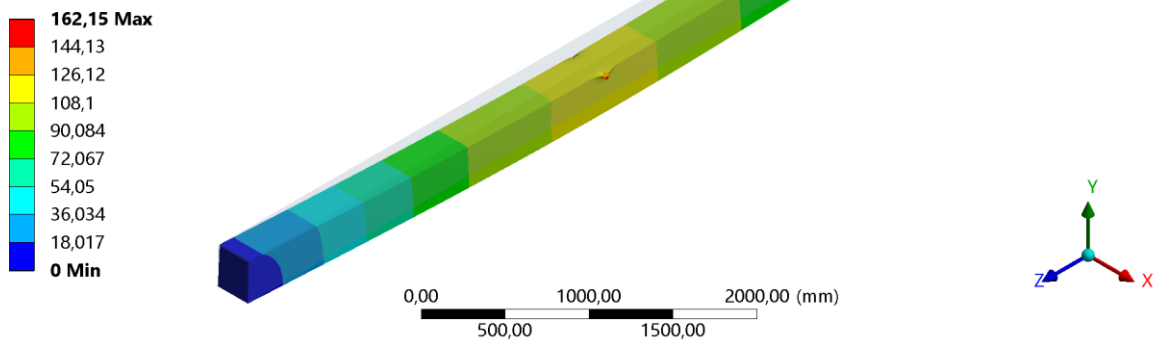


Figura 104 – Vista isométrica do deslocamento total a 150 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 150°C

Normal Stress 3
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 898,56
10/11/2020 15:02

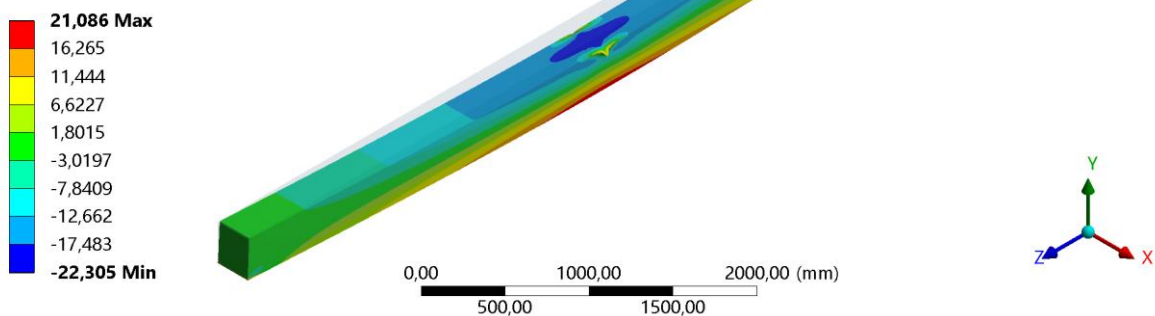


Figura 105 – Vista isométrica da tensão normal de flexão a 150 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 200°C

Directional Deformation 2
 Type: Directional Deformation(Y Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 650,84
 18/11/2020 16:34

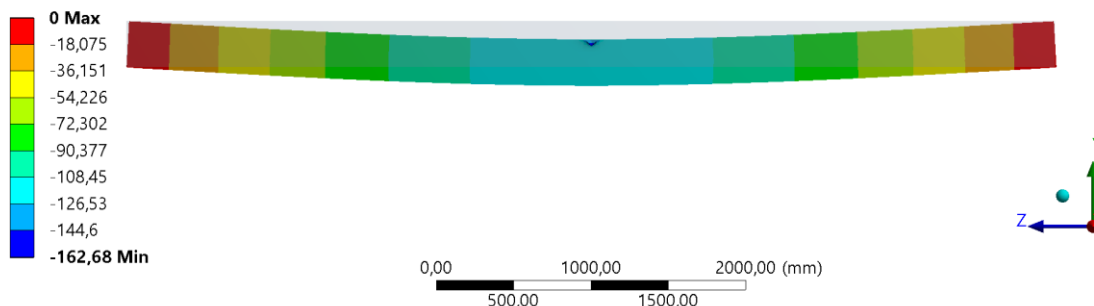


Figura 106 – Vista frontal do deslocamento direcional em y a 200 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 200°C

Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 650,84
 10/11/2020 23:27

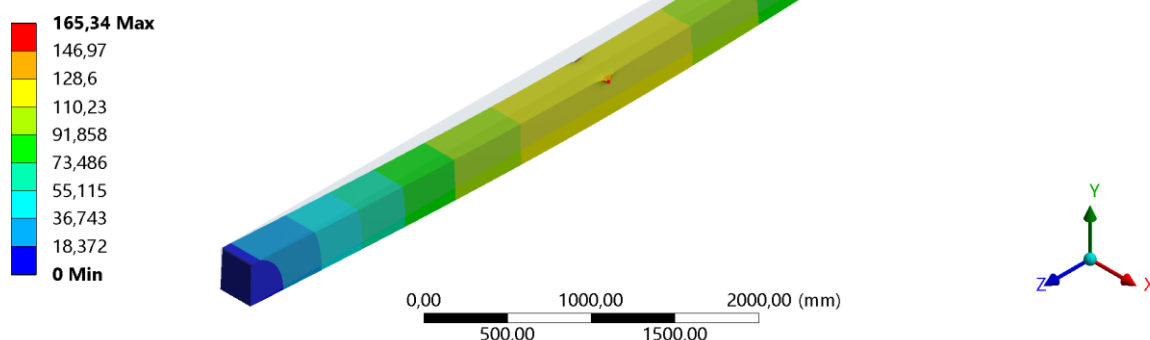


Figura 107 – Vista isométrica do deslocamento total a 200 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 200°C

Normal Stress 3
 Type: Normal Stress(Z Axis)
 Unit: MPa
 Global Coordinate System
 Time: 650,84
 10/11/2020 23:28

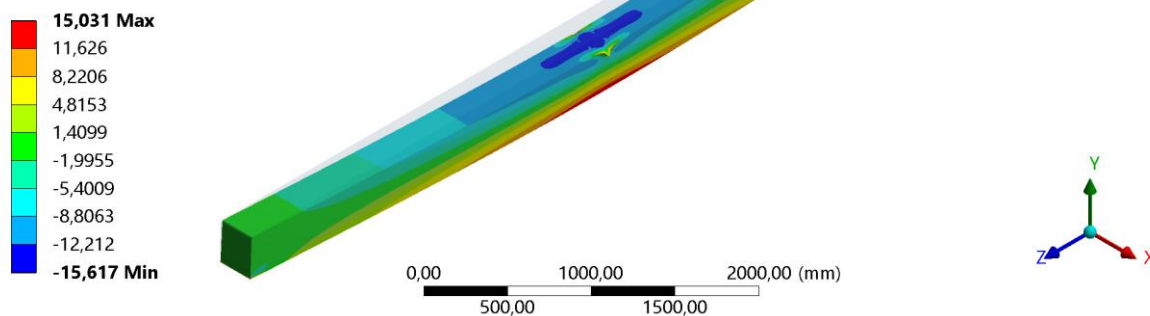


Figura 108 – Vista isométrica da tensão normal de flexão a 200 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 250°C

Directional Deformation 2
Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 365,95
18/11/2020 16:37

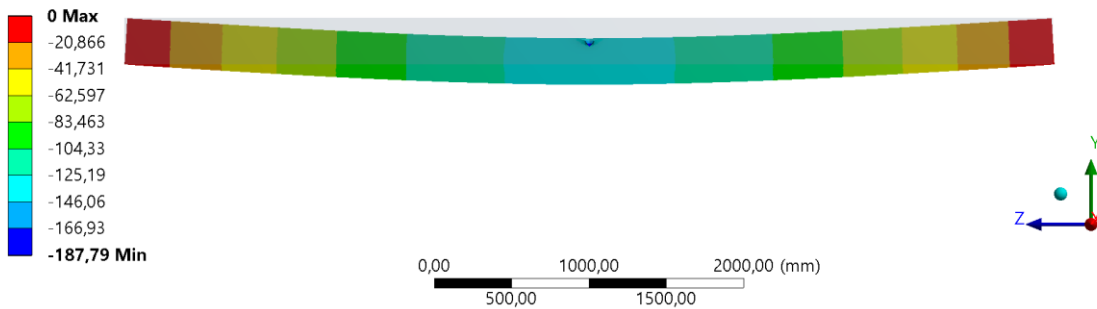


Figura 109 – Vista frontal do deslocamento direcional em y a 250 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 250°C

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 365,95
10/11/2020 15:31

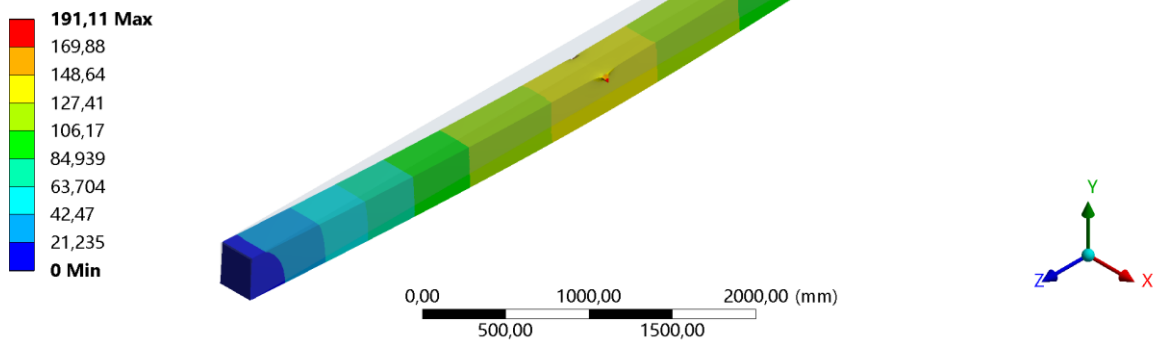


Figura 110 – Vista isométrica do deslocamento total a 250 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 250°C

Normal Stress 3
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 365,95
10/11/2020 15:32

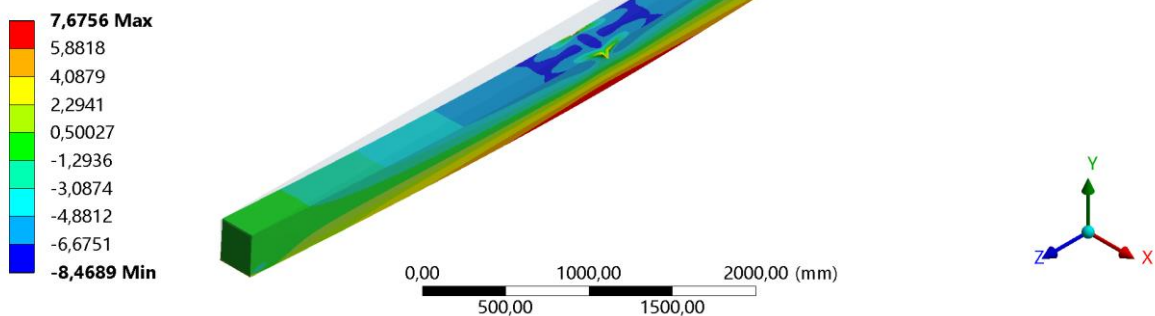


Figura 111 – Vista isométrica da tensão normal de flexão a 250 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 300°C

Directional Deformation 2
 Type: Directional Deformation(Y Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 23,155
 18/11/2020 16:39

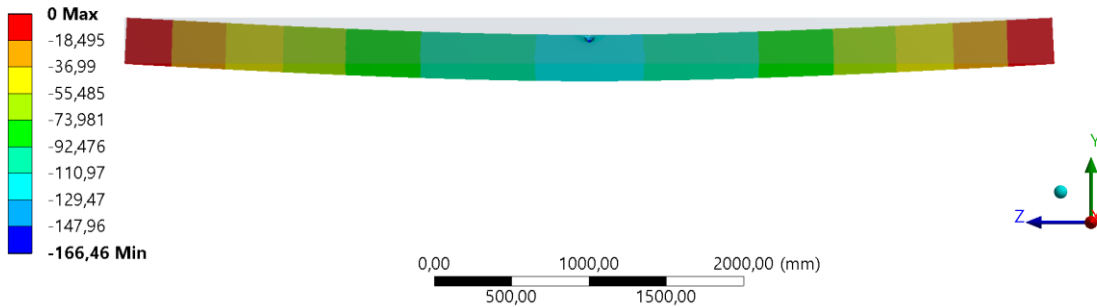


Figura 112 – Vista frontal do deslocamento direcional em y a 300 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 300°C

Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 23,155
 10/11/2020 15:37

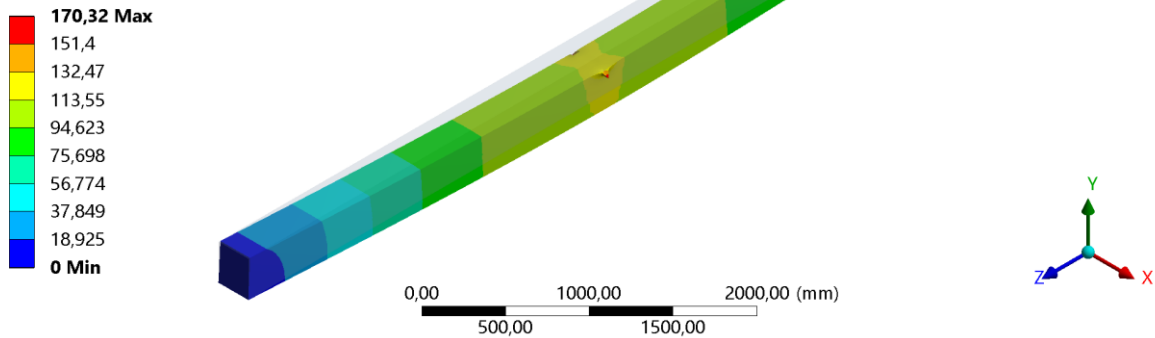


Figura 113 – Vista isométrica do deslocamento total a 300 °C, viga 250x300x6000 mm.

