

**ANÁLISE A ELEVADAS TEMPERATURAS DA LIGAÇÃO
(W-S-W) AÇO-MADEIRA COM CHAPA METÁLICA
CENTRAL**

Fernando de Morais Miranda

Dissertação apresentada à
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança**

Para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Construção

**Bragança
junho 2018**

**ANÁLISE A ELEVADAS TEMPERATURAS DA LIGAÇÃO
(W-S-W) AÇO-MADEIRA COM CHAPA METÁLICA
CENTRAL**

Fernando de Morais Miranda

Dissertação apresentada à
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança**

Para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Construção
No âmbito da Dupla Diplomação com a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientado por:
Professora Doutora Elza Maria Morais da Fonseca (IPB)
Professor Doutor Jorge Luis Nunes de Goes (UTFPR)

Junho 2018

*Aos meus pais,
pelo apoio e amor incondicional.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceber a oportunidade, a coragem e a capacidade de completar o desafio de realizar este trabalho. Aos meus pais Luiz e Valdirene, pelo apoio, confiança e amor incondicional dedicados a mim. Por todos os conselhos que me direcionaram para os caminhos do bem e nunca permitindo que eu me perdesse. Agradeço aos meus irmãos Jonas e Felipe pelo apoio e amor. Agradeço especialmente a Professora Elza M. M. Fonseca, por quem tenho muita admiração, pela orientação, apoio, paciência e todos os conhecimentos passados a mim durante a realização deste trabalho. Agradeço também ao coorientador, Professor Jorge L. N. Goes, pela amizade, confiança e auxílio na produção deste trabalho, além dos conhecimentos passados enquanto professor. Aos professores da UTFPR e IPB que fizeram parte da minha formação, por todo conhecimento transmitido, paciência e dedicação em nos preparar da melhor forma possível para os novos desafios que virão. À minha família pelo apoio, sendo fundamental em todas as fases da minha vida. Aos meus amigos, em especial às amizades construídas durante a graduação, sendo muito importante durante essa trajetória de dificuldades e desafios tornando tudo mais fácil e agradável além dos vários momentos de felicidades e diversão que foram compartilhados. Aos amigos que conheci em Portugal, por todo apoio e momentos de felicidades que vocês me proporcionaram. Agradeço ao Sr. Lotário e Maria da Penha, pelo apoio que me foi dado enquanto eu estava longe de casa sendo uma família para mim, tornando as horas de trabalho mais agradáveis. Agradeço ao grande mestre Tony Rafael, por ter me proporcionado o apoio e incentivo para iniciar esta etapa muito importante de minha vida. Enfim, a todos que de alguma forma colaboraram na realização deste trabalho, muito obrigado.

RESUMO

As ligações em madeira são partes muito importantes de uma estrutura, sendo responsáveis por garantir a resistência e estabilidade estrutural. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico e térmico de ligações aço-madeira (W-S-W) com chapa metálica central e ligadores do tipo cavilha metálica em corte duplo. Para o projeto das ligações W-S-W foram utilizadas as regras normativas com base no Eurocódigo 5-1-1 (CEN-EN1995-1-1, 2004) e Eurocódigo 5-1-2 (CEN-EN1995-1-2, 2004). Posteriormente foram desenvolvidos modelos computacionais das ligações em corte duplo e sob o efeito de altas temperaturas.

Foram projetadas diversas ligações (W-S-W) atendendo às diferentes variáveis consideradas: cinco cargas de tração, membros em madeira com duas espessuras diferentes e dois diâmetros diferentes de cavilha. Foram utilizadas as propriedades da madeira laminada colada da classe GL28h da espécie “birch wood”, seguindo os valores prescritos no Eurocódigo 5 para a resistência e rigidez à temperatura ambiente e a elevadas temperaturas.

O modelo computacional utiliza o método dos elementos finitos (MEF), através de uma análise estrutural com carga incremental, algoritmo de contato entre os diferentes elementos da ligação, propriedades dos materiais ortotrópicas para a madeira e isotrópicas para o aço, para o cálculo da máxima capacidade resistente da ligações à temperatura ambiente.

O modelo computacional térmico, baseado no MEF, permite uma análise em regime transiente e utilização das propriedades térmicas não-lineares dos materiais envolvidos, para o cálculo da velocidade de carbonização na madeira e do campo de temperaturas, nas mesmas ligações protegidas e não-protegidas, mas agora expostas ao fogo para um lado ou três dos seus lados. Neste tipo de análise, os ligadores tiveram uma forte influência na avaliação da resistência térmica. As ligações com proteção mostraram também um bom desempenho.

Os resultados mostraram que o modelo numérico apresenta boa concordância com o modelo analítico, sendo o maior erro obtido entre os métodos 15,40%, concluindo-se que nas mesmas condições o arranjo dos ligadores pode aumentar significativamente a capacidade de carga resistente da ligação. Na análise térmica os valores obtidos no cálculo da velocidade de carbonização foram maiores que os apresentados no Eurocódigo 5, com maior variação nas regiões próximas às cavilhas.

Palavras chave: Ligação W-S-W, madeira, aço, capacidade de carga, carbonização.

ABSTRACT

Timber connections, responsible for ensuring structural strength and stability, are very important parts of a structure. The main objective of the present work is to evaluate the mechanical and thermal behaviour of steel-wood connections (W-S-W) with central steel plate and dowel steel connectors in double-shear. For the design of W-S-W connections, the normative rules based on Eurocode 5-1-1 (CEN-EN1995-1-1, 2004) and Eurocode 5-1-2 (CEN-EN1995-1-2, 2004) were used. In addition, computational models were developed for the double-shear connections for mechanical and thermal analysis due the effect of high temperatures.

Several connections (W-S-W) were designed taking into account different variables: five tensile loads, wood members with two different thicknesses and two different dowel diameters. The properties of GL28h glued laminated wood of the "birch wood" specie were used, following the values prescribed in Eurocode 5 for strength and stiffness at room and high temperatures.

The advanced model uses the finite element method (FEM), through structural analysis with incremental load, contact algorithm between different elements of the connection, properties of orthotropic materials for wood and isotropic for steel, for the calculation of maximum load-carrying capacity at room temperature.

The thermal computational model, based on FEM, allows a transient analysis and uses nonlinear thermal properties of the involved materials, for charring layer calculation in the wood material and temperature field for protected and unprotected connections. The connections in study were exposed to the fire conditions at one or three sides. In this type of analysis, the dowels had a strong influence on the thermal resistance evaluation. Connections with protection also showed good performance.

The numerical results have a good agreement with the analytical model, being the obtained major error among the methods is 15.40%, concluding that under the same conditions the dowels arrangement can significantly increase the load-carrying capacity. In the thermal analysis, the obtained values for charring layer calculation were higher when compared with Eurocode 5, with greater variation near of the holes dowels.

Keywords: W-S-W connection, wood, steel, load-carrying capacity, charring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ligação com cavilhas em duplo corte [8].....	4
Figura 2: Ligações de madeira em duplo corte: (a) ligação madeira-madeira-madeira (W-W-W), (b) ligação madeira-aço-madeira (W-S-W), (c) ligação aço-madeira-aço (S-W-S) [14]... 7	7
Figura 3: Ligação com aço em três lados [18].....	8
Figura 4: Entalhes: a) Ligação com dente simples; b) Ligação com dente duplo [19].....	9
Figura 5: Eixos principais da madeira em relação à direção das fibras [31]......	16
Figura 6: Fator de redução para tensão paralela a fibra da madeira macia [33]......	18
Figura 7: Efeito da temperatura no módulo de elasticidade paralelo à fibra da madeira macia [33]......	19
Figura 8: Relação da temperatura e calor específico para madeira [33].	20
Figura 9: Relação da temperatura com a condutividade térmica para madeira [33].	21
Figura 10: Relação da temperatura e massa volúmica para a madeira macia com humidade inicial de 12%, [33]......	22
Figura 11: Fator de redução para a relação de tensão-deformação do aço carbono a temperaturas elevadas, adaptado [38]......	28
Figura 12: Calor específico do aço em função da temperatura [38]......	29
Figura 13: Condutividade térmica do aço em função da temperatura [38]......	30
Figura 14: Massa volúmica do aço em função da temperatura [38]......	31
Figura 15: Seção carbonizada de madeira, [42]......	33
Figura 16: Fases de um incêndio natural [48].	35
Figura 17: ISO 834.....	36
Figura 18: Modos de falha para conexões de aço-madeira em duplo plano de corte, adaptado de [54].	45
Figura 19: Espaçamentos e distâncias de bordas e finais para cavilhas [1].	47
Figura 20: Representação esquemática da ligação W-S-W.....	48
Figura 21: Carbonização unidimensional com exposição ao fogo de um lado [33]......	53
Figura 22: Profundidade de carbonização unidimensional e carbonização ideal. (1) Seção transversal residual (forma real), (2) Seção transversal retangular equivalente, adaptado de [33] [55]......	54
Figura 23: Espessura extra e incremento nas distâncias finais e laterais das ligações protegidas [33]......	57

Figura 24: SOLID185 3-D Structural Solid [59].....	61
Figura 25: Modelo para a ligação 1 projetada em temperatura ambiente; I) LN=1, CN=4, II) LN=2, CN=2.....	61
Figura 26: Modelo numérico analisado para a ligação 1. I) LN=1, CN=4, II) LN=2, CN=2.	62
Figura 27: Condições de fronteira para problemas térmicos em um campo Ω [61].....	64
Figura 28: SOLID278 Homogeneous Thermal Solid Geometry [59].....	68
Figura 29: Exposição ao fogo das ligações. I) Exposição de um lado, II) Exposição de três lados.	69
Figura 30: Elementos finitos tridimensionais lineares e sua representação no sistema de coordenadas locais [63].....	70
Figura 31: Distribuição da tensão para a ligação1: a) σ_{xx} em 1/4 da madeira da ligação, b) σ_{xx} em 1/4 das cavilhas e da placa de aço central, c) τ_{xy} em 1/4 das cavilhas e da placa de aço central.	73
Figura 32: Espessuras e nós da análise da evolução da temperatura para o interior da ligação, a) análise frontal, b) análise da diagonal.	75
Figura 33: Evolução da temperatura para o interior da seção de madeira ao final do tempo $t_{d,fi}$	77
Figura 34: Campo de temperaturas na ligação 2, a) Campo de temperaturas, b) Carbonização.	78
Figura 35: Evolução da temperatura para o interior da seção de madeira e da cavilha ao final do tempo $t_{d,fi}$	80
Figura 36: Evolução da temperatura na diagonal da seção de madeira	81
Figura 37: Campo de temperaturas na ligação 2, a) Campo de temperatura, b) Carbonização, I) exposição de $t_{d,fi}$, II) exposição de 30 minutos.	82
Figura 38: Pontos de análise da evolução da temperatura para o interior da ligação, a) análise frontal, b) análise da diagonal.....	83
Figura 39: Evolução da temperatura para o interior da ligação 2 protegida pelo aumento da espessura da madeira.....	84
Figura 40: Campo de temperaturas e carbonização da ligação 2 protegida pelo aumento da espessura, exposição de um lado.	84
Figura 41: Campo de temperatura e carbonização na seção 2 ligação 2.....	86
Figura 42: Evolução da temperatura para o interior da ligação 2 protegida pelo aumento da espessura da madeira.....	87

Figura 43: Evolução das temperaturas na diagonal da seção do elemento de madeira da ligação 2 protegida pelo aumento da espessura da madeira.	87
Figura 44: Decréscimo da temperatura ao longo do comprimento da cavilha.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variação do calor específico da madeira.	20
Tabela 2: Relação da temperatura com a condutividade térmica para madeira [33].	21
Tabela 3: Razão de massa volúmica da madeira macia para a classe de serviço 1 [33].	22
Tabela 4: Valores característicos da resistência, rigidez e massa volúmica da Madeira Laminada Colada [35].	23
Tabela 5: Módulo de elasticidade de alguns tipos de madeira à temperatura ambiente [36].	24
Tabela 6: Razões elásticas para espécie yellow birch, contendo aproximadamente 12 % de humidade [30].	24
Tabela 7: Coeficiente de Poisson para várias espécies com aproximadamente 12% de teor de humidade [36].	25
Tabela 8: Valores nominais da tensão de cedência f_y e resistência à tração final f_u para o aço estrutural laminado a quente, [37].	26
Tabela 9: Valores nominais de tensão de cedência f_y e resistência à tração final f_u para seções estruturais ocas, [37].	26
Tabela 10: Fator de redução para relação tensão-deformação do aço carbono a elevadas temperaturas [38].	27
Tabela 11: Espaçamentos e distâncias mínimas para cavilhas, [1].	47
Tabela 12: Ligações W-S-W com diferentes espessuras, diâmetro de cavilha e carregamento aplicado GL28h.	49
Tabela 13: Velocidade de carbonização [33].	52
Tabela 14: Método de redução de carga para ligações não protegidas.	58
Tabela 15: Método de redução de carga para ligações protegidas pelo aumento da espessura.	58
Tabela 16: Comparação de F_v , R_k^* do modelo analítico e numérico.	72
Tabela 17: Variação na capacidade de carga para a ligação 1.	74
Tabela 18: Espessura e velocidade de carbonização.	76
Tabela 19: Espessura e velocidade de carbonização na superfície frontal.	79
Tabela 20: Espessura e velocidade de carbonização na superfície.	80
Tabela 21: Profundidade e velocidade da carbonização.	83
Tabela 22: Espessura e velocidade de carbonização na parte frontal.	85
Tabela 23: Espessura e velocidade de carbonização na superfície.	86

NOTAÇÕES

Letras maiúsculas latinas

A_s	Área da seção transversal de madeira.
C_N	Número de colunas de ligadores.
E	Módulo de elasticidade.
E_d	Esforço de projeto.
$E_{d,fi}$	Efeito das ações de projeto para o fogo.
$F_{ax,Rk}$	Resistência ao arranque característica do ligador.
$F_{v,Rd}$	Capacidade de carga de projeto por plano de corte e por ligador.
$F_{v,Rk}$	Capacidade de carga característica por plano de corte e por ligador.
$F_{v,Rk}^*$	Capacidade de carga característica da ligação.
$F_{v,Rk,fi}^*$	Capacidade de carga característica da ligação ao fogo.
G	Módulo de corte.
L_N	Número de linhas de ligadores.
$M_{y,Rk}$	Momento de cedência plástico característico do ligador.
R_{20}	Fração de 20% da resistência mecânica em temperatura ambiente.
R_k	Resistência mecânica característica de uma ligação.
$R_{d,t,fi}$	Resistência mecânica de projeto em situação de incêndio em um tempo t .
$S_{d,fi}$	Propriedade de rigidez ao fogo.
S_{05}	Fração de 5% da propriedade de rigidez em temperatura ambiente.
S_{20}	Fração de 20% de uma propriedade de rigidez em temperatura ambiente.
T	Temperatura dos gases no interior do compartimento de incêndio.
T_0	Temperatura inicial.

Letras minúsculas latinas

a_{fi}	Aumento da espessura da madeira.
c_a	Calor específico do aço.
d	Diâmetro do ligador.
$d_{char,0}$	Profundidade de carbonização unidirecional de projeto.
$d_{char,n}$	Profundidade de carbonização ideal de projeto.
f_{20}	Fração de 20% de uma propriedade de resistência à temperatura ambiente.
$f_{d,fi}$	Resistência de projeto ao fogo.
$f_{m,g,k}$	Resistência à flexão característica.
$f_{t,0,d}$	Resistência à tração de projeto paralela às fibras.
$f_{t,0,k}$	Resistência à tração característica paralela às fibras.
$f_{h,0,k}$	Resistência ao esmagamento característica paralela à fibra.
$f_{h,\alpha,k}$	Resistência ao esmagamento característica com um ângulo em relação à fibra.
f_y	Tensão de cedência do aço.
f_u	Resistência final à tração do aço.
$f_{u,k}$	Tensão de cedência característica do aço.
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção.
k	Constante do ligador.
k_{mod}	Fator de modificação da madeira.
$k_{mod,fi}$	Fator de modificação da madeira ao fogo.
k_{fi}	Valor que depende da madeira e do tipo de ligação.
k_{flux}	Coefficiente que leva em conta o aumento de fluxo de calor pelo ligador.
$k_{y,\theta}$	Fator de redução para a tensão de cedência do aço a elevadas temperaturas.
$k_{p,\theta}$	Fator de redução para o limite de proporcionalidade do aço a elevadas temperaturas.
$k_{E,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade do aço a elevadas temperaturas.
n_{ef}	Número efetivo de ligadores.
q''	Fluxo de calor.
t	Tempo.
t_1	Menor espessura dos elementos laterais da madeira em profundidade de penetração.

$t_{d,fi}$	Período de resistência ao fogo de projeto para ligação não protegida.
t_{req}	Tempo de resistência ao fogo requerido.

Letras minúsculas gregas

β_0	Taxa de carbonização unidirecional.
β_n	Taxa de carbonização ideal.
$\sigma_{t,0,d}$	Tensão de tração de projeto solicitante paralela às fibras.
ε	Deformação.
ν	Coefficiente de Poisson.
θ_a	Temperatura do aço.
λ_a	Condutividade térmica do aço.
ρ	Massa volúmica.
ρ_a	Massa volúmica do aço.
α	Coefficiente de dilatação térmica.
γ_M	Fator de segurança parcial.
$\gamma_{M,fi}$	Fator de segurança parcial da madeira ao fogo.
η	Fator de conversão.
η_0	Grau de utilização em temperatura ambiente.
η_{fi}	Fator de redução para a carga de projeto ao fogo.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Estado da arte.....	2
1.2	Motivação.....	12
1.3	Objetivos.....	13
1.4	Organização da tese.....	13
2.	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	16
2.1	Madeira.....	16
2.1.1	Propriedades mecânicas em temperatura ambiente.....	17
2.1.2	Propriedades mecânicas em elevadas temperaturas.....	18
2.1.3	Propriedades térmicas.....	19
2.1.3.1	Calor específico.....	19
2.1.3.2	Condutividade térmica.....	21
2.1.3.3	Massa volúmica.....	22
2.2	Propriedades da madeira laminada colada.....	23
2.3	Aço.....	25
2.3.1	Propriedades mecânicas em temperatura ambiente.....	25
2.3.2	Propriedades mecânicas em elevadas temperaturas.....	27
2.3.3	Propriedades térmicas.....	28
2.3.3.1	Calor específico.....	29
2.3.3.2	Condutividade térmica.....	30
2.3.3.3	Massa volúmica.....	31
3.	ANÁLISE TÉRMICA.....	32
3.1	Comportamento térmico da madeira.....	32
3.2	Curva de incêndio natural.....	34
3.3	Curva de incêndio padrão ISO 834.....	35
3.4	Transferência de calor.....	36
3.4.1	Condução.....	36
3.4.2	Convecção.....	37

3.4.3	Radiação	38
3.4.4	Convecção e radiação simultâneas	40
4.	PROJETO DA LIGAÇÃO W-S-W PELO MÉTODO SIMPLIFICADO	42
4.1	Temperatura ambiente	42
4.1.1	Projeto da ligação aço-madeira com cavilhas em duplo corte	43
4.1.2	Ligações projetadas.....	49
4.2	Elevadas temperaturas	50
4.2.1	Profundidade de carbonização.....	52
4.2.2	Método de redução de carga.....	54
4.2.2.1	Ligações não protegidas	54
4.2.2.2	Ligações protegidas pelo aumento da espessura da madeira.....	56
4.2.3	Ligações projetadas.....	57
5.	ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DA LIGAÇÃO W-S-W	59
5.1	Modelo numérico à temperatura ambiente	59
5.1.1	Condições de fronteira	59
5.1.2	Modelo numérico.....	60
5.2	Modelo numérico a elevadas temperaturas.....	63
5.2.1	Equações da condução de calor e condições de fronteira	63
5.2.2	Modelo numérico.....	67
5.3	Funções de forma	69
5.4	Linguagem APDL	71
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
6.1	Análise mecânica.....	72
6.2	Análise térmica.....	74
6.2.1	Ligações não protegidas.....	75
6.2.1.1	Exposição de um lado	76
6.2.1.2	Exposição de três lados	79
6.2.2	Ligações protegidas pelo aumento da espessura da madeira	82
6.2.2.1	Exposição de um lado	83

6.2.2.2	Exposição de três lados	85
6.2.3	Temperaturas nas cavilhas	88
7.	CONCLUSÃO.....	90
7.1	Conclusões gerais.....	90
7.2	Trabalhos futuros.....	92
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
	ANEXO A	99
	ANEXO B	103
	ANEXO C	114
	ANEXO D	135

1. INTRODUÇÃO

Com a revolução industrial, e todo o crescimento tecnológico envolvido, o interesse foi crescente na investigação e na análise do comportamento de novos materiais ou já existentes para aplicação na construção e em estruturas de engenharia. A análise e estudo do comportamento ao fogo de elementos de madeira começou a ganhar interesse pela aplicação deste material em estruturas que garantissem segurança em uso. A madeira era um material bastante utilizado, porém pouco se sabia quanto ao seu comportamento perante um incêndio. Iniciou-se então uma série de estudos experimentais na tentativa de conhecer o seu comportamento. Posteriormente, e com o avanço informático, o recurso das simulações computacionais prevendo modelos de análise começou a ter um papel ativo.

As ligações de madeira ou outros materiais são partes muito importantes em estruturas, pois são responsáveis por garantir a resistência e a estabilidade estrutural. Os elementos que promovem a ligação, ligadores, permitem a junção de partes na estrutura e podem ser classificadas em três categorias principais: ligadores metálicos, placas dentadas e anéis de divisão. As ligações com ligadores metálicos seguem as regras do Eurocódigo 5-1-1 [1].

A grande vulnerabilidade da madeira, em situações de incêndio, requer uma avaliação mecânica e térmica rigorosa. Os fenômenos químicos que ocorrem na madeira durante a exposição ao fogo, conduzem ao estudo de um processo complexo. Quando as estruturas em madeira são expostas a altas temperaturas, é formada uma camada superficial carbonizada que perde as suas propriedades mecânicas de resistência e rigidez. No entanto, e em função das dimensões da seção, a camada carbonizada isola as partes internas dos elementos que podem permanecer a baixas temperaturas, dificultando por isso a propagação do calor para o interior da seção [2].

A análise das ligações com madeira e aço sob altas temperaturas pode ser um desafio devido à sua alta complexidade, pela existência de vários tipos de ligações, diferentes geometrias, diferentes configurações, variedade de ligadores e degradação das propriedades dos materiais durante o aquecimento. Esses fatores são os mais importantes a considerar numa análise térmica. A madeira e o aço são materiais com características fortemente dependentes da temperatura que influênciam diretamente a resistência da estrutura.

Neste trabalho, pretende-se avaliar o comportamento de ligações madeira-aço com cavilhas metálicas em duplo corte à temperatura ambiente e sob efeito de elevadas temperaturas com e sem proteção de material isolante. É efetuado o projeto de 45 ligações, com base em cálculos analíticos e ainda utilizando métodos computacionais com elementos finitos são

apresentadas 30 simulações numéricas, tendo sido efetuados mais modelos numéricos para obtenção da convergência da solução. Será avaliada a resistência mecânica e térmica das ligações de madeira-aço em estudo, em conformidade com as regras de segurança e projeto. A quantidade de ligadores e a sua disposição terão uma forte influência na avaliação da resistência da ligação, situação esta determinada através dos modelos computacionais desenvolvidos.

1.1 Estado da arte

As ligações de madeira são objeto de estudos de muitos pesquisadores em vários países, ela é considerada uma das partes mais importantes de uma construção em madeira e, portanto, necessita de uma maior atenção durante a elaboração de um projeto. A determinação da capacidade de carga e resistência térmica é uma tarefa bastante complexa, devido ao elevado número de parâmetros em estudo.

O precursor no estudo de ligações de madeira com ligadores metálicos em planos de corte foi Johansen, com a primeira publicação em 1949 [3]. O seu estudo deu origem ao conhecido “European Yield Model”, que caracteriza um modelo rígido-plástico para avaliação dos modos de falha da ligação. Ele verificou que a resistência das ligações em um ou mais planos de corte depende da resistência ao esmagamento da madeira e da resistência à flexão do ligador, pois os ligadores não estão submetidos a um estado de corte puro devido o esmagamento localizado do ligador na madeira. Esse estudo é balizador para várias normas, desde 1993 o Eurocódigo 5-1-1 [1] baseia-se no modelo de Johansen assim como a norma brasileira para projeto de estruturas de madeira ABNT-NBR 7190.

Em 2004, P. D. Moraes *et al.* realizaram um trabalho com o objetivo de estudar o comportamento de ligações com pinos em estruturas de madeira submetidas a um carregamento inicial e posterior aplicação de um fluxo de calor lateral. Foram realizados ensaios experimentais em uma ligação com um pino, depois foi elaborado um modelo numérico para prever o comportamento desse tipo de ligação devido ao aumento da temperatura. As deformações e o tempo até a ruptura têm relação com o campo de temperaturas. De acordo com os autores a modelagem do comportamento mecânico das ligações em temperaturas elevadas mostrou a necessidade de considerar a variação das propriedades mecânicas que caracterizam uma ligação do tipo cavilha [4].

Em 2006, E. M. Pinto e C. Calil desenvolveram estudos teóricos e experimentais sobre a degradação térmica e gradientes térmicos da madeira exposta ao fogo. Em sua pesquisa, peças

estruturais de madeira, vigas, são expostas ao aquecimento de acordo com a curva padrão ASTM E 199, dentro de um forno com queimadores a gás. Utilizando termopares, foram coletadas as temperaturas em diferentes profundidades e concluiu-se que devido à massividade dos elementos estruturais de madeira e à baixa condutividade térmica do carvão, a parte interna apresenta um aquecimento lento. A redução da capacidade de carga da madeira deve-se principalmente à diminuição da seção transversal resistente durante a carbonização e à redução das propriedades mecânicas de resistência e rigidez [5].

Em 2006, J. Branco *et al.* aspirou destacar a importância do conhecimento sobre a resistência e rigidez das ligações em vigas de madeira tradicionais. Ligações originais não reforçadas, foram submetidas a testes estáticos e cíclicos. Foi avaliada a influência do nível de pré-compressão do membro. Os testes em provetes foram precedidos por uma caracterização adequada e rigorosa da madeira utilizada na construção das ligações. Os resultados dos testes experimentais mostram que a capacidade depende do nível de tensão compressiva no membro, no entanto, parâmetros como o ângulo dos componentes, a largura dos elementos conectados e o coeficiente de fricção são condições típicas que demandam atenção especial para determinar uma correta capacidade carga da ligação [6].

Em 2008, A. Hanhijaärvi e A. Kevarinmäki organizaram um grande programa experimental para investigar a resistência ao corte em várias ligações com duplo corte. O programa explorou os mecanismos de falha no âmbito das ligações madeira-aço de alta capacidade de carga. Todas as ligações testadas foram do tipo aço-madeira usando grandes diâmetros e, conseqüentemente, cavilhas razoavelmente rígidas. Os experimentos consistiram em mais de 150 testes de tração, através dos quais diferentes e versáteis configurações de cavilhas foram testadas. Com base nos resultados experimentais, foi desenvolvido um novo método de projeto contra mecanismos de falha da madeira na região da ligação. Uma das conclusões mais relevante indica que a equação do Eurocódigo 5-1-1 para o número efetivo de cavilhas em linha é muito conservadora para essas ligações, porque não leva em conta a esbelteza das cavilhas. O novo método é adequado especialmente para ligações aço madeira de alta capacidade de carga [7].

Em 2009, J. L. González Fueyo *et al.* produziram uma pesquisa onde o foco foi estudar as tensões de projeto em ligações de madeira com ligadores metálicos. Durante o estudo foi realizado o projeto de ligações com ligadores do tipo cavilha em corte duplo, como identificado na Figura 1, essas ligações devem ser capazes de suportar as cargas de projeto impostas aos seus componentes, portanto o projeto seguiu as recomendações apresentadas no Eurocódigo 5-1-1 [1]. O nível de tensões e momentos indicados pela norma foram comparados com os

calculados usando o método dos elementos finitos. O mecanismo de falha identificado apresenta o colapso nas bordas da madeira mais uma dobra plástica no centro da cavilha. As equações propostas no Eurocódigo 5-1-1 para calcular o momento máximo que a cavilha pode suportar produzem valores que estão entre o momento elástico e plástico. Isso indica que parte das fibras estará na região plástica, mas não todas, o que está de acordo com os padrões de segurança que impedem que ela alcance as cargas reais de ruptura. No entanto, isso não evitaria a presença de algumas deformações plásticas irreversíveis. Além disso, o momento máximo calculado pelo MEF é um pouco acima do valor da norma [8].

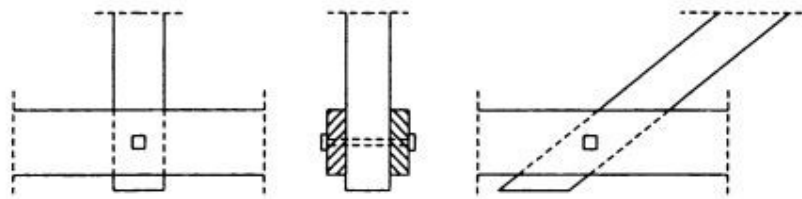


Figura 1: Ligação com cavilhas em duplo corte [8].

Em 2009, P. B Cachin e J. M. Franssen realizaram modelos numéricos para estudar ligações madeira-madeira (W-W-W) com cavilhas sob carregamento térmico. O modelo foi calibrado para a temperatura ambiente e posteriormente usado nas análises térmicas que foram feitas em duas etapas. Em uma primeira etapa, foi feita uma análise térmica com um modelo 3D para descobrir as temperaturas na madeira e nas cavilhas. A segunda etapa foi para avaliar o desempenho mecânico da ligação, utilizando as propriedades da madeira e do aço ajustadas para as temperaturas obtidas na primeira parte. Os resultados obtidos através do modelo numérico indicam tempos maiores até à falha, evidenciando assim que as equações do Eurocódigo 5 apresentam aproximações conservadoras [9].

Em 2009, L. Peng *et al.* realizaram uma investigação sobre o desempenho durante a ocorrência de um incêndio de ligações madeira-aço-madeira com placas de aço inseridas em fendas no membro de madeira. Inicialmente utilizaram um modelo térmico tridimensional que faz uso do método dos elementos finitos para analisar a transferência de calor no interior das ligações de madeira, que foram expostas a curva de incêndio padrão ISO 834. Na fase seguinte, foi adotada uma redução na resistência ao esmagamento para estimar a capacidade de carga das ligações em elevadas temperaturas. Com base nos perfis de temperatura no interior da ligação, obtidos pelo modelo térmico, a redução da resistência de esmagamento foi

determinada e usada para calcular a capacidade de carga em temperaturas elevadas. Os autores apresentaram uma fórmula, como proposta para avaliar a capacidade de resistência ao fogo das ligações de madeira que foi comparada com os resultados dos testes de resistência ao fogo. A conclusão mais relevante do estudo mostra que nas ligações expostas ao fogo, a espessura dos membros laterais da madeira desempenha um papel mais relevante na capacidade de carga do que o diâmetro do ligador. Os parâmetros considerados incluíram o nível de carga, o diâmetro do ligador e a espessura do membro de madeira [10].

Em 2009, R.F.P. Silva desenvolveu um trabalho onde o objetivo principal era estudar o efeito do fogo em vários tipos de ligações e ligadores. Um segundo objetivo do trabalho era avaliar o comportamento mecânico das ligações e determinar qual o ligador mais eficiente em função do esforço atuante. O estudo térmico abordou o método simplificado e o método de redução de carga, e posteriormente foi feita uma comparação de modo a conhecer os pontos fortes e as limitações de cada um. No fim do estudo mecânico ele concluiu que ligações aço-madeira, com chapa metálica lateral e central atingem resultados semelhantes, entretanto, no caso da chapa metálica central há um ganho de resistência da capacidade de carga para todos os ligadores. No estudo em elevadas temperaturas considerando o método simplificado ele afirma que as ligações dimensionadas em temperatura ambiente, e sem proteção, apresentam um tempo de resistência ao fogo de 15 minutos para pregos, parafusos de porca e outros conectores e 20 minutos para cavilhas, contudo, para uma resistência maior aconselha-se proteger a ligação com material isolante ao invés de usar um incremento de madeira, devido a esse segundo limitar o tempo máximo de resistência em 30 minutos. No estudo do método de redução de carga verificou que a resistência ao fogo é função de uma variável que depende de cada ligador, e que por esse método as cavilhas apresentam o melhor desempenho [11].

Em 2010, A. Frangi, C. Erchinger e M. Fontana realizaram um extenso programa de ensaios e testes sobre o comportamento estrutural das ligações de madeira em elevadas temperaturas, apresentando também o comportamento em temperatura ambiente. Esse estudo, abordou as ligações em madeira com múltiplos planos de corte usando cavilhas com chapas de aço inseridas na madeira e ligações com placas laterais de aço com pregos anelados. Os resultados dos testes mostraram que as ligações desprotegidas de aço-madeira com cavilhas projetadas para temperatura ambiente com múltiplos planos de corte atingiram uma resistência ao fogo de aproximadamente 30 minutos. Ao aumentar a distância das cavilhas até o final em 40 [mm] e a espessura dos membros laterais de madeira, a resistência ao fogo aumentou para valores superiores a 70 minutos. As ligações protegidas com placas de madeira ou gesso mostraram uma resistência ao fogo de cerca de 60 minutos. Assim, do ponto de vista de projeto

ao fogo, essas estratégias foram favoráveis para melhoria da resistência. Por outro lado, as ligações desprotegidas com chapas laterais de aço e pregos anelares falharam após cerca de 12 minutos devido a grandes deformações dos pregos e placas laterais de aço diretamente expostas ao fogo. Ao proteger as chapas laterais de aço usando uma tinta intumescente, a resistência ao fogo dessas ligações foi aumentada para cerca de 30 minutos [12].