C: Análise para a viga 250x300x6000mm, temperatura constante de 300°C

Normal Stress 3
 Type: Normal Stress(Z Axis)
 Unit: MPa
 Global Coordinate System
 Time: 23,155
 10/11/2020 15:37

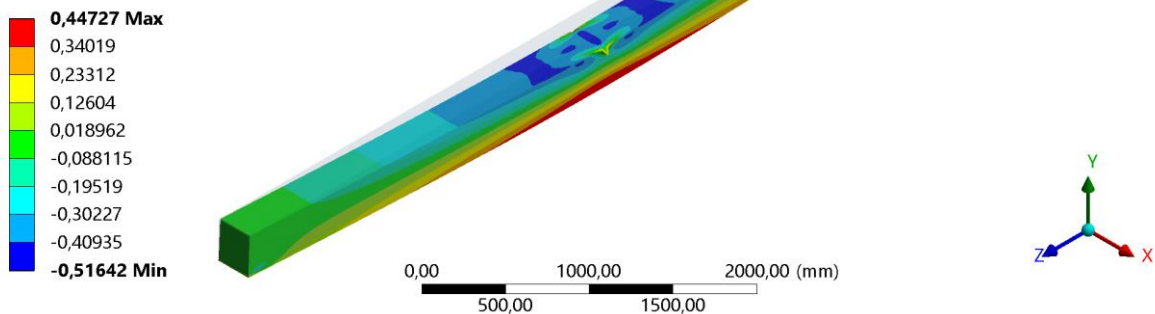


Figura 114 – Vista isométrica da tensão normal de flexão a 300 °C, viga 250x300x6000 mm.

Anexo VIII – Restrições de deslocamento e giro nos planos de simetria, malha aplicada vigas 75x150x6000 mm e 250x300x6000 mm.

D: Static Structural

Plano de simetria YZ

Time: 3600, s

20/11/2020 03:54

Plano de simetria YZ
Components: 0,;Free;Free mm

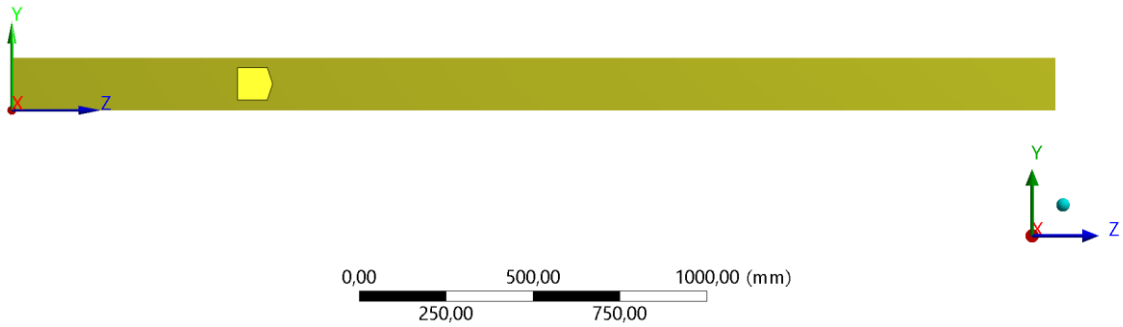


Figura 115 - Vista do interior da viga dividida longitudinalmente segundo o plano de simetria yz, deslocamento fixo segundo x – viga 75x150x6000 mm.

D: Static Structural

Plano de simetria YZ

Time: 3600, s

20/11/2020 03:54

Plano de simetria YZ
Components: 0,;Free;Free mm

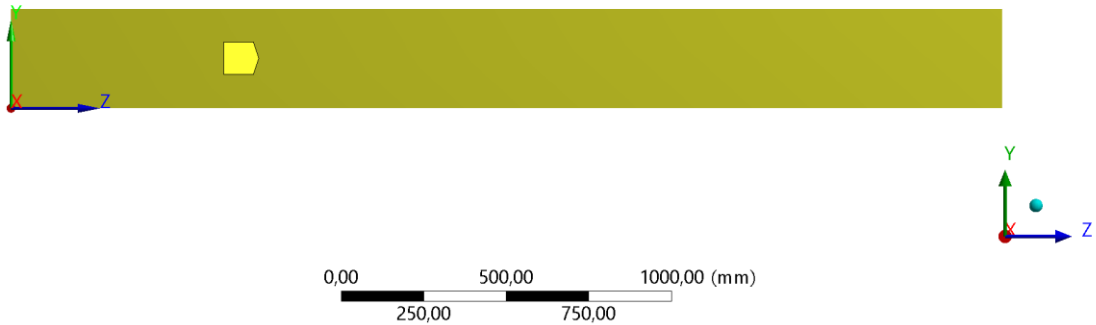


Figura 116 – Vista do interior da viga dividida longitudinalmente segundo o plano de simetria yz, deslocamento fixo segundo x – viga 250x300x6000 mm.

D: Static Structural

Plano de simetria XY

Time: 3600, s

20/11/2020 03:53

■ Plano de simetria XY
Components: Free;Free;0, mm
Rotation: Free, 0,, 0, °
Location: 56,25, 75,, 3000, mm

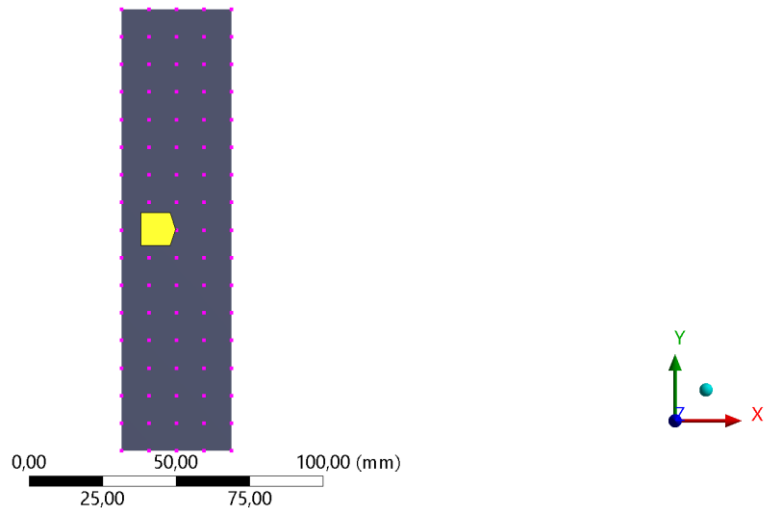


Figura 117 – Vista do interior da viga particionada a meio vão segundo o plano de simetria xy , deslocamento fixo segundo z e rotação nula entorno de y e z – viga 75x150x6000 mm.

D: Static Structural

Plano de simetria XY

Time: 3600, s

20/11/2020 03:53

■ Plano de simetria XY
Components: Free;Free;0, mm
Rotation: Free, 0,, 0, °
Location: 187,5, 150,, 3000, mm

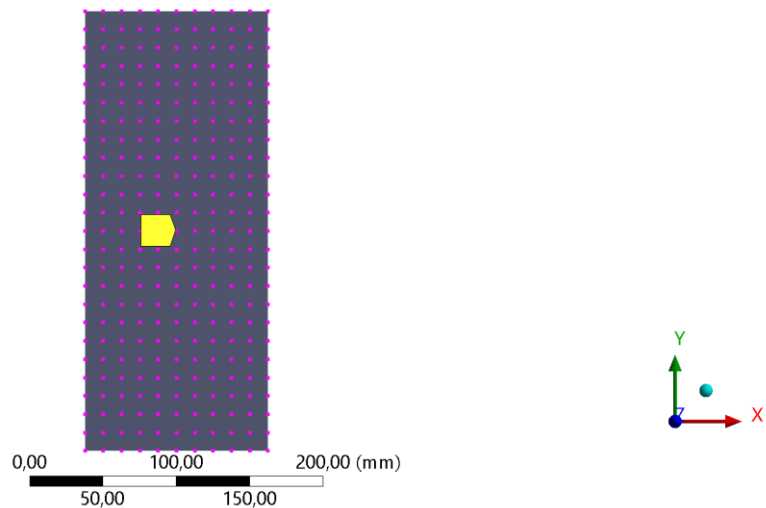


Figura 118 - Vista do interior da viga particionada a meio vão segundo o plano de simetria xy , deslocamento fixo segundo z e rotação nula entorno de y e z – viga 75x150x6000 mm.

Anexo IX – Resultado do campo de temperaturas obtido para as vigas de secção 75x150 mm e 250x300 mm expostas à curva de incêndio ISO834.

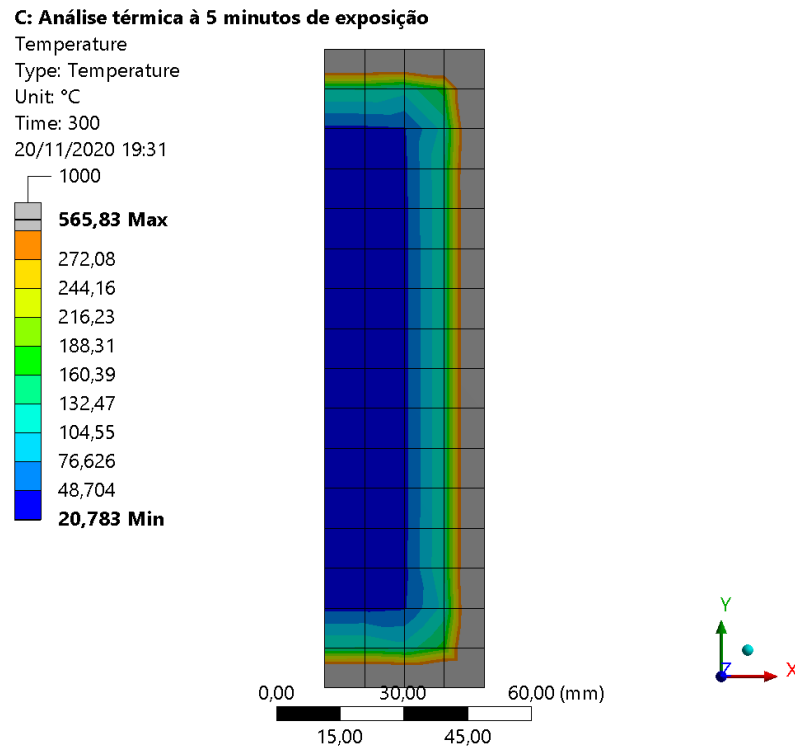


Figura 119 – Campo de temperaturas para 5 minutos de exposição, ¼ da secção 75x150 mm.

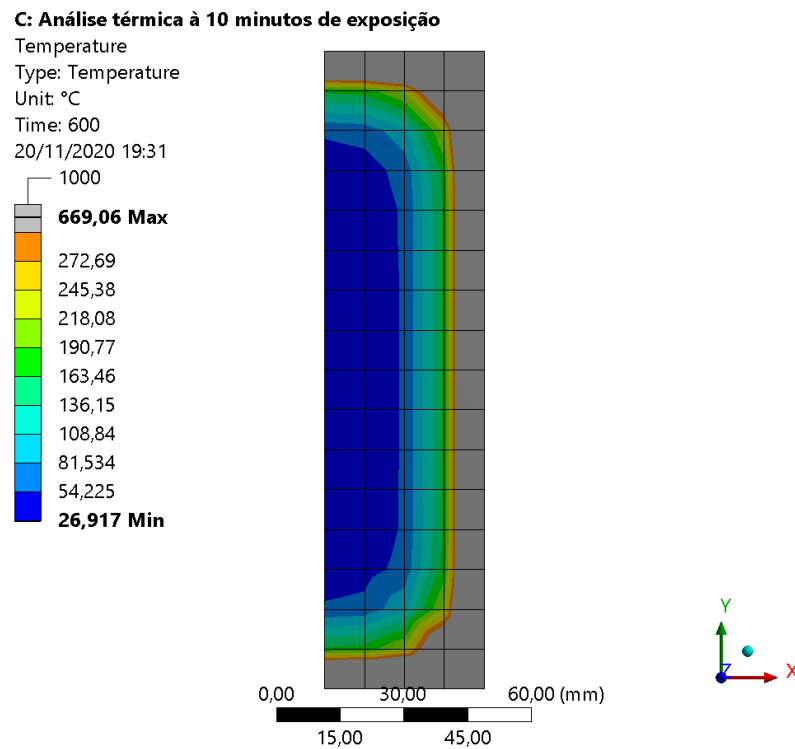


Figura 120 – Campo de temperaturas para 10 minutos de exposição, ¼ da secção 75x150 mm.