Em 2010, M. Fragiacomio *et al.* aperfeiçoou estudos numéricos e experimentais sobre o comportamento térmico estrutural de membros de madeira laminada (LVL) exposta ao fogo. Um modelo 3D de elementos finitos foi implementado no *ABAQUS* para simular os testes de incêndio. A distribuição de temperatura dentro da seção transversal foi prevista com um pequeno atraso pela análise térmica em relação aos registros do termopar usado nos testes experimentais. O estado térmico e mecânico da seção transversal intermediária do membro estudado foi analisada em diferentes tempos de exposição para obtenção de resultados de uma análise térmica-estrutural combinada. A distribuição de tensão foi comparada com a resistência correspondente em um estado térmico específico. Diferentes redistribuições de tensão ocorreram nas fibras mais frias em função da carga aplicada e do tempo de exposição ao fogo, o estudo conduz a um conhecimento da possibilidade de ocorrer um aumento na plasticidade da madeira em elevadas temperaturas [13].

Em 2011, L. Peng *et al.* desenvolveram um estudo sobre o desempenho de ligações de madeira com corte duplo. Inicialmente foi analisado os modelos existentes, em seguida foram introduzidas novas correlações para prever as resistências ao fogo das ligações desprotegidas do tipo W-W-W, W-S-W e S-W-S. Os métodos de cálculo são desenvolvidos usando dados obtidos a partir de experimentos com fogo na literatura consultada, combinados com dados obtidos a partir de modelagem numérica. Os resultados do estudo mostraram que o diâmetro e o número de ligadores não têm influência direta na resistência ao fogo das ligações, no entanto ele concluiu que aumentando o diâmetro ou o número de ligadores a capacidade de carga à temperatura ambiente aumenta, e a razão entre a carga aplicada e carga suportada das ligações diminui. Essa diminuição leva a um aumento na resistência ao fogo, porém as ligações ficam sobre dimensionadas à temperatura ambiente. As análises também mostraram que para as mesmas espessuras de placas e números de ligadores, utilizar cavilhas em vez de parafusos melhora a resistência ao fogo [14].

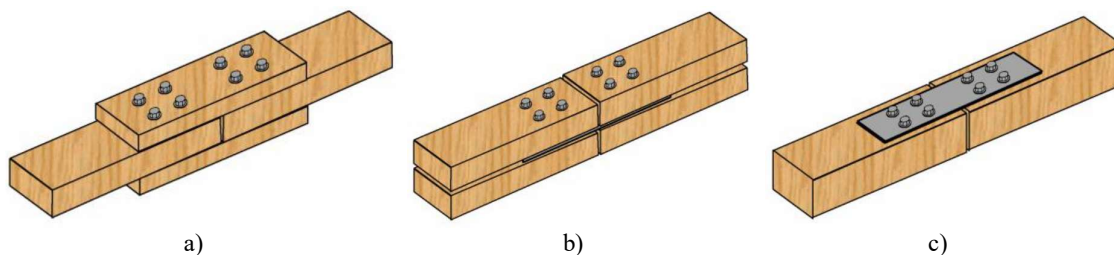


Figura 2: Ligações de madeira em duplo corte: (a) ligação madeira-madeira-madeira (W-W-W), (b) ligação madeira-aço-madeira (W-S-W), (c) ligação aço-madeira-aço (S-W-S) [14].

Em 2012, E. Resch e M. Kaliske construíram um modelo numérico tridimensional com o intuito de avaliar ligações de madeira em duplo plano de corte com ligadores do tipo cavilha, para determinar a carga final e analisar a falha da construção. Os autores salientam que a modelagem em elementos finitos deve ser adequada, com formulações adaptadas dos elementos, propriedades dos materiais e a consideração correta do contato entre os componentes da ligação. A vantagem das simulações numéricas é a sua eficiência em relação ao tempo, custos e certeza dos resultados, devido ao campo de tensões ser considerado realista nas análises tridimensionais. Os estudos numéricos apresentados mostram características complexas de falha que influenciam significativamente a carga final. A comparação dos valores de carga final determinados a partir de simulações numéricas e a norma DIN 1052, valida o conceito apresentado na norma em caso de carga de compressão. Ao contrário disso, as características de falha diferem para o carregamento de tração [15].

Em 2013, C. L. Santos fez algumas propostas inovadoras para ligações de madeira do tipo W-W-W. Uma delas foi a utilização de insertos metálicos colados entre as peças de madeira e os ligadores para garantir um reforço das ligações. Outra análise realizada foi a colagem de CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*) nas zonas laterais da ligação, abrangendo as envolventes dos furos das cavilhas. Para avaliar a ligação, ele desenvolveu modelos numéricos e também procedeu à realização de ensaios experimentais em provetes. A técnica de reforço desenvolvida apresentou bons resultados quando aplicada nas peças de madeira com carga na direção radial. Ele observou que o reforço com insertos metálicos apresentaram desempenho melhor do que o CFRP [16].

Em 2013, C. Maraveas trabalhou com ligações de madeira expostas ao fogo. A pesquisa avaliou o desempenho em projeto de ligações, obtendo resultados sobre quais são, geralmente, as zonas mais fracas na madeira de construção em temperatura ambiente e determinando a resistência geral ao fogo da estrutura. Foram apresentados estudos experimentais e numéricos sobre a resistência ao fogo e o efeito dos vários parâmetros que governam o comportamento de

ligações típicas, como madeira-madeira-madeira (WWW), madeira-aço-madeira (WSW) e aço-madeira-aço (SWS). Os resultados mostraram que as ligações de madeira são extremamente vulneráveis ao fogo. A classificação ao fogo de ligações desprotegidas carregadas paralelamente à fibra é tipicamente inferior a 30 min. A perda de resistência ao esmagamento na região dos furos devido ao aumento de temperatura é o fator predominante na determinação de sua resistência ao fogo e normalmente resulta no alongamento dos furos dos ligadores. O autor apresenta como solução mais eficaz, a aplicação da proteção contra o fogo [17].

Em 2014, A. Akotuah Ohene realizou um trabalho onde o objetivo principal foi determinar os parâmetros chave que governam o desempenho ao fogo de ligações. O estudo considerou um típico sistema híbrido estrutural de madeira-aço, onde uma viga de madeira laminada colada é ligada a uma coluna de aço por ligações do tipo S-W-S, W-S-W e um tipo de ligação com aço em três lados, conforme Figura 3. Ele estudou a resistência ao fogo das ligações usando um modelo de elementos finitos e comparou com os testes experimentais de resistência ao fogo em grande escala que foram conduzidos anteriormente. A variação entre os testes experimentais e os resultados do modelo numérico variaram em um intervalo de $\pm 11\%$, mantendo uma boa correlação. As características importantes que foram avaliadas nas ligações individuais foram a transferência de calor, o desenvolvimento de temperatura, taxa de carbonização da madeira, danos estruturais e a falha durante a exposição ao fogo. Em conclusão, a ligação com aço em três lados teve uma melhor resistência ao fogo do que as ligações S-W-S e W-S-W, enquanto que a ligação W-S-W teve melhor desempenho que a ligação S-W-S [18].

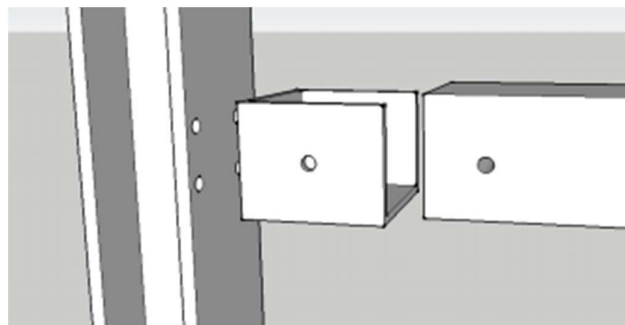


Figura 3: Ligação com aço em três lados [18].

Em 2015, S. I. F. Barbosa desenvolveu uma pesquisa para compreender os mecanismos e fatores que influenciam o comportamento global das ligações de madeira tradicionais e

avaliar as mesmas ligações com adição de reforço com peças metálicas ou materiais compósitos. A pesquisa mostrou que o esmagamento das fibras na superfície do entalhe foi o modo de ruptura mais comum em todos os testes. Esse fenômeno poderia introduzir uma questão sobre sua viabilidade quando aplicada a uma estrutura. As abordagens analíticas estudadas quando são comparadas aos resultados dos testes, oferecem valores muito conservadores da capacidade de carga máxima da ligação com dente único [19].

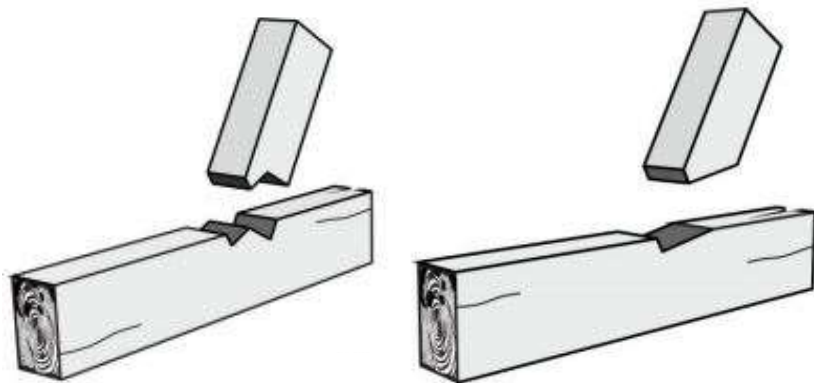


Figura 4: Entalhes: a) Ligação com dente simples; b) Ligação com dente duplo [19].

Em 2015, S. B. Amankwah Boadi investigou a resistência ao fogo e o comportamento de ligações híbridas entre colunas de aço e vigas de madeira laminada colada em incêndios reais com elementos em tamanhos reais. Os valores da velocidade de carbonização foram superiores a 1,0 [mm/min] para as ligações com aço externo e atingiu uma média de 2 [mm/min] nas ligações com aço na parte interna da viga, isso evidencia a interferência que a condução de calor dos aços que compõem a ligação tem sobre a carbonização [20].

Em 2016, P. Palma realizou um trabalho com o objetivo de avaliar o comportamento térmico e mecânico de ligações aço-madeira com cavilhas em uniões de vigas e colunas. Ele estudou várias tipologias de ligações com carregamento perpendicular à fibra da madeira e realizou testes experimentais de resistência mecânica e ao fogo, posteriormente, ele desenvolveu um “framework” para modelar as ligações de madeira expostas ao fogo e realizar uma análise de elementos finitos. Os objetivos das simulações numéricas foram conduzir um estudo paramétrico dos parâmetros mais importantes identificados na campanha experimental. O programa de simulações numéricas compreendeu estudos paramétricos sobre a espessura de membros laterais e o espaçamento entre ligadores. Os resultados de alguns testes atingiram mais de 30 e até 60 minutos de resistência ao fogo, com seções transversais de 160x260 cm² e

240x340 cm², respectivamente, para graus de utilização entre 0,2 e 0,4. A maioria das conexões falharam depois de grandes deformações devido o esmagamento da ligação nos lados da viga. Aspectos como uma abertura maior entre a viga e a coluna e a presença de reforço com parafusos auto-roscentes diminuíram a resistência ao fogo. A comparação com os resultados experimentais mostra que os modelos de transferência de calor proporcionam boas estimativas das temperaturas medidas e o modelo de carga fornece boas aproximações da capacidade de carga à temperatura normal. Concluindo que os parâmetros que exercem maior relevância na resistência ao fogo são a espessura dos membros laterais e o grau de utilização [21].

Em 2017, A. Aissa estudou ligações em madeira do tipo W-W-W em duplo corte com cavilhas de aço como ligadores. Em sua abordagem ele considerou as ligações não protegidas à temperatura ambiente e protegidas em altas temperaturas. De acordo com ele, a madeira apresenta um comportamento complexo em situações de incêndio e a combinação com cavilhas metálicas intensificam a condução de calor para o interior do material. A metodologia foi baseada na concepção de modelos analíticos e numéricos. Na análise mecânica, os resultados numéricos foram superiores aos resultados analíticos obtidos de acordo com as regras do Eurocódigo. Na análise térmica ele estudou a proteção da ligação com placas de gesso e MDF, onde a espessura foi definida para atingir um tempo de resistência de 30 minutos. No final do estudo ele concluiu que as placas de gesso podem ser consideradas como o melhor material de isolamento na ligação de madeira [22].

Em 2018, J.M. Cabrero e M. Yurrita descreveram os modos de falha frágil e revisaram os modelos de cálculo existentes propostos por vários autores. Este trabalho fornece informações sobre os diferentes modos de falha das ligações de aço-madeira com ligadores do tipo cavilha metálica carregados paralelamente à fibra. Ele compila os diferentes modelos disponíveis e testes experimentais disponíveis na literatura. É dada especial atenção aos modelos que visam proporcionar um conjunto completo e consistente de equações para discriminar as falhas dúcteis das frágeis. Hoje em dia, um método tão completo é apresentado numa proposta de revisão da norma da Nova Zelândia e no método de Hanhijärvi e Kevarinmäki [7]. Pode ser argumentado que também um modelo completo é dado no Eurocódigo 5-1-2 [1], pois alguns modos de falha são implicitamente levados em conta. O modelo para ligações com cavilha desenvolvido por Hanhijärvi e Kevarinmäki é o que melhor discrimina falhas dúcteis e frágeis para ligadores de grande diâmetro e apresenta-se, como uma alternativa viável de melhorar os modelos atualmente incluídos nas normas para ligações com cavilha [23].

Os parafusos são substituídos por cavilhas quando o caráter estético do projeto é uma das condicionantes, devido o acabamento ser menos aparente. Geralmente são confeccionadas em metal ou madeira dura, sendo as de metal mais utilizadas no ramo da construção e as de madeira no ramo da fabricação de móveis. As normas ISO, DIN e ASME apresentam especificações para fabricação de cavilhas, determinam as dimensões e os materiais. As cavilhas apresentam pequenas variações em relação ao seu tamanho nominal e depende da norma reguladora adotada. Na norma DIN 6325, as cavilhas se apresentam ligeiramente maiores que o valor nominal, por exemplo, um pino de 3 [mm] varia de 3,002 [mm] a 3,008 [mm], e na norma ISO 2338 os pinos-guia são ligeiramente menores, a faixa nominal é de 3 [mm] e os valores reais são da ordem de 2.986 a 3.000 [mm].

As cavilhas são ligadores de forma cilíndrica e diâmetro constante. As cavilhas, diferente dos parafusos, são introduzidas sobre pressão de forma a ficarem justas, pois a força que unirá os elementos é o atrito ao longo da cavilha [24]. Dessa forma, geralmente usa-se um diâmetro na pré-furação da ordem de 0,8 a 1 [mm] menor que o diâmetro da cavilha, consequência disso é a maior eficiência na transmissão dos esforços.

Os ligadores e componentes de metal usados em ligações de madeira, aquecem rapidamente e perdem sua rigidez e resistência em altas temperaturas. Eles também transferem calor para o interior dos membros de madeira e aceleram a carbonização da madeira devido à alta condutividade térmica do metal [14].

Uma temperatura de 300 [°C] é amplamente utilizada para definir a base da camada carbonizada. Estabelecer a taxa de carbonização é um procedimento crítico para avaliar a resistência ao fogo e a resistência mecânica, pois a camada carbonizada não tem capacidade de carga. A resistência ao fogo de um elemento de madeira depende da existência de proteção ou espessura da camada carbonizada [25].

A resistência ao fogo é definida no Eurocódigo 1-1-2 [26] como a capacidade para cumprir suas funções exigidas (função de suporte de carga e / ou função de separação de fogo) de uma estrutura, parte de uma estrutura ou um membro para um nível de carga específico, uma exposição específica a incêndio em um período de tempo específico.

A segurança estrutural determina que no caso de ocorrência de incêndio a estrutura deve ser capaz de resistir aos esforços solicitantes em altas temperaturas por um determinado tempo sem que ocorra falha estrutural [27]. Espera-se que durante esse tempo de resistência, todas as medidas de segurança para que nenhuma vida esteja em situação de risco possam ser tomadas, como a evacuação de um prédio por exemplo.

1.2 Motivação

A madeira apresenta-se como um material muito importante no cenário das construções sustentáveis, considerado como renovável e baixo consumo de energia para produção e utilização, além de diminuir o uso de recursos hídricos e apresentar baixa emissão de carbono.

A madeira é largamente utilizada em engenharia estrutural, o material apresenta boas propriedades mecânicas de resistência e rigidez, além de ter boas propriedades térmicas, acústicas e tornar o peso final das estruturas menor, levando à diminuição dos custos relativos nas edificações. Dessa forma, conhecer as características e comportamento da madeira em estruturas é muito importante para garantir a segurança durante a sua utilização e prever o comportamento durante situações de acidentes como incêndios.

Muitos trabalhos experimentais foram e ainda são desenvolvidos para analisar ligações de madeira com ligadores metálicos sujeitos ao corte. Essas pesquisas levaram ao desenvolvimento de metodologias que fazem previsões da capacidade de carga e modos de falha das ligações contribuindo para o entendimento e melhorias nos projetos estruturais.

Ligações à temperatura ambiente com carregamentos na direção paralela ou perpendicular às fibras exibem comportamentos muito diferentes, sendo este último propenso a falhas frágeis [21]. Em altas temperaturas a avaliação dos parâmetros que interferem na resistência são extremamente difíceis de serem determinados em análises experimentais devido à dificuldade de execução desses ensaios.

Com a evolução da tecnologia computacional, surgiram as análises estruturais pelo método dos elementos finitos. A análise em elementos finitos garante bons resultados em comparação com os testes experimentais e apresentam diferentes possibilidades de aquisição de dados e resultados como tensões, deslocamentos, campos de temperatura, etc.

Poucos modelos numéricos foram desenvolvidos para estudar o comportamento ao fogo das ligações de madeira, mesmo que estudos experimentais sejam difíceis de realizar [28]. Entretanto, cada vez mais é lançado esse auxílio nas pesquisas e análises que estão sendo desenvolvidas.

Em especial, as ligações em madeira com placa de aço central e cavilhas metálicas em duplo corte, são pouco estudadas no âmbito das análises por elementos finitos. Assim, surgiu a curiosidade e o interesse em compreender e conhecer o comportamento desse tipo de ligação quando sujeita a carregamentos mecânicos e térmicos, levando à realização do presente trabalho.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico e térmico da ligação (W-S-W) aço-madeira com chapa metálica central e ligadores do tipo cavilha metálica em duplo corte. Para a avaliação, pretende-se utilizar as regras de projeto com base nos Eurocódigos e posteriormente desenvolver modelos numéricos para estudar o comportamento das ligações e validar o que é apresentado na norma através de comparações entre os valores da resistência mecânica e térmica para as ligações em estudo.

As ligações estudadas nesse trabalho serão projetadas de acordo com carregamento reais possíveis de serem aplicados em estruturas, diâmetros comerciais de cavilhas metálicas e variadas espessuras do membro lateral de madeira. Desse modo, um dos objetivos é apresentar no final desse trabalho uma tabela que poderá ser usada por construtores para determinação da configuração da ligação, de acordo com a carga de projeto e dimensões dos materiais que serão utilizadas. Isso será feito numa tentativa de garantir a utilização e a estabilidade das estruturas.

Ligações de madeira sofrem alterações quando expostas ao fogo, a madeira carboniza e perde resistência mecânica, o aço por ser um bom condutor de calor é aquecido rapidamente e também perde resistência além de acelerar a carbonização na madeira.

É importante analisar e entender os parâmetros que interferem na resistência ao fogo das ligações, porém entende-se que a resistência ao fogo afeta a capacidade de carga, dessa forma saber se a resistência mecânica vai de encontro aos valores apresentados na norma também é essencial. Assim, no final desse trabalho espera-se:

- Avaliar a resistência mecânica das ligações;
- Descobrir a espessura da camada carbonizada;
- A velocidade de carbonização;
- A temperatura em cada material;
- A influência do ligador na condução de calor.

1.4 Organização da tese

Esta tese está organizada em 7 capítulos, nos próximos parágrafos é apresentada uma breve descrição do conteúdo presente em cada um deles.

No presente capítulo foi apresentada uma breve introdução, onde é abordada a importância e as vantagens do uso da madeira em estruturas, os trabalhos de relevância

desenvolvidos na área de estudo da resistência de ligações de madeira em temperatura ambiente e sujeitas ao fogo e a importância da pesquisa e estudo do tema. Também é apresentado a motivação em estudar ligações do tipo madeira-aço-madeira com cavilhas metálicas e definidos os objetivos a serem alcançados no final do trabalho.

No segundo capítulo são apresentadas as propriedades da madeira e do aço. Nessa seção são apresentadas as propriedades mecânicas de resistência e rigidez de ambos os materiais em temperatura ambiente e as mudanças que cada propriedade sofre com o aumento de temperatura. Também são apresentadas as propriedades térmicas dos materiais, devido a sua grande importância nas análises térmicas que serão realizadas nesse trabalho. Por fim, são apresentadas as propriedades da madeira laminada colada da classe GL28h que será usada no desenvolvimento desse trabalho.

O terceiro capítulo discorre sobre a análise térmica e os parâmetros importantes para realizar um estudo correto. Abordam-se as propriedades térmicas da madeira e alguns dos processos químicos e físicos que ocorrem com a madeira durante a queima. Apresentam-se as curvas de incêndio natural e de incêndio padrão ISO 834, que descrevem a evolução da temperatura no tempo. Por fim abordam-se os fenômenos de transferência de calor.

No quarto capítulo apresentam-se as regras de projeto de acordo com as normas europeias. A primeira parte demonstra as equações e as regras para o projeto de ligações em temperatura ambiente, e posteriormente apresenta-se as ligações projetadas para realização do estudo. A segunda parte, de forma semelhante à primeira, apresenta as regras para o projeto das ligações de madeira ao fogo, abordando o método de redução de carga para ligações com e sem proteção, posteriormente são apresentados os parâmetros de resistência ao fogo das ligações que foram projetadas para o estudo.

O quinto capítulo descreve o método dos elementos finitos. Apresentam-se as condições de fronteira para o problema mecânico e é apresentado o elemento finito utilizado pelo *ANSYS®* na solução do problema. Para elevadas temperaturas, apresenta-se a solução da equação diferencial da condução de calor e as respectivas condições iniciais e de fronteira. Planeia sobre os processos iterativos e as características do elemento utilizado junto com descrição das condições de fronteira utilizadas no *ANSYS®* para a análise térmica. Nessa parte também é descrita as funções de forma dos elementos e apresenta-se a linguagem de programação APDL.

No sexto capítulo é feita a apresentação e discussão dos resultados. A primeira parte apresenta os resultados do modelo numérico utilizado na análise mecânica e compara com os resultados analíticos, dissertando sobre as variáveis que interferem na capacidade de carga das

ligações. A segunda parte apresenta os resultados da análise térmica, abordando a interferência dos ligadores, a mudança ocorrida com a proteção e as diferentes formas de exposição. Os dados obtidos nesta parte mostram a carbonização na madeira, a velocidade de carbonização e o campo de temperaturas de uma ligação para as diferentes condições. Também são apresentados gráficos com a evolução de temperaturas ao longo do tempo em diferentes profundidades da madeira e cavilhas, além de se mostrar como é o desenvolvimento da temperatura ao longo a cavilha.

O sétimo capítulo apresenta as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho e as sugestões para novos trabalhos com o objetivo de melhorar o conhecimento sobre o tema.

2. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

A análise estrutural só é possível com o conhecimento das propriedades dos materiais que farão parte da estrutura. A maioria dos materiais empregados na construção são regulados por normas que apresentam os valores das propriedades ou apresentam os ensaios que devem ser feitos para determinação.

2.1 Madeira

As madeiras utilizadas nas construções são obtidas de troncos de árvores. As madeiras são classificadas em duas categorias principais, as madeiras duras, que são provenientes de árvores frondosas que apresentam crescimento lento (dicotiledôneas da classe angiosperma), e as madeiras macias, que são provenientes em geral das árvores coníferas (angiospermas) [29].

Madeira é um material heterogêneo, higroscópico, celular e anisotrópico. As características mecânicas da madeira dependem da concentração e organização dos componentes do tecido celular. A madeira é caracterizada como um material ortotrópico, ou seja, com propriedades mecânicas únicas e independentes nas direções dos três eixos perpendiculares: longitudinal, radial e tangencial. O eixo longitudinal (L) é paralelo à fibra, o eixo radial (R) é normal para os anéis de crescimento (perpendicular à fibra), e o eixo tangencial (T) é perpendicular a direção das fibras e tangente aos anéis de crescimento [30].

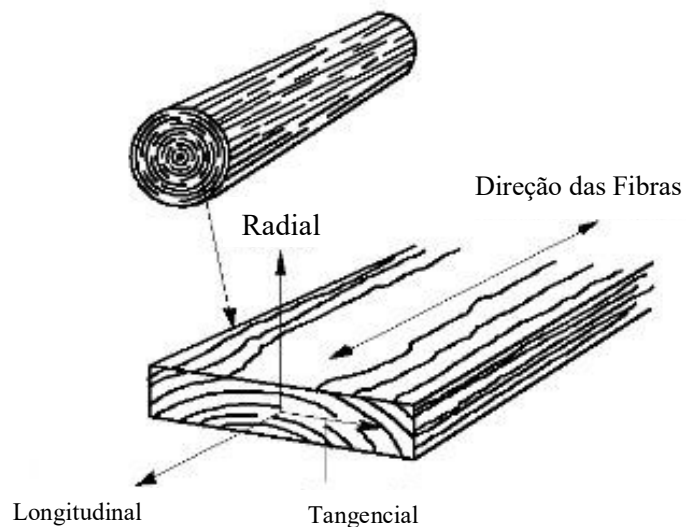


Figura 5: Eixos principais da madeira em relação à direção das fibras [31].

A diferença das propriedades entre as direções radial e tangencial raramente tem importância prática, preza-se por diferenciar as propriedades na direção das fibras principais e na direção perpendicular às mesmas fibras.

A madeira deve ser capaz de realizar ligações resistentes, essa condição é determinada pela força desenvolvida paralelamente ou perpendicularmente à fibra da madeira. Se uma direção é mais fraca do que a outra, a resistência da ligação é reduzida, pode ocorrer separação dos ligadores se esses estiverem muito próximo da borda ou muito próximos uns dos outros.

2.1.1 Propriedades mecânicas em temperatura ambiente

A propriedade mais importante de um material usado como elemento estrutural é a resistência mecânica. Essa propriedade está ligada à capacidade de um elemento resistir aos esforços de tração, compressão e flexão sem falhar. Essas propriedades são determinadas através de ensaios destrutivos que caracterizam a resistência para diferentes espécies de madeira e variam de acordo com o tipo de tensão aplicada.

Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young é uma medida de rigidez do material. Ele é usado para descrever as propriedades elásticas do material quando estão em tração ou compressão.

A elasticidade é uma propriedade do material que permitirá restaurar a sua forma original após uma deformação. Esta força de restauração é, em geral, proporcional à deformação descrita pela Lei de Hooke [32]. A lei de Hooke é uma relação linear usada para descrever a tensão σ de acordo com a equação:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (1)$$

A tensão é proporcional à deformação ε e ao módulo de elasticidade E .

Uma das propriedades mecânicas mais importantes dos materiais estruturais é a tensão de cedência ou escoamento, ela é definida na engenharia com base na quantidade de deformação (ponto de estrição) em que um material para de deformar elasticamente (deformação elástica), reversível, e começa a deformar-se irreversivelmente (deformação plástica). A tensão pode ser definida como a capacidade de resistir a uma força aplicada: quanto maior a resistência, mais forte o material. A resistência ao escoamento pode ser medida de

várias maneiras, por exemplo: a deformação máxima que o material pode sofrer antes da falha ocorrer ou a deformação que resulta de um determinado nível de tensão antes da falha total.

Quando um membro é carregado em uma direção, a deformação perpendicular à direção da carga é proporcional à deformação paralela à direção da carga. A razão entre a tensão transversal e axial é denominada coeficiente de Poisson. Os coeficientes de Poisson são indicados por μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{LT} , μ_{TL} , μ_{RT} e μ_{TR} . A primeira letra do sub índice refere-se à direção da tensão aplicada, a segunda letra refere-se à direção da deformação lateral. Por exemplo, μ_{LR} é o coeficiente de Poisson para a deformação ao longo do eixo radial causada pela tensão ao longo do eixo longitudinal.

2.1.2 Propriedades mecânicas em elevadas temperaturas

Os valores locais de resistência e módulo de elasticidade para a madeira macia devem ser multiplicados por um fator de redução dependente da temperatura de acordo com a Figura 6 e Figura 7.

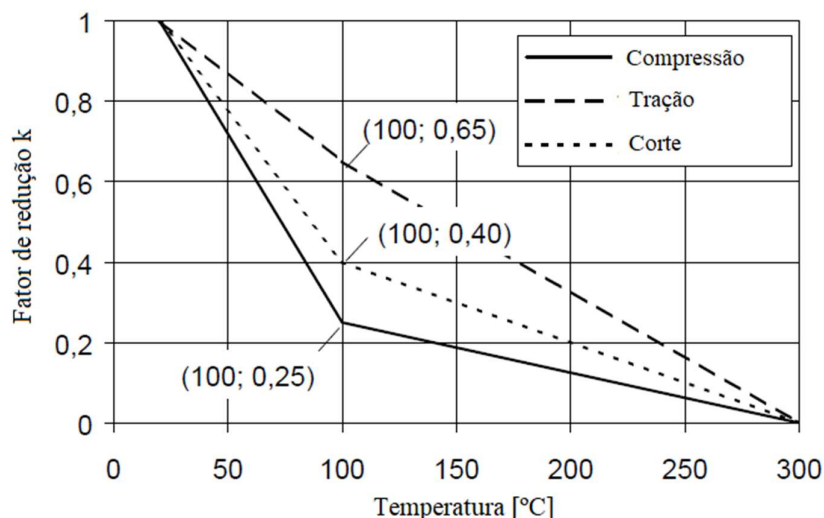


Figura 6: Fator de redução para tensão paralela a fibra da madeira macia [33].

O módulo de elasticidade tem uma variação linear sob o efeito de alta temperatura e é expresso em duas fases, tanto na tração como na compressão, a primeira entre 20 [°C] e 100 [°C] e a segunda entre 100 [°C] e 300 [°C], de acordo com o Eurocódigo 5-1-2 [33].

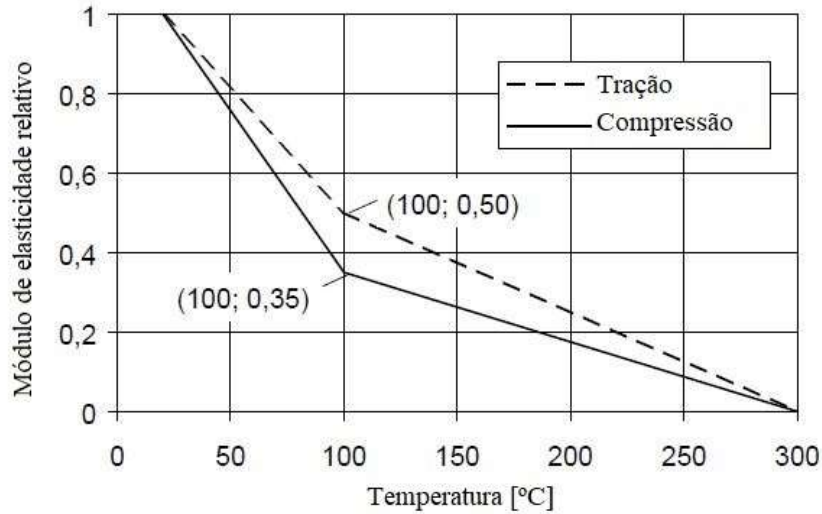


Figura 7: Efeito da temperatura no módulo de elasticidade paralelo à fibra da madeira macia [33].

O gráfico mostra que o módulo de elasticidade relativo cai de acordo com o aumento da temperatura, a queda é mais rápida até os 100 [°C], sendo maior na tração e menor na compressão.

2.1.3 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas expressam a forma como um material se comporta quando é exposto à uma fonte de calor. A seguir apresenta-se as propriedades mais importantes para a madeira que são necessárias para a análise térmica.

2.1.3.1 Calor específico

O calor específico pode ser definido como a quantidade de calor que deve ser fornecida para que 1 grama de substância tenha a sua temperatura elevada em 1[°C]. Essa propriedade é muito importante em análises térmicas, a Figura 8 apresenta a variação que o calor específico sofre quando a madeira é aquecida.

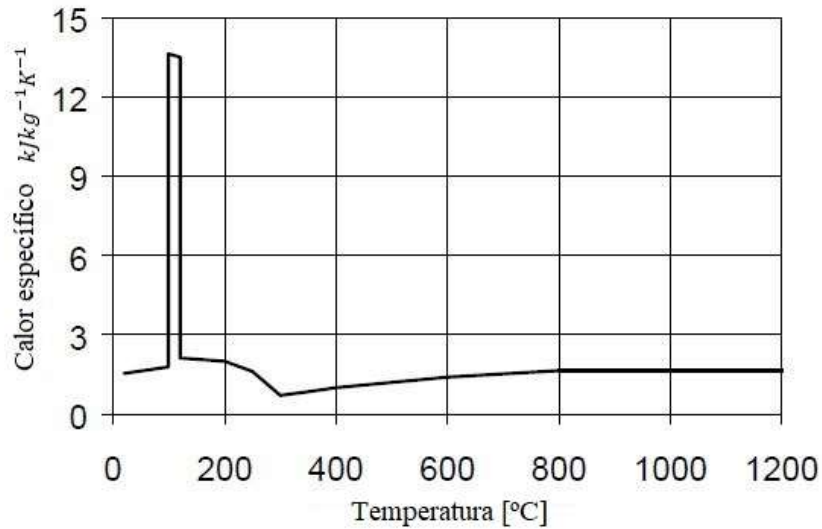


Figura 8: Relação da temperatura e calor específico para madeira [33].