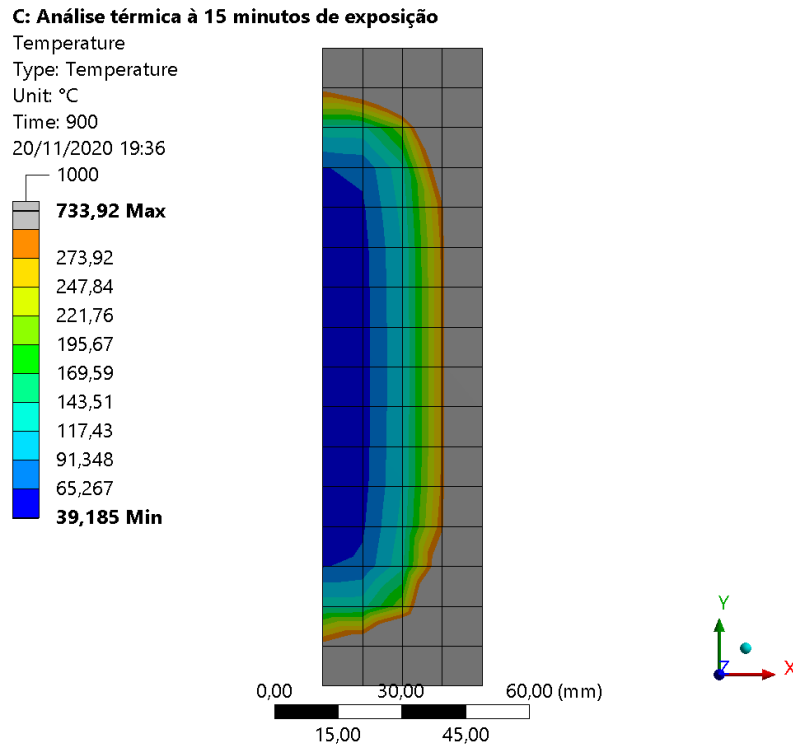


Figura 121 – Campo de temperaturas para 15 minutos de exposição, 1/4 da secção 75x150 mm.

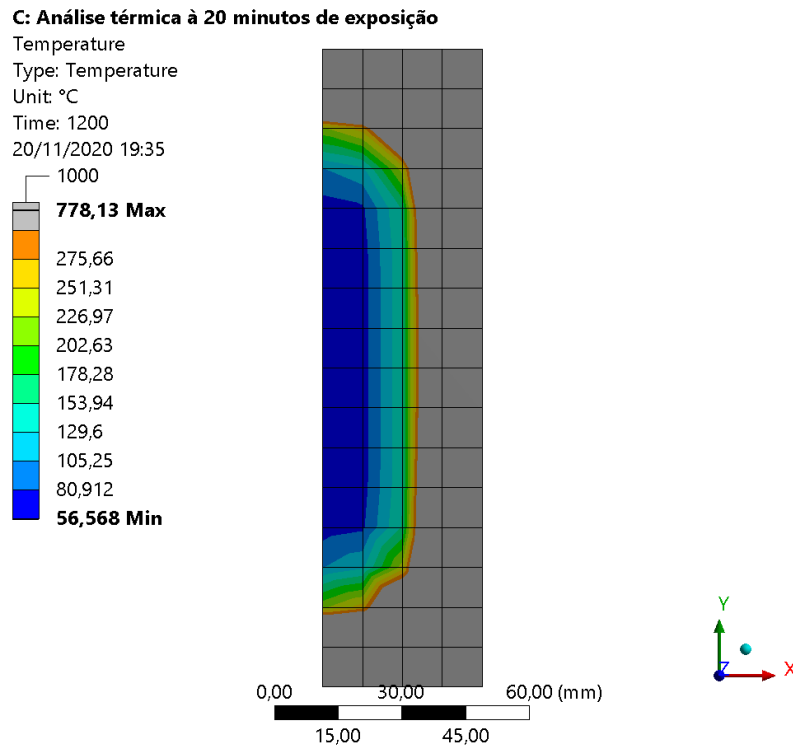


Figura 122 – Campo de temperaturas para 20 minutos de exposição, 1/4 da secção 75x150 mm.

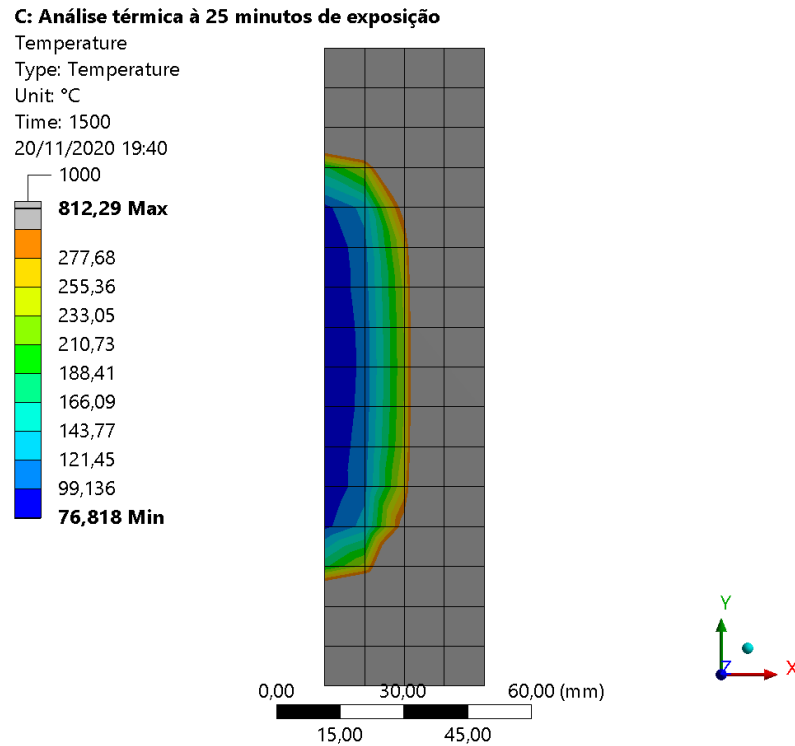


Figura 123 – Campo de temperaturas para 25 minutos de exposição, 1/4 da secção 75x150 mm.

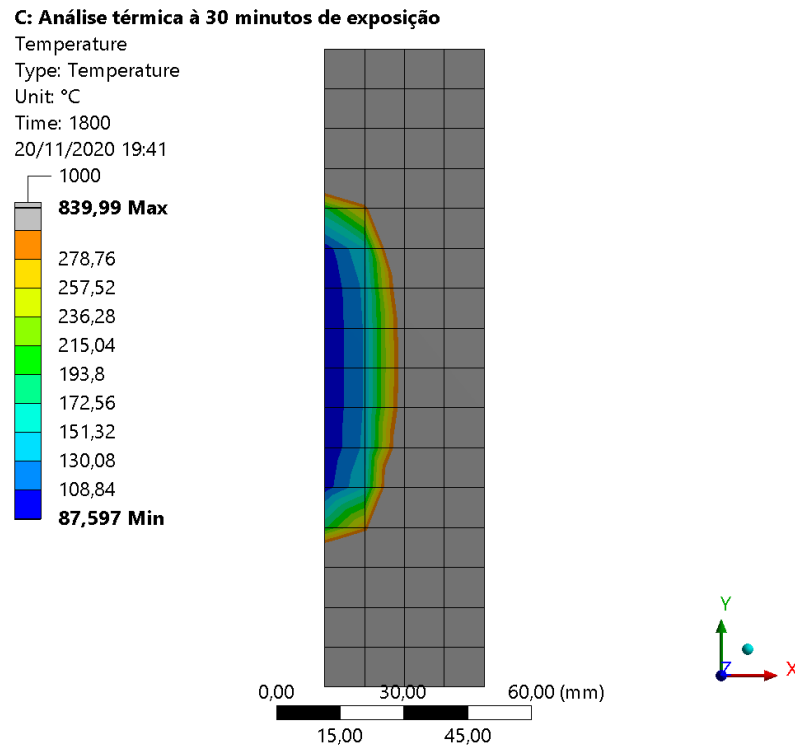


Figura 124 – Campo de temperaturas para 30 minutos de exposição, 1/4 da secção 75x150 mm.

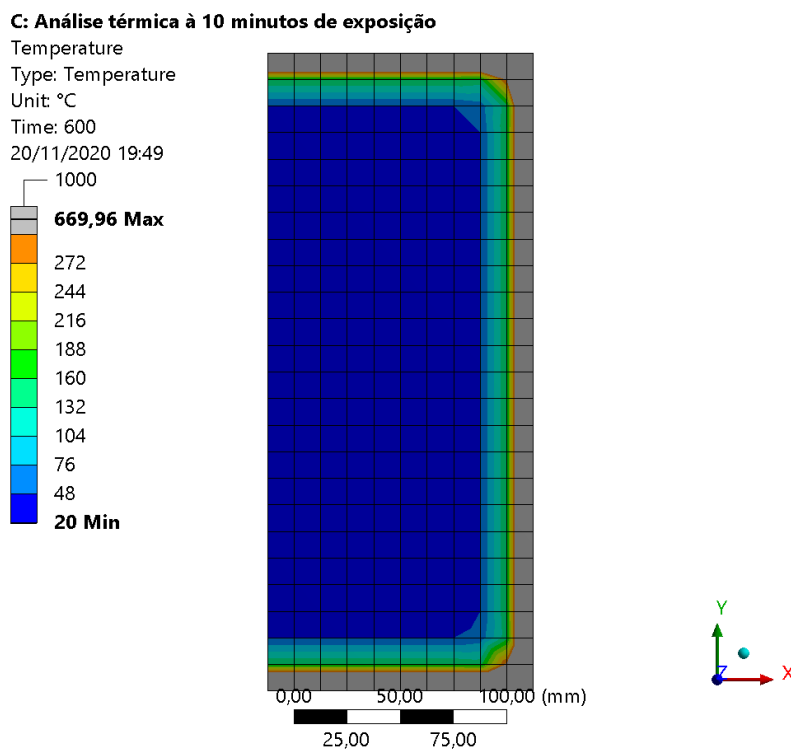


Figura 125 – Campo de temperaturas para 10 minutos de exposição, $\frac{1}{4}$ da secção 250x300 mm.

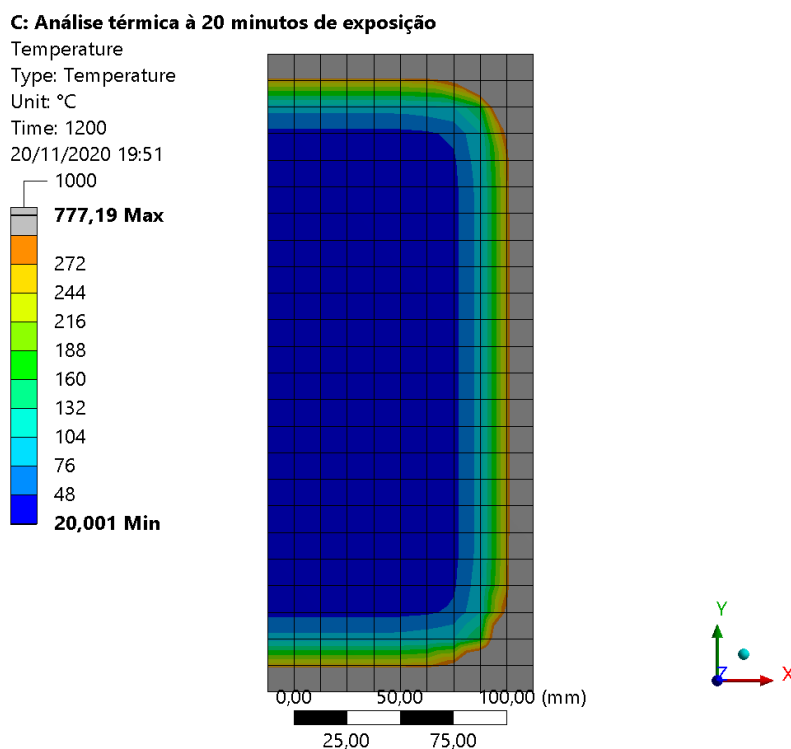


Figura 126 – Campo de temperaturas para 20 minutos de exposição, $\frac{1}{4}$ da secção 250x300 mm.

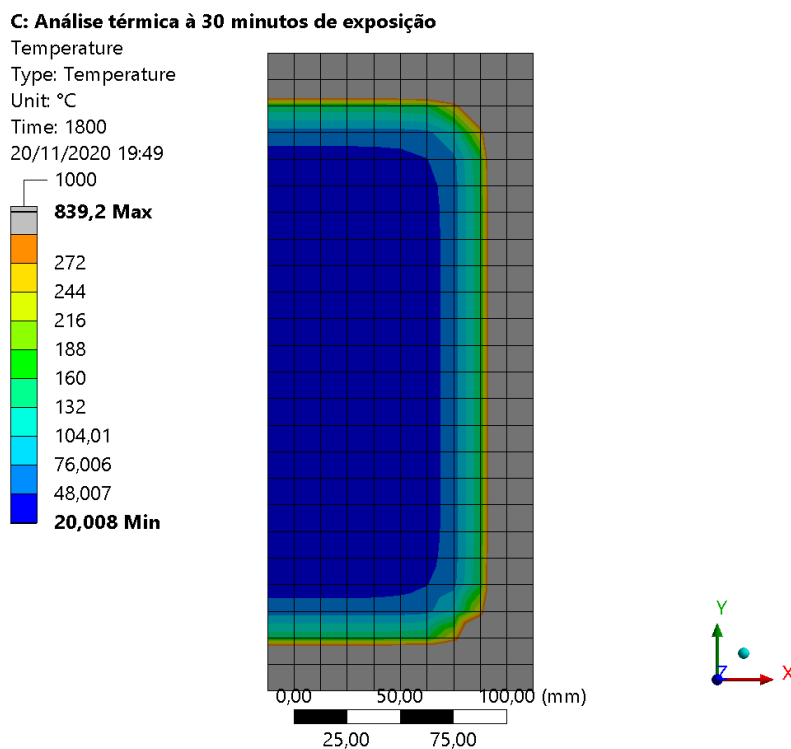


Figura 127 – Campo de temperaturas para 30 minutos de exposição, $\frac{1}{4}$ da secção 250x300 mm.

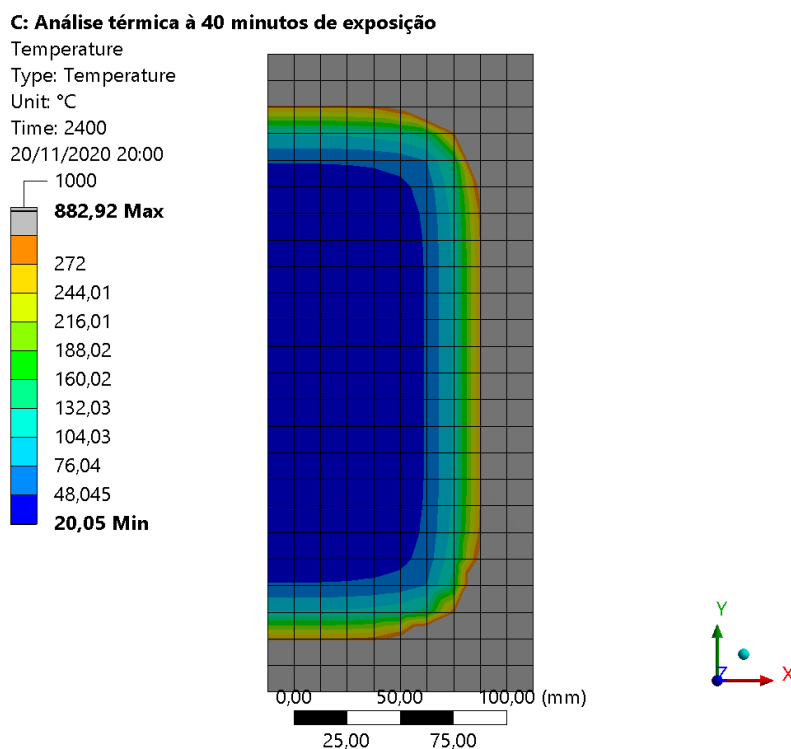


Figura 128 – Campo de temperaturas para 40 minutos de exposição, $\frac{1}{4}$ da secção 250x300 mm.

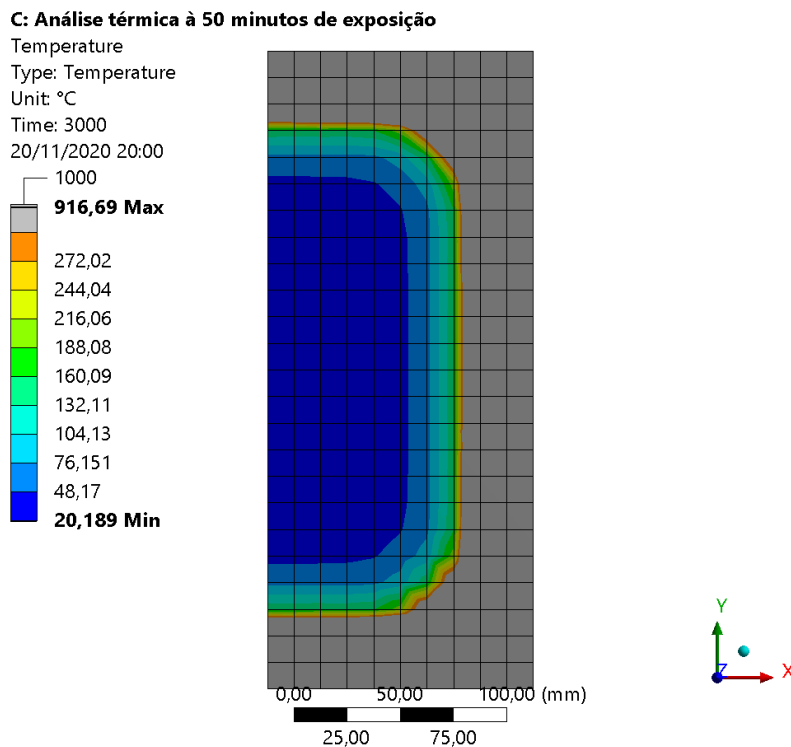


Figura 129 – Campo de temperaturas para 50 minutos de exposição, 1/4 da secção 250x300 mm.

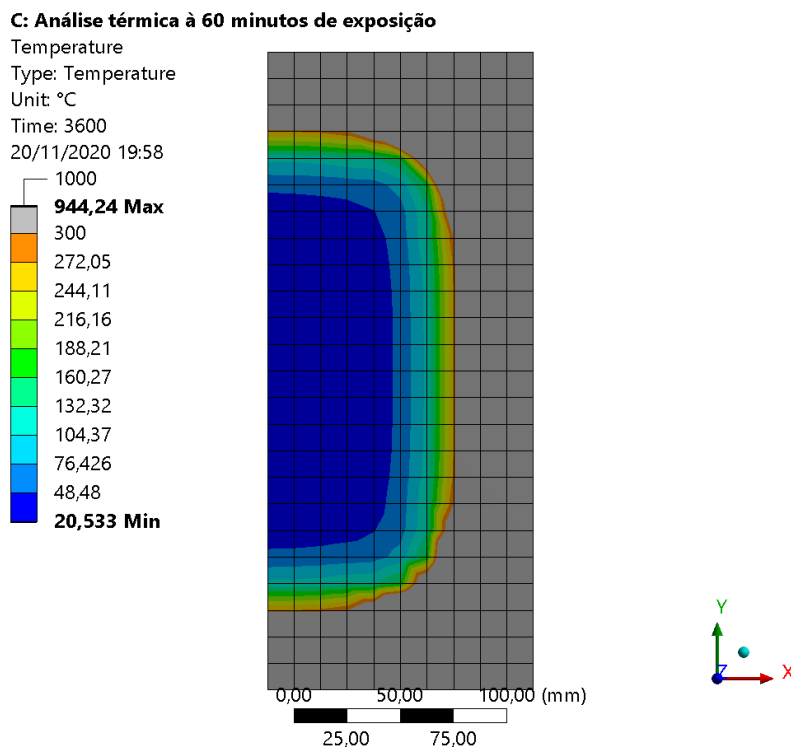


Figura 130 – Campo de temperaturas para 60 minutos de exposição, 1/4 da secção 250x300 mm.

Anexo X – Determinação do caminho para obtenção dos dados para acompanhar a evolução da temperatura para o interior das vigas de secção 75x150 mm e 250x300 mm.

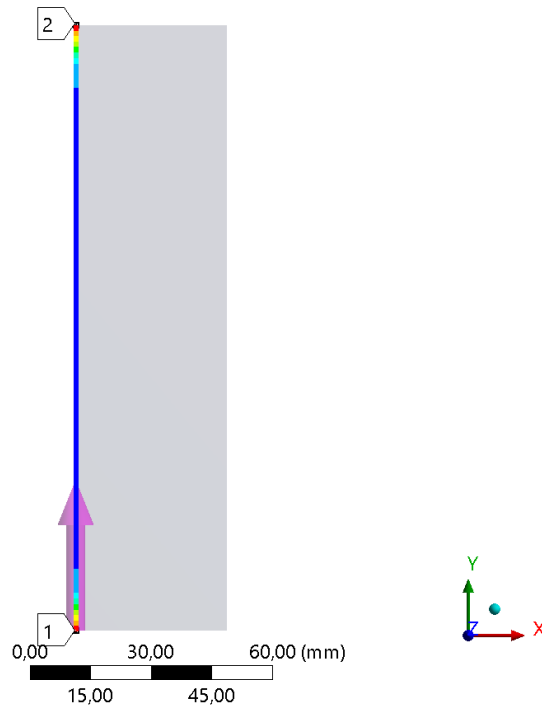


Figura 131 – Caminho para medição dos dados de temperatura no interior da secção transversal 75x150 mm.

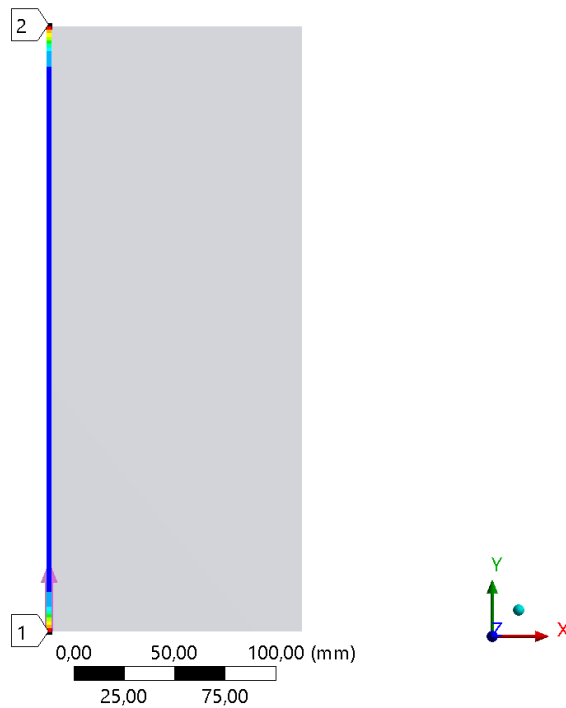


Figura 132 – Caminho para medição dos dados de temperatura no interior da secção transversal 250x300 mm.

Anexo XI – Resultados para a análise da evolução da temperatura para o interior da secção transversal das vigas 75x150x6000 mm e 250x300x6000 mm.

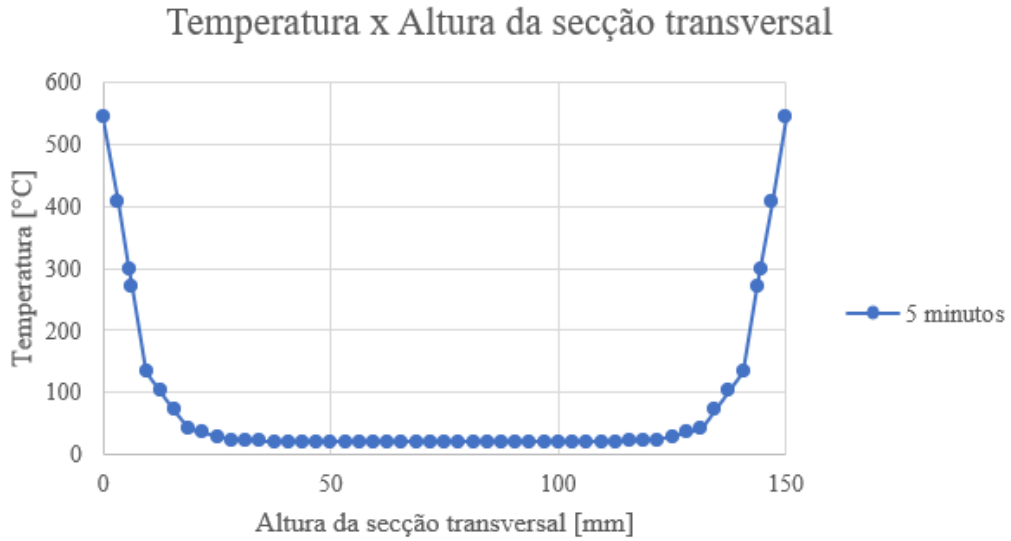


Figura 133 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 75x150x6000 mm para 5 minutos de exposição.