O calor específico da madeira sofre variação para diferentes temperaturas, os valores são próximos na fase inicial do aumento de temperatura antes de chegar próximo aos 100 [°C]. Após atingir essa temperatura sofre um aumento brusco por um curto intervalo de temperatura e então tem uma queda brusca ficando próximo dos valores iniciais, o valor mínimo ocorre quando a temperatura está próxima dos 300 [°C] que coincide com a temperatura adotada para a carbonização da madeira.

A tabela seguir fornece os valores de calor específico para diferentes temperaturas.

Tabela 1: Variação do calor específico da madeira.

Temperatura [°C]	Capacidade de Calor Específico $kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$
20	1,53
99	1,77
99	13,60
120	13,50
120	2,12
200	2
250	1,62
300	0,71
350	0,85
400	1
600	1,40
800	1,65
1200	1,65

O aumento na faixa dos 100 [°C] é devido, principalmente, a perda da umidade contida na madeira.

2.1.3.2 Condutividade térmica

De acordo com o Eurocódigo 5-1-2 [33], a condutividade térmica da madeira aumenta com o aumento da temperatura que pode ser observado na Figura 9:

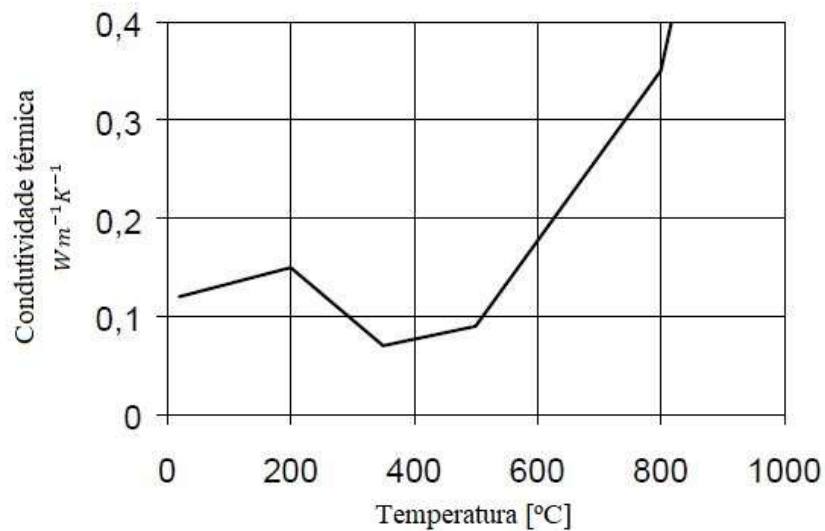


Figura 9: Relação da temperatura com a condutividade térmica para madeira [33].

A Tabela 2 apresenta os valores da condutividade térmica da madeira para alguns valores de temperatura.

Tabela 2: Relação da temperatura com a condutividade térmica para madeira [33].

Temperatura [°C]	Condutividade térmica [Wm ⁻¹ k ⁻¹]
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50

Observa-se que após 200 [°C] a madeira diminui a condutividade térmica até atingir aproximadamente 350 [°C], isso é bastante relevante pois quando a madeira está nessa

temperatura ela pode ser considerada como um isolante em situação de incêndio, entretanto ao atingir 800 [°C], a condutividade aumenta rapidamente aumentando o fluxo de calor.

2.1.3.3 Massa volúmica

A massa volúmica diminui com o aumento de temperatura, conforme a Figura 10.

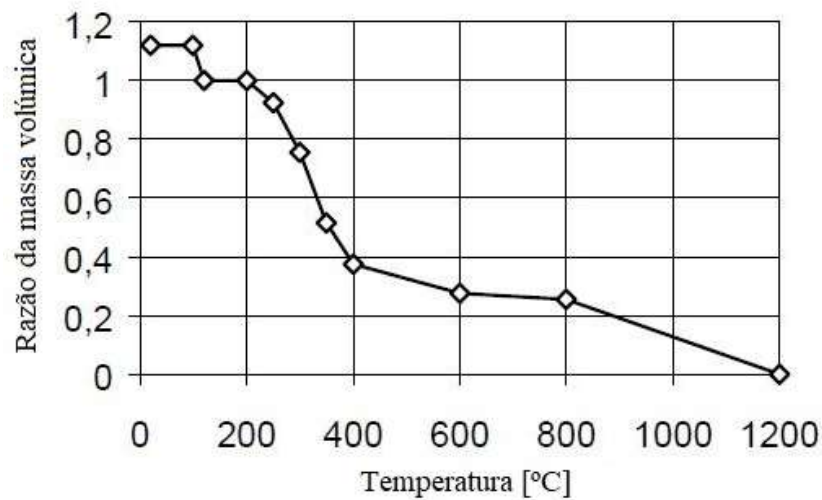


Figura 10: Relação da temperatura e massa volúmica para a madeira macia com umidade inicial de 12%, [33].

A Tabela 3 apresenta os valores de temperatura e seu respectivo valor de razão de densidade para madeira macia.

Tabela 3: Razão de massa volúmica da madeira macia para a classe de serviço 1 [33].

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

Onde ω é a humidade contida na madeira.

2.2 Propriedades da madeira laminada colada

A madeira laminada colada, também chamada de Glulam, é um produto tecnologicamente avançado e muito usado nas estruturas de madeira por ser versátil e apresentar boa estabilidade dimensional. Existem vários tipos de madeira laminada colada considerando diferentes aplicações como decks, vigas, pilares e ligações de madeira por exemplo.

A madeira laminada colada é fabricada a partir de placas de madeira coladas sucessivamente, geralmente são produzidas com seção transversal retangular e apresentam grande adaptabilidade aos projetos. A norma ISO 1194 [34] apresenta oito classes de resistência para a madeira laminada colada, considerando a madeira sólida como homogênea, que significa que todas as placas laminadas tem a mesma classe de resistência, a categoria é definida como GLxh. Nesse trabalho foi considerado a madeira laminada colada da categoria GL28h pois apresenta boas características de resistência, rigidez e massa volúmica as quais são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Valores característicos da resistência, rigidez e massa volúmica da Madeira Laminada Colada [35].

Designação	Simbologia	Valor
Resistência [MPa]		
Resist. à flexão	$f_{m,g,k}$	28,00
Resist. tração paralela à fibra	$f_{t,0,k}$	19,50
Resist. tração perpendicular à fibra	$f_{t,90,k}$	0,45
Resist. compressão paralela à fibra	$f_{c,0,k}$	26,50
Resist. compressão perpendicular à fibra	$f_{c,90,k}$	3,00
Rigidez [MPa]		
Módulo de elasticidade paralelo à fibra	$E_{g,0,medio}$	12600,00
Módulo de elasticidade perpendicular à fibra	$E_{g,0,m}$	420,00
Módulo de distorção	$G_{g,medio}$	780,00
Massa volúmica [kg/m ³]		
Massa volúmica	ρ	410,00

Devido à característica ortotrópica da madeira é necessário determinar as propriedades na direção dos 3 eixos mutuamente perpendiculares, assim a partir das propriedades e razões elásticas de algumas espécies que possuem valores semelhantes à da madeira da classe GL28h,

pode-se determinar os valores ausentes. A Tabela 5 mostra o módulo de elasticidade de algumas espécies de madeira com humidade de 12% aproximadamente [36].

Tabela 5: Módulo de elasticidade de alguns tipos de madeira à temperatura ambiente [36].

Espécie de Madeira	Módulo de Elasticidade [MPa]
Ash (Black)	11000
Ash (Green)	11400
Ash (White)	12000
Basswood, American	10100
Beech, American	11900
Birch (Paper)	11000
Birch (Sweet)	15000
Birch (Yellow)	13900
Cherry, black	10300
Oak (Black)	11300
Oak (Pin)	11900

Para o desenvolvimento do trabalho adotou-se o módulo de elasticidade da espécie de madeira denominada "birch (paper)" da classe de madeira dura. A escolha foi baseada na proximidade entre os valores de resistência e rigidez dessa espécie e da madeira laminada colada da categoria GL28h. O módulo de elasticidade nas direções tangencial e radial à fibra não são apresentadas na norma [34] e não há valores para a espécie "birch (paper)" na bibliografia consultada [30], entretanto, esses valores são de extrema importância para o estudo e foram determinados através das razões elásticas da espécie "birch (yellow)" que estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Razões elásticas para espécie yellow birch, contendo aproximadamente 12 % de humidade [30].

Espécie	E_T/E_L	E_R/E_L	G_{LR}/E_L	G_{LT}/E_L	G_{RT}/E_L
Birch, yellow	0,050	0,078	0,074	0,068	0,017

Os valores médios dos coeficientes de Poisson para amostras de algumas espécies são apresentados na Tabela 7. Os valores para μ_{RL} e μ_{TL} são determinados com menos precisão do que os outros coeficientes de Poisson. Os coeficientes de Poisson variam entre as espécies e são afetados pelo teor de humidade e gravidade específica [36].

Tabela 7: Coeficiente de Poisson para várias espécies com aproximadamente 12% de teor de humidade [36].

Espécie	μ_{LR}	μ_{LT}	μ_{RT}	μ_{TR}	μ_{RL}	μ_{TL}
Madeira Dura						
Ash (White)	0.371	0.440	0.684	0.360	0.059	0.051
Basswood (American)	0,364	0,406	0,912	0,346	0,034	0,022
Birch (Yellow)	0.426	0.451	0.697	0.426	0.043	0.024
Cherry, black	0.392	0.428	0.695	0.282	0.086	0.048

Na constituição do modelo numérico é necessário definir o valor do coeficiente de Poisson que a madeira utilizada possui, na bibliografia esses valores não foram encontrados. Assim foi considerado os valores pertencentes à espécie “yellow-birch”, pois os valores apresentam maior uniformidade entre os eixos.

2.3 Aço

De acordo com o *American Iron & Steel Institute* (AISI), o aço pode ser categorizado em quatro grupos básicos com base nas composições químicas: aço carbono, liga de aço, aço inoxidável e aço ferramenta. Além disso, existem muitos tipos de aço que apresentam propriedades variadas. Todo aço é composto de ferro e carbono. A quantidade de carbono juntamente com as ligas adicionadas é que determinam as propriedades de cada categoria. Um sistema de classificação especial é usado no código SAE-AISI para aços. Eles são expressos com 4 números, por exemplo 10xx, os dígitos 'xx' representam o teor de carbono do metal em centésimos de porcentagem. O primeiro dígito do número representa a outra liga adicionada ao aço (se houver). O segundo dígito indica a porcentagem dessa liga, ou os aditivos da liga de minério.

2.3.1 Propriedades mecânicas em temperatura ambiente

De acordo com o Eurocódigo 3-1-1 [37], as propriedades mecânicas dos aços estruturais podem ser obtidas diretamente dos valores fornecidos pelas normas dos produtos ou podem ser usados os valores da simplificação dada pelo Eurocódigo apresentada a seguir na Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8: Valores nominais da tensão de cedência f_y e resistência à tração final f_u para o aço estrutural laminado a quente, [37].

Norma e classe do aço	Espessura nominal do elemento t [mm]			
	$t \leq 40 \text{ mm}$		$40 \text{ mm} \leq t \leq 80 \text{ mm}$	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

O presente trabalho utilizou o aço da S275 com tensão cedência igual 275 [MPa] e resistência final a tração igual 430 [MPa].

Tabela 9: Valores nominais de tensão de cedência f_y e resistência à tração final f_u para seções estruturais ocas, [37].

Norma e classe do aço	Espessura nominal do elemento t [mm]			
	$t \leq 40 \text{ mm}$		$40 \text{ mm} \leq t \leq 80 \text{ mm}$	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NLH	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550
EN 10219-1				
S 235 H	235	360	-	-

S 275 H	275	430	-	-
S 355 H	355	510	-	-
S 275 NH/NLH	275	370	-	-
S 355 NH/NLH	355	470	-	-
S 460 NH/NLH	460	550	-	-
S 275 MH/MLH	275	360	-	-
S 355 MH/MLH	355	470	-	-
S 420 MH/MLH	420	500	-	-
S 460 MH/MLH	460	530	-	-

Os valores de projeto a adotar para os coeficientes do material à temperatura ambiente que serão utilizados nos cálculos dos aços estruturais devem ser tomados, de acordo com o Eurocódigo 3-1-1 [37], da seguinte forma:

Módulo de elasticidade longitudinal: $E = 210\,000 \text{ [N/m}^2\text{]}$

Módulo de elasticidade transversal: $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 81\,000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

Coefficiente de Poisson em estágio elástico: $\nu = 0,3$

Coefficiente de dilatação térmica: $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ K (para } T \leq 100^\circ\text{C)}$

2.3.2 Propriedades mecânicas em elevadas temperaturas

As propriedades mecânicas do aço carbono sujeito a elevadas temperaturas podem ser determinadas a partir de um fator de redução. Na Tabela 10 e Figura 11 é apresentado esse fator para a tensão de cedência efetiva, limite de proporcionalidade e módulo de elasticidade.

Tabela 10: Fator de redução para relação tensão-deformação do aço carbono a elevadas temperaturas [38].

Temperatura do aço θ_a [°C]	Fator de redução a temperatura θ_a relativo ao valor de f_y ou E_a a 20°C		
	Fator de redução (relativo a f_y) para a tensão de cedência efetiva $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Fator de redução (relativo a f_y) para o limite de proporcionalidade $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Fator de redução (relativo a E_a) para o módulo de elasticidade $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900

300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1000°C	0,040	0,0250	0,0450
1100°C	0,020	0,0125	0,0225
1200°C	0,000	0,0000	0,0000

Nota: Para valores de temperatura intermediários, deve-se tomar o valor do fator de redução por interpolação linear.

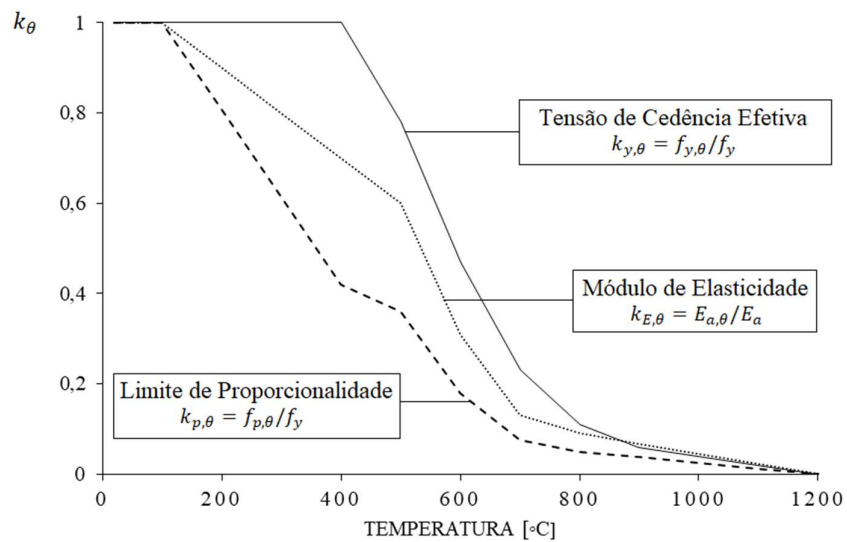


Figura 11: Fator de redução para a relação de tensão-deformação do aço carbono a temperaturas elevadas, adaptado [38].

O aço perde todas as suas propriedades ao atingir 1200 [°C].

2.3.3 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas do aço são influenciadas quando o aço está exposto ao fogo, o Eurocódigo 3-1-2 [38] define os valores dessas propriedades conforme o aumento de temperatura.

2.3.3.1 Calor específico

O calor específico é a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura em 1°C. O calor específico do aço c_a deve ser determinado através das seguintes expressões:

$$20[^\circ\text{C}] \leq \theta_a \leq 600 [^\circ\text{C}]$$

$$c_a = 425 + 7,7 \times 10^{-1}\theta_a - 1,69 \times 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6}\theta_a^3 [J/kgK] \quad (3)$$

$$600 [^\circ\text{C}] \leq \theta_a \leq 735[^\circ\text{C}]$$

$$c_a = 666 + \left(\frac{13002}{738 - \theta_a}\right) [J/kgK] \quad (4)$$

$$735 [^\circ\text{C}] \leq \theta_a \leq 900[^\circ\text{C}]$$

$$c_a = 545 + \left(\frac{17820}{\theta_a - 731}\right) [J/kgK] \quad (5)$$

$$900 [^\circ\text{C}] \leq \theta_a \leq 1200[^\circ\text{C}]$$

$$c_a = 650 [J/kgK] \quad (6)$$

Em que θ_a representa a temperatura do aço em [°C].

A variação do calor específico do aço em função da temperatura pode ser observada através do gráfico seguinte.

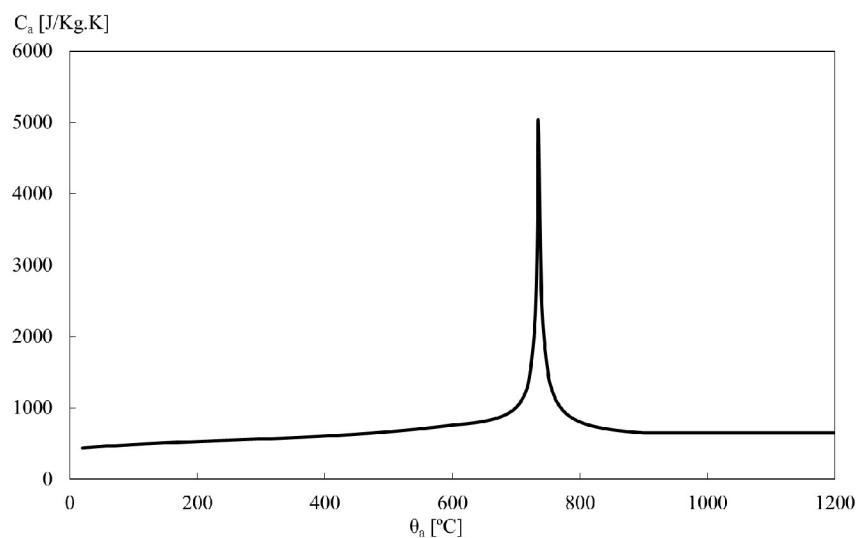


Figura 12: Calor específico do aço em função da temperatura [38].

O calor específico apresenta um pico na temperatura de 735 [°C] atingindo um máximo de 5000 [J/kg.K].

2.3.3.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica é definida como uma propriedade física dos materiais que descreve a facilidade ou a dificuldade de um material conduzir calor.

A condutividade térmica do aço λ_a deve ser determinada através das seguintes expressões:

$$20 [^{\circ}\text{C}] \leq \theta_a \leq 800 [^{\circ}\text{C}]$$

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a [W/mK] \quad (7)$$

$$800 [^{\circ}\text{C}] \leq \theta_a \leq 1200 [^{\circ}\text{C}]$$

$$\lambda_a = 27,3 [W/mK] \quad (8)$$

Em que θ_a representa a temperatura do aço em [°C].

A variação da condutividade térmica do aço em função da temperatura pode ser observada na Figura 13.

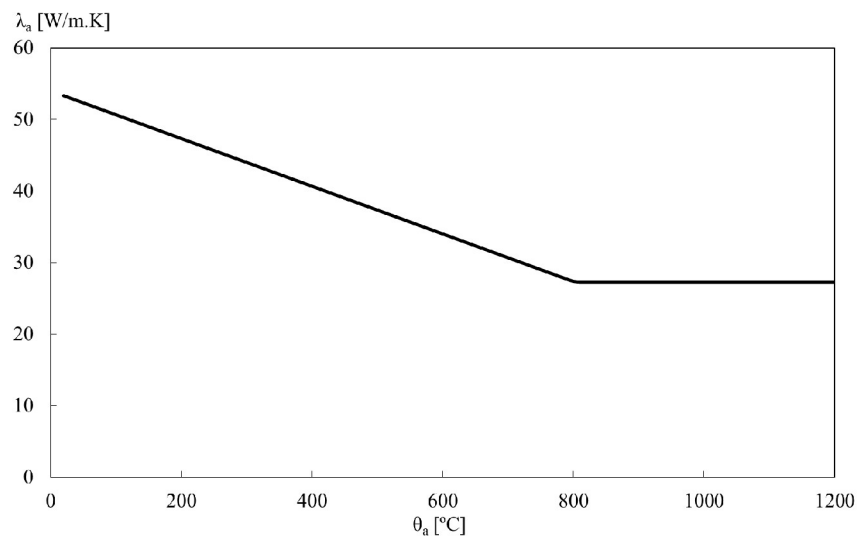


Figura 13: Condutividade térmica do aço em função da temperatura [38].

A condutividade térmica do aço tem uma queda linear até atingir 800 [°C] e permanece constante após essa temperatura.

2.3.3.3 Massa volúmica

A massa volúmica do aço ρ_a não é afetada, permanecendo constante quando o aço é submetido a elevadas temperaturas.

$$20[^\circ\text{C}] \leq \theta_a \leq 1200[^\circ\text{C}]$$

$$\rho_a = 7850 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (2)$$

A massa volúmica do aço em função da temperatura pode ser observada através do gráfico representado na figura seguinte.

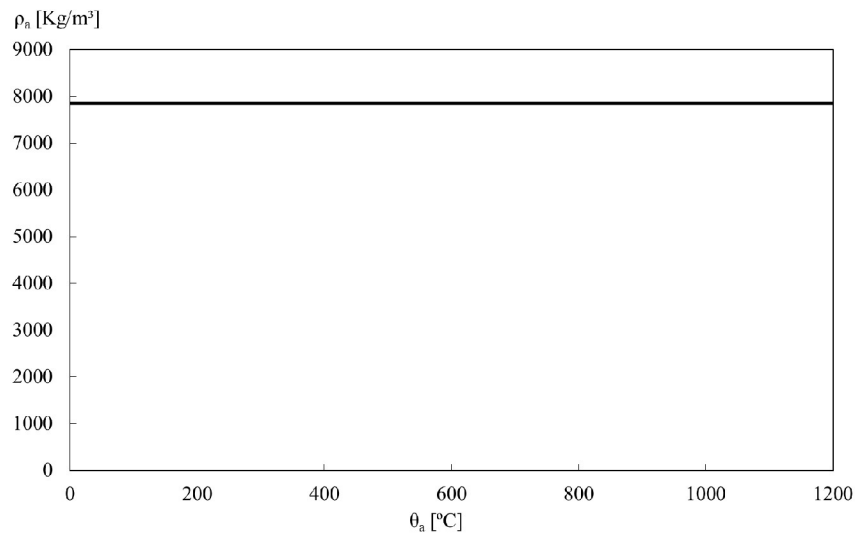


Figura 14: Massa volúmica do aço em função da temperatura [38].

3. ANÁLISE TÉRMICA

A análise térmica pode ser definida como um conjunto de técnicas utilizadas para medir as propriedades físicas de uma substância ou produtos derivados de reações em função da temperatura, enquanto a substância sofre uma variação controlada de temperatura [39].

Madeira e aço são materiais altamente influenciados pela elevação da temperatura, pois suas propriedades de resistência e rigidez são alteradas. Dessa forma, realizar uma análise térmica detalhada é de extrema importância para conhecer o comportamento de membros estruturais que sofrem grande variação de temperatura ao longo do tempo.

Durante uma análise térmica busca-se conhecer a espessura da camada carbonizada, a velocidade de carbonização e as temperaturas no interior do elemento de madeira e do elemento de aço.

3.1 Comportamento térmico da madeira

Ao ser exposta a elevadas temperaturas a madeira sofre mudanças na sua composição química e física. Quando expostas a tais condições, três fenômenos são demasiadamente importantes de se conhecer sendo eles a pirólise, a ignição e carbonização. A seguir decorre a apresentação de tais fenômenos com os respectivos danos que a madeira sofre em cada fase.

A pirólise é a degradação térmica de uma matéria-prima na ausência de um agente oxidante, levando a formação de uma mistura de líquido (composição de alcatrão), gases e um carvão carbonado altamente reativo [40]. Na madeira, a pirólise causa uma produção de gases combustíveis, acompanhada de uma perda de massa, geralmente, se inicia quando a madeira atinge a temperatura de 250 °C [41].

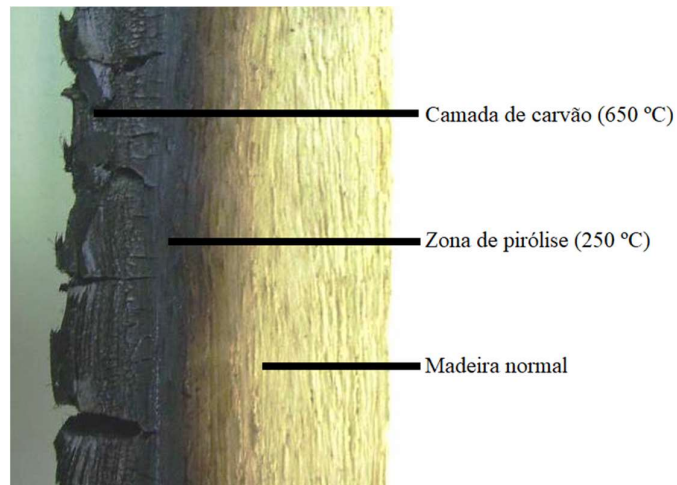


Figura 15: Seção carbonizada de madeira, [42].

As alterações que ocorrem na madeira durante o processo de pirólise podem ser separadas em 4 etapas conforme o aumento de temperatura. Até atingir os 200[°C] a camada superficial de madeira basicamente perde água. Entre 200 [°C] e 280 [°C] a degradação da superfície da madeira avança para o núcleo, dando início à criação de uma camada que se forma lentamente, onde o processo de pirólise ocorre. Após atingir 280 [°C] até 500 [°C] ocorrem as reações exotérmicas com a liberação de gases combustíveis e alcatrão na forma de fumaça, o resíduo gerado nessa etapa é o carvão. Acima de 500 [°C] a carbonização se completa e as reações que acontecem liberam mais gases e alcatrão [43].

Define-se como ignição o processo no qual um material exposto a temperaturas suficientemente altas, juntamente com oxigênio em abundância presente no ambiente entra em combustão. Dessa forma, para que se inicie um incêndio é necessário que existam em simultâneo uma fonte de calor, um combustível e a presença de oxigênio.

A ignição costuma ser classificada em espontânea e forçada. A ignição espontânea é caracterizada por ser um fenômeno químico, no qual há uma lenta geração de calor, a partir da oxidação de materiais combustíveis quando esses são expostos a fontes de calor relativamente baixas, geralmente sem a existência de chamas. A ignição forçada ocorre quando a superfície do material é exposta a uma fonte calor, chamada fator de ignição, como uma chama ou uma faísca.

A carbonização pode ser entendida como um processo químico de combustão incompleta que envolve determinados sólidos quando são expostos ao calor elevado. Como resultado desta reação, o produto gerado é chamado de carvão. A ação do calor atua retirando

o oxigênio e o hidrogênio do sólido e assim a matéria restante será constituída principalmente de carbono [44].

Durante a exposição ao fogo a madeira é considerada um material inflamável e combustível, entretanto, durante a exposição uma camada de carbonização se forma nas superfícies externas do elemento e protege o interior do elemento devido as características de isolamento térmico que o carvão gerado apresenta após a queima da madeira. Portanto, a seção residual de madeira vai reduzindo lentamente durante a exposição, fazendo com que a capacidade estrutural sofra uma diminuição progressiva ao longo do tempo [45].

A taxa de carbonização tanto de madeira macia quanto de madeiras duras quando expostas a curvas de incêndio padrão foram estudadas em vários países. Todas essas investigações mostram que a massa volúmica da madeira é o principal fator que influencia sobre essa característica. Outros fatores como a umidade da madeira também influenciam a taxa de carbonização [45].

A taxa de carbonização é um valor dimensional, para a avaliação da resistência ao fogo e sua quantificação é de extrema importância. Geralmente é expressa em [mm/min] e sua determinação é feita por modelos empíricos com ensaios experimentais e/ou modelos numéricos. A carbonização é buscada principalmente para descobrir as seções residuais dos elementos estruturais de madeira.

3.2 Curva de incêndio natural

Para que ocorra um incêndio é necessário que existam em simultâneo uma fonte de calor, um combustível e um comburente (oxigênio). O início do incêndio dá-se quando a mistura combustível e oxigênio está suficientemente quente para que ocorra uma combustão [46]. Após o início do incêndio os mecanismos de transferência de calor começam a gerar os fluxos de calor para o ambiente e elementos próximos.

A curva de incêndio natural é usada afim de descrever o comportamento natural do fogo em uma situação de incêndio. O incêndio identifica-se como sendo uma combustão sem controle no espaço e no tempo, e necessita de condições específicas para se desenvolver, como a fonte de calor, o material combustível e o oxigênio [47].

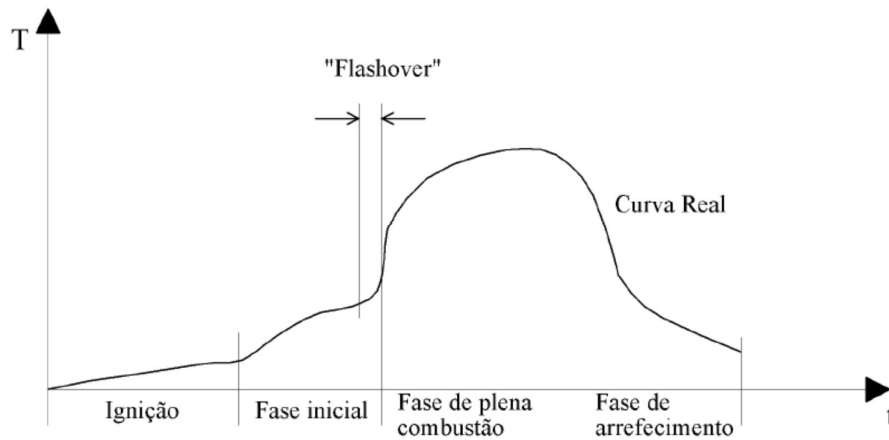


Figura 16: Fases de um incêndio natural [48].

O incêndio se inicia pela ignição de um material ao atingir a temperatura de combustão. Quando um nível suficiente de radiação é atingido, todos os materiais combustíveis do ambiente entram em ignição gerando uma inflamação generalizada (flashover). Posteriormente a temperatura se eleva rapidamente e o incêndio se propaga. Após ser consumido todo o material combustível não há mais o fornecimento de energia térmica para o ambiente, nessa fase a temperatura decai e o fogo se extingue [43].

3.3 Curva de incêndio padrão ISO 834

De acordo com o Eurocódigo 1-1-2 [26], a temperatura sofre elevação ao longo do tempo ao qual um elemento é exposto. A curva de incêndio padrão ISO 834 [49] fornece a temperatura ao longo do tempo, e essa temperatura é dada de acordo com a seguinte equação:

$$T = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (9)$$

Onde T é a temperatura dos gases no interior do compartimento de incêndio [°C], T_0 é a temperatura inicial, que de acordo com Eurocódigo 1-1-2, é tomado igual a 20 [°C] e t é o tempo em minutos desde o início do incêndio.

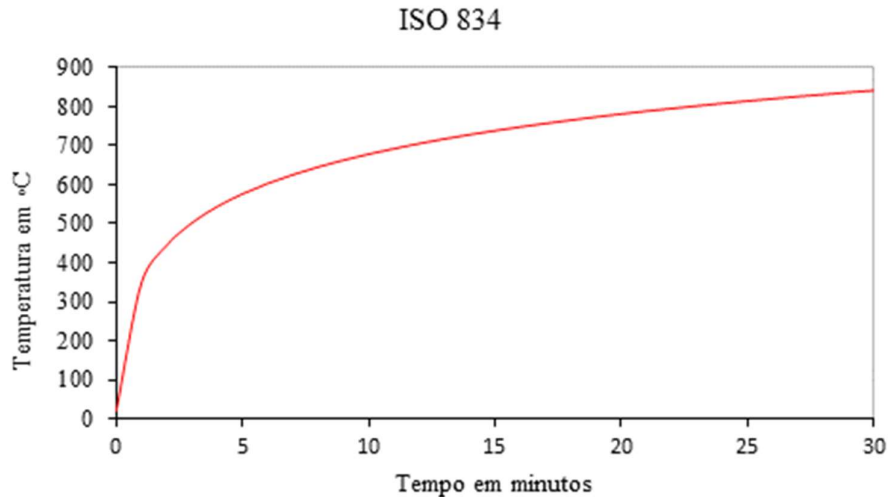


Figura 17: ISO 834.

A Figura 17 apresenta graficamente a evolução da temperatura ao longo do tempo até 30 minutos, que é o tempo máximo de resistência abordado nesse trabalho. A fase inicial é marcada pelo aumento rápido de temperatura seguida de um aumento lento, atingindo ao final de 30 minutos a temperatura de aproximadamente 842 [°C]. O tempo de exposição à curva padrão de tempo-temperatura supostamente tem o mesmo efeito de aquecimento que um incêndio real.

3.4 Transferência de calor

Sempre que existir diferenças de temperatura em um ou vários meios haverá transferência de calor. Essa por sua vez, pode ser definida como uma energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço [50]. Esse fluxo de calor pode acontecer de 3 formas diferentes sendo elas condução, convecção e radiação térmica, que podem ocorrer ao mesmo tempo ou separadas.

3.4.1 Condução

A condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de um elemento/meio devido às interações entre partículas [50]. O calor sempre é transferido do elemento/meio de maior temperatura para o de menor temperatura com o objetivo de igualar as temperaturas dos elementos ou meios que podem ser sólidos, líquidos ou gasosos.

A quantidade de calor que ocorre durante o fluxo pode ser quantificada através de uma equação que permite calcular a quantidade de energia transferida por unidade de tempo. Essa equação foi obtida a partir de observações experimentais e é denominada Lei de Fourier.

$$q'' = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (10)$$

O fluxo de calor q'' é a taxa de transferência de calor na direção perpendicular à direção da transferência e é proporcional ao gradiente de temperatura. O parâmetro λ é uma propriedade de transporte denominado condutividade térmica e varia de acordo com o material.