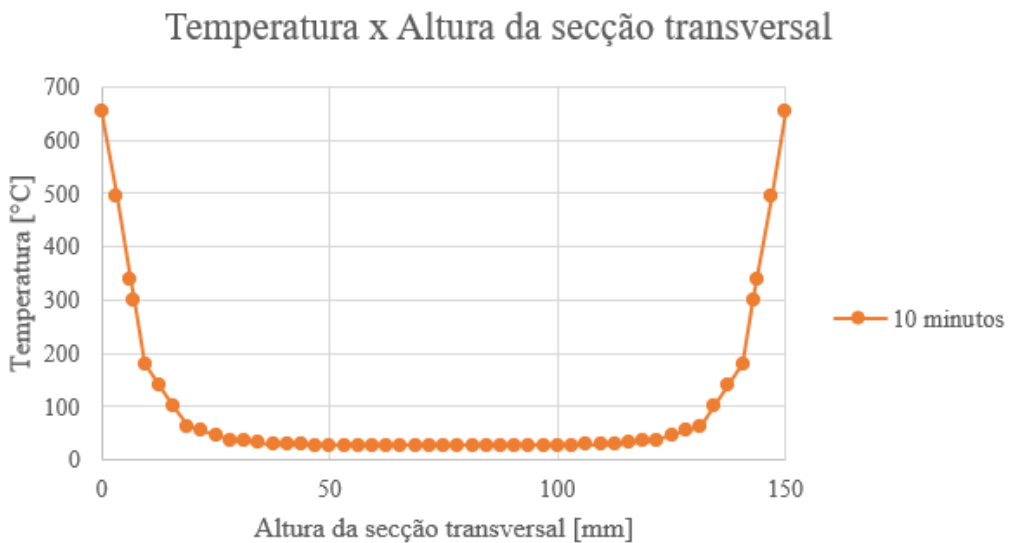


Figura 134 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 75x150x6000 mm para 10 minutos de exposição.

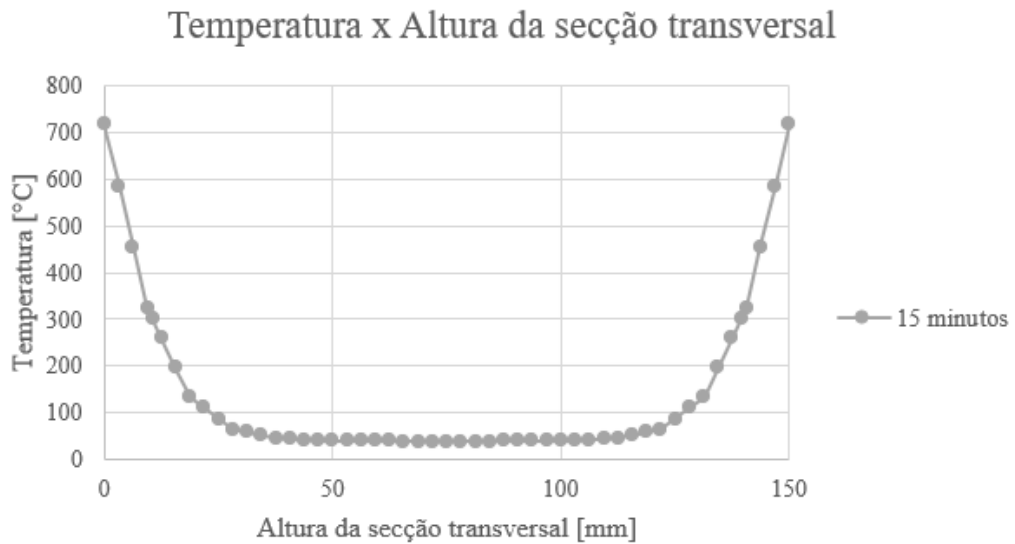


Figura 135 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 75x150x6000 mm para 15 minutos de exposição.

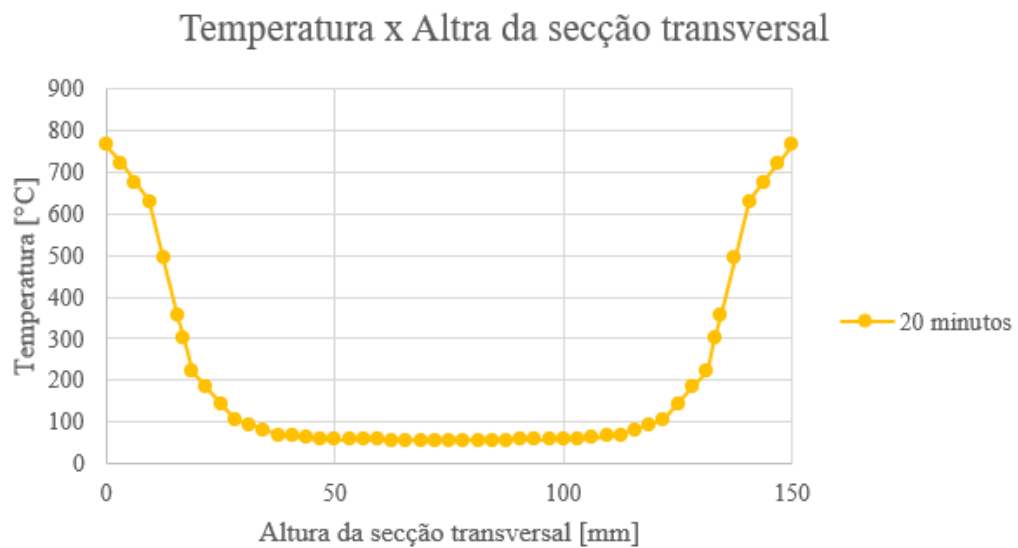


Figura 136 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 75x150x6000 mm para 20 minutos de exposição.

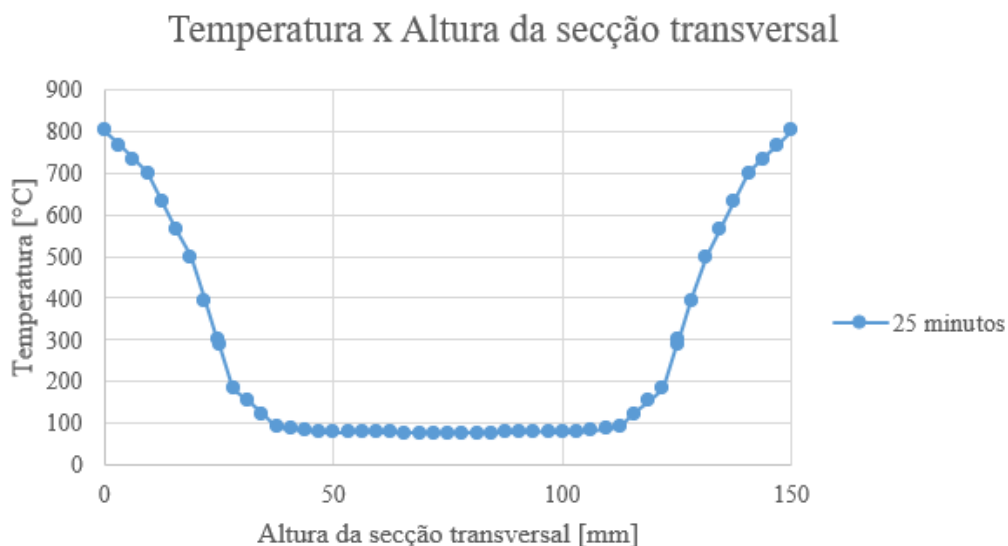


Figura 137 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 75x150x6000 mm para 25 minutos de exposição.

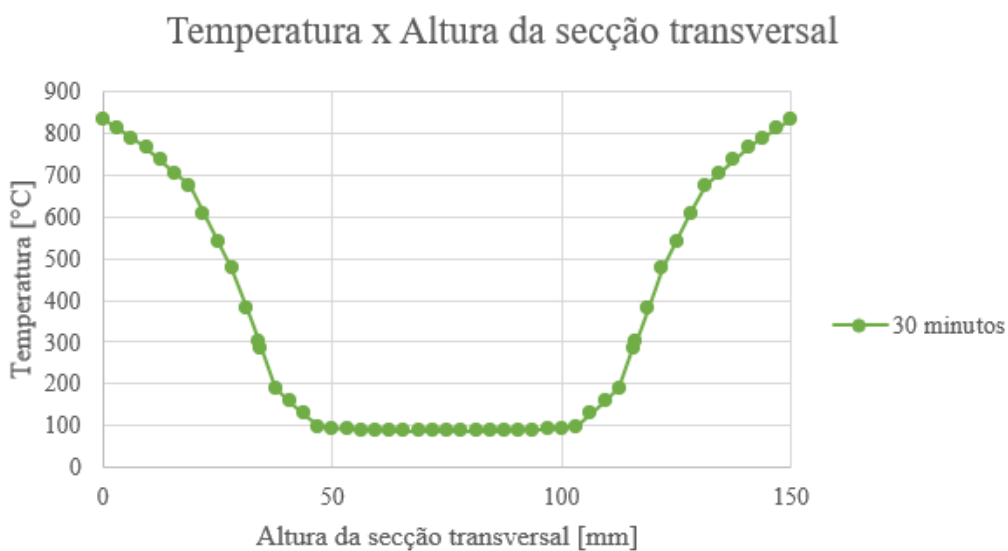


Figura 138 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 75x150x6000 mm para 30 minutos de exposição.

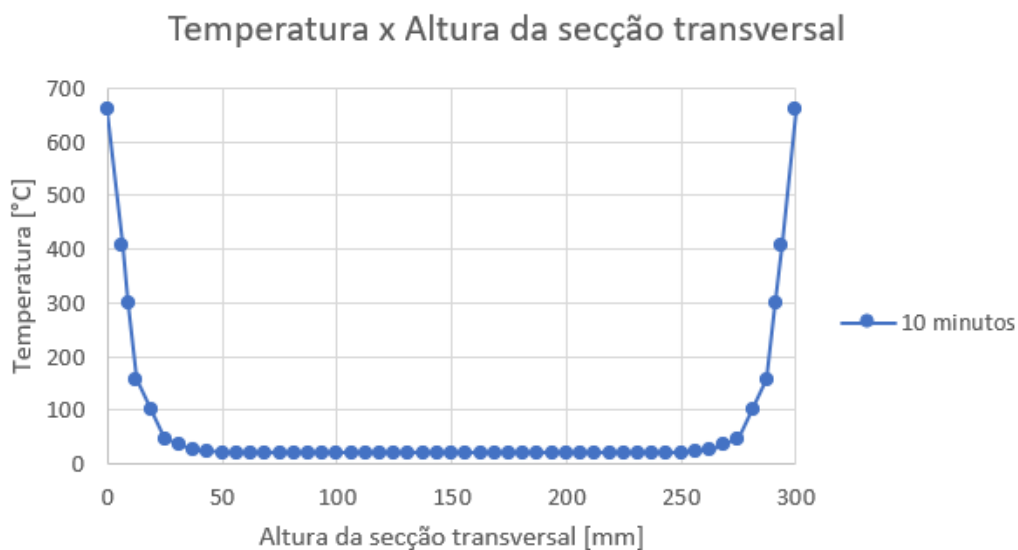


Figura 139 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 250x300x6000 mm para 10 minutos de exposição.