A equação apresentada acima descreve o fluxo de calor apenas em uma direção, contudo o calor transita em mais direções, para determinar o fluxo com características tridimensionais pode-se usar do operador vetorial gradiente “ ∇ ” que confere características tridimensionais e $T(x,y,z)$ representa o campo de temperaturas em coordenadas cartesianas. Dessa forma a equação pode ser expressa nos seguintes termos:

$$q'' = -\lambda \nabla T = -\lambda \left(i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (11)$$

3.4.2 Convecção

De forma simples, a transferência de calor por convecção pode ser entendida como a transferência de calor de um local para outro pelo movimento de fluídos. Ela ocorre por dois mecanismos. A difusão que é o movimento molecular aleatório, a energia também é transferida pelo movimento global do fluído a qual é chamado de advecção. O interesse maior é na transferência de calor por convecção que ocorre devido o contato entre um fluído em movimento e uma superfície a uma certa temperatura que seja diferente da temperatura do fluído, [50].

Quando ocorre o escoamento de um fluído sobre uma superfície sólida, o fluído imediatamente em contato com a parede adere à mesma. Isso ocorre devido os efeitos que a viscosidade do fluído gera na região próxima à superfície originando a camada limite.

A convecção pode ser classificada de acordo com a natureza em que o escoamento do fluído acontece. Denomina-se convecção forçada quando o escoamento é causado por meios

externos, tais como um ventilador, bombas mecânicas ou ventos atmosféricos. Por outro lado, quando o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo, que são originadas a partir de diferenças causadas por variações de temperatura no fluido, é dita convecção livre.

A transferência de calor por convecção é descrita como a transferência de energia que ocorre internamente em um fluido devido aos efeitos combinados de condução e do escoamento global ou macroscópico do fluido. Tipicamente, a energia que está sendo transferida é a energia sensível, ou energia térmica interna, do fluido.

A equação que expressa o fluxo de calor para transferência de calor por convecção independe da natureza do processo é obtida na forma seguinte:

$$q'' = h_c(T_s - T_\infty) \quad (12)$$

Onde q'' é o fluxo de calor por convecção que é proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície, T_s , e do fluido, T_∞ . Essa expressão é conhecida como a lei do resfriamento de Newton, e o parâmetro h_c é conhecido como coeficiente de transferência de calor por convecção. Qualquer estudo de convecção é baseado na determinação desse parâmetro que depende das condições existentes na camada limite e essas são influenciadas pela geometria da superfície, natureza do escoamento do fluido, laminar ou turbulento, e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transportes do fluido [50].

3.4.3 Radiação

A radiação nada mais é que a emissão da energia interna do objeto [51]. A transferência de calor por radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma certa temperatura maior que o zero Kelvin. Ela não é dependente da forma da matéria, pois a emissão pode ser atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria. Para a condução e convecção é obrigatória a presença de um meio material para que ocorra transferência de calor, ao contrário desses, na radiação essa condicionante não é obrigatória, visto que a radiação é mais eficiente no vácuo e a energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas [50].

A radiação que é emitida por uma superfície tem sua origem na energia térmica da matéria delimitada pela superfície, essa energia é liberada por uma taxa por unidade de área e é conhecida como poder emissivo da superfície comumente representado pela letra E . A lei de

Stefan-Boltzmann quantifica o poder emissivo de um corpo e diz que existe um limite superior, que é dado por:

$$E = \sigma T_s^4 \quad (13)$$

Onde T_s refere-se a temperatura absoluta em graus Kelvin da superfície e σ é a constante de Stefan-Boltzmann que assume valor igual a $5,67 \times 10^{-8} [W/m^2K^4]$. Essa equação refere-se ao corpo negro que possui capacidade emitir sua energia total o qual é definido como corpo ideal. Entretanto, para os corpos reais a capacidade de emissão é sempre menor quando comparadas ao corpo negro, essa diminuição depende das propriedades físicas, químicas e do arranjo da microestrutura de cada material. Dessa forma a emissividade de um material real é dada por:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (14)$$

Onde ε é uma propriedade radiante da superfície conhecida por emissividade. A emissividade de uma superfície representa a razão entre a radiação emitida pela superfície em uma determinada temperatura e a radiação emitida por um corpo negro na mesma temperatura, [51]. A emissividade tem uma variação predefinida na faixa $0 \leq \varepsilon \leq 1$, essa propriedade fornece uma medida da eficiência na qual uma superfície emite energia quando comparada a emissividade de um corpo negro.

A energia que é emitida durante a radiação de um corpo incide sobre a superfície de outro corpo que se encontra próximo. A esta energia dá-se o nome de Irradiação (G). No entanto, parte da energia que incide sobre o corpo não é absorvida, e sim refletida de volta para o ambiente. A percentagem de energia radiante que pode ser absorvida pela superfície de um corpo é determinada de acordo com a sua absorvidade. A absorvidade (α) é uma propriedade radiante da superfície. Sendo assim, a taxa de radiação que é absorvida pelo corpo (G_{abs}) é expressa por:

$$G_{abs} = \alpha G \quad (15)$$

Onde $0 \leq \alpha \leq 1$. Se α for menor que 1 e a superfície for opaca, partes da irradiação são refletidas de volta ao ambiente.

Nos casos reais, a emissividade e a absorvidade possuem valores diferentes. No entanto é usual considerar essas propriedades com valores similares em aplicações de engenharia, são as chamadas superfícies cinzas, [50]. Para casos onde admite-se que a emissividade e a absorvidade assumem valores iguais, a taxa líquida de transferência de calor por radiação saindo da superfície, expressa por unidade de área da superfície é dada por:

$$q_{rad}'' = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (16)$$

Onde T_{viz} é a temperatura da vizinhança [K]. Essa expressão fornece a diferença entre a energia térmica que é liberada devido à radiação que é emitida e a que é ganha devido à absorção de radiação.

Em muitas aplicações de engenharia é conveniente quantificar a taxa líquida de calor por radiação, isso é possível através da utilização de um coeficiente de transferência de calor por radiação h_r , obtendo assim a seguinte expressão:

$$q_{rad} = h_r(T_s - T_{viz}) \quad (17)$$

Onde A corresponde a área [m^2] em que a troca de calor ocorre e h_r é determinado na seguinte expressão:

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_s - T_{viz})(T_s^2 + T_{viz}^2) \quad (18)$$

Onde T_s é a temperatura na superfície.

3.4.4 Convecção e radiação simultâneas

Os mecanismos de transferência de calor podem ocorrer de forma separadas ou simultâneas. Nas situações em que se faz importante considerar todos os mecanismos de transferência de calor é importante levar em consideração o efeito que esses mecanismos causam quando ocorrem de forma combinada.

De acordo com o Eurocódigo 1-1-2 [26], em superfícies expostas ao fogo o fluxo de calor líquido pode ser determinado considerando a existência do fluxo de calor por convecção e radiação através da seguinte expressão:

$$q_{cr}'' = q_c'' + q_r'' = h_c(T_s - T_\infty) + h_r(T_s - T_{viz}) \quad (19)$$

Onde q_{cr}'' é o fluxo de calor efetivo dos mecanismos combinados, q_c'' é o fluxo líquido de calor por convecção e q_r'' é o fluxo líquido de calor por radiação.

4. PROJETO DA LIGAÇÃO W-S-W PELO MÉTODO SIMPLIFICADO

Na realização deste trabalho optou-se pela utilização de madeira laminada colada para o desenvolvimento da ligação de madeira-aço-madeira (W-S-W). As placas de madeira são da classe GL28h e será utilizada uma espécie de madeira semelhante denominada “yellow birch”, para a obtenção das propriedades ortotrópicas necessárias para o desenvolvimento do modelo numérico.

O método simplificado baseia-se nos Eurocódigos, e faz uso das equações analíticas apresentadas para o projeto das ligações em temperatura ambiente, tomando em conta as penalizações nas propriedades de resistência do material e capacidade de carga devido ao efeito da duração do carregamento e a humidade contida na madeira, considerando também as variações que podem ocorrer nas propriedades dos materiais.

Para o projeto em situação de incêndio, as equações analíticas descrevem as variações nas propriedades dos materiais devido ao aquecimento e apresentam o valor do fator parcial de segurança ao fogo para a madeira juntamente com o fator de modificação para o fogo.

4.1 Temperatura ambiente

Uma ligação deve ser projetada respeitando as regras de dimensionamento estabelecidas pelas normas vigentes, pois estas estabelecem os critérios de verificação para garantir a estabilidade e segurança da estrutura. Para o cálculo da ligação foi tomado por referência o Eurocódigo 5-1-1 [1] e a norma DIN 6325 [52].

De acordo com o Eurocódigo [53] uma estrutura deve ser projetada e executada de forma que, durante sua vida útil, tenha graus de confiabilidade apropriados e de maneira econômica, de modo a sustentar as ações e influências que possam ocorrer durante a execução e uso.

Desde 1993, a norma Europeia para Projeto de Estruturas de Madeira, Eurocódigo 5-1-1 [1] baseia-se na teoria rígido-plástico de Johansen (European Yield Model) [3]. Quando o carregamento imposto pelas ações atua na ligação composta por ligadores metálicos, esta pode falhar pela flexão do ligador e/ou esmagamento da madeira, classificadas com uma ruptura dúctil, ou falhar de modo frágil por ruptura na madeira. As regras para o dimensionamento apresentadas pelo Eurocódigo 5-1-1 afirmam que a falha para esse tipo de ligação ocorre por ruptura dúctil.

4.1.1 Projeto da ligação aço-madeira com cavilhas em duplo corte

O projeto de uma ligação aço-madeira com cavilhas envolve um grande número de conceitos e teorias que garantem que as condições de resistência e rigidez sejam satisfeitas perante a estabilidade e os estados limites.

Durante a concepção do projeto da ligação, a disposição e o tamanho dos ligadores, os espaçamentos, as distâncias até às bordas e até às extremidades, devem ser escolhidas de modo que a resistência esperada e a rigidez possam ser obtidas. O Eurocódigo 5-1-1 [1] conduz os procedimentos apropriados para o dimensionamento das ligações conforme é apresentado a seguir.

De acordo com o Eurocódigo 5-1-1, a máxima tensão de tração na direção paralela às fibras nos elementos de madeira deve obedecer a seguinte equação:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (20)$$

Onde $\sigma_{t,0,d}$ é a tensão de tração solicitante de projeto na direção paralela às fibras e $f_{t,0,d}$ é a tensão resistente de projeto paralela às fibras da madeira.

A equação para o cálculo da tensão de tração solicitante de cálculo é dada por:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{E_d}{A_s} \quad (21)$$

Onde E_d é a força solicitante de projeto aplicada no membro de madeira e A_s é a área da seção transversal de madeira da ligação W-S-W.

A tensão resistente de projeto paralela às fibras é obtida a partir da seguinte equação:

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \times f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (22)$$

Onde k_{mod} é o fator de modificação tomando em conta o efeito do carregamento ao longo do tempo e o teor de humidade, $f_{t,0,k}$ é a tensão de tração resistente característica paralela às fibras da madeira e γ_M é o fator de segurança parcial.

As tabelas 2.3 e 3.1 do Eurocódigo 5-1-1 [1] apresentam os valores de γ_M para cada material, para combinação fundamental e acidental e valores de k_{mod} para cada material, norma, classe de serviço e duração do carregamento.

Para determinação da capacidade de carga lateral de ligações com cavilhas de metal devem ser consideradas as contribuições da tensão de cedência, a resistência ao esmagamento e a resistência ao arranque do ligador, além de verificar também a resistência da placa de metal. De acordo com o Eurocódigo 5-1-1 [1], a determinação da capacidade de carga característica por plano de corte de cada ligador, para ligadores em duplo corte, deve ser tomado como o valor mínimo encontrado nas seguintes equações:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & (a) \\ f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4 M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (b) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (c) \end{cases} \quad (23)$$

Onde $F_{v,Rk}$ é a capacidade de carga característica por plano de corte e por ligador, t_1 é a menor espessura dos elementos laterais da madeira em profundidade de penetração, $f_{h,1,k}$ é a resistência ao esmagamento característica no membro de madeira, d é o diâmetro do ligador, $M_{y,Rk}$ é o momento de cedência plástico característico do ligador, $F_{ax,Rk}$ é a capacidade de resistência ao arranque característica do ligador usado no cálculo da contribuição na capacidade de carga do efeito de corda, entretanto, e de acordo com o Eurocódigo 5-1-1, [1] para cavilhas $F_{ax,Rk}$ é tomado igual a 0%. A figura a seguir apresenta os modos de falha contemplados pela equação (23).

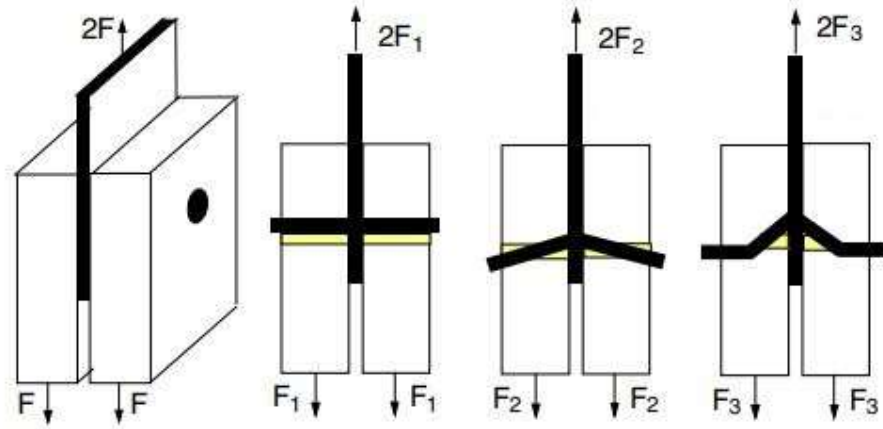


Figura 18: Modos de falha para conexões de aço-madeira em duplo plano de corte, adaptado de [54].

A resistência ao esmagamento da madeira para ligações com cavilhas deve ser calculada de forma idêntica às ligações aparafusadas conforme as recomendações apresentadas no Eurocódigo 5-1-1 [1]. O cálculo para parafusos até 30 mm de diâmetro levando em consideração os valores característicos da resistência ao esmagamento na madeira e LVL, juntamente com a existência de um ângulo α em relação às fibras da madeira, deve ser realizado seguindo as equações:

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01 d)\rho_k \quad (24)$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (25)$$

Onde $f_{h,0,k}$ é a resistência ao esmagamento característica paralela às fibras [N/mm^2], ρ_k é a massa volúmica característica da madeira [kg/m^3], α é o ângulo do carregamento em relação às fibras, d é o diâmetro do parafuso [mm] e k_{90} é definido de acordo com a seguinte equação:

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015 d & \text{para madeira macia} \\ 1,30 + 0,015 d & \text{para LVL} \\ 0,90 + 0,015 d & \text{para madeira dura} \end{cases} \quad (26)$$

Nos parafusos, o valor característico do momento de cedência plástica é obtido por:

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6} \quad (27)$$

Onde $M_{y,Rk}$ é o valor característico do momento de cedência plástica [N.mm], $f_{u,k}$ é a tensão de cedência característica do aço [N/mm²] e d é o diâmetro do parafuso em [mm].

O resultado da capacidade de carga característica por plano de corte por ligador obtido na equação (23) deve ser multiplicado pelo fator de modificação e dividido pelo fator de segurança parcial. Dessa forma obtém-se $F_{v,Rd}$ que é a capacidade de carga de projeto por plano de corte por ligador.

$$F_{v,Rd} = \frac{k_{mod} F_{v,Rk}}{\gamma_M} \quad (28)$$

O próximo passo é determinar o número de cavilhas por ligação. Sabendo o carregamento de projeto que essa ligação estará submetida, E_d , o número de cavilhas pode ser obtido por:

$$N^o = \frac{E_d}{F_{v,Rd}} \quad (29)$$

Após encontrar o número de ligadores e determinar a configuração, recomenda-se determinar o número efetivo de ligadores por linha paralela à fibra. O número efetivo de ligadores é dado por:

$$n_{ef} = \min \left\{ n, n^{0,9} \times \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \right\} \quad (30)$$

Onde a_1 é o espaçamento entre os ligadores na direção das fibras, d é o diâmetro e n é o número de ligadores em linha.

A capacidade de carga característica efetiva da linha de ligadores paralelos à fibra é dada por:

$$F_{v,ef,Rk} = n_{ef} F_{v,Rk} \quad (31)$$

Onde $F_{v,ef,Rk}$ é a capacidade carga característica efetiva de uma linha de ligadores paralela à fibra, n_{ef} é o número efetivo de ligadores na linha e $F_{v,Rk}$ é a capacidade de carga característica de cada ligador.

De acordo com o Eurocódigo 5-1-1 [1], o diâmetro mínimo da cavilha deve ser 6 [mm] com tolerância de ∓ 1 [mm] e o diâmetro do furo no membro de madeira não deve ser maior que o diâmetro da cavilha. O espaçamento mínimo entre as cavilhas, bordas e a extremidade da ligação são apresentados de forma ilustrativa na Figura 19.

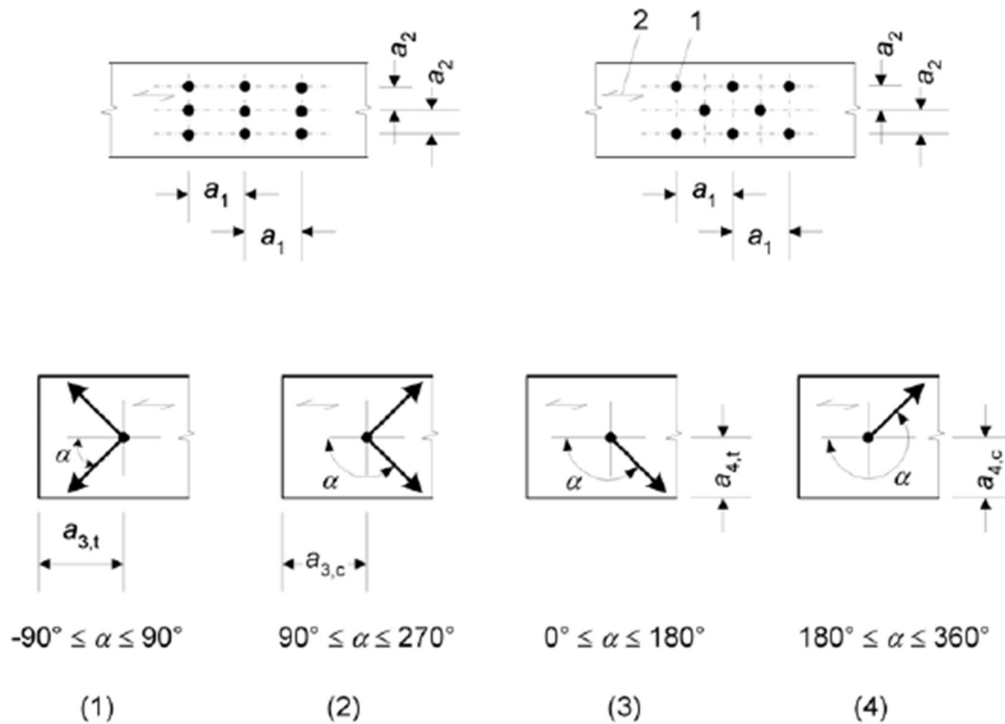


Figura 19: Espaçamentos e distâncias de bordas e finais para cavilhas [1].

Os espaçamentos mínimos devem ser calculados conforme Tabela 11, sendo importante atentar-se ao diâmetro do ligador e adotar o ângulo do carregamento em relação à direção das fibras correto.

Tabela 11: Espaçamentos e distâncias mínimas para cavilhas, [1].

Espaçamento e borda/ distância até o final	Ângulo	Espaçamento mínimo e de borda/extremidade
a_1 (Paralelo à fibra)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + 2 \cos\alpha)d$
a_2	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

(Perpendicular à fibra)		
$a_{3,t}$ (extremidade em carga)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$máx(7 d; 80 \text{ mm})$
$a_{3,c}$ (extremidade sem carga)	$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ $150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$ $210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$máx[(a_{3,t} \text{sen } \alpha)d; 3d]$ $3d$ $máx[(a_{3,t} \text{sen } \alpha)d; 3d]$
$a_{4,t}$ (lateral em carga)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$máx[(2 + 2 \text{ sin } \alpha)d; 3d]$
$a_{4,t}$ (lateral sem carga)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

A figura a seguir ilustra esquematicamente uma ligação típica W-S-W, onde é possível identificar as distâncias relevantes durante a construção.

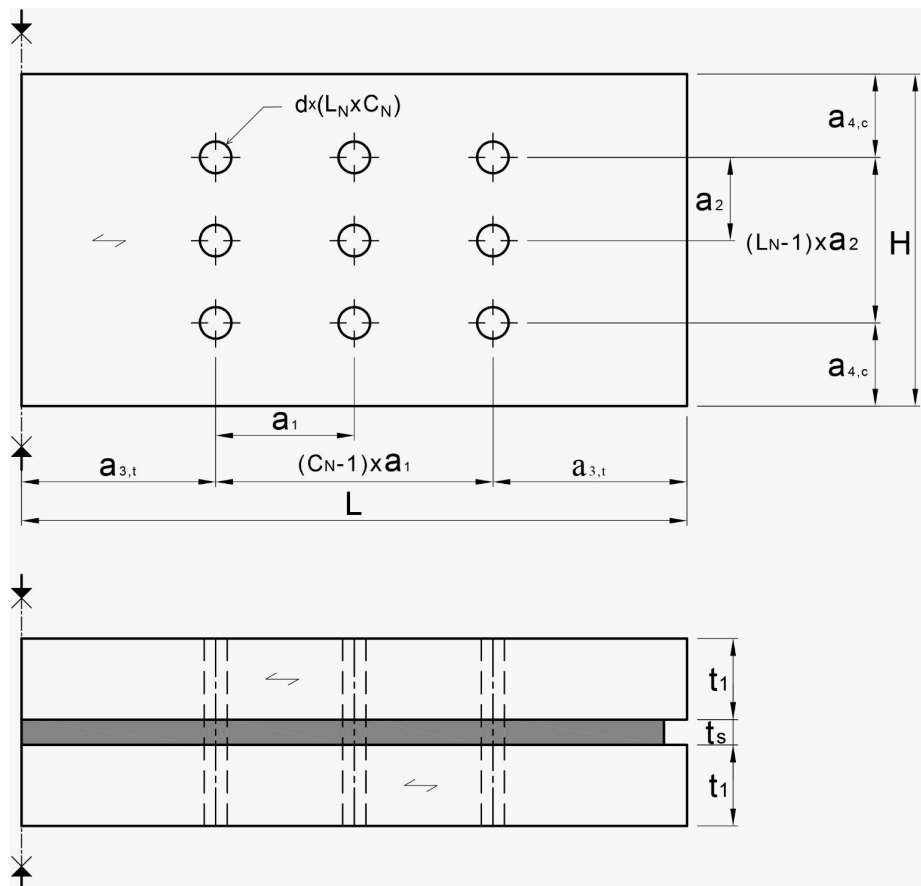


Figura 20: Representação esquemática da ligação W-S-W.

A representação contempla apenas metade da ligação devido ao plano de simetria existente, onde as duas partes laterais representam a madeira e a parte central, na cor cinza, representa a placa de aço.

4.1.2 Ligações projetadas

Neste trabalho, 30 ligações W-S-W foram projetadas com o objetivo de analisar a capacidade de carga à temperatura ambiente. Para o dimensionamento, foram adotadas cinco cargas de tração diferentes aplicadas no membro lateral de madeira (10, 20, 30, 40 e 50 kN), duas espessuras de chapa de madeira diferentes (25 e 50 mm) e três diâmetros de cavilhas (8, 10 e 12 mm). A placa de aço central tem a mesma dimensão em todas as ligações estudadas com uma espessura igual a 6 [mm].

Uma planilha em Excel foi desenvolvida para realização dos cálculos de todas as ligações e determinar os parâmetros de projeto para cada modelo. A Tabela 12 apresenta 10 das ligações projetadas, pois essas serão analisadas pelo método dos elementos finitos, o Anexo A apresenta todas as ligações projetadas pelos cálculos analíticos. A planilha foi desenvolvida levando em conta as regras apresentadas no Eurocódigo 5-1-1 [1] facilitando os cálculos analíticos para todas as ligações. Considerando o número calculado de cavilhas necessário, é possível escolher uma configuração (LN e CN) entre os ligadores respeitando os espaçamentos mínimos impostos pela norma.

Tabela 12: Ligações W-S-W com diferentes espessuras, diâmetro de cavilha e carregamento aplicado GL28h.

Ligação	Ed kN	t1 mm	d mm	$f_{t,0,k}$ MPa	$F_{v,Rk}$ N	$F_{v,Rd}$ N	n° -	LN -	CN -	a1 mm	a2 mm	a3t mm	a4c mm	L mm	H mm	Seção transversal mm ²
1	10	25	8	19,5	3963,1	2536,4	4	1	4	40	24	80	24	280	48	2400
2		50	12	19,5	9437,0	6039,7	2	1	2	60	36	84	36	228	72	7200
3	20	25	8	19,5	3963,1	2536,4	8	2	4	40	24	80	24	280	72	3600
4		50	12	19,5	9437,0	6039,7	4	1	4	60	36	84	36	348	72	7200
5	30	25	8	19,5	3963,1	2536,4	12	3	4	40	24	80	24	280	96	4800
6		50	12	19,5	9437,0	6039,7	6	2	3	60	36	84	36	288	108	10800
7	40	25	8	19,5	3963,1	2536,4	16	4	4	40	24	80	24	280	120	6000
8		50	12	19,5	9437,0	6039,7	8	2	4	60	36	84	36	348	108	10800
9	50	25	8	19,5	3963,0	2536,3	20	5	4	40	24	80	24	280	144	7200
10		50	12	19,5	9437,0	6039,7	9	1	9	60	36	84	36	648	72	7200

O número de cavilhas adotado, n°, é o mínimo necessário para atender às condições de que a capacidade de carga da ligação necessita ser maior que as ações de projeto e, a configuração deve apresentar uma uniformidade, ou seja, ter o mesmo número de ligadores nas linhas e colunas se houver mais de uma linha e/ou mais de uma coluna de ligadores.

O número efetivo de ligadores não foi considerado nesse trabalho, pois a regras apresentadas para os cálculos, citadas anteriormente, são para ligações com parafusos que podem ser utilizadas para cavilhas, dessa forma, a sua utilização pode gerar dúvidas quanto aos resultados, além de alguns trabalhos desenvolvidos afirmarem que essa equação é muito conservadora.

4.2 Elevadas temperaturas

Após o dimensionamento da ligação para ações em temperatura ambiente é importante verificar a resistência perante à situação acidental de ocorrência de incêndio. Caso as ligações não possuam uma resistência mínima, de acordo com o Eurocódigo 5-1-2 [33], é necessário tomar novas medidas em relação ao projeto de modo a atingir o tempo de resistência à exposição requerido.

A verificação da resistência mecânica em elevadas temperaturas considera uma penalização da resistência da ligação em temperatura ambiente, isso é feito aplicando um fator parcial de segurança ao fogo e um coeficiente de modificação ao fogo nas propriedades de resistência e rigidez dos materiais conforme as seguintes equações:

$$f_{d,fi} = \frac{k_{mod,fi} \times f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (32)$$

$$S_{d,fi} = \frac{k_{mod,fi} \times S_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (33)$$

Onde $f_{d,fi}$ é a resistência de projeto ao fogo, $S_{d,fi}$ são as propriedades de rigidez ao fogo, f_{20} é a fração de 20% de uma propriedade de resistência à temperatura ambiente, S_{20} é uma fração de 20% de uma propriedade de rigidez (módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de elasticidade transversal) em temperatura ambiente, $k_{mod,fi}$ é o fator de modificação para o fogo e $\gamma_{M,fi}$ é o fator parcial de segurança da madeira para o fogo.

A resistência mecânica quanto à capacidade de carga da ligação deve ser calculada pela seguinte equação:

$$R_{d,t,fi} = \eta \frac{R_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (34)$$

Onde $R_{d,t,fi}$ é o valor da resistência mecânica de projeto em situação de incêndio num tempo t , R_{20} é uma fração de 20% do valor da resistência mecânica em temperatura ambiente sem o efeito da duração do carregamento e humidade, η é o fator de conversão e $\gamma_{M,fi}$ é o fator parcial de segurança para madeira ao fogo.

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

$$f_{20} = k_{fi} f_k \quad (35)$$

$$S_{20} = k_{fi} S_{05} \quad (36)$$

Onde k_{fi} é um valor tabelado dado na tabela 2.1 do Eurocódigo 5-1-2 [33] que depende da madeira e tipo da ligação, f_k é a resistência característica e S_{05} é uma fração de 5% da propriedade de rigidez em temperatura ambiente.

A fração de 20 % da resistência mecânica, R_{20} , de uma ligação deve ser calculada de acordo com:

$$R_{20} = k_{fi} R_k \quad (37)$$

Onde R_k é resistência mecânica característica de uma ligação à temperatura ambiente sem o efeito da duração do carregamento e humidade ($k_{mod} = 1$).

O método de verificação geral apresentado no Eurocódigo consiste em satisfazer a seguinte equação:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad (38)$$

Onde $E_{d,fi}$ são os efeitos das ações de projeto em situação de incêndio, determinado de acordo com o Eurocódigo 1-1-2 [26] considerando os efeitos de expansões térmicas e deformações. De modo simples, essa equação determina que as ações devem ser menores ou iguais à resistência de projeto ao fogo correspondente.

O efeito das ações de projeto em situação de incêndio pode ser obtido através de uma simplificação, tomando por base os valores das análises em temperatura ambiente através da seguinte equação:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d \quad (39)$$

Onde E_d é o valor de projeto do efeito das ações para a temperatura ambiente, usando a combinação fundamental de ações de acordo com Eurocódigo [53] e η_{fi} é o fator de redução para a carga de projeto ao fogo. Como uma simplificação para o cálculo de η_{fi} , admite-se um valor recomendado de 0,6 exceto para cargas da categoria E (áreas susceptíveis de acumular bens, incluindo áreas de acesso).

4.2.1 Profundidade de carbonização

A carbonização da madeira tem início quando o material é exposto a temperaturas superiores à 300 [°C] por determinado período de tempo. A carbonização introduz a formação de uma camada de carbono sobre a superfície da madeira, resultante da decomposição do material.

A carbonização deve ser analisada em todas as superfícies de madeira que estão expostas diretamente ao fogo e, quando relevante, para as superfícies inicialmente protegidas da exposição ao fogo, onde ocorre carbonização da madeira durante o tempo relevante de exposição ao fogo.

O cálculo das propriedades da seção transversal deve ser baseado na profundidade real da carbonização, incluindo o efeito de arredondamentos de cantos. Alternativamente, uma seção transversal ideal sem arredondamentos de cantos pode ser calculada com base na velocidade de carbonização ideal. A Tabela 13 apresenta diferentes velocidades de carbonização para diferentes tipos de madeira e massas volúmicas.

Tabela 13: Velocidade de carbonização [33].

Tipo	Material e massa volúmica	β_0 [mm/min]	β_n [mm/min]
Madeira macia	Madeira laminada colada, $\rho \geq 290$ [kg/m ³]	0,65	0,7
	Madeira maciça, $\rho \geq 290$ [kg/m ³]	0,65	0,8
Madeira Dura	Madeira maciça ou laminada colada, $\rho \geq 290$ [kg/m ³]	0,65	0,70
	Madeira maciça ou laminada colada, $\rho \geq 450$ [kg/m ³]	0,50	0,55

Em superfícies sem nenhum material de proteção, a taxa de carbonização para carbonização unidimensional, ver Figura 21, deve ser tomada como constante com o tempo. A profundidade carbonizada de projeto deve ser calculada como:

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad (40)$$

Onde $d_{char,0}$ é a profundidade de carbonização de projeto para carbonização unidimensional, β_0 é a taxa de carbonização unidimensional de projeto sob exposição ao fogo padrão e t é o tempo de exposição ao fogo.

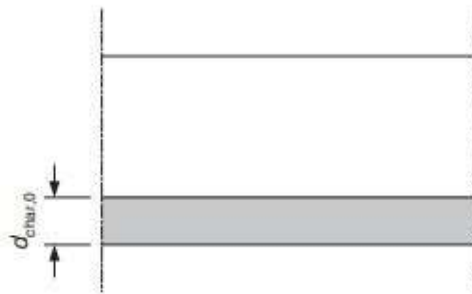


Figura 21: Carbonização unidimensional com exposição ao fogo de um lado [33].

A taxa de carbonização ideal, cuja magnitude inclui o efeito de arredondamentos e fissuras nos cantos, ver Figura 22, deve ser considerada constante com o tempo. A profundidade de carbonização ideal de projeto deve ser calculada como:

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (41)$$

Onde $d_{char,n}$ é a profundidade de carbonização ideal de projeto considerando o efeito dos arredondamentos dos cantos e β_n é a taxa de carbonização ideal de projeto cuja magnitude inclui o efeito de arredondamentos de canto e fissuras.

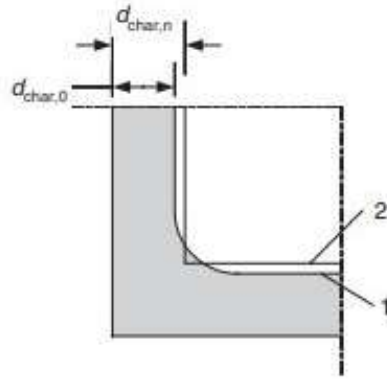


Figura 22: Profundidade de carbonização unidimensional e carbonização ideal. (1) Seção transversal residual (forma real), (2) Seção transversal retangular equivalente, adaptado de [33] [55].

Para simplificar, o mesmo valor da taxa de carbonização ideal é usado para todos os lados de uma seção transversal, embora às vezes seria mais preciso usar uma taxa de carbonização ideal maior nos lados estreitos de seções transversais estreitas [55]. Foi mostrado por [56] que as taxas de carbonização ideal apresentam boa concordância com aquelas calculadas para a forma real da seção transversal residual.