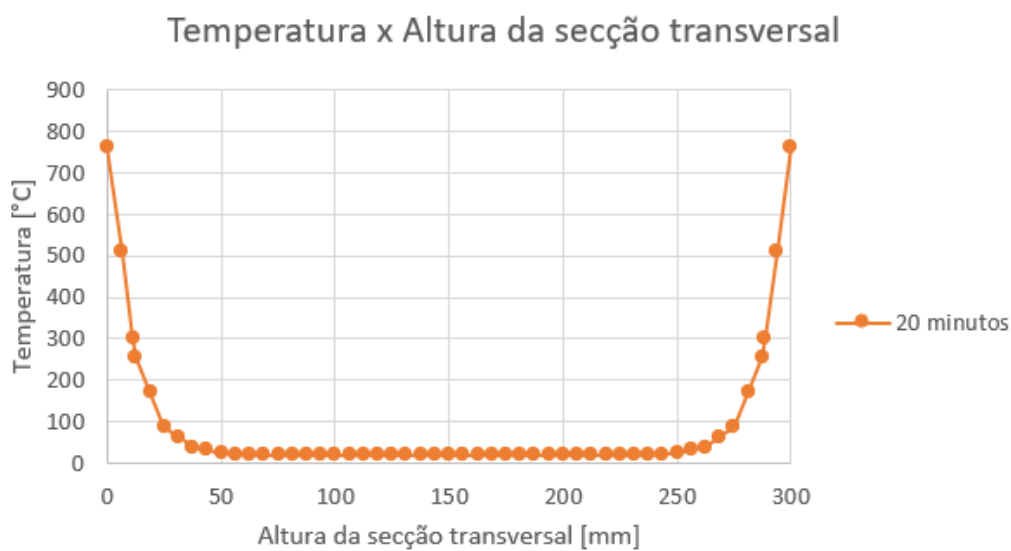


Figura 140 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 250x300x6000 mm para 20 minutos de exposição.

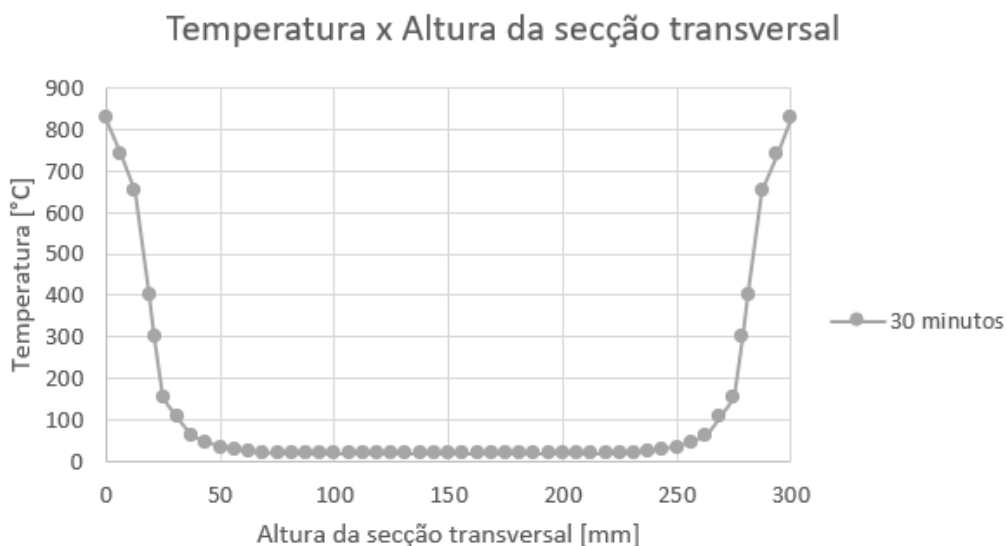


Figura 141 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 250x300x6000 mm para 30 minutos de exposição.

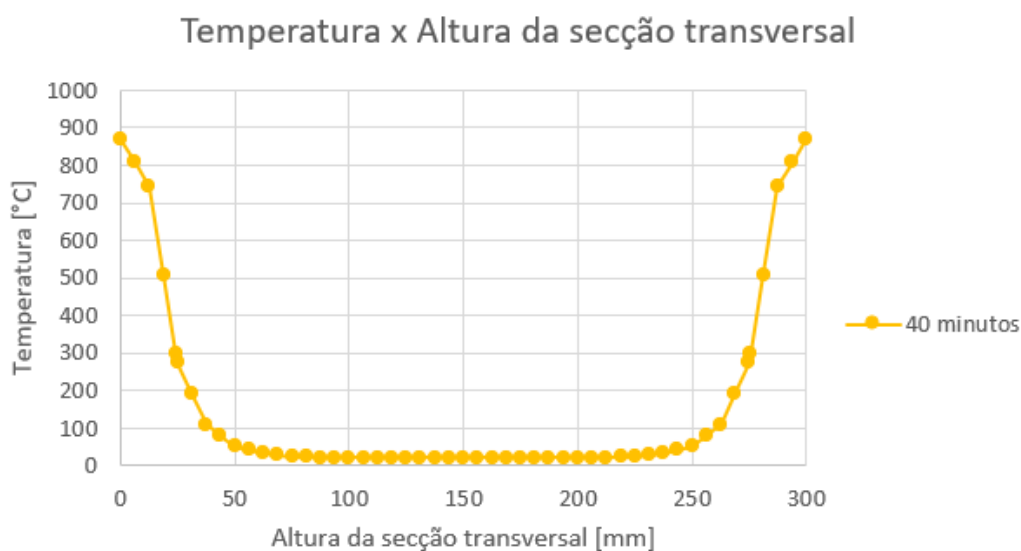


Figura 142 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 250x300x6000 mm para 40 minutos de exposição.

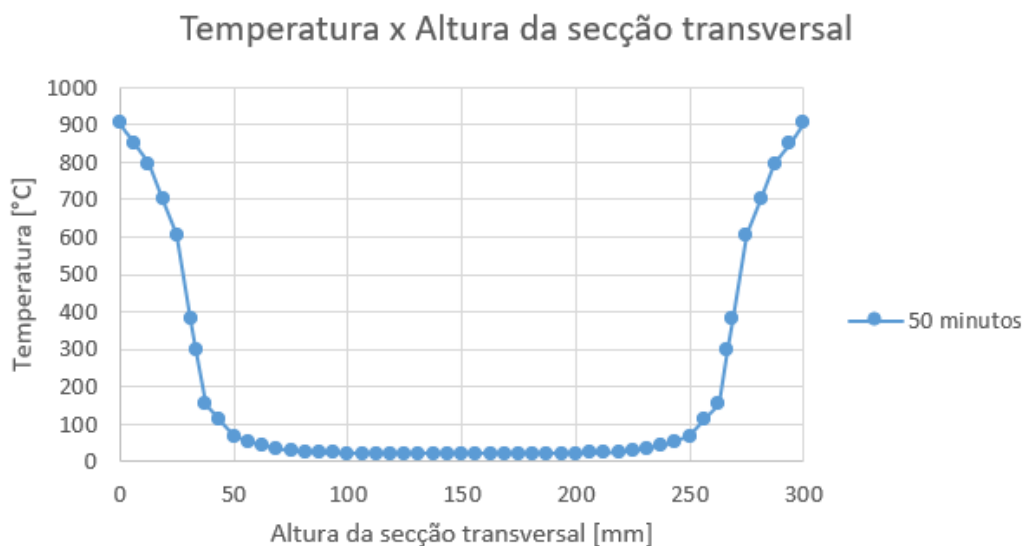


Figura 143 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 250x300x6000 mm para 50 minutos de exposição.

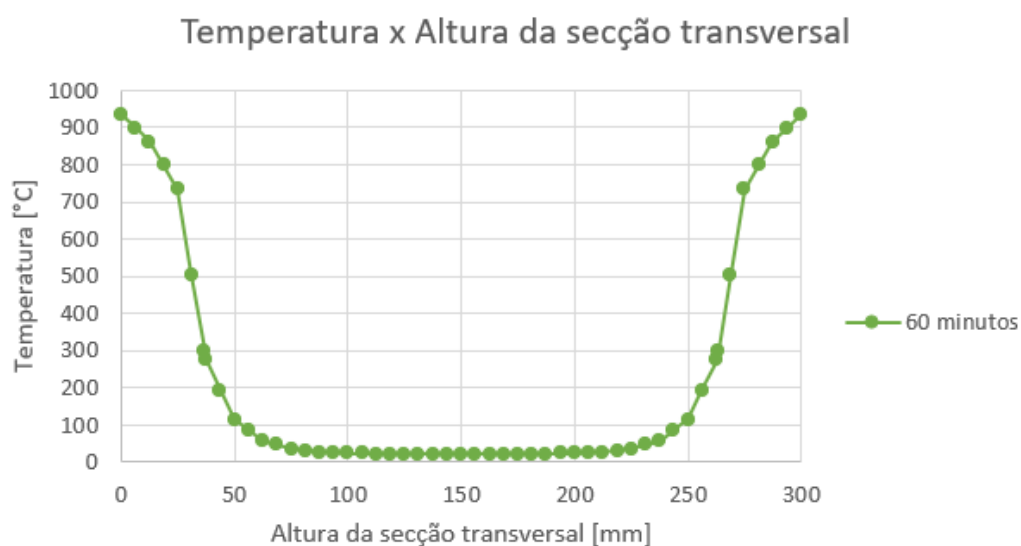


Figura 144 – Gráfico da evolução da temperatura para o interior da secção transversal da viga 250x300x6000 mm para 60 minutos de exposição.

Anexo XII - Resultados obtidos por P. J. V. Gouveia para profundidade de carbonização e taxa de carbonização.

Tabela 45 - Taxa de carbonização para 30 minutos de exposição à três frentes de fogo, [4].

Geometria da Viga					β_n [mm/min]		
b [mm]	d [mm]	L [mm]	X [mm]	Y [mm]	Média	EC5	Erro [%]
80	80	2000	0,57	1,13	0,85	0,7	21,43
80	100	2000	0,55	0,98	0,77		9,52
80	120	2000	0,57	1,13	0,85		21,43
80	140	2000	0,57	1,13	0,85		21,43
				Média	0,83		
100	80	2000	0,58	0,67	0,63	0,7	10,71
100	100	2000	0,55	0,67	0,61		13,1
100	120	2000	0,5	0,82	0,58		16,67
100	140	2000	0,52	1,13	0,67		4,76
				Média	0,62		
120	80	2000	0,58	0,6	0,59	0,7	15,48
120	100	2000	0,55	0,7	0,63		10,71
120	120	2000	0,55	0,6	0,58		17,86
120	140	2000	0,55	0,62	0,58		16,67
				Média	0,59		
140	80	2000	0,53	0,58	0,56	0,7	20,24
140	100	2000	0,5	0,53	0,52		26,19
140	120	2000	0,5	0,58	0,54		22,62
140	140	2000	0,48	0,52	0,5		28,57
				Média	0,53		

Anexo XIII – Resultados de tensão normal de flexão por deslocamento a meio vão para simulação numérica da viga 75x150x6000 mm à tempos fixos de exposição.

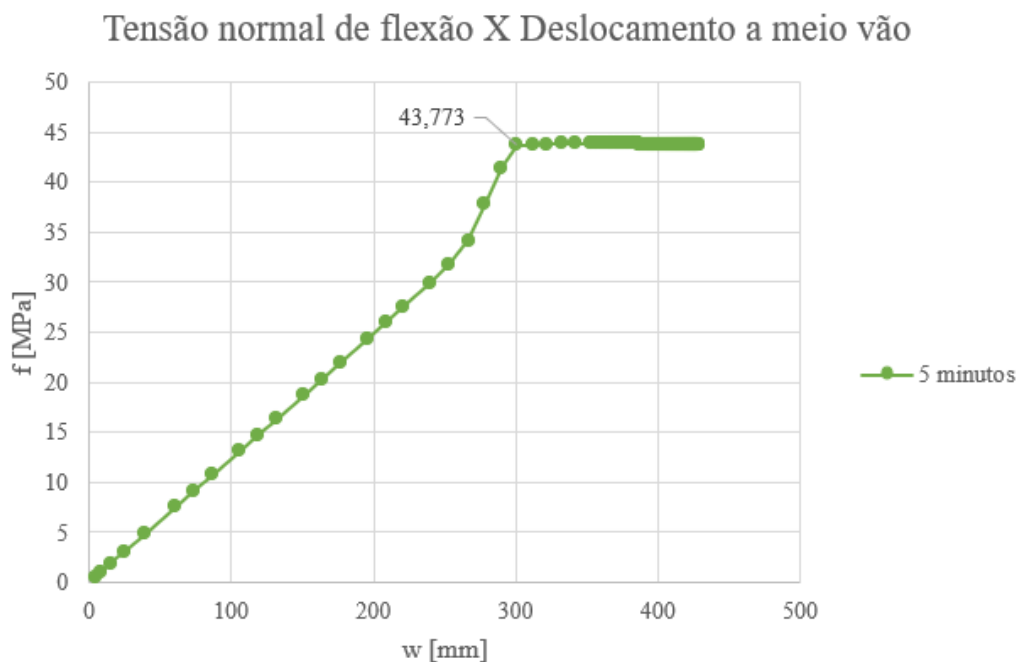


Figura 145 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 5 minutos da viga 75x150x6000 mm.

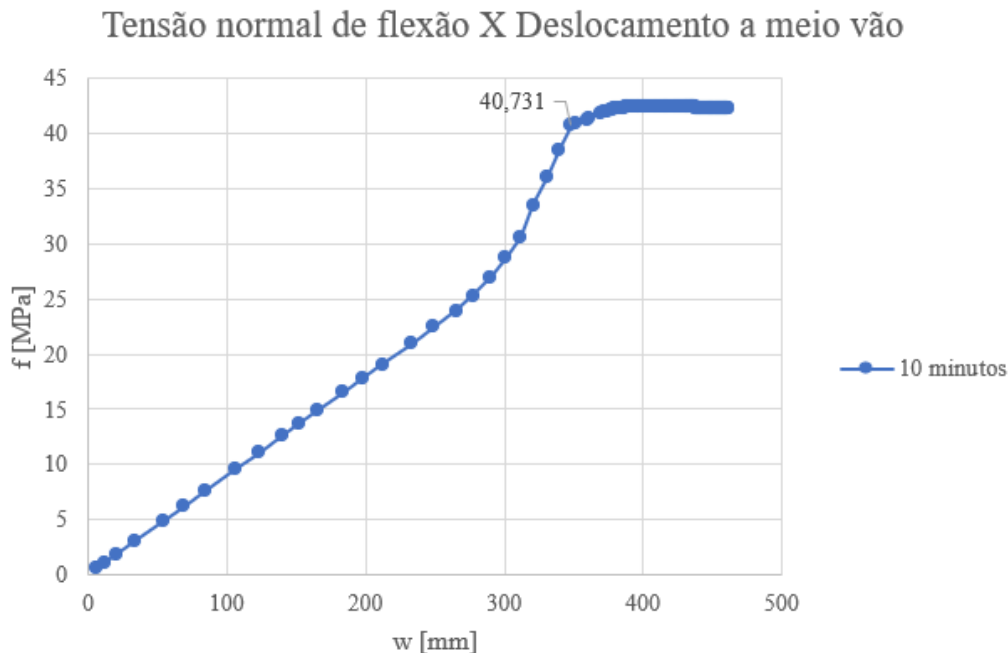


Figura 146 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 10 minutos da viga 75x150x6000 mm.

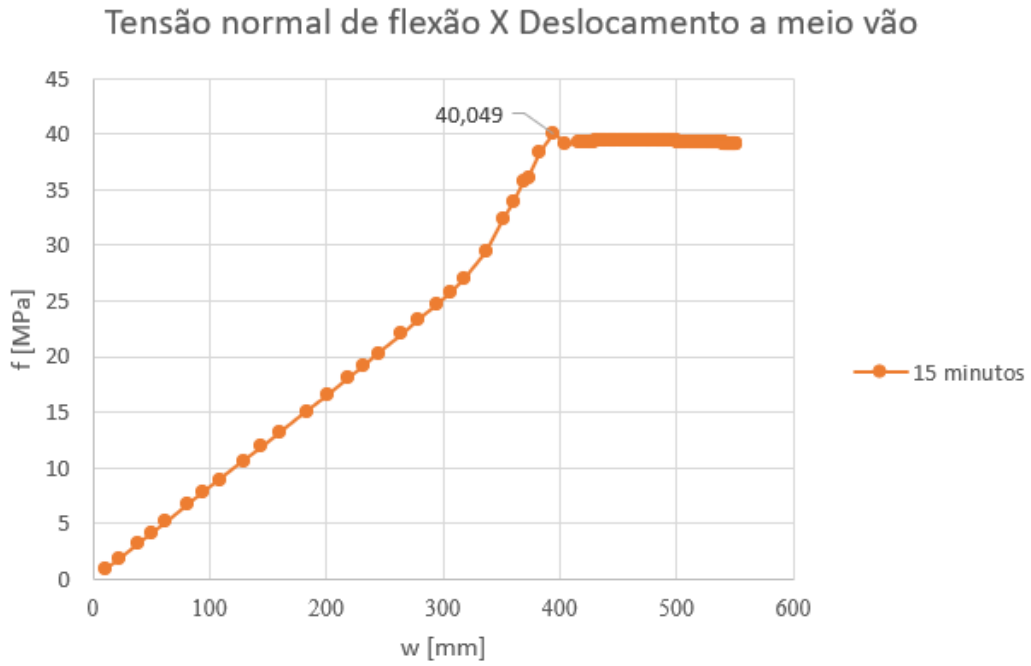


Figura 147 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 15 minutos da viga 75x150x6000 mm.

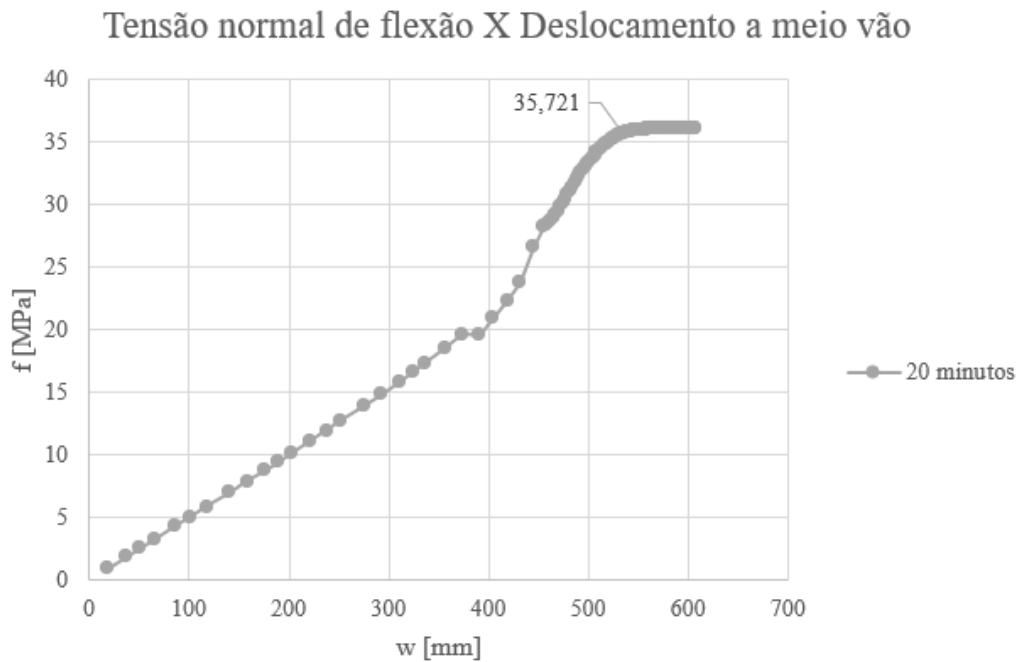


Figura 148 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 20 minutos da viga 75x150x6000 mm.

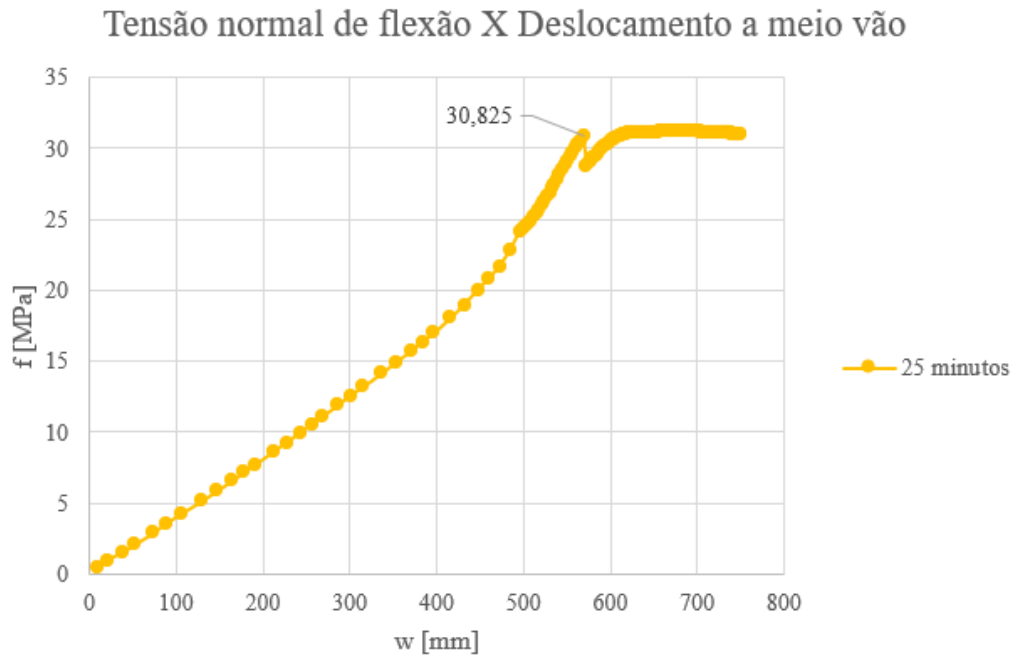


Figura 149 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 25 minutos da viga 75x150x6000 mm.

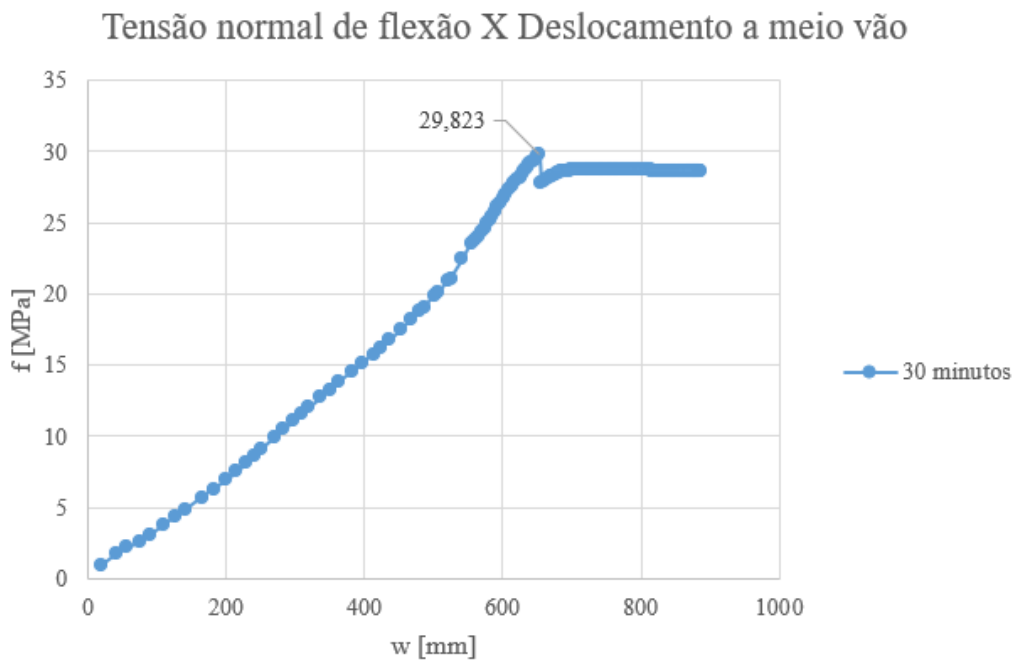


Figura 150 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 30 minutos da viga 75x150x6000 mm.

Anexo XIV – Resultados de tensão normal de flexão por deslocamento a meio vão para simulação numérica da viga 75x150x6000 mm a tempos fixos de exposição.

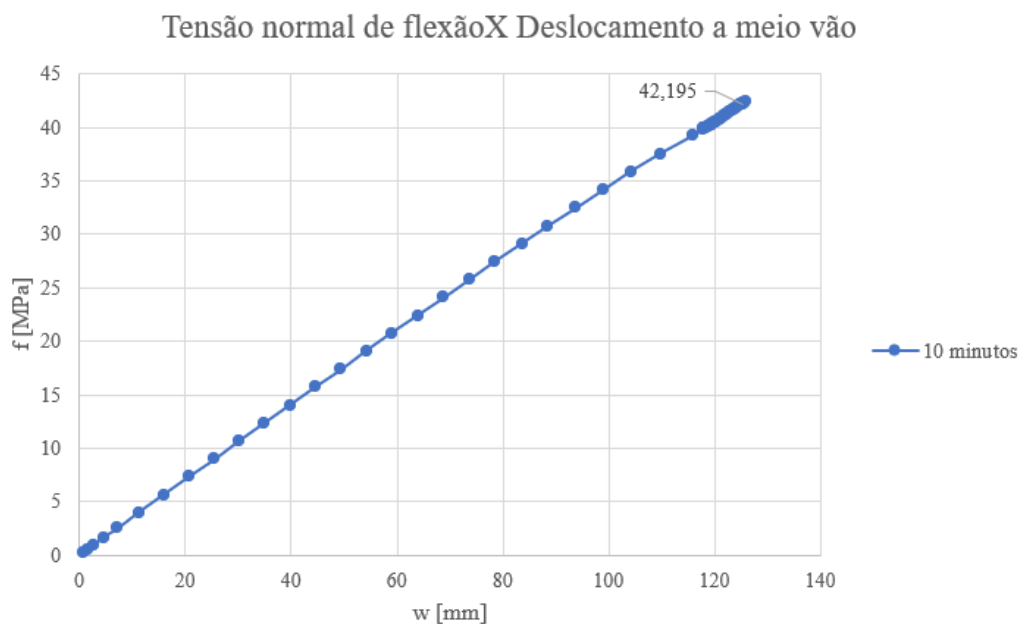


Figura 151 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 10 minutos da viga 250x300x6000 mm.