4.2.2 Método de redução de carga

Consiste na redução da capacidade resistente da ligação, através do cálculo de um fator η que depende do tempo de resistência ao fogo, $t_{d,fi}$, e de um parâmetro k , uma constante do ligador. Esse método aplica-se a ligações entre membros sob exposição ao fogo padrão.

Esse método limita a resistência ao fogo de ligações não protegidas em um tempo máximo de 30 minutos, que é o máximo período de validade do parâmetro k . Para as ligações protegidas, a menos que existam indicações contrárias, a resistência máxima é de 60 minutos.

4.2.2.1 Ligações não protegidas

A análise de resistência ao fogo abordada nesse método é feita em duas partes. Na primeira parte, após a penalização da resistência da ligação e das ações, verifica se a ligação apresenta resistência maior do que as ações satisfazendo a condição da equação (38). Caso a condição não se verifique, é necessário calcular o aumento de resistência através de técnicas como o aumento do número de ligadores, aumento do diâmetro dos ligadores ou aumento da espessura dos membros de madeira. A segunda parte consiste em determinar o tempo de

resistência ao fogo da ligação. A seguir apresentam-se as equações analíticas usadas para realizar as verificações e os respectivos fatores que interferem e devem ser considerados no cálculo.

De acordo com o Eurocódigo 5-1-2, para que o método tenha validade a espessura da placa lateral de madeira, t_1 em [mm], deve ser maior ou igual a:

$$t_1 = \max \begin{cases} 50 \\ 50 + 1,25(d - 12) \end{cases} \quad (42)$$

Onde d é o diâmetro da cavilha [mm].

Para a exposição ao fogo padrão, a capacidade de carga característica de uma ligação com ligadores ao corte deve ser calculada com a seguinte equação:

$$F_{v,Rk,fi}^* = \eta F_{v,Rk}^* \quad (43)$$

Com:

$$\eta = e^{-k t_{d,fi}} \quad (44)$$

Onde $F_{v,Rk}^*$ é a capacidade de carga lateral característica da ligação com ligadores ao corte em temperatura ambiente, obtido através da multiplicação da capacidade de carga característica de cada ligador pelo número de ligadores e planos de corte existentes na ligação, η é o fator de conversão, k é um parâmetro de cada ligador dado na tabela 6.3 do Eurocódigo 5-1-2 [33], $t_{d,fi}$ é o período de resistência ao fogo de projeto de ligações não protegidas.

A resistência ao fogo de projeto das ligações não protegidas carregadas pelos efeitos das ações de projeto durante uma situação de incêndio deve ser calculada de acordo com a seguinte equação:

$$t_{d,fi} = -\frac{1}{k} \ln \left(\frac{\eta_{fi} \eta_0 k_{mod} \gamma_{M,fi}}{\gamma_M k_{fi}} \right) \quad (45)$$

Onde k é o parâmetro dado na tabela 6.3 do Eurocódigo 5-1-2 [33] com um período máximo de validade de 30 minutos, η_{fi} é o fator de redução da carga de projeto em situação

de fogo, η_0 é grau de utilização em temperatura ambiente, k_{mod} é o fator de modificação de acordo com o Eurocódigo 5-1-1 [1], γ_M é o fator parcial de segurança para a ligação, k_{fi} é o valor dado na tabela 2.1 do Eurocódigo 5-1-2 [33] e $\gamma_{M,fi}$ é o coeficiente de segurança parcial para a madeira ao fogo.

O valor do grau de utilização em temperatura ambiente é a razão entre o efeito das ações de projeto E_d , e a capacidade de carga de projeto R_d , a utilização de $\eta_0=1$ é uma simplificação conservadora, pois assume que não há superdimensionamento em temperatura ambiente. Entre as 5 ligações analisadas para a resistência ao fogo, esse parâmetro variou de 0,83 a 0,99, assim, para uma uniformização dos cálculos e contemplar todas as ligações foi adotado $\eta_0=1$.

4.2.2.2 Ligações protegidas pelo aumento da espessura da madeira

Para aumentar a resistência ao fogo das ligações o Eurocódigo 5-1-2 [33] apresenta um método alternativo de proteger as superfícies finais e laterais dos membros com um aumento da espessura da madeira, as distâncias finais e laterais podem ser incrementadas por a_{fi} de acordo com a equação (46).

$$a_{fi} = \beta_n k_{flux} (t_{req} - t_{d,fi}) \quad (46)$$

Onde β_n é a velocidade de carbonização de acordo com a Tabela 13, k_{flux} é um coeficiente que leva em conta o aumento do fluxo de calor através do ligador que deve ser tomado igual 1,5 por recomendação do Eurocódigo, t_{req} é o tempo requerido para resistência ao fogo, $t_{d,fi}$ é o tempo de resistência ao fogo da ligação não protegida que deve ser calculado de acordo com a equação (45). A figura a seguir representa o incremento de madeira nos membros da ligação.

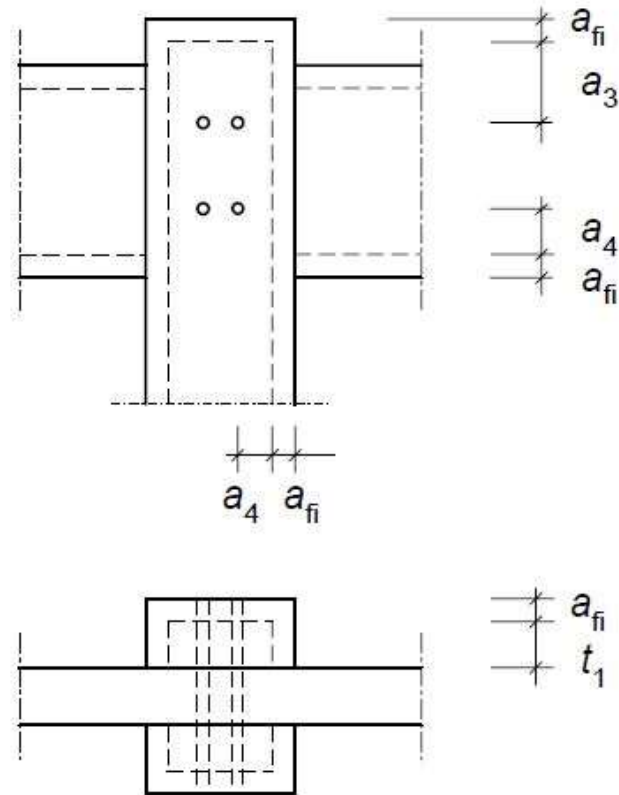


Figura 23: Espessura extra e incremento nas distâncias finais e laterais das ligações protegidas [33].

O período de resistência máxima desse incremento é de 30 minutos, para resistências maiores as distâncias finais devem ser incrementadas por $2 a_{fi}$.

4.2.3 Ligações projetadas

A análise térmica contempla as ligações da Tabela 12 que satisfazem a condição da equação (42), foram utilizadas as equações simplificadas do método analítico apresentado no Eurocódigo 5-1-2 [33]. Foi abordado neste trabalho o método de redução de carga, onde foi avaliado o comportamento em elevadas temperaturas das ligações não protegidas e protegidas por um incremento de madeira. Foram desenvolvidas duas planilhas para calcular os parâmetros pertinentes da análise térmica quando as ligações são expostas ao fogo, sendo uma para as ligações não protegidas e outra para as ligações protegidas. O Anexo A apresenta um total de 15 ligações que foram projetadas ao fogo com cálculos analíticos, nem todas são abordadas durante o desenvolvimento do trabalho, pois não foi possível realizar uma análise

pelo método dos elementos finitos em todas as ligações devido ao tempo necessário para realizar as simulações.

Para as ligações não protegidas é importante descobrir a capacidade de carga lateral de projeto da ligação exposta ao fogo, $F_{v,Rd,fi}^*$, o efeito das ações de projeto ao fogo e por fim, determinar o tempo de resistência ao fogo, $t_{d,fi}$, os valores são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Método de redução de carga para ligações não protegidas.

Ligação	E_d kN	t_1 mm	d mm	H mm	$f_{t,0,k}$ N/mm ²	ρ Kg/m ³	n° cavilhas	$E_{d,fi}$ kN	$t_{d,fi}$ min	$F_{v,Rk,fi}^*$ N	$F_{v,Rd,fi}^*$ N
1	10	50	12	72	19,5	410	2	6	12,90	12604,6	10083,7
2	20	50	12	72	19,5	410	4	12	12,90	25209,2	20167,3
3	30	50	12	108	19,5	410	6	18	12,90	37813,8	30251,0
4	40	50	12	108	19,5	410	8	24	12,90	50418,4	40334,7
5	50	50	12	72	19,5	410	9	30	12,90	56720,6	45376,51

Para o método de redução de carga de ligações protegidas pelo aumento da espessura é importante definir o tempo de resistência à exposição ao fogo pretendido, t_{req} , pois a partir dele podemos determinar o valor do incremento de madeira, a_{fi} , que deverá ser acrescentado nas distâncias finais para que a ligação alcance a resistência desejada.

Para estas ligações o tempo de resistência é de 30 minutos. A Tabela 15 apresenta os valores relevantes, assim como as novas distâncias devido ao incremento da espessura da madeira.

Tabela 15: Método de redução de carga para ligações protegidas pelo aumento da espessura.

Ligação	$E_{d,fi}$ kN	t_1 mm	d mm	H mm	n° cavilhas	β_n mm/min	t_{req} min	a_{fi} mm	t_1^* mm	H* mm	$F_{v,Rk,fi}^*$ N	$F_{v,Rd,fi}^*$ N
1	6	50	12	72	2	0,7	30	18	68	108	15432,3	12345,8
2	12	50	12	72	4	0,7	30	18	68	108	30864,6	24691,6
3	18	50	12	108	6	0,7	30	18	68	144	46296,8	37037,5
4	24	50	12	108	8	0,7	30	18	68	144	61729,1	49383,3
5	30	50	12	72	9	0,7	30	18	68	108	69445,2	55556,2

Com o incremento de madeira, a ligação tem a sua capacidade de carga aumentada levando a um sobre dimensionamento da ligação para a temperatura ambiente, contudo a ligação estará protegida ao fogo.

5. ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DA LIGAÇÃO W-S-W

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é usado largamente nos problemas de engenharia. Cada vez mais os projetos apresentam uma complexidade maior e isso expõem a dificuldade existente na realização de análises ou ensaios de elementos com geometria complexa ou de grandes dimensões. Esse método é capaz de determinar o estado de tensões e deformação de um sólido de geometria qualquer sujeito a atuação de ações externas, também é capaz de determinar as temperaturas de elementos ou materiais expostos ao fogo além das aplicações em outras áreas que são bastante utilizadas.

O conceito básico do Método dos Elementos Finitos (MEF) consiste em subdividir, o domínio do problema ou o elemento em estudo, em subdomínios de dimensões finitas tais que, o conjunto de todos os subdomínios seja igual ao domínio original [57].

A obtenção de resultados pelo método dos elementos finitos para regimes transientes e não lineares apresenta elevada complexidade. Os sistemas computacionais necessários para obtenção dos resultados devem apresentar alto desempenho devido ao grande volume de cálculos que são realizados na solução. As análises mecânicas e térmicas das ligações W-S-W contaram com o auxílio de modelos numéricos realizado no programa de elementos finitos ANSYS® [58], largamente usado em análises estruturais, fluídos, dinâmica, térmica, eletromagnetismo, fratura, fadiga, etc.

5.1 Modelo numérico à temperatura ambiente

O modelo numérico para temperatura ambiente foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a capacidade de carga das ligações, entender as mudanças ocorridas quando a ligação atinge a carga de ruptura e analisar a influência dos ligadores.

5.1.1 Condições de fronteira

As condições de fronteira são considerações importantes em análises mecânicas. Para os sólidos e estruturas as condições de fronteira existentes são o deslocamento (condição essencial) e a força (condição natural).

A condição de fronteira de deslocamento pode ser escrita de forma simples nas fronteiras do deslocamento como:

$$u = \bar{u} \text{ e/ou } v = \bar{v} \text{ e/ou } w = \bar{w} \quad (47)$$

O termo com barra representa o valor prescrito para o componente de deslocamento. Para a maioria das simulações atuais, o deslocamento é usado para descrever o suporte ou restrições no sólido, e, portanto, os valores de deslocamento prescritos são zero na maioria das vezes. Em tais casos, a condição limite é denominada como condição de contorno homogêneo. Caso contrário, elas são condições de contorno não homogêneas.

As condições de fronteira de força podem ser escritas para as forças na fronteira como:

$$n\sigma = \bar{t} \quad (48)$$

Onde n é o cosseno da normal exterior na fronteira que pode ser na direção x, y e z , e pode ser escrito de forma genérica como $n_i(x, y, z)$.

A maioria dos problemas de engenharia que envolvem análise mecânica utilizam as condições de fronteira referente aos deslocamentos e forças para elaboração de modelos numéricos que se aproximem de situações reais. A restrição de deslocamentos em determinadas superfícies são muito usadas em planos de simetria para que a análise de elementos finitos possa contemplar apenas partes do elementos diminuindo assim o volume de cálculos necessários para a solução.

5.1.2 Modelo numérico

A análise de resistência mecânica utiliza um modelo numérico com um elemento denominado SOLID185 que é usado para a modelagem tridimensional de estruturas sólidas. O elemento é definido por oito nós com três graus de liberdade em cada nó (translações nodais nas direções x, y e z) e as propriedades do material são consideradas como ortotrópicas. A geometria e os locais dos nós para este elemento são mostradas na Figura 24.

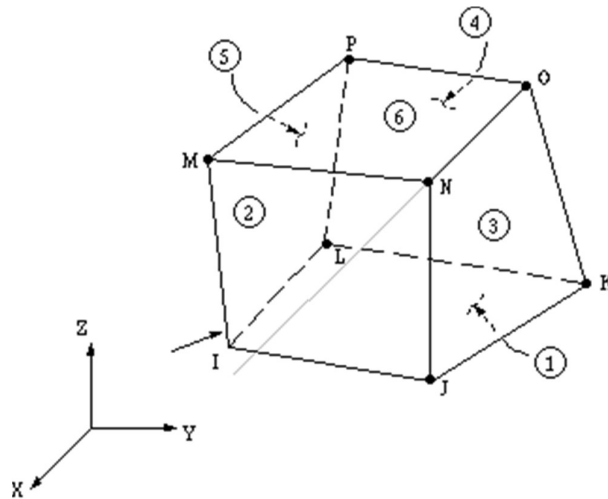


Figura 24: SOLID185 3-D Structural Solid [59].

Nesse elemento as cargas são definidas como sendo de dois tipos: nodal e no elemento. As cargas nodais são definidas nos nós e não estão diretamente relacionadas aos elementos. Essas cargas nodais estão associadas aos graus de liberdade no nó. As cargas dos elementos são cargas de superfície, cargas corporais e cargas de inércia. As cargas de elementos sempre estão associadas a um elemento específico (mesmo que a entrada esteja nos nós).

As cargas de superfície (pressões para elementos estruturais, convecções para elementos térmicos, etc.) podem ser inseridas em formato nodal ou formato de elemento. Por exemplo, o carregamento superficial pode ser aplicado a uma face do elemento ou, por conveniência, aos nós da face de um elemento. A figura a seguir representa o modelo numérico com duas configurações diferentes para a primeira ligação apresentada na Tabela 12.

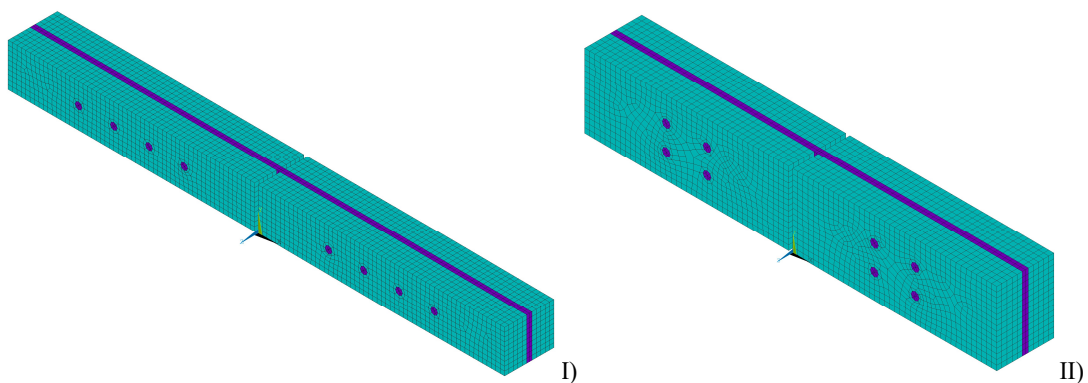


Figura 25: Modelo para a ligação 1 projetada em temperatura ambiente; I) LN=1, CN=4, II) LN=2, CN=2.

No presente trabalho, devido às condições geométricas de simetria e de carregamento da ligação W-S-W, foi reproduzido $\frac{1}{4}$ (um quarto) do modelo para análise MEF, ver Figura 26. As condições de fronteira, simetria, foram introduzidas nos planos simétricos da placa de aço central. Em decorrência da interface de contato entre a placa de aço e a madeira e entre as cavilhas e a madeira, foi considerado um coeficiente de atrito estático igual a 0,3.

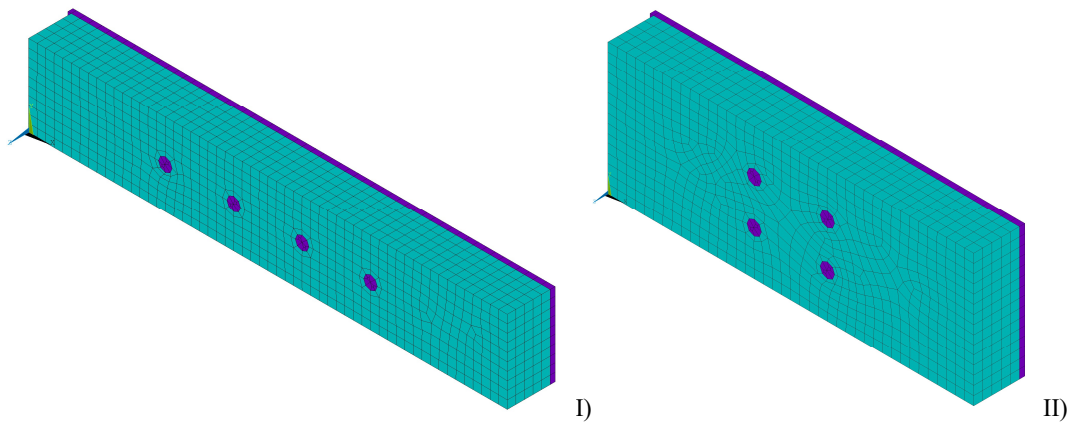


Figura 26: Modelo numérico analisado para a ligação 1. I) LN=1, CN=4, II) LN=2, CN=2.

A análise estrutural foi incremental, onde uma carga de tração foi aplicada e aumentada linearmente no membro lateral de madeira da ligação. O controle de tempo é definido para um intervalo de tempo igual a 10 segundos, o passo de tempo mínimo é igual a 1 e o passo de tempo máximo igual a 10 segundos, com um máximo de 4 iterações de equilíbrio para cada passo de tempo. O método de Newton foi usado como o processo com convergência mais rápida para solução dos problemas. Os critérios de convergência e tolerâncias devem ser cuidadosamente escolhidos para fornecer soluções precisas, no presente estudo será adotado aquele que satisfaça o equilíbrio da solução, usualmente baseado em algum controle de força ou deslocamento. Malhas de diferentes tamanhos foram implementadas até os resultados atingirem um valor satisfatório.

O modelo numérico foi desenvolvido a fim de obter a capacidade de carga de cada ligação e comparar com os resultados dos cálculos do modelo analítico apresentado no Eurocódigo 5-1-1 [1].

5.2 Modelo numérico a elevadas temperaturas

A análise em elevadas temperaturas com MEF é de bastante relevância, os processos de transferência de calor podem ser bastantes complexos e com equações analíticas compostas por diferenciais com solução extremamente difícil. Os campos de temperatura obtidos por modelos numéricos são bastante fiáveis e ajudam a entender como é a evolução de temperatura para os diferentes materiais e geometrias.

5.2.1 Equações da condução de calor e condições de fronteira

A análise térmica permite conhecer a distribuição de temperaturas e compreender os processos de transferência de calor que ocorrem num corpo. A condução de calor é dada por uma equação diferencial que admite algumas condições de fronteira em sua solução. A equação a seguir governa a condução de calor em sólidos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (49)$$

A transferência de calor é influenciada pelas propriedades dos materiais, nessa equação as propriedades são: λ correspondente à condutividade térmica [W/mK], C_p referente ao calor específico [kJ/kgK] e ρ referente a massa específica [kg/m³]. Os termos diferenciais representam as variações do gradiente de temperaturas [°C] no plano tridimensional [x,y e z] em função do tempo [s]. O termo \dot{Q} corresponde à taxa de calor gerado internamente no material por unidade de volume por tempo [J/m³s].

A difusividade térmica representada por α [m²/s] é uma propriedade do material usada para caracterização quanto à condução de calor. Esse valor é muito usado nas determinações de campos de temperaturas, pois descreve quão rápido um corpo se ajusta às temperaturas no seu entorno. A sua determinação é obtida de uma relação entre a condutividade térmica, calor específico e massa volúmica conforme apresentada na equação (50).

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (50)$$

Um elevado valor da difusividade térmica significa que a transferência do calor para dentro de um corpo ocorrerá de forma rápida e também levará pouco tempo para o calor sair do corpo.

A equação (49) não tem nenhuma parcela de origem mecânica e possibilita conhecer o campo de temperaturas em um corpo sólido [60]. Para determinar sua solução é necessário utilizar as condições iniciais e de fronteira pertinentes ao problema térmico conforme é apresentado na Figura 27.

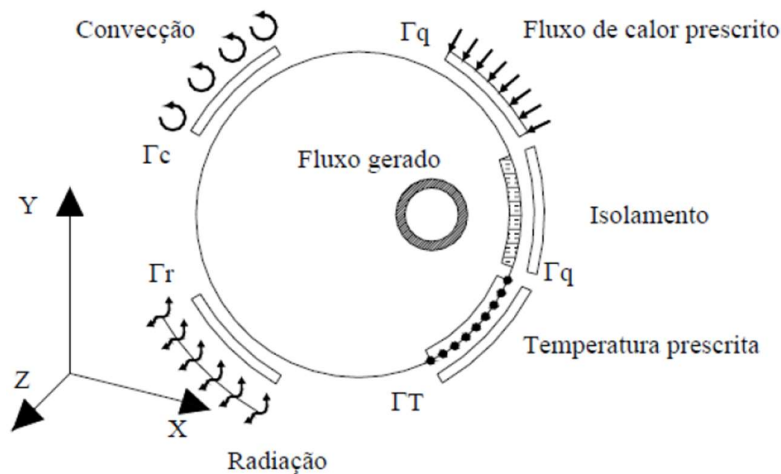


Figura 27: Condições de fronteira para problemas térmicos em um campo Ω [61].

Um campo de temperaturas que satisfaz a equação diferencial da condução de calor deve satisfazer juntamente a condição inicial e as condições de fronteira. A condição inicial refere-se à temperatura no instante inicial ($t = 0$) e as condições de fronteira relacionam as temperaturas ou fluxos de calor em certas superfícies do sólido [60]. As condições de fronteira para os problemas térmicos são a temperatura inicial, convecção e radiação. Essas condições são definidas da seguinte forma [60] [61] [62]:

- Condição de fronteira de Dirichlet que diz que a temperatura \bar{T} numa região Γ_T da fronteira do corpo é prescrita por:

$$T = \bar{T} \quad (51)$$

- Condição de fronteira de Neumann diz que se existir um fluxo de calor, \bar{q} , fora do corpo (normal à fronteira) numa parte, Γ_q , da fronteira então a lei de Fourier

pode determinar a derivada parcial da temperatura em relação ao vetor normal externo n :

$$q = qn = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \bar{q} \quad (52)$$

- Condição de fronteira de Cauchy diz que o fluxo de calor, q_c , vindo do interior do corpo que entra em uma parte, Γ_c , da fronteira à temperatura T , sai por convecção para o meio ambiente à temperatura T_∞ , também chamada de condição mista de Dirichlet e Neumann e é dada por:

$$q_c = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T - T_\infty) \quad (53)$$

- A condição de fronteira que relaciona a troca de calor por radiação entre uma parte, Γ_r , da fronteira a uma temperatura T para a superfície absorvente na vizinhança à uma temperatura, T_{viz} , é dada por:

$$q_r = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_{cr}(T - T_{viz}) \quad (54)$$

A solução da equação diferencial da condução de calor, necessita de uma discretização do espaço que pode ser realizada substituindo a equação da condução de calor por um sistema de equações diferenciais. Para isto, aplica-se o método dos resíduos pesados à equação de calor em regime transitório e no domínio Ω :

$$\int_{\Omega} W_i R_{\Omega} d\Omega + \int_{\Gamma_q} \bar{W}_i R_q d\Gamma_q + \int_{\Gamma_h} \bar{W}_i R_h d\Gamma_{qh} = 0, i = 1, 2, \dots \quad (55)$$

Em que os resíduos são expressos de acordo com as seguintes equações:

$$R_{\Omega} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + \dot{Q} - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad em \Omega \quad (56)$$

$$R_q = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \bar{q}, \quad em \Gamma_q \quad (57)$$

$$R_h = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + h_{cr}T - h_{cr}T_\infty, \quad em \Gamma_h \quad (58)$$

Ao substituir os resíduos das equações (56), (57) e (58) na equação (55) obtém-se integrais não tabeladas, onde pode-se efetuar uma integração por partes da primeira integral referente ao resíduo de Ω . Após operações matemáticas que utilizam o teorema de Green e consideram as funções de peso arbitrárias como $W_i = -W_i$, obtém-se a seguinte equação detalhada:

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega} \left(\frac{\partial W_i}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W_i}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial W_i}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) d\Omega + \int_{\Gamma_T} W_i \lambda \frac{\partial T}{\partial n} d\Gamma + \int_{\Omega} W_i \dot{Q} d\Omega - \\ & \int_{\Omega} W_i \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega - \int_{\Gamma_T} W_i \bar{q} d\Gamma_q - \int_{\Gamma_h} W_i h_{cr} T d\Gamma_h + \int_{\Gamma_h} W_i h_{cr} T_\infty d\Gamma_h = 0 \end{aligned} \quad (59)$$

A solução usa uma discretização parcial, dando lugar a um sistema de equações diferenciais que são integradas no tempo. A função do campo de temperaturas no interior do elemento é aproximada pelas temperaturas nodais em qualquer instante de tempo t , assim temos:

$$T = \sum_{j=1}^m N_j(x, y, z) T_j(t) = NT^e \quad (60)$$

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{j=1}^m N_j(x, y, z) \dot{T}_j(t) = NT^e \quad (61)$$

Aplicando o método de Galerkin para escolha das funções de peso iguais as próprias funções de forma, substituindo a equação (60) e (61) na equação (59), o sistema global de equações estendida a todo o domínio Ω poder ser escrito da seguinte forma:

$$KT + C\dot{T} = F \quad (62)$$

Em alguns problemas lineares a solução da equação (62) pode ser obtida por métodos analíticos, entretanto, a maioria das soluções é obtida por uma discretização no tempo através de métodos numéricos por elementos finitos ou diferenças finitas. Adotando a solução através de diferenças finitas, adota-se a hipótese que o sistema é satisfeito em pontos discretos, (t_{n+a}) ,

em cada intervalo de tempo (t_n, t_{n+1}) . Considerando que o sistema tem apenas derivadas de primeira ordem, e que a temperatura varia linearmente durante o intervalo de tempo Δt , desde o instante t_n até $t_{n+1} = t_n + \Delta t$, sendo N o número de intervalos [60] [61]. A derivada da função que determina a temperatura no instante $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ assume a seguinte forma:

$$\dot{T}_{n+\alpha} = \frac{T_{n+1} - T_n}{\Delta t} = \frac{T_{n+\alpha} - T_n}{\alpha \Delta t} \quad (63)$$

O termo α é um parâmetro que define para cada intervalo de tempo o instante em que a equação (62) é satisfeita. Substituindo a equação (63) em (62), obtém-se a expressão na qual as matrizes são calculadas para o instante $t_{n+\alpha}$, essa equação pode ser escrita como:

$$\widehat{K}_{n+\alpha} T_{n+\alpha} = \widehat{F}_{n+\alpha} \quad , \alpha \in (0,1), n \in (20,1, \dots, N-1) \quad (64)$$

Assim, o campo de temperaturas no final do instante de tempo é determinado pela equação:

$$T_{n+1} = \frac{T_{n+\alpha}}{\alpha} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) T_n \quad (65)$$

Esse campo de temperaturas refere-se as temperaturas iniciais. O operador α pode variar resultando em vários esquemas de integração no tempo. Para valores de α diferentes de zero os esquemas mais utilizados são o esquema de Crank-Nicolson ($\alpha = 1/2$), o esquema de Galerkin ($\alpha = 2/3$) e o esquema de Euler Backward ($\alpha = 1$). Devido as características próprias de cada esquema de integração é difícil afirmar qual é o mais eficiente para a solução do problema [61].

5.2.2 Modelo numérico

O modelo numérico para análise em elevadas temperaturas utiliza um elemento denominado SOLID278 que possui capacidade de condução térmica em três dimensões. O elemento possui oito nós com um único grau de liberdade em cada nó, a temperatura, e as propriedades consideradas são de um material ortotrópico. O elemento é aplicável a uma análise térmica 3D, estacionária ou transitória. O SOLID278 é adequado para modelar a condução de calor em sólidos tridimensionais. Permite prismas e degenerações tetraédricas

quando usado em regiões irregulares. Ele foi projetado para ser um elemento complementar ao SOLID185. A geometria e as localizações dos nós desse elemento são mostradas na Figura 28.

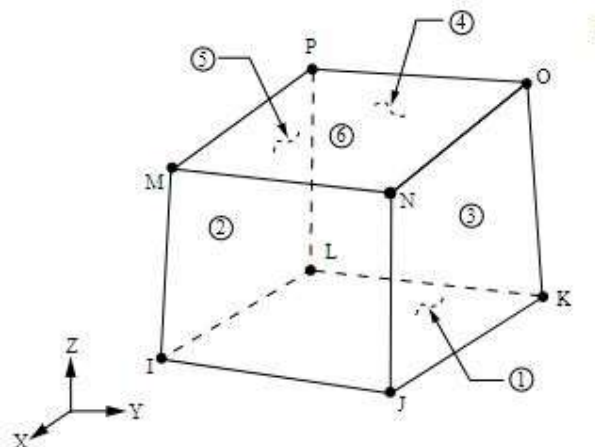


Figura 28: SOLID278 Homogeneous Thermal Solid Geometry [59].

O sistema de coordenadas padrão do elemento é dado ao longo das direções globais. Convecção ou fluxo de calor (mas não ambos) e radiação podem ser introduzidos como cargas de superfície nas faces do elemento.

Na elaboração do modelo numérico algumas considerações importantes foram adotadas. O critério de convergência foi baseado na temperatura. A malha de elementos tem um tamanho de 5 [mm] para todas ligações. A fonte de calor será aplicada na ligação utilizando um coeficiente de convecção de 25[W/m²K] e uma emissividade do fogo igual a 1. Uma temperatura inicial é aplicada a todos os elementos [20°C]. Nesse tipo de análise, as condições de fronteira são a temperatura inicial, a radiação e a convecção.

A análise numérica será em regime transiente com aumento da temperatura seguindo a curva de incêndio padrão definida pela ISO 834 [49]. O tempo de exposição será de 30 minutos para as ligações protegidas e não protegidas. A análise térmica considerou duas formas diferentes de exposição ao fogo das ligações nos modelos numéricos. A primeira considerou que o fogo ocorre apenas em um lado da ligação, atuando na presença frontal das cavilhas, dessa forma será possível comparar a velocidade de carbonização unidimensional apresentada na norma. Na segunda, o fogo foi aplicado em três lados, além da superfície lateral da primeira análise, o fogo foi aplicado na superfície inferior e superior das ligações como é apresentado na Figura 29.

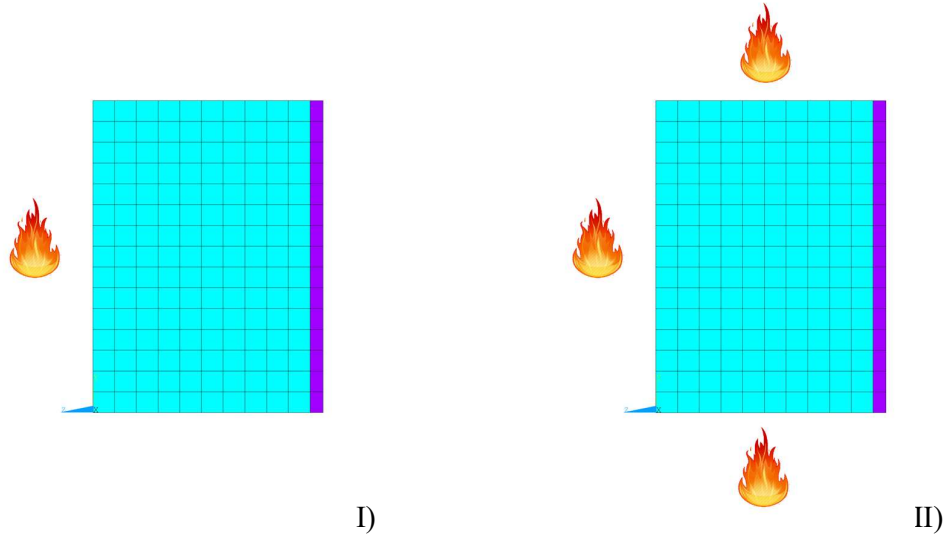


Figura 29: Exposição ao fogo das ligações. I) Exposição de um lado, II) Exposição de três lados.