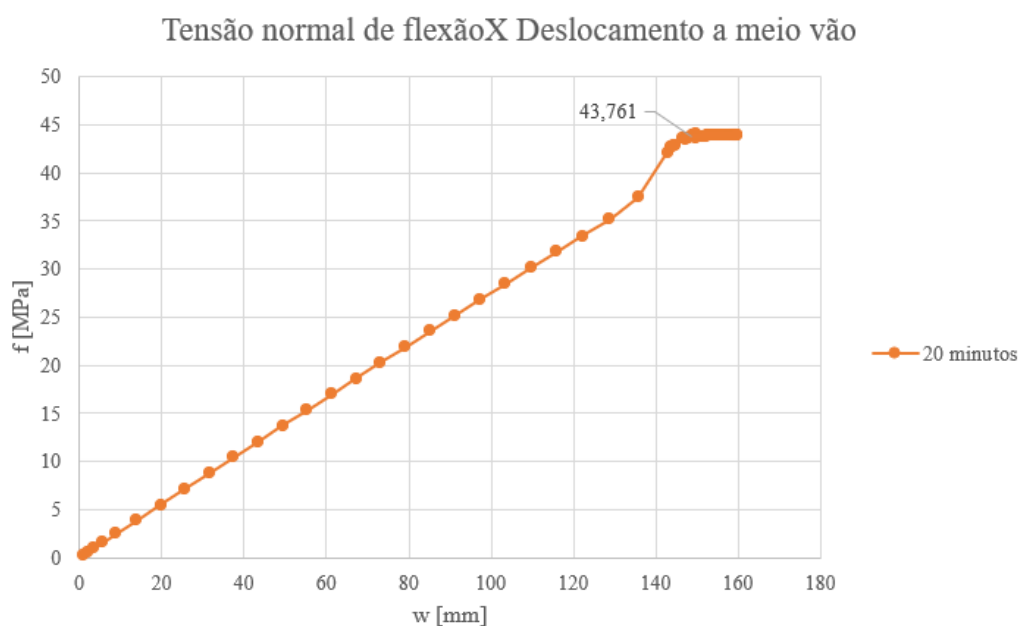


Figura 152 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 20 minutos da viga 250x300x6000 mm.

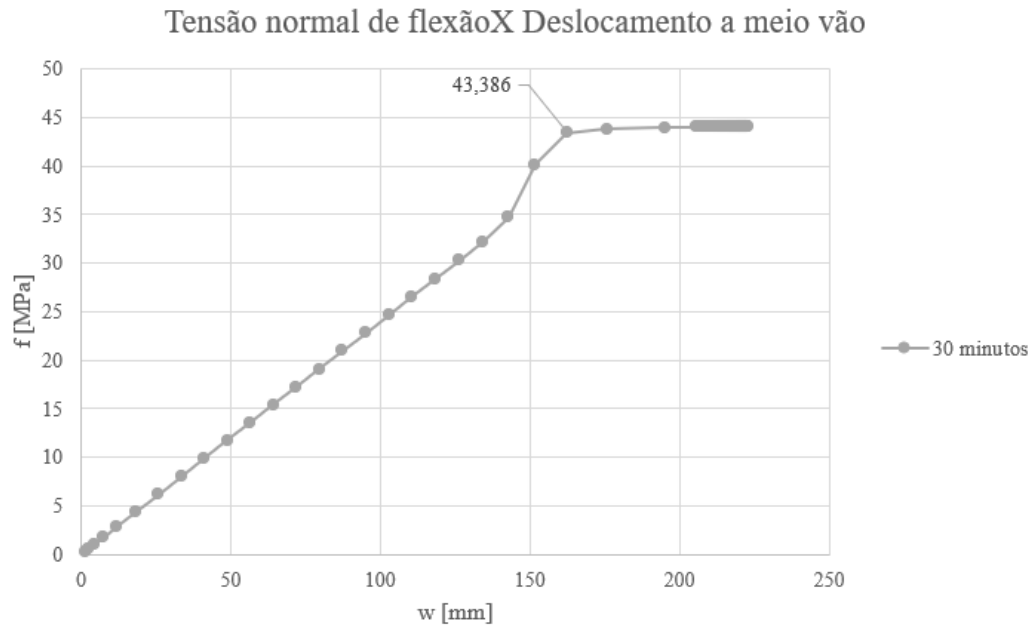


Figura 153 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 30 minutos da viga 250x300x6000 mm.

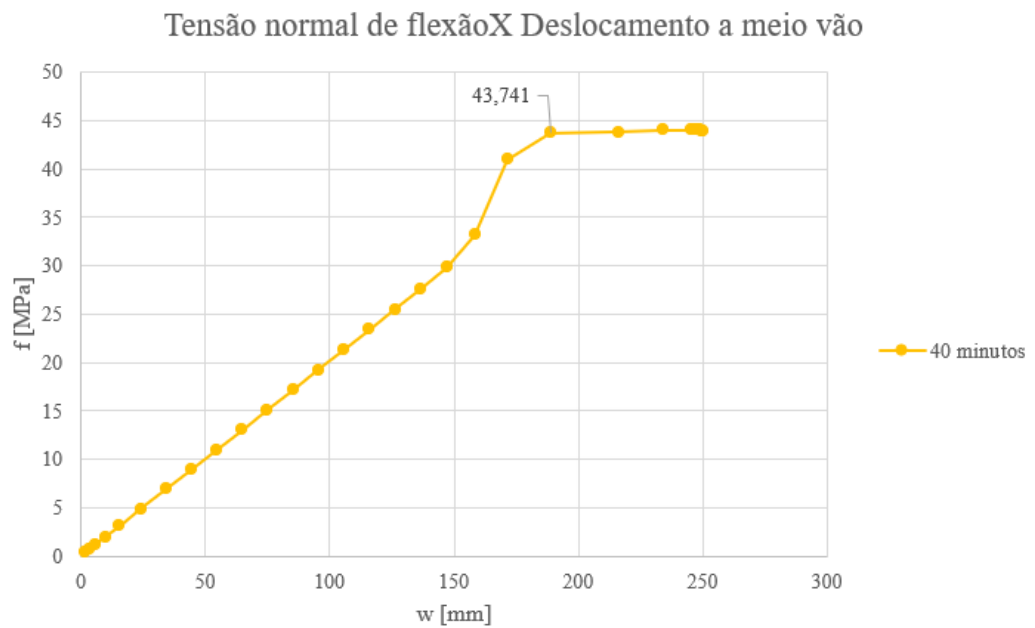


Figura 154 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 40 minutos da viga 250x300x6000 mm.

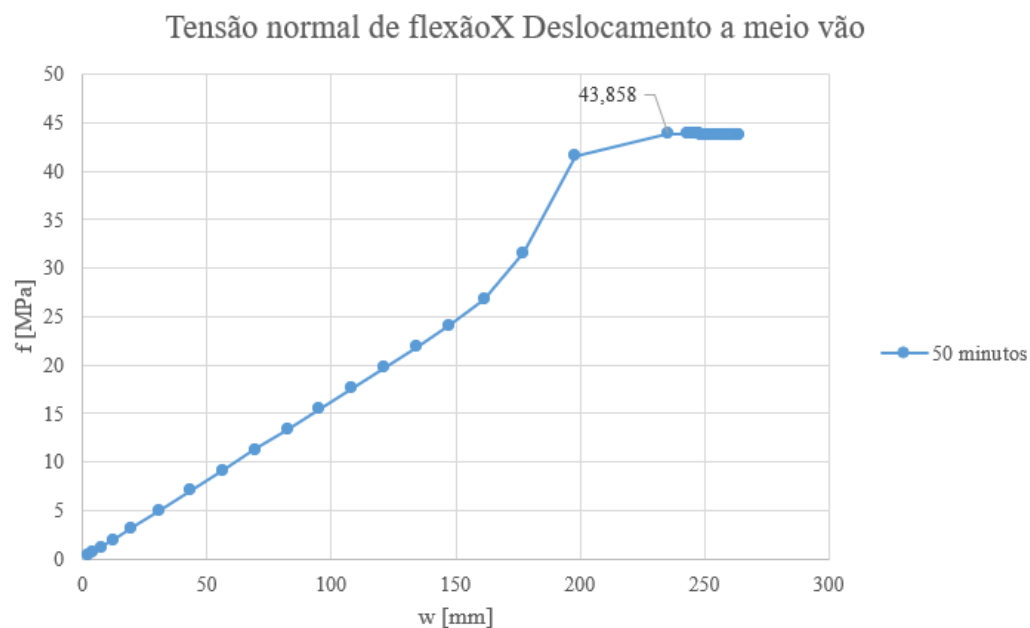


Figura 155 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 50 minutos da viga 250x300x6000 mm.

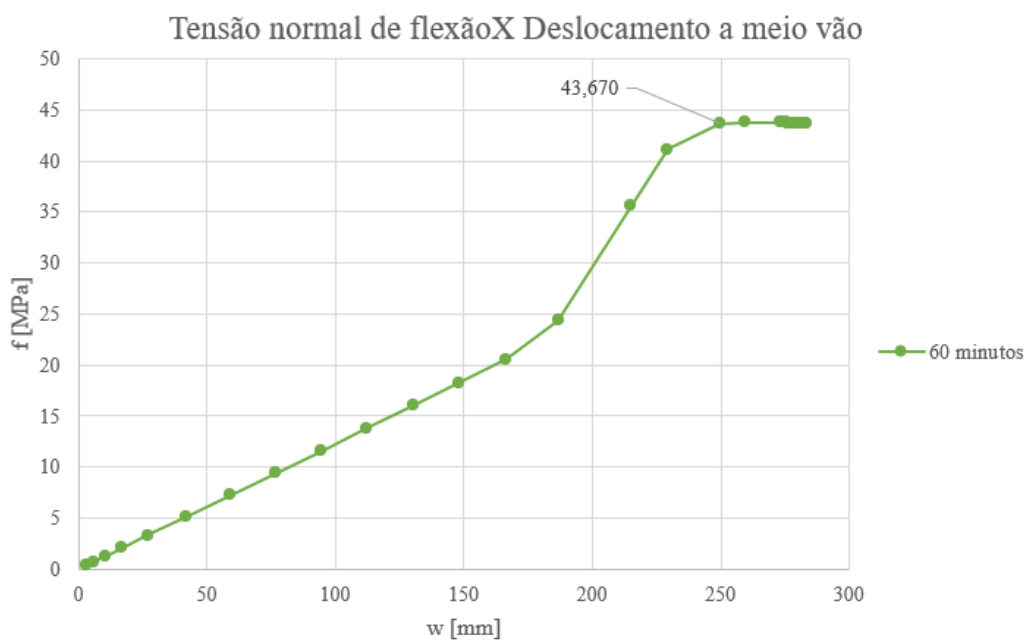


Figura 156 – Gráfico Tensão normal de flexão por Deslocamento a meio vão para uma exposição de 60 minutos da viga 250x300x6000 mm.

Anexo XV – Resultados da aplicação do método simplificado do Eurocódigo 1995-1-2

Tabela 46 – Aplicação do método da secção reduzida para a viga 75x150x6000 mm.

Exposição	Fator de redução da secção					Secção Inicial		Secção Efetiva		
	Tempo [min]	β_n [mm/min]	dchar,n [mm]	d ₀ [mm]	k ₀	d _{ef} [mm]	b [mm]	d [mm]	b [mm]	d [mm]
5	0,8	4	7	0,25	5,75	75	150	63,5	138,5	203012,15
10	0,8	8	7	0,5	11,5	75	150	52	127	139784,67
15	0,8	12	7	0,75	17,25	75	150	40,5	115,5	90046,69
20	0,8	16	7	1	23	75	150	29	104	52277,33
25	0,8	20	7	1	27	75	150	21	96	32256,00
30	0,8	24	7	1	31	75	150	13	88	16778,67

Tabela 47 – Aplicação do método da secção reduzida para a viga 250x300x6000 mm.

Exposição	Fator de redução da secção					Secção Inicial		Secção Efetiva		
	Tempo [min]	β_n [mm/min]	dchar,n [mm]	d ₀ [mm]	k ₀	d _{ef} [mm]	b [mm]	d [mm]	b [mm]	d [mm]
10	0,8	8	7	0,5	11,5	250	300	227	277	2902913,83
20	0,8	16	7	1	23	250	300	204	254	2193544,00
30	0,8	24	7	1	31	250	300	188	238	1774845,33
40	0,8	32	7	1	39	250	300	172	222	1412808,00
50	0,8	40	7	1	47	250	300	156	206	1103336,00
60	0,8	48	7	1	55	250	300	140	190	842333,33