A fonte de calor foi aplicada em um nó afastado da superfície exposta, seja para exposição de um lado ou exposição de 3 lados.

5.3 Funções de forma

Elementos finitos isoparamétricos são baseados na definição paramétrica das funções de coordenadas e de deslocamento. As mesmas funções de forma são usadas para especificação da forma do elemento e para interpolação do campo de deslocamento [63].

A importância da formulação isoparamétrica está relacionada a possibilidade de utilizar elementos irregulares. Elementos finitos isoparamétricos tem as funções de forma, N_i , definidas em coordenadas locais ξ, η, ζ ($-1 \leq \xi, \eta \leq 1, \zeta \leq 1$). O termo "isoparamétrico" significa que geometria e campo de deslocamento são especificados em forma paramétrica e são interpolados com as mesmas funções.

As funções de forma são usadas para interpolação de deslocamentos para uma análise estrutural (num problema 3D com 3 graus de liberdade) ou temperaturas numa análise térmica (neste caso 1 grau de liberdade), em geral na forma:

$$\begin{aligned}
 u &= \sum N_i u_i, v = \sum N_i v_i, w = \sum N_i w_i \\
 x &= \sum N_i x_i, y = \sum N_i y_i, z = \sum N_i z_i
 \end{aligned}
 \tag{66}$$

Onde, em geral, u , v e w são componentes de deslocamento no ponto com coordenadas locais ξ, η, ζ ; u_i, v_i, w_i são valores de deslocamento nos nós do elemento finito; x_i, y_i, z_i são as coordenadas dos nós do elemento. A forma da matricial das relações acima é a seguinte:

$$\begin{aligned} \{u\} &= [N]\{q\} \\ \{u\} &= \{u \ v \ w\} \\ \{q\} &= \{u_1 \ v_1 \ w_1 \ u_2 \ v_2 \ w_2 \ \dots\} \end{aligned} \quad (67)$$

$$\begin{aligned} \{x\} &= [N]\{x^e\} \\ \{u\} &= \{x \ y \ z\} \\ \{q\} &= \{x_1 \ y_1 \ z_1 \ x_2 \ y_2 \ z_2 \ \dots\} \end{aligned} \quad (68)$$

As funções de forma para elementos isoparamétricos bidimensionais lineares com 4 nós são dadas por:

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi_0)(1 + \eta_0) \quad (69)$$

Na equação acima $\xi_0 = \xi \xi_i$ e $\eta_0 = \eta \eta_i$, onde ξ_i e η_i são valores das coordenadas locais nos nós ξ e η .

Um elemento isoparamétrico tridimensional linear de 8 nós é mostrado na Figura 30.

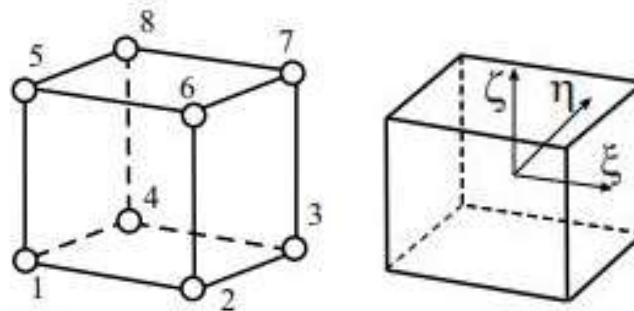


Figura 30: Elementos finitos tridimensionais lineares e sua representação no sistema de coordenadas locais [63].

A funções de forma do elemento linear de 8 nós são iguais a:

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{1}{8}(1 + \xi_0)(1 + \eta_0)(1 + \zeta_0) \\ \xi_0 &= \xi \xi_i, \eta_0 = \eta \eta_i, \zeta_0 = \zeta \zeta_i \end{aligned} \quad (70)$$

5.4 Linguagem APDL

O tempo gasto com pré-processamento nos software é relativamente grande. Os usuários do ANSYS® [58] podem utilizar a linguagem conhecida como APDL (*ANSYS Parametric Design Language*) que é uma importante ferramenta para o código ANSYS de elementos finitos.

Semelhante a outras linguagens de programação (PASCAL, C++, FORTRAN, etc), a linguagem em APDL possui recursos para atribuição de variáveis, execução de laços, decisões lógicas, atribuição de valores, operadores matemáticos e funções paramétricas.

A programação do algoritmo é escrita em arquivos do tipo “*.txt”, e este deve ser carregado no programa ANSYS®, que efetuará a construção da geometria e dos parâmetros de maneira automática.

No presente trabalho devido ao número elevado de ligações estudadas com diferentes geometria, foram desenvolvidos diferentes códigos em linguagem APDL para facilitar a geração das geometrias e a inclusão dos parâmetros para cada tipo de análise. No Anexo D está apresentado o exemplo de um código utilizado para a criação do modelo de uma das ligações estudadas.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A simulação numérica é uma ferramenta muito importante e de grande utilização na solução de problemas de engenharia. Neste estudo, modelos de elementos finitos foram criados junto com a aplicação correta das condições de fronteira pertinentes à cada problema, buscando sempre as condições mais próximas de uma situação real. Na análise mecânica buscou-se obter resultados referentes à capacidade de carga, estado de tensões que as ligações geram quando submetidas ao carregamento que conduzirá à falha do elemento e também entender como a configuração dos ligadores interfere na capacidade de carga das ligações. A análise térmica, por sua vez, determinou a velocidade de carbonização, a camada carbonizada, a distribuição e a evolução do campo de temperatura em cada elemento da ligação e a influência dos ligadores. Os resultados obtidos são apresentados nas seções seguintes.

6.1 Análise mecânica

A resistência da ligação é verificada pela soma da resistência ao corte dos ligadores por plano de corte. Na Tabela 16 são apresentados os valores da capacidade de carga de acordo com os cálculos efetuados seguindo a metodologia apresentada no Eurocódigo 5-1-1 [1], os resultados das simulações numéricas no software ANSYS® [58] e a comparação entre os dois valores.

Tabela 16: Comparação de $F_{v,Rk}^*$ do modelo analítico e numérico.

Ligação	E_d kN	t_1 mm	d mm	Capacidade de carga (analítica) N	Capacidade de carga (numérica) N	Erro relativo %
1	10	25	8	31704	36000	13,55
2		50	12	37748	36000	4,63
3	20	25	8	63409	73173	15,40
4		50	12	75496	83885	11,11
5	30	25	8	95113	92500	2,75
6		50	12	113244	116000	2,43
7	40	25	8	126818	116000	8,53
8		50	12	150992	146500	2,97
9	50	25	8	158522	141620	10,66
10		50	12	169866	160620	5,44

O erro relativo entre os métodos é relativamente pequeno, as ligações em que a espessura da placa de madeira é de 25 [mm] e o diâmetro é de 8 [mm] têm os maiores erros.

Quanto à configuração dos ligadores, o Eurocódigo 5-1-1 não faz nenhuma recomendação, isso pode acarretar uma grande variação dos resultados de capacidades de carga para ligações projetadas para mesma carga e mesmas propriedades, mas com arranjos de ligadores diferentes.

Com a variação da configuração a ligação tem um aumento relativamente grande na capacidade de carga. A seguir são apresentadas as tensões para duas configurações diferentes.

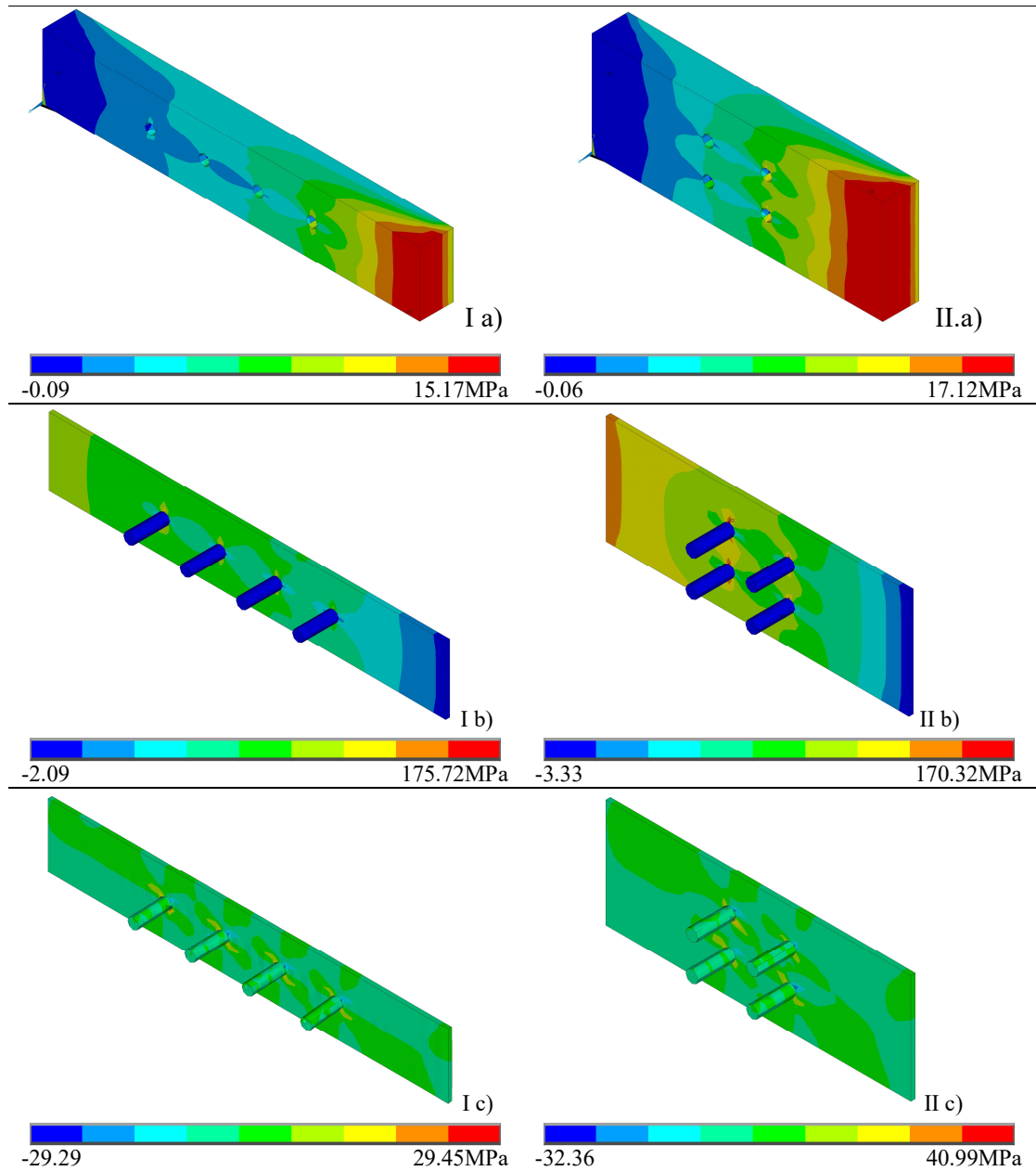


Figura 31: Distribuição da tensão para a ligação1: a) σ_{xx} em 1/4 da madeira da ligação, b) σ_{xx} em 1/4 das cavilhas e da placa de aço central, c) τ_{xy} em 1/4 das cavilhas e da placa de aço central.

A tabela a seguir apresenta a capacidade de carga para a mesma ligação com duas configurações diferentes.

Tabela 17: Variação na capacidade de carga para a ligação 1.

Modelo analítico N	Modelo numérico arranjo 4x1 N	Modelo numérico arranjo 2x2 N	Varição %
31704	36000	61000	69,44

A Figura 31 exibe a distribuição de tensões para cada caso. Como a capacidade de carga é maior, as tensões normais no membro de madeira e de aço aumentam no caso II em comparação com o caso I, e a tensão de corte nas cavilhas também são maiores. Em ligações como do caso I, a falha acontece por grandes deformações na região dos ligadores, mais especificamente no primeiro ligador.

O Anexo B retrata os modelos numéricos e as tensões nos elementos das ligações apresentadas na Tabela 12. As ligações que a espessura do membro lateral é 25 [mm] apresentam tensões muito elevadas, próximo da resistência da madeira, nos membros de madeira na região de aplicação da carga, enquanto que as com espessura de 50 [mm] apresentam tensões maiores na região das cavilhas.

A carga que é aplicada à placa de madeira é transmitida para as cavilhas e, subsequentemente, para a placa de aço central, estas forças causam um alto nível de tensão que pode atingir o limite de elasticidade do aço ou causar deformação excessiva. Em geral, a placa de aço central exibe tensões maiores perto do final da placa de madeira. Em um projeto bem executado a falha da ligação nunca ocorrerá na placa de aço central.

6.2 Análise térmica

De acordo com o Eurocódigo 5-1-2 [33] a madeira carboniza quando atinge a temperatura de 300 [°C], após carbonizada a madeira não apresenta nenhuma resistência mecânica diminuindo gradualmente a capacidade de carga dos elementos estruturais conforme o avanço da profundidade de carbonização.

O Anexo C apresenta o campo de temperaturas e carbonização para todas as ligações, protegidas pelo aumento da espessura e não protegidas, considerando a exposição de um lado e três lados.

6.2.1 Ligações não protegidas

De acordo com o Eurocódigo 5-1-2 [33], as ligações não protegidas têm uma resistência de 12,90 minutos, logo é importante apresentar as espessuras da carbonização e campos de temperatura nesse tempo.

Para analisar a evolução da temperatura para o interior do membro de madeira e realizar uma análise pontual, foram escolhidas 5 espessuras diferentes, além da superfície exposta, que englobam a madeira carbonizada e a parte que ainda não carbonizou. Também foi analisado a evolução da temperatura em 9 nós na diagonal da seção de madeira quando a ligação tem 3 lados expostos ao fogo, como indicado na Figura 32, com o intuito de realizar uma análise gráfica que expresse esses resultados de forma mais clara.

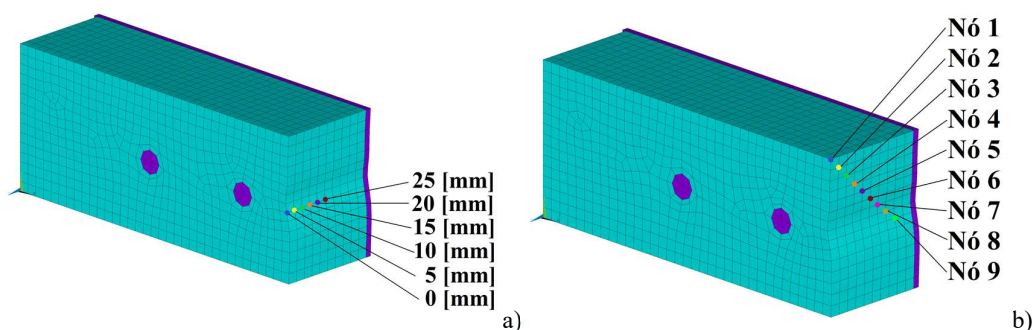


Figura 32: Espessuras e nós da análise da evolução da temperatura para o interior da ligação, a) análise frontal, b) análise da diagonal.

A carbonização foi medida em três seções transversais diferentes:

- Seção 1: Seção mais distante das cavilhas;
- Seção 2: Seção que abrange a seção de madeira e a seção da cavilha;
- Seção 3: Seção que abrange a seção de madeira no meio de duas cavilhas, semelhante à apresentada na Figura 32.

A velocidade de carbonização foi calculada tomando em conta que as profundidades de carbonização apresentadas não foram medidas exatamente no tempo de 774 segundos, mas em intervalo de tempos próximos entre 769 e 779 segundos, devido às condições de convergência de resultados.

6.2.1.1 Exposição de um lado

A velocidade e a espessura da camada carbonizada para o tempo de exposição de aproximadamente 12,90 minutos, referente ao tempo $t_{d,fi}$, são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18: Espessura e velocidade de carbonização.

Ligação	Seção 1		Seção 2		Seção 3	
	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min
1	9,25	0,72	9,00	0,70	9,25	0,72
2	9,30	0,72	9,10	0,70	9,25	0,71
3	9,30	0,72	8,75	0,68	9,25	0,71
4	9,30	0,72	8,70	0,67	9,25	0,71
5	9,25	0,72	9,10	0,71	9,15	0,71
Média	9,28	0,72	8,93	0,69	9,23	0,71

Através das velocidades de carbonização apresentadas, observa-se que durante o tempo de resistência à exposição ao fogo todas as ligações possuem a mesma velocidade de carbonização na seção 1.

Na seção 2, onde as cavilhas exercem a maior influência na camada de carbonização, identifica-se que as ligações com mais de uma linha de ligadores possuem uma profundidade de carbonização menor em relação às outras seções, diminuindo assim a velocidade de carbonização. De modo geral todas as ligações possuem uma velocidade de carbonização menor nessa seção.

Na seção 3, entre cavilhas, a carbonização é uniforme para todas as ligações, é levemente menor do que a seção 1 e maior que a seção 2.

A Figura 33 representa de forma gráfica a evolução de temperatura na madeira e na cavilha da ligação 2.

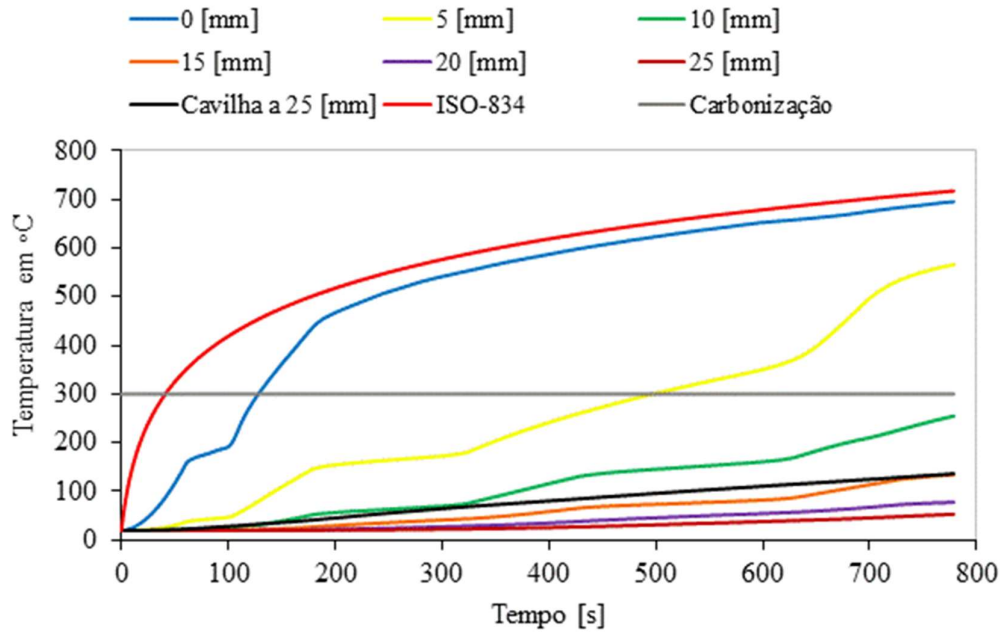


Figura 33: Evolução da temperatura para o interior da seção de madeira ao final do tempo $t_{d,fi}$.

Na superfície da madeira, a evolução da temperatura aproxima-se da curva ISO 834 após 200 segundos de exposição, conforme aumenta a espessura em direção ao interior do elemento de madeira, a temperatura tem evolução mais lenta do que a parte mais externa. A linha na cor preta, representa a cavilha a 25 [mm] de profundidade e mostra a evolução da temperatura nesse ponto, evidenciando assim, o aumento da temperatura no interior do elemento de madeira devido à condução do ligador metálico.

As regiões no interior da ligação ainda estão com temperaturas relativamente baixas, devido a isso a cavilha ao mesmo tempo que conduz um fluxo de calor para o interior não atinge temperaturas tão elevadas. A Figura 34 exibe uma análise térmica para dois tempos de exposição diferentes.

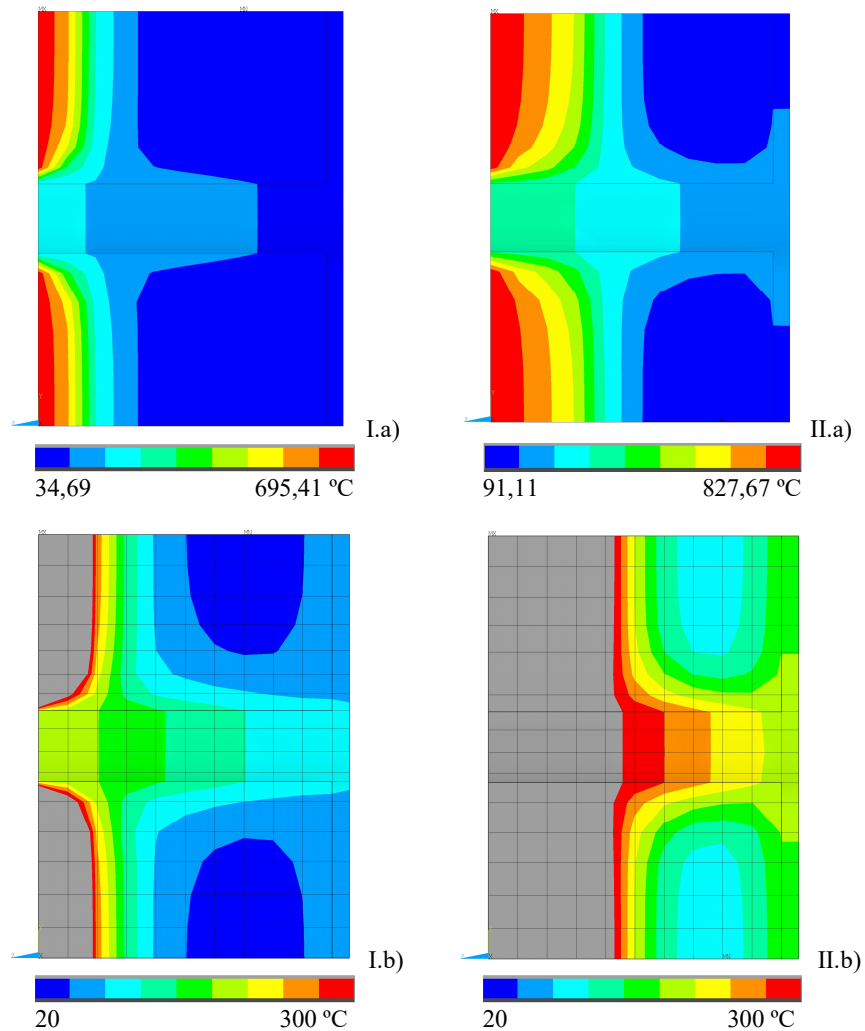


Figura 34: Campo de temperaturas na ligação 2, a) Campo de temperaturas, b) Carbonização.

As Figura 34 I a) e II a) mostram o campo de temperaturas para um tempo de exposição igual a $t_{d,fi}$ e 30 minutos respectivamente, a figura 30 b) apresenta a carbonização ao final de ambos os tempos.

Para a exposição igual a $t_{d,fi}$ a profundidade de carbonização ainda é pequena, a cavilha conduz calor para o interior da seção, mas nessas condições a cavilha atua como um redutor de temperatura para a madeira próxima à cavilha na superfície exposta, pois devido à sua alta condutividade ela busca um equilíbrio entre o restante da seção transversal mais fria e a região mais aquecida.

Em uma exposição de 30 minutos a carbonização atinge quase metade da seção de madeira e a placa de aço central começa a aquecer de forma significativa a superfície não exposta do membro lateral de madeira. Nesse período, a cavilha inicia a carbonização da

madeira que está em contato. Fica evidente que essa ligação atinge a ruptura após ultrapassar o tempo $t_{d,fi}$.

6.2.1.2 Exposição de três lados

A espessura carbonizada, medida a partir da superfície frontal para as 3 seções analisadas, está apresentada na Tabela 19.

Tabela 19: Espessura e velocidade de carbonização na superfície frontal.

Ligação	Seção 1		Seção 2		Seção 3	
	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min
1	9,45	0,74	10,00	0,78	9,45	0,74
2	9,45	0,73	10,00	0,83	9,45	0,73
3	9,25	0,72	9,10	0,71	9,25	0,72
4	9,25	0,72	9,00	0,70	9,25	0,72
5	9,25	0,73	10,00	0,77	9,25	0,76
Média	9,37	0,73	9,78	0,77	9,37	0,73

Quando expostas ao fogo por três lados, a carbonização na seção 1 tem uma profundidade semelhante quando exposta somente em um lado na superfície frontal. A velocidade de carbonização é levemente maior e percebe-se o efeito de arredondamento dos cantos.

Na seção 2 a camada de carbonização é significativamente menor nas ligações com mais de uma linha de ligadores. Nessa seção, a velocidade de carbonização é muito variada entre as ligações atingindo um máximo de 0,83 [mm/min] na ligação 2 e um mínimo de 0,71 [mm/min] na ligação 3.

A seção 3 apresenta valores iguais à seção 1. Entende-se assim que as regiões que não estão muito próximas das cavilhas sofrem pouca influência durante a carbonização para períodos não muito grandes de tempo.

Independentemente da configuração, para todas as seções a velocidade de carbonização é maior em relação à exposição de um lado, isso ocorre devido ao aumento das superfícies expostas ao fogo que gera o aquecimento da placa de aço central através das superfícies superiores e inferiores, a Figura 37 apresenta o campo de temperaturas demonstrando esses fenômenos.

Tabela 20: Espessura e velocidade de carbonização na superfície.

Ligação	Seção 1		Seção 2		Seção 3	
	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min
1	9,26	0,72	9,41	0,73	9,58	0,75
2	9,26	0,72	9,60	0,74	9,51	0,73
3	9,18	0,71	8,93	0,70	9,34	0,73
4	9,13	0,71	9,46	0,74	9,18	0,72
5	8,98	0,70	9,29	0,72	9,20	0,71
Média	9,16	0,71	9,34	0,73	9,36	0,73

A carbonização da superfície de cima da madeira ocorre com velocidade menor, entretanto a carbonização é bem difícil de mensurar devido ao campo de temperaturas que esse tipo de ligação e exposição resultam. Existe ainda o efeito de arredondamento de canto, que faz a carbonização avançar de forma mais rápida na diagonal das seções. A Figura 35 e a Figura 36 representam de forma gráfica a evolução de temperatura na seção na madeira e na cavilha da ligação 2.

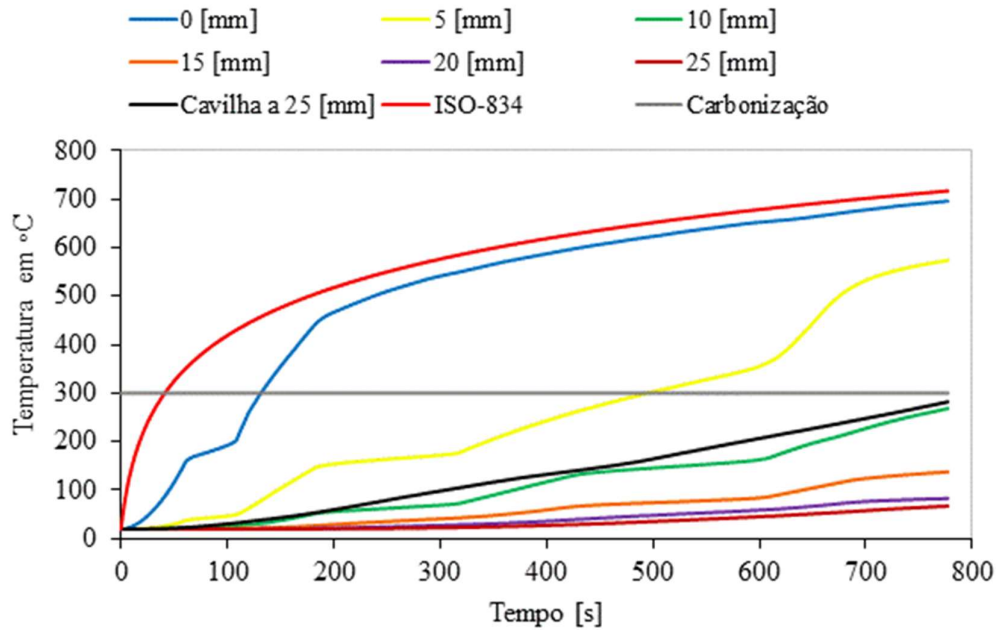


Figura 35: Evolução da temperatura para o interior da seção de madeira e da cavilha ao final do tempo $t_{d,f}$.

A madeira aquece de forma semelhante a exposição de um lado, porém a cavilha apresenta um aquecimento maior. A seguir é mostrado a evolução de temperatura na diagonal da seção de madeira.

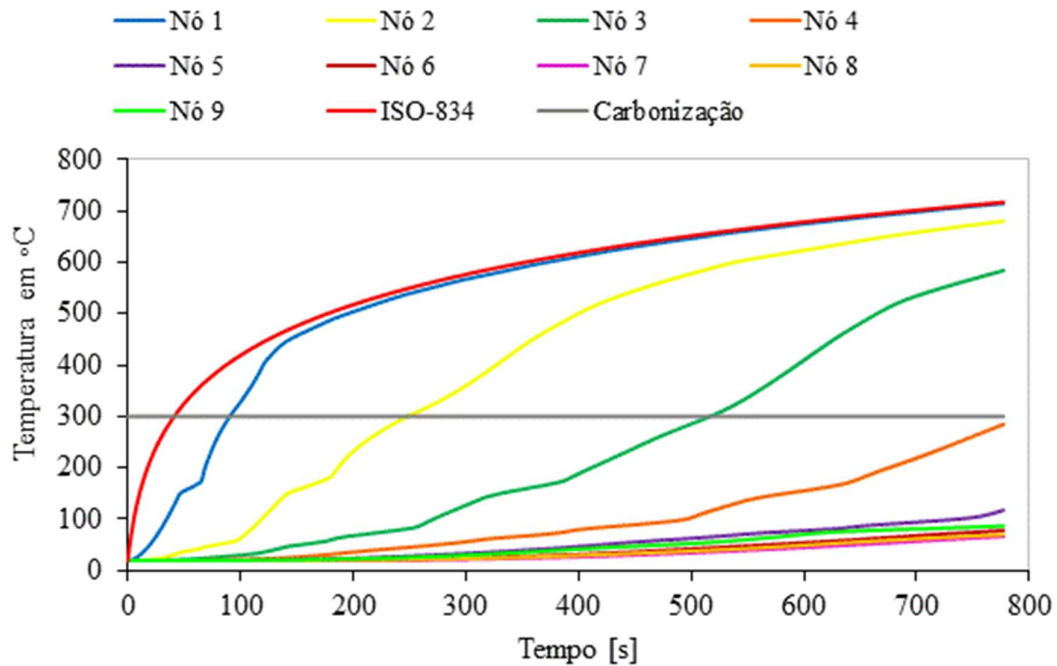


Figura 36: Evolução da temperatura na diagonal da seção de madeira

O aquecimento da madeira na diagonal acontece de forma acelerada em direção ao interior, isso é previsto no Eurocódigo 5-1-2. A Figura 37 demonstra o efeito de arredondamento do canto que ocorrem para exposições em mais de um lado dos membros de madeira.

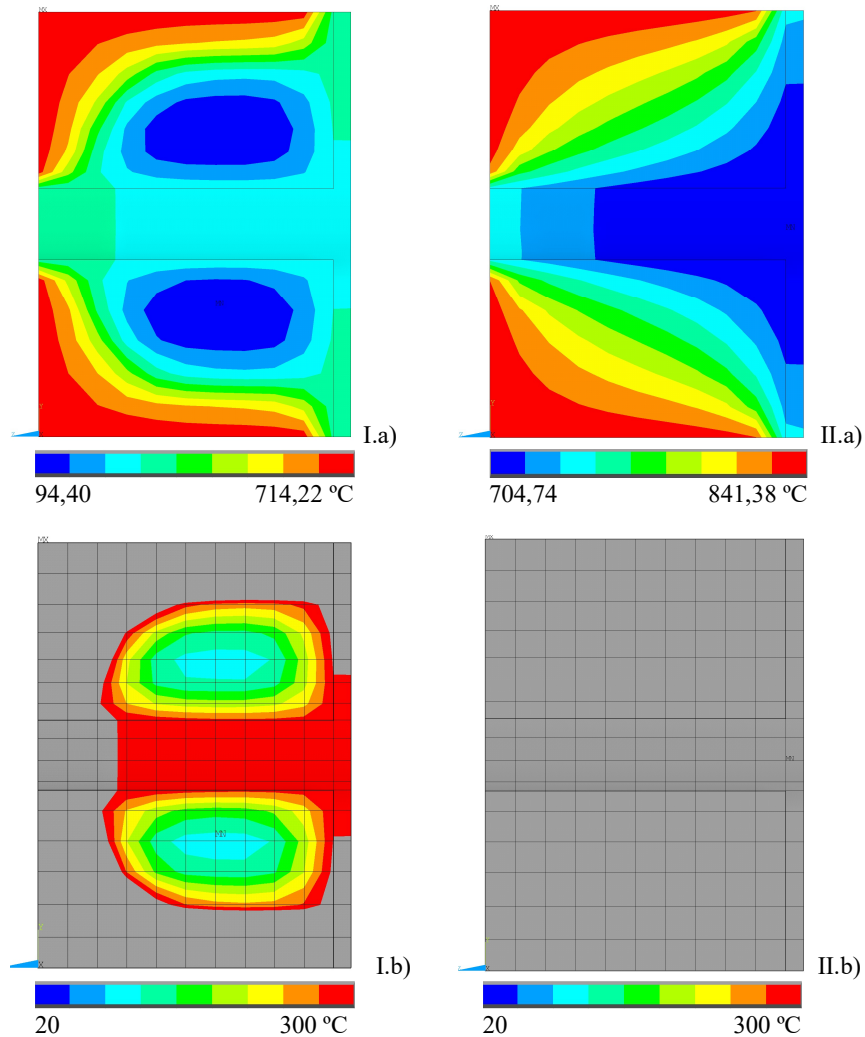


Figura 37: Campo de temperaturas na ligação 2, a) Campo de temperatura, b) Carbonização, I) exposição de $t_{d,fi}$, II) exposição de 30 minutos.

Para a exposição em 3 lados a ligação tem uma seção residual consideravelmente menor que a seção inicial, conclui-se que logo após o tempo de exposição $t_{d,fi}$, o aço produzirá uma grande carbonização da madeira à sua volta devido às altas temperaturas que os elementos de aço apresentam. Após 30 minutos não existe seção residual de madeira, devendo assim utilizar material de proteção para alcançar tal resistência.

6.2.2 Ligações protegidas pelo aumento da espessura da madeira

As ligações protegidas pelo aumento da espessura da madeira devem alcançar uma resistência de 30 minutos de acordo com Eurocódigo 5-1-2 [33].

As análises gráficas são realizadas de forma semelhante às ligações não protegidas, todavia, os pontos analisados têm coordenadas diferentes devido a malha de elementos finitos, assim as espessuras analisadas seguem o apresentado na Figura 38.

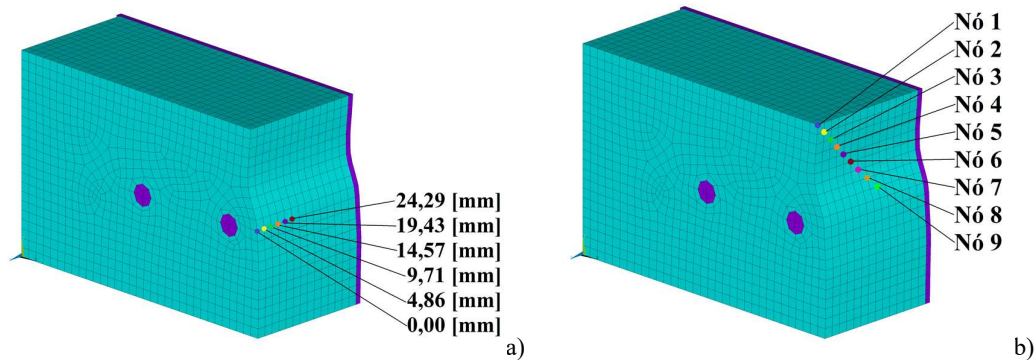


Figura 38: Pontos de análise da evolução da temperatura para o interior da ligação, a) análise frontal, b) análise da diagonal.

6.2.2.1 Exposição de um lado

A Tabela 21 apresenta a carbonização da madeira e a respectiva velocidade de carbonização unidimensional para uma exposição ao fogo de 30 minutos.

Tabela 21: Profundidade e velocidade da carbonização.

Ligação	Seção 1		Seção 2		Seção 3	
	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min
1	21,42	0,71	21,37	0,71	21,13	0,70
2	21,42	0,71	21,47	0,72	21,27	0,71
3	21,47	0,72	21,23	0,71	21,32	0,71
4	21,47	0,72	21,18	0,71	21,37	0,71
5	21,42	0,72	21,42	0,71	21,32	0,71
Média	21,44	0,71	21,33	0,71	21,28	0,71

A velocidade de carbonização média nas 3 seções analisadas foi de 0,71 [mm/min]. Para exposição de um lado percebe-se que a carbonização sofre pouca influência da configuração das cavilhas e a velocidade vai de encontro ao apresentado no Eurocódigo 5-1-2, ver Tabela 13.

A figura a seguir apresenta a evolução da temperatura em diferentes profundidades, a carbonização e a evolução da temperatura na cavilha.

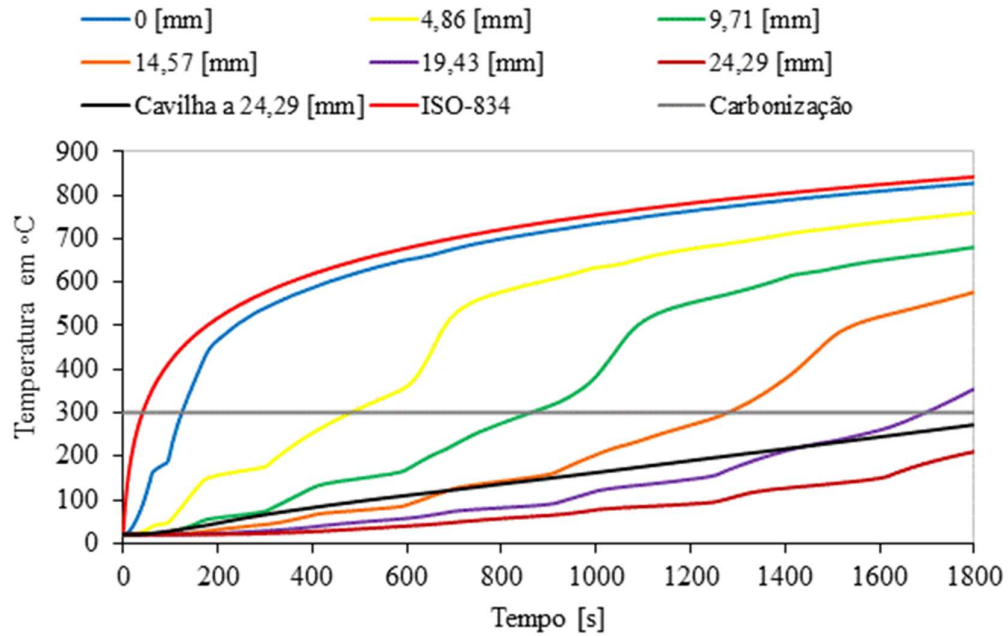


Figura 39: Evolução da temperatura para o interior da ligação 2 protegida pelo aumento da espessura da madeira.

O campo de temperaturas e a carbonização da seção 2 são mostrados na Figura 40.

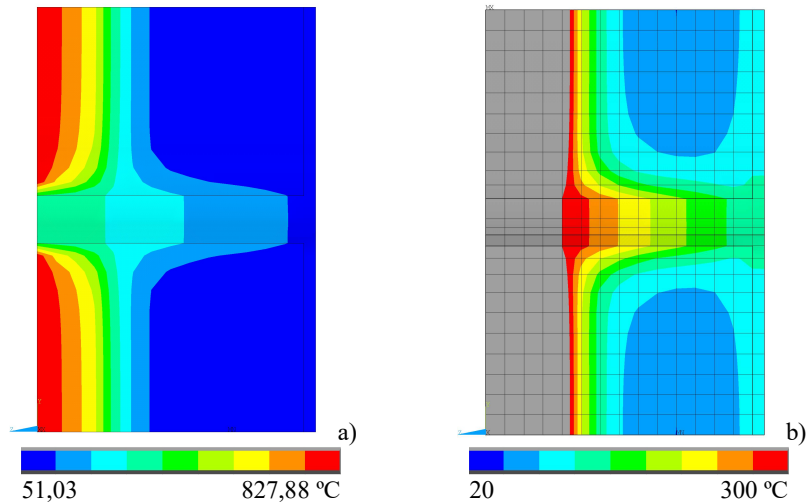


Figura 40: Campo de temperaturas e carbonização da ligação 2 protegida pelo aumento da espessura, exposição de um lado.

Embora a cavilha conduza um fluxo de calor para o interior da ligação, a carbonização é menor na região próxima à cavilha, devido a maior seção transversal e a boa condutividade térmica da cavilha, o equilíbrio de temperatura entre as partes mais aquecidas e as mais frias da ligação demora mais a acontecer. Entretanto, como pode observar na Figura 40 b), ocorre um aquecimento da placa de metal e conseqüentemente um aquecimento da madeira em contato, gerando um fluxo de calor na superfície não exposta em direção a superfície exposta ao fogo.

6.2.2.2 Exposição de três lados

A Tabela 22 apresenta a velocidade e a carbonização na parte frontal das ligações quando são expostas ao fogo em 3 superfícies.

Tabela 22: Espessura e velocidade de carbonização na parte frontal.

Ligação	Seção 1		Seção 2		Seção 3	
	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min
1	23,12	0,77	-	-	24,28	0,81
2	23,17	0,77	-	-	24,29	0,81
3	21,86	0,73	-	-	22,34	0,74
4	21,86	0,73	-	-	22,83	0,76
5	22,88	0,76	-	-	24,29	0,81
Média	22,58	0,75	-	-	23,61	0,79

A carbonização é maior quando comparada à exposição de um lado. Nessas condições a ligação como um todo aquece mais rápida o que influencia na carbonização.

A seção 1 apresenta uma carbonização uniforme entre as ligações e um pouco maior do que as ligações não protegidas. A seção 2 praticamente não tem seção residual, por isso os valores não são apresentados na tabela acima. A seção 3 apresenta uma taxa de carbonização elevada nessas condições, evidência assim a influência dos elementos metálicos na condução de calor para o interior da ligação.

A Tabela 23 apresenta a carbonização na superfície superior da ligação e velocidade de carbonização para as 3 seções analisadas.

Tabela 23: Espessura e velocidade de carbonização na superfície.

Ligação	Seção 1		Seção 2		Seção 3	
	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min	Profundidade Carbonização mm	Velocidade de carbonização mm/min
1	25,82	0,86	-	-	26,06	0,87
2	25,77	0,86	-	-	26,41	0,88
3	24,38	0,81	-	-	26,20	0,87
4	24,43	0,81	-	-	25,90	0,86
5	25,72	0,86	-	-	25,83	0,86
Média	25,23	0,84	-	-	26,08	0,87

Na superfície superior da ligação a profundidade e a velocidade de carbonização são maiores. Essa região sofre pouca influência das cavilhas, entretanto como já citado anteriormente, o Eurocódigo 5 parte 1-2 [33] adotado a mesma velocidade para todos os lados, entretanto, conforme [55] os lados estreitos das seções transversais possuem uma velocidade de carbonização maior. A Figura 41 apresenta o campo de temperaturas e a carbonização.

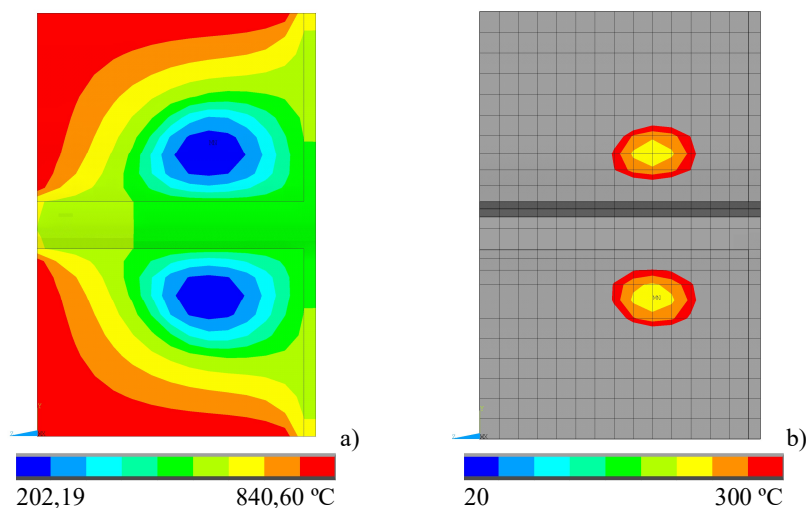


Figura 41: Campo de temperatura e carbonização na seção 2 ligação 2.

A seção residual é considerada nula na região das cavilhas, a madeira que ainda não carbonizou possui temperaturas da ordem de 200 [°C], portanto logo será carbonizada.

As Figura 42 e Figura 43 demonstram a evolução da temperatura na parte frontal e na diagonal da seção de madeira, além da temperatura na cavilha.

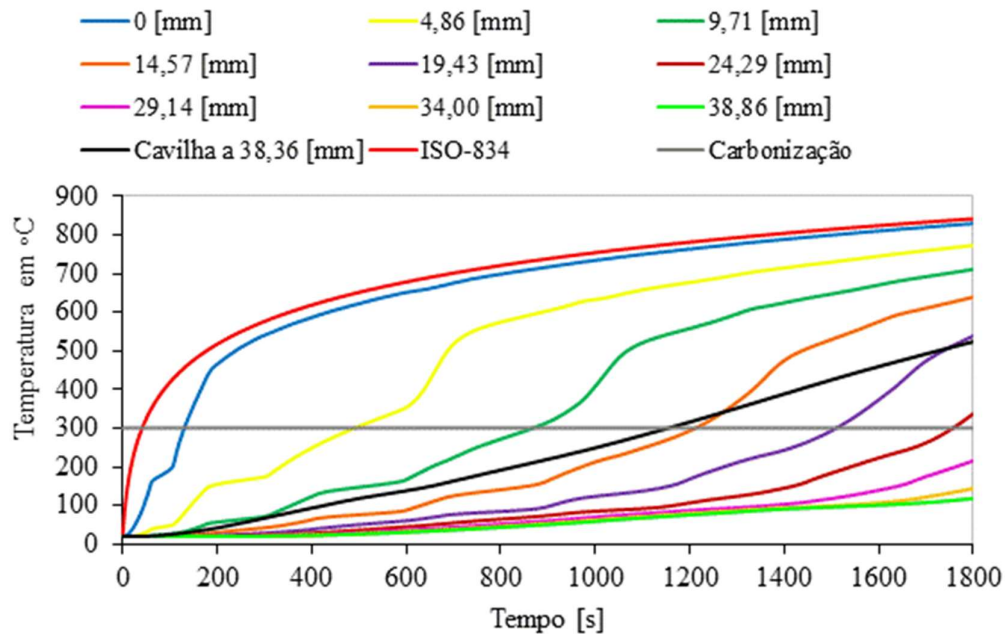


Figura 42: Evolução da temperatura para o interior da ligação 2 protegida pelo aumento da espessura da madeira.

Numa profundidade de 38,36 [mm] a cavilha atinge 300 [°C] por volta de 1150 segundos, enquanto a madeira na seção 3 numa mesma profundidade encontra-se a temperaturas inferiores a 100 [°C]. Concluindo assim, que a cavilha conduz um grande fluxo de calor que acarreta ao aquecimento acelerado da região interna da ligação.

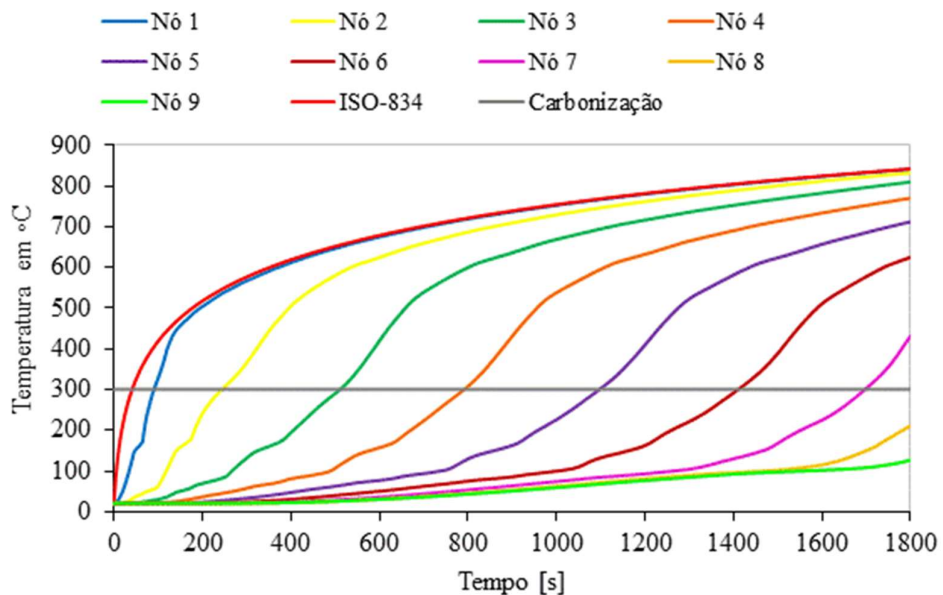


Figura 43: Evolução das temperaturas na diagonal da seção do elemento de madeira da ligação 2 protegida pelo aumento da espessura da madeira.

Na diagonal da seção de madeira as temperaturas têm uma evolução rápida, as linhas que representam os diferentes pontos ultrapassam a curva da carbonização, 300 [°C], muitos antes do que na parte frontal.

6.2.3 Temperaturas nas cavilhas

A Figura 44 apresenta a evolução da temperatura ao longo do comprimento da cavilha ao final da exposição do período $t_{d,fi}$ para as ligações não protegidas e protegidas pelo aumento da espessura da madeira.

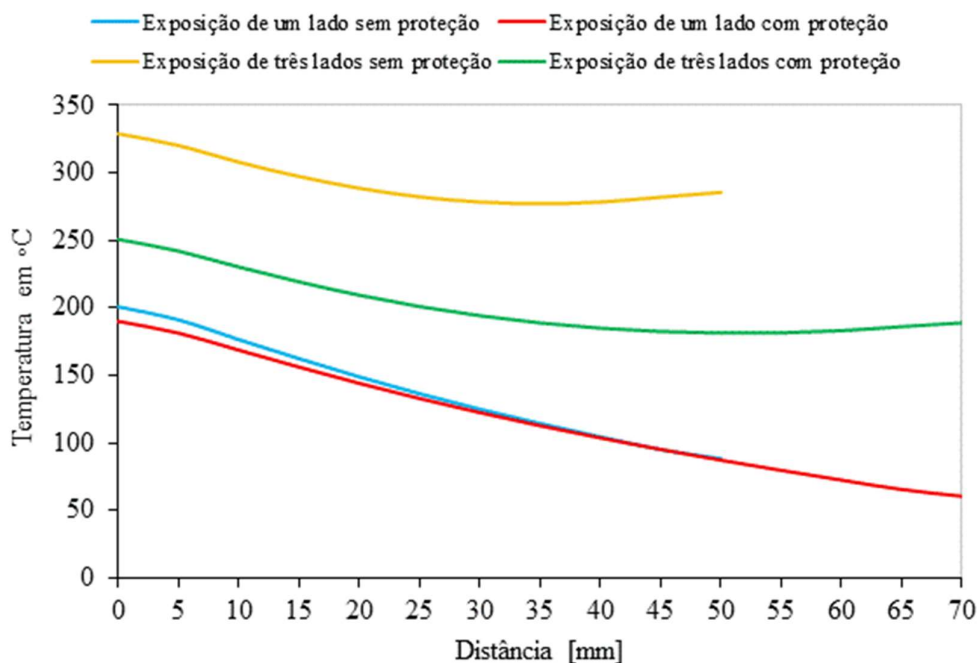


Figura 44: Decréscimo da temperatura ao longo do comprimento da cavilha.

Para a exposição de um lado, a cavilha apresenta valores de temperaturas semelhantes ao longo do comprimento. A cavilha de ambas ligações, protegidas e não protegidas, possui temperaturas um pouco mais altas perto da superfície exposta e apresenta temperaturas mais baixas quanto mais próximo da placa de aço central.

Para exposição de três lados, as temperaturas são bastantes diferentes entre as ligações protegidas e não protegidas. A cavilha da ligação protegida possui temperaturas da ordem de 80 [°C] mais baixas do que a não protegida. A temperatura na cavilha da ligação não protegida

é maior que 300 [°C] e tem papel importante no avanço da carbonização para o interior da madeira.

Em relação à condução de calor pela cavilha, pode perceber que a proteção com o aumento da espessura da madeira é mais eficiente para exposição de 3 lados, pois embora a cavilha conduza calor para o interior da madeira em todos os casos, somente na exposição em três lados das ligações não protegidas a temperatura ultrapassou os 300 [°C].

7. CONCLUSÃO

A seguir apresenta-se as conclusões acerca do estudo desenvolvido e faz-se sugestões para trabalhos que possam vir a colaborar com o tema.

7.1 Conclusões gerais

Este trabalho apresenta diferentes metodologias aplicadas ao projeto de ligações do tipo W-S-W utilizadas na engenharia estrutural. Duas planilhas eletrônicas com todas as equações analíticas foram desenvolvidas para calcular diferentes configurações W-S-W e avaliar a resistência mecânica e térmica das ligações. Em temperatura ambiente a planilha fornece as dimensões e capacidade de carga das ligações para uma carga de tração aplicada. Para elevadas temperaturas a planilha fornece o tempo de resistência nas ligações não protegidas e os parâmetros para proteção com um incremento de madeira. Um procedimento numérico baseado no MEF também foi implementado para produzir diferentes simulações 3D focadas em análise mecânica e térmica. O modelo numérico representa a conexão W-S-W com uma carga de tração incremental aplicada, a fim de obter a carga crítica máxima e determinar a capacidade de carga máxima de cada fixador. Na análise térmica, o modelo numérico apresenta os campos de temperaturas na ligação, a temperatura em cada material, a profundidade e a velocidade de carbonização da madeira para a exposição em um e três lados.

A comparação de vários resultados obtidos entre cálculos analíticos e numéricos mostrou uma concordância favorável na análise mecânica e pequena variação na análise térmica. As simulações numéricas são muito relevantes, os modelos podem ser usados para verificação em outro tipo de conexões submetidas a diferentes condições de carga mecânica e térmica.

O modelo numérico proposto na análise mecânica poderia ser usado para o cálculo de verificação e distribuição de tensões e deslocamentos em quaisquer materiais ou componentes da ligação W-S-W em estudo, como uma metodologia alternativa, para evitar qualquer dano antes da construção. A solução numérica apresentada apresenta bons resultados e está de acordo com a capacidade de carga analítica calculada por plano de corte por ligador, para cada ligação em estudo.

Os resultados obtidos estão de acordo com os cálculos analíticos, no entanto, nas ligações com uma espessura menor que t_1 é um desafio determinar a capacidade de carga, onde diferentes controles de conjuntos precisam ser introduzidos na solução numérica. A resistência

à tração da madeira foi alcançada antes da resistência ao corte das cavilhas. Esse comportamento é o que aconteceria em situação real. Sobre o arranjo das cavilhas, o Eurocódigo 5-1-1 [1] não faz recomendação ao número de colunas ou linhas da configuração. Após o número calculado de cavilhas, o projetista precisa apenas verificar as dimensões entre eles. Essa situação poderia levar os projetistas a produzir conexões superdimensionadas, onde a capacidade de carga da conexão é muito maior do que a necessária, com seções transversais maiores.

O modelo numérico proposto na análise térmica apresenta boa correlação ao modelo analítico, e pode ser usado para determinação dos campos de temperatura em cada material da ligação W-S-W e determinar as profundidades e velocidade de carbonização em diferentes seções da ligação. O modelo também pode ser usado para diferentes tipos de madeira e ligações.

Os resultados mostram que a carbonização da madeira sofre grande influência dos ligadores de aço tanto retardando a carbonização em curtos tempos de exposição, como acelerando para longos tempos de exposição. A configuração das cavilhas e tipo de exposição também são fatores que causam grande variabilidade nos resultados. Para ligações carregadas paralelamente à fibra da madeira, a distância entre ligadores na direção perpendicular à fibra é consideravelmente menor e exerce bastante influência da carbonização. Para exposição de um lado a seção transversal residual é pouco menor que a original, embora não abordado nesse trabalho, acredita-se que a ligação realmente possui o tempo de resistência apresentado pelo método analítico. Já na exposição em 3 lados, a seção residual é consideravelmente menor que a original, sendo praticamente nula na região das cavilhas durante exposição de 30 minutos, ocasionando a falha da ligação antes do apresentado no modelo analítico.

O método de proteção das ligações com um incremento de madeira se apresenta como uma boa alternativa de proteção para ligações expostas em um lado, e não tão eficiente para exposição de 3 lados devido à condução de calor pelos elementos de aço da ligação, cavilhas e placa de aço central.

De forma geral, ambos os modelos numéricos propostos estão em concordância com a norma e apresentam-se como ferramentas de grande valia para garantir a segurança estrutural e evitar possíveis acidentes.

7.2 Trabalhos futuros

Os estudos na área do fogo são de extrema relevância e grande complexidade, estudos científicos podem agregar aos resultados já obtidos, gerar novos conhecimento, dar continuidade e aperfeiçoar à pesquisa científica, evidenciam-se algumas situações interessantes para trabalhos futuros:

- Desenvolver um modelo numérico para a análise de tensões e avaliação dos modos de falha da ligação;
- Avaliar as dimensões necessárias entre os espaçamentos de uma ligação apresentados no Eurocódigo, para a verificação na influência da resistência térmica e mecânica;
- Estudar outros tipos de ligação usando o método de redução de carga proposto no Eurocódigo 5;
- Desenvolver um modelo numérico acoplado para análise conjunta de resistência mecânica e térmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CEN, EN1995-1-1, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, Brussels, 2004.
- [2] Barreira, L. M. S. "Estudo Numérico do Comportamento Térmico e Mecânico de Estruturas em Madeira". Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, 2008. Tese de mestrado.
- [3] Johansen, K. W., 1949: "Theory of Timber Connections". International association of Bridge and Structural Engineering, Publication No. 9, Bern, Switzerland, pp. 249 – 262.
- [4] Moraes, P. D. [et al.]. "Influência da temperatura sobre as ligações em estruturas de madeira". Cuibá: IX encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira, 2004.
- [5] Pinto, E. M., Calil Junior, C., "Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de Eucalyptus de uso estrutural exposta ao fogo," *Revista Minerva: Pesquisa e Tecnologia*, vol. 3, pp. 131- 140, 2006.
- [6] J. Branco, P. Cruz, M. Piazza, "Comportamento semi-rígido de ligações tradicionais de madeira", 4as Jornadas Portuguesas De Engenharia De Estruturas (JPEE), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) - Centro de Conferências, Lisboa, Portugal, 2006.
- [7] Hanhijärvi A, Kevarinmäki A. VTT publications 677: "Timber failure mechanisms in high-capacity dowelled connections of timber to steel". VTT, Espoo; 2008. ISBN 9789513870904.
- [8] J. L. González Fueyo, M. Dominguez, J. A. Cabezas, M. P. Rubio. "Design of connections with metal dowel-type fasteners in double shear". *Materials and Structures* 42:385–397, 2009.
- [9] Cachim, Paulo B. Franssen, Jean-Marc, "Numerical modelling of timber connections under fire loading using a component model," *Fire Safety Journal*, vol. 44, pp. 840-853, 2009.
- [10] L. Peng, G. Hadjisophocleus, J. Mehaffey, M. Mohammad. "Predicting the Fire Resistance of Wood–Steel–Wood Timber Connections". *Fire Technology*, vol. 47, no. 4, pp. 1101–1119, Nov. 2009.
- [11] Silva, R. F. P. "Cálculo ao Fogo de Ligações de Madeira". Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 2009. Tese de mestrado.

- [12] A. Frangi, C. Erchinger, M. Fontan, "Experimental Fire Analysis of Steel-to-Timber Connections Using Dowels and Nails", Institute of Structural Engineering IBK, Zurich, Switzerland, Fire and Materials, Vol. 34, P. 01-19, January 2010.
- [13] Fragiaco, Massimo & Menis, Agnese & J. Moss, Peter & H. Buchanan, Andrew & Clemente, Isaia. (2010). "Numerical and Experimental Evaluation of the Temperature Distribution Within Laminated Veneer Lumber (LVL) Exposed to Fire". Journal of Structural Fire Engineering. 1. 145-159. 10.1260/2040-2317.1.3.145.
- [14] Peng, L. , Hadjisophocous, GV , Mehaffey, JR e Mohammad M. , 2011 . "On the Fire Performance of Double shear Timber Connections". Fire Safety Science 10: 1207-1218 . 10.3801 / IAFSS.FSS.10-1207.
- [15] Resch E, Kaliske M. "Numerical analysis and design of double-shear dowel-type connections of wood". Eng. Struct. 2012; 41:234–241.
- [16] Santos, C. L. "Comportamento mecânico de ligações do tipo cavilha em estruturas de madeira". Covilã, 2013. Tese de doutorado.
- [17] C. Maraveas, K. Miamis, Ch. E. Mattahiou (2013). "Performance of timber connections exposed to fire: a review". Fire Technology. doi:10.1007/s10694-013-0369-y.
- [18] Ohene, A. A. "Modelling the Fire Performance of Hybrid Steel-Timber Connections". Ottawa, Ontario: Carleton University, Department of Civil and Environmental Engineering, 2014. Master Dissertation of Applied Science in Civil Engineering.
- [19] Barbosa, S. I. F. "Reforço de Ligações Tradicionais de Madeira". Escola de Engenharia, Universidade do Minho, P 01-22, novembro 2015. Dissertação em Mestrado em Engenharia Civil.
- [20] Boadi, S. B. A. "Full Scale Tests on the Performance of Hybrid Timber Connections in Real Fires". Ottawa, Ontario: Carleton University, Department of Civil and Environmental Engineering, 2015. Master Dissertation of Applied Science in Civil Engineering.
- [21] Palma, P. "Fire Behaviour of Timber Connections", Phd thesis, ETH Zurich, 2016.
- [22] Aissa, A. "Computational Model for Timber Connections". Bragança: Instituto politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, 2017. Master Thesis.
- [23] Cabrero, J.M., Engineering Structures (2018), <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.037>.

- [24] Mendes, P. M. F. C. "Ligações em Estruturas de Madeira Tecnologia e Dimensionamento de Acordo com o Eurocódigo 5". Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994. Tese de Mestrado em Construções de Edifícios, 1994, pp. 20-21.
- [25] WHITE, R. H. "Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Timber Members". 3th. Westford: society of Fire Protection, 2002. cap. 11.
- [26] EN1991-1-2. 2002. "Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions- Actions on structures exposed to fire". Brussels, CEN, European Committee for Standardization.
- [27] Vargas, M. R.; Silva, V. P. (2003). "Resistência ao fogo das estruturas de aço". Instituto Brasileiro de Siderurgia - IBS/ Centro Brasileiro de Construção em Aço - CBCA.
- [28] P. Palma, A. Frangi. "Modelling the fire resistance of steel-to-timber dowelled connections loaded perpendicularly to the grain". Fire Safety Journal (2017), <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.12.001>.
- [29] Walter Pfeil, Michèle Schubert Pfeil, Estruturas de Madeira, Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- [30] David W. Green, Jerrold E. Winandy, and David E. Kretschmann. Mechanical Properties of Wood, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. Wood Handbook – Wood as an Engineering Material. Chapter 4, p. 1–45, 1999.
- [31] RITTER, M. A. (1990), Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance: manual.1 ed., Washington, Forest Service USA.
- [32] “Modulus of Elasticity or Young's Modulus - and Tensile Modulus for common Materials, Engineeringtoolbox.com,” [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html. [Acesso em 16 Janeiro 2018].
- [33] CEN, EN1995-1-2, Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-2: General Structural fire design, European Standards, Brussels, 2003.
- [34] CEN, BS EN 1194:1999, Timber Structures – Glued laminated timber – Strength classes and determination of characteristic values. British Standard, 1999.
- [35] “Valores característicos da resistência, rigidez e da densidade da Madeira Lamelada Colada,” [Online]. Available: http://www.toscca.com/imgs/categorias/033744_1_4243_Tabela-2-valores-resistencia-e-rigidez-lamelados.pdf. [Acesso em 14 Fevereiro 2018].

- [36] D. W. GREEN, Mechanical Properties of Wood, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Chapter 4: P 01-26, 1999 Revised June 2002.
- [37] CEN, EN1993-1-1: "Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings", Brussels, 2005.
- [38] CEN, EN1993-1-2, "Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design". European Standards, Brussels, 2005.
- [39] IONASHIRO, M.; GIOLITO, I. "Nomenclatura, padrões e apresentação dos resultados em análise térmica". Cerâmica, São Paulo, v. 26, n. 121, p. 17-24, jan. 1980.
- [40] Morten G. Gronli, Morten C. Melaaen, "Mathematical Model for Wood Pyrolysis - Comparison of Experimental Measurements with Model Predictions," *Energy & Fuels*, vol. 14, pp. 791-800, 2000.
- [41] FRANGI, A. "Fire resistance assessment of timber structures - Structural Fire Design of Buildings according to the Eurocodes". Brussels, 2012.
- [42] Figueroa, M. J. M., Moraes, P. D., "Comportamento da madeira a temperaturas elevadas," *Ambiente Construído*, vol. 9, nº 4, pp. p. 157-174, 2009.
- [43] Pinto, E. M. "Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal a grã para *Eucalyptus citriodora* E *E. grandis*". São Carlos: Universidade de São Paulo, 2005. Tese de doutorado.
- [44] CEMIN, D.S. "Desenvolvimento de um forno para carbonização de resíduos agroflorestais em pequena escala". Faculdade De Tecnologia – FT, 2010. 82f. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais.
- [45] Njankouo J.M., Dotreppe J.C., Franssen J.M. (2005). "Fire resistance of timbers from tropical countries and comparison of experimental charring rates with various models". *Construction and building materials*, 19(5), 376-386.
- [46] Coelho, D. C. S. "Modelo Computacional para Avaliação Térmica e Mecânica de Estruturas em Madeira". Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, 2011. Tese de mestrado em Engenharia da Construção.
- [47] Costa, G. N. S. "Análise térmica de lajes em madeira com e sem proteção". Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, 2017. Dissertação de mestrado em Engenharia Industrial.
- [48] Real P.V. (2003). *Incêndio em Estruturas Metálicas*. Amadora: Edições Orion.

- [49] ISO. ISO 834-1. Fire-resistance tests - Elements of building construction. Part 1: general requirements, Switzerland: Technical Committee ISO/TC 92, (1999).
- [50] Incropera F. (2008). Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6ªed. Rio de Janeiro: LTC.
- [51] Çengel, Yunus A., Ghajar Afshin J., Princípios de Transferência de Calor, 4º Edição, Porto Alegre: AMGH EDITORA LTDA, 2012, p. 684.
- [52] DIN 6325, EN ISO 8734: Parallel Pins, of Hardened Steel and Martensitic Stainless Steel (Dowel Pins) - Cylindrical Pins, 1997. ICS: 21.060.50.
- [53] CEN, EN 1990:2002+A1. "Eurocode: Basis of structural design". Brussels, 2005.
- [54] P. Racher, K. Laplanche, D. Dhima, A. Bouchaïr, "Thermo-mechanical analysis of the fire performance of dowelled timber connection". Engineering Structures, Volume 32, Issue 4, 2010, pp 1148-1157, ISSN 0141-0296, doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.12.041.
- [55] König, J. (2005). "Structural fire design according to Eurocode 5—Design rules and their background". Fire Mater., 29(3), 147–163.
- [56] König J. "Basic and notional charring rates". Proceedings of CIB W18, Meeting thirty-five, Kyoto. Lehrstuhl für Ingenieurholzbau, University of Karlsruhe: Karlsruhe, Germany, 2002.
- [57] ALVES, L. M. "Métodos dos Elementos Finitos, Apostila organizada como resultado do estudo das aulas para obtenção de créditos da Disciplina de Método dos Elementos Finitos do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Paraná", Curitiba, 2007.
- [58] ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 18.2, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc.
- [59] ANSYS® Academic Research, Release 18.2, Help System, Element reference, ANSYS®, Inc.
- [60] Vila Real, P. J. M. M. F. "Modelação por elementos finitos da solidificação e comportamento termomecânico de peças vazadas em moldações metálicas". Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1993. Dissertação de Mestrado em Engenharia Estrutural.

- [61] Fonseca, E. M. M. F. "Análise por Elementos Finitos do Comportamento de Tubagens sob a Acção de Fortes Gradientes Térmico". Porto: FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Mecânica.
- [62] Pentenrieder, B. "Finite Element Solution of Heat Conduction Problems in Complicated 3D Geometries Using the Multigrid Method". Munich, Germany: Technical University of Munich, Faculty of Mathematics, 29 July 2005. Dissertation in Mathematics.
- [63] G.P.Nikishkov, Introduction to the finite element method, University of Aizu, Aizu-Wakamatsu 965-8580, Japan 2004.

Anexo A

Projeto de ligações W-S-W de acordo com o Eurocódigo 5

Tabela A.1: Ligações de acordo com o Eurocódigo 5-1-1.

E_d	t_1	d	$f_{t,0,k}$	$f_{u,k}$	ρ	$M_{y,Rk}$	$F_{v,Rk}$	$F_{v,Rd}$	n°	L_N	C_N	a_1	a_2	a_{3t}	a_{4c}	largura da placa, L	altura da placa, h
kN	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kN.mm	kN	kN	uni.	uni.	uni.	mm	mm	mm	mm	mm	mm
10	25	8	19,5	400	410	26,74	3,96	2,54	4	1	4	40	24	80	24	280	48
		10	19,5	400	410	47,77	5,56	3,56	3	1	3	50	30	80	30	260	60
		12	19,5	400	410	76,75	7,45	4,77	3	1	3	60	36	84	36	288	72
	50	8	19,5	400	410	26,74	5,87	3,75	3	1	3	40	24	80	24	240	48
		10	19,5	400	410	47,77	7,58	4,85	3	1	3	50	30	80	30	260	60
		12	19,5	400	410	76,75	9,437	6,04	2	1	2	60	36	84	36	228	72
20	25	8	19,5	400	410	26,74	3,96	2,54	8	2	4	40	24	80	24	280	72
		10	19,5	400	410	47,77	5,56	3,56	6	2	3	50	30	80	30	260	90
		12	19,5	400	410	76,75	7,45	4,77	6	2	3	60	36	84	36	288	108
	50	8	19,5	400	410	26,74	5,87	3,75	6	2	3	40	24	80	24	240	72
		10	19,5	400	410	47,77	7,58	4,85	6	2	3	50	30	80	30	260	90
		12	19,5	400	410	76,75	9,44	6,04	4	1	4	60	36	84	36	348	72
30	25	8	19,5	400	410	26,74	3,96	2,54	12	3	4	40	24	80	24	280	96
		10	19,5	400	410	47,77	5,56	3,56	9	3	3	50	30	80	30	260	120
		12	19,5	400	410	76,75	7,45	4,77	8	2	4	60	36	84	36	348	108
	50	8	19,5	400	410	26,74	5,87	3,75	8	2	4	40	24	80	24	280	72
		10	19,5	400	410	47,77	7,58	4,85	8	2	4	50	30	80	30	310	90
		12	19,5	400	410	76,75	9,44	6,04	6	2	3	60	36	84	36	288	108
40	25	8	19,5	400	410	26,74	3,96	2,54	16	4	4	40	24	80	24	280	120
		10	19,5	400	410	47,77	5,56	3,56	12	3	4	50	30	80	30	310	120
		12	19,5	400	410	76,75	7,45	4,77	9	3	3	60	36	84	36	288	144
	50	8	19,5	400	410	26,74	5,87	3,75	12	3	4	40	24	80	24	280	96
		10	19,5	400	410	47,77	7,58	4,85	9	3	3	50	30	80	30	260	120
		12	19,5	400	410	76,75	9,44	6,04	8	2	4	60	36	84	36	348	108
50	25	8	19,5	400	410	26,74	3,96	2,54	20	5	4	40	24	80	24	280	144
		10	19,5	400	410	47,77	5,56	3,56	15	3	5	50	30	80	30	360	120
		12	19,5	400	410	76,75	7,45	4,77	12	3	4	60	36	84	36	348	144
	50	8	19,5	400	410	26,74	5,87	3,75	15	3	5	40	24	80	24	320	96
		10	19,5	400	410	47,77	7,58	4,85	12	3	4	50	30	80	30	310	120
		12	19,5	400	410	76,75	9,44	6,04	9	1	9	60	36	84	36	648	72

n° é o número total de cavilhas na ligação

Tabela A.2: Ligações não protegidas projetadas ao fogo de acordo com Eurocódigo 5-1-2.

E_d kN	t_1 mm	d mm	H mm	$f_{t,0,k}$ N/mm ²	ρ Kg/m ³	n ^o cavilhas	$E_{d,fi}$ kN	$t_{d,fi}$ min	$F_{v,Rk,fi}^*$ N	$F_{v,Rd,fi}^*$ N
10	50	8	48	19,50	410	3	6	12,90	11751,3	9401,0
		10	60	19,50	410	3	6	12,90	15181,5	12145,4
		12	72	19,50	410	2	6	12,90	12604,6	10083,7
20	50	8	72	19,50	410	6	12	12,90	23502,6	18802,1
		10	90	19,50	410	6	12	12,90	30363,5	24290,8
		12	72	19,50	410	4	12	12,90	25209,2	20167,3
30	50	8	72	19,50	410	8	18	12,90	31336,8	25069,5
		10	90	19,50	410	8	18	12,90	40484,6	32387,7
		12	108	19,50	410	6	18	12,90	37813,8	30251,0
40	50	8	96	19,50	410	12	24	12,90	47005,2	37604,2
		10	120	19,50	410	9	24	12,90	45545,2	36436,2
		12	108	19,5	410	8	24	12,90	50418,4	40334,7
50	50	8		19,50	410	15	30	12,90	58756,5	47005,2
		10		19,50	410	12	30	12,90	60726,9	48582,6
		12	72	19,5	410	9	30	12,90	56720,6	45376,5

Tabela A.3: Ligações protegidas projetadas ao fogo de acordo com Eurocódigo 5-1-2.

$E_{d,fi}$ kN	t_1 mm	d mm	H mm	n ^o cavilhas	β_n mm/min	t_{req} min	a_{fi} mm	t_1^* mm	H^* mm	$F_{v,Rk,fi}^*$ N	$F_{v,Rd,fi}^*$ N
6	50	8	48	3	0,7	30	18	68	84	11853,8	9483,1
		10	60	3	0,7	30	18	68	96	17519,6	14015,6
		12	72	2	0,7	30	18	68	108	15432,3	12345,8
12	50	8	72	6	0,7	30	18	68	108	23707,6	18966,1
		10	90	6	0,7	30	18	68	126	35039,1	28031,3
		12	72	4	0,7	30	18	68	108	30864,6	24691,6
18	50	8	72	8	0,7	30	18	68	108	31610,2	25288,1
		10	90	8	0,7	30	18	68	126	46718,8	37375,1
		12	108	6	0,7	30	18	68	144	46296,8	37037,5
24	50	8	96	12	0,7	30	18	68	132	47415,2	37932,2
		10	120	9	0,7	30	18	68	156	52558,7	42046,9
		12	108	8	0,7	30	18	68	144	61729,1	49383,3
30	50	8		15	0,7	30	18	68	132	59269,0	47415,2
		10		12	0,7	30	18	68	156	70078,2	56062,6
		12	72	9	0,7	30	18	68	108	69445,2	55556,2

Tabela A.4: Diâmetro nominal de cavilhas.

SIZE RANGES

SIZE RANGE – DOWEL PINS TO DIN 6325 m6 TOLERANCE

Nominal Diameter, DIN 6325	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	14	16	20	
Available Materials	Steel, Through Hardened and Ground to m6 tolerance														
Double Shear Strengths tested to ISO 8749, kN	1.5	3.4	5.5	8	13	22	31	53	88	132	210	260	350	485	
Lengths in mm															
4															
5															
6															
8															
10															
12															
14															
16															
18															
20															
24															
28															
30															
32															
36															
40															
45															
50															
55															
60															
70															
80															
90															
100															
110															
120															
Length Tolerances to js 14															

SIZE RANGE – DOWEL PINS TO DIN 7 m6 AND h8 TOLERANCE

Nominal Diameter, DIN 7	0.8	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	14	16	20	25	30
Dimension C	0.12	0.15	0.23	0.3	0.4	0.45	0.6	0.75	0.9	1.2	1.5	1.8	2	2.5	3	4	4.5
Available Materials	Mild Steel ground to m6 or h8 tolerance A2 Stainless, Grade 1.4305 ground to m6 or h8, up to 25 mm Ø A4 Stainless, Grade 1.4571 ground to m6, from 1 to 25mm Ø																
Double Shear Strengths tested to ISO 8749, kN																	
Mild Steel	0.4	0.7	1.6	2.85	4.25	6.15	10.6	16.5	22.8	40.5	63.2	91	124	156	220	300	390
Stainless Steel A2	0.4	0.7	1.7	2.9	4.4	6.6	11.7	18.1	26.0	47.0	64.1	92					
Lengths in mm																	
3																	
4																	
5																	
6																	
8																	
10																	
12																	
14																	
16																	
18																	
20																	
24																	
28																	
30																	
32																	
36																	
40																	
45																	
50																	
55																	
60																	
70																	
80																	
90																	
100																	
110																	
120																	
Length Tolerances	3– 10 mm long + 0.3,- 0					12– 50 mm long + 0.5,- 0					Over 50 mm long + 0.8,- 0						

A selection kit is also available. Also stocked in inch sizes in equivalent standard.

E: sales@technifast.co.uk W: www.technifast.co.uk

Anexo B
Análise mecânica das ligações

Tabela B.1: Tensões na ligação 1.

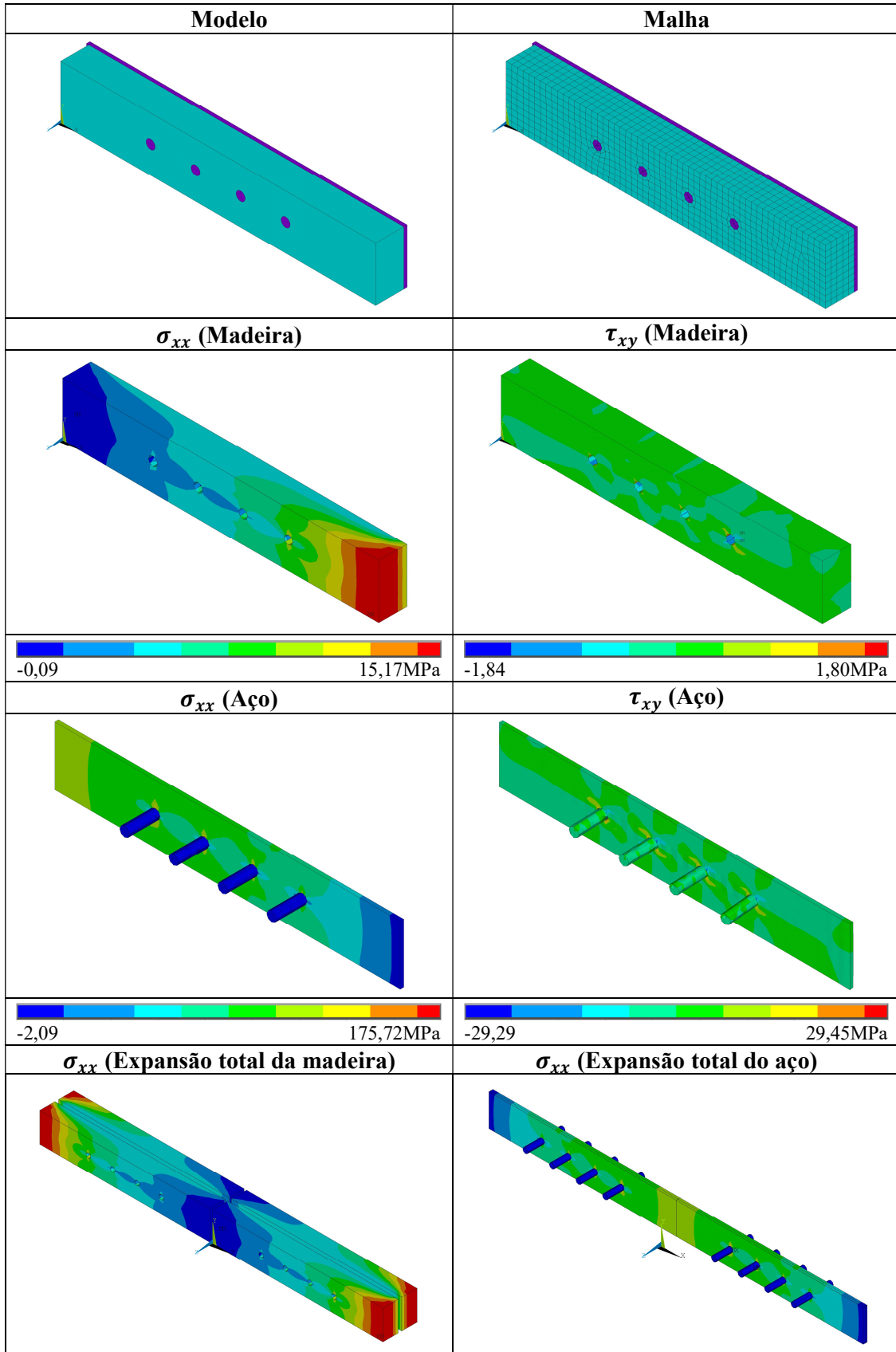


Tabela B.2: Tensões na ligação 2.

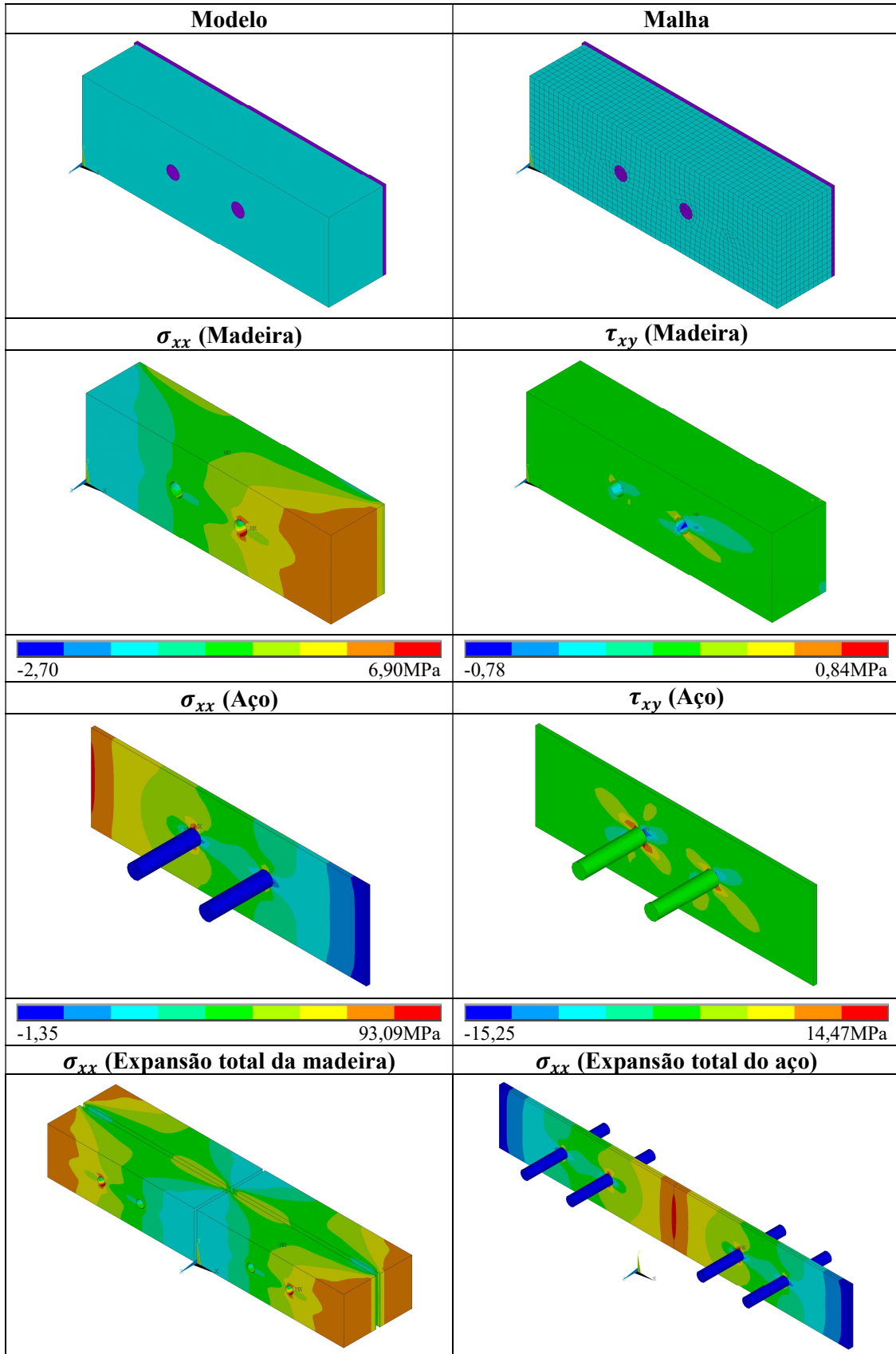


Tabela B.3: Tensões na ligação 3.

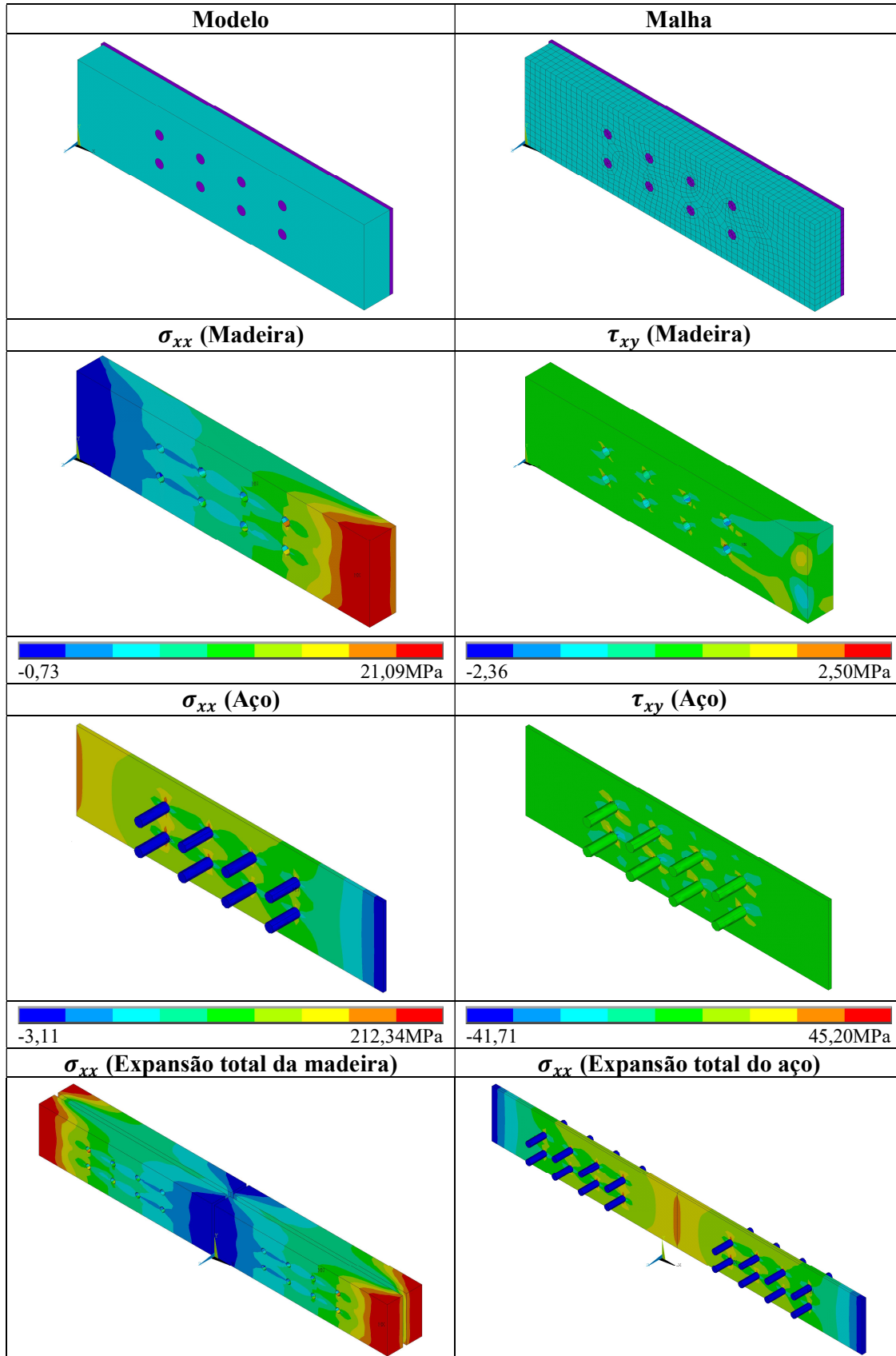


Tabela B. 4: Tensões na ligação 4.

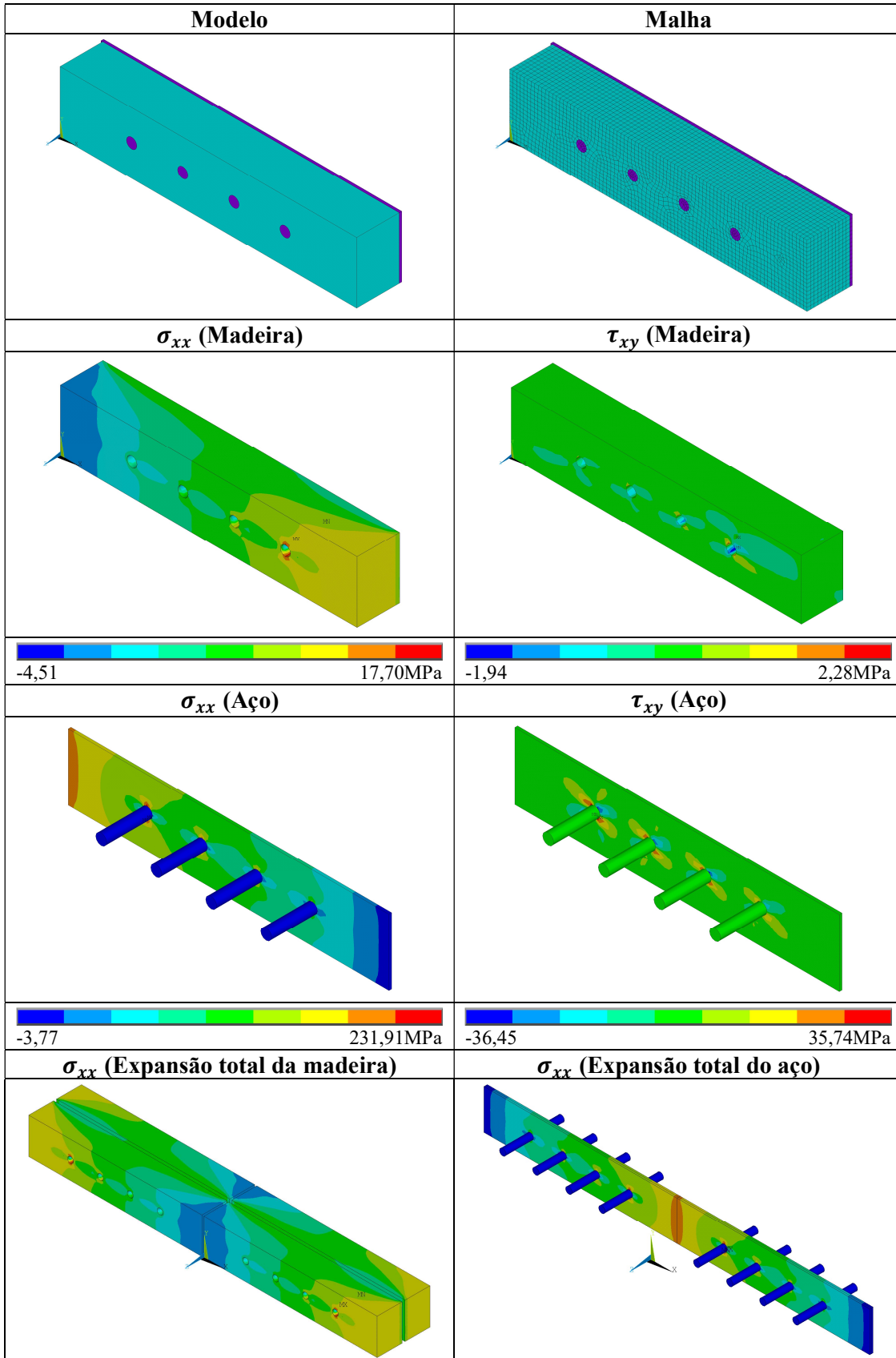


Tabela B.5: Tensões na ligação 5.

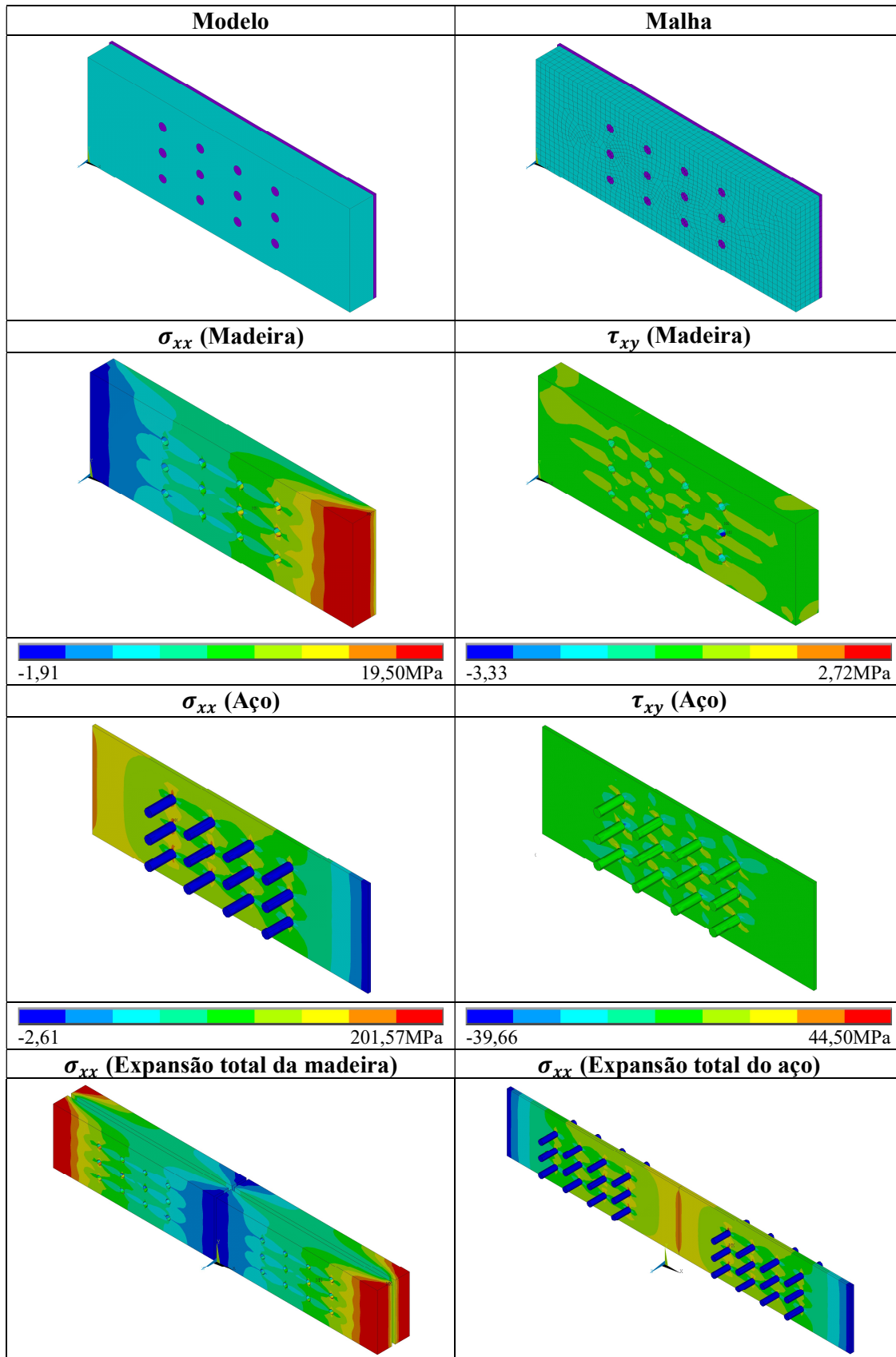


Tabela B.6: Ligação 6.

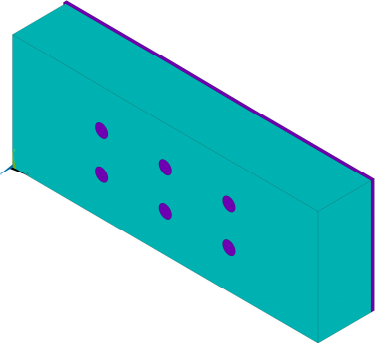
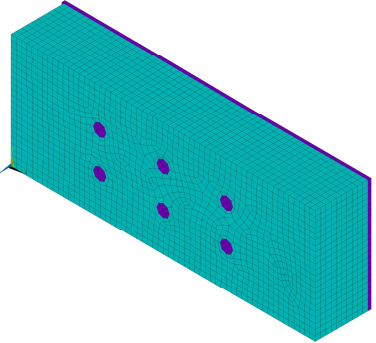
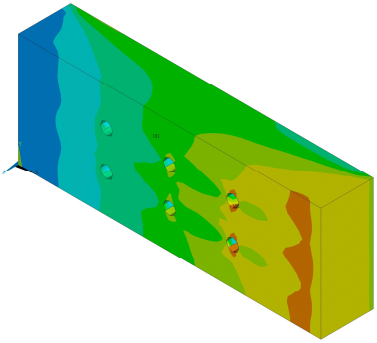
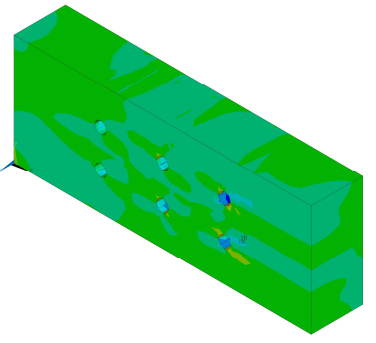


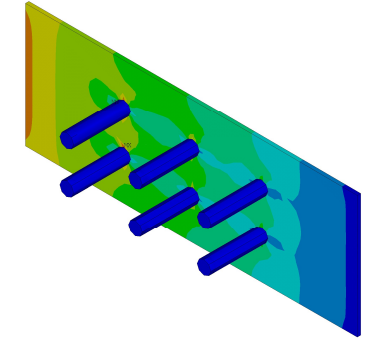
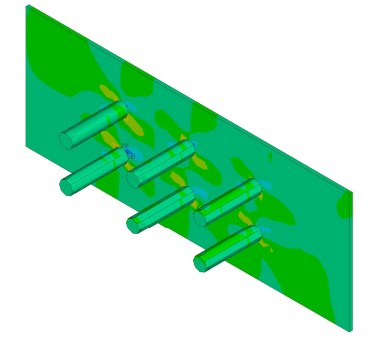


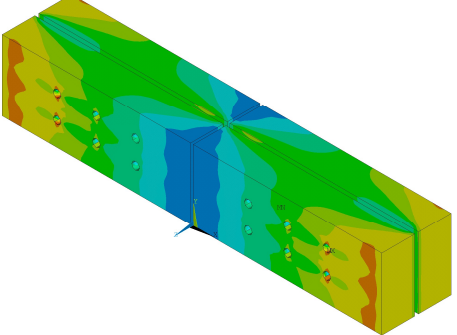
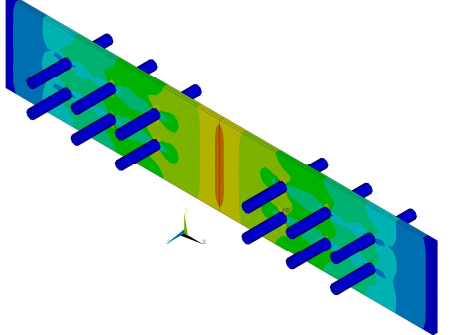
Modelo	Malha
	
σ_{xx} (Madeira)	τ_{xy} (Madeira)
	
	
σ_{xx} (Aço)	τ_{xy} (Aço)
	
	
σ_{xx} (Expansão total da madeira)	σ_{xx} (Expansão total do aço)
	

Tabela B.7: Tensões na ligação 7.

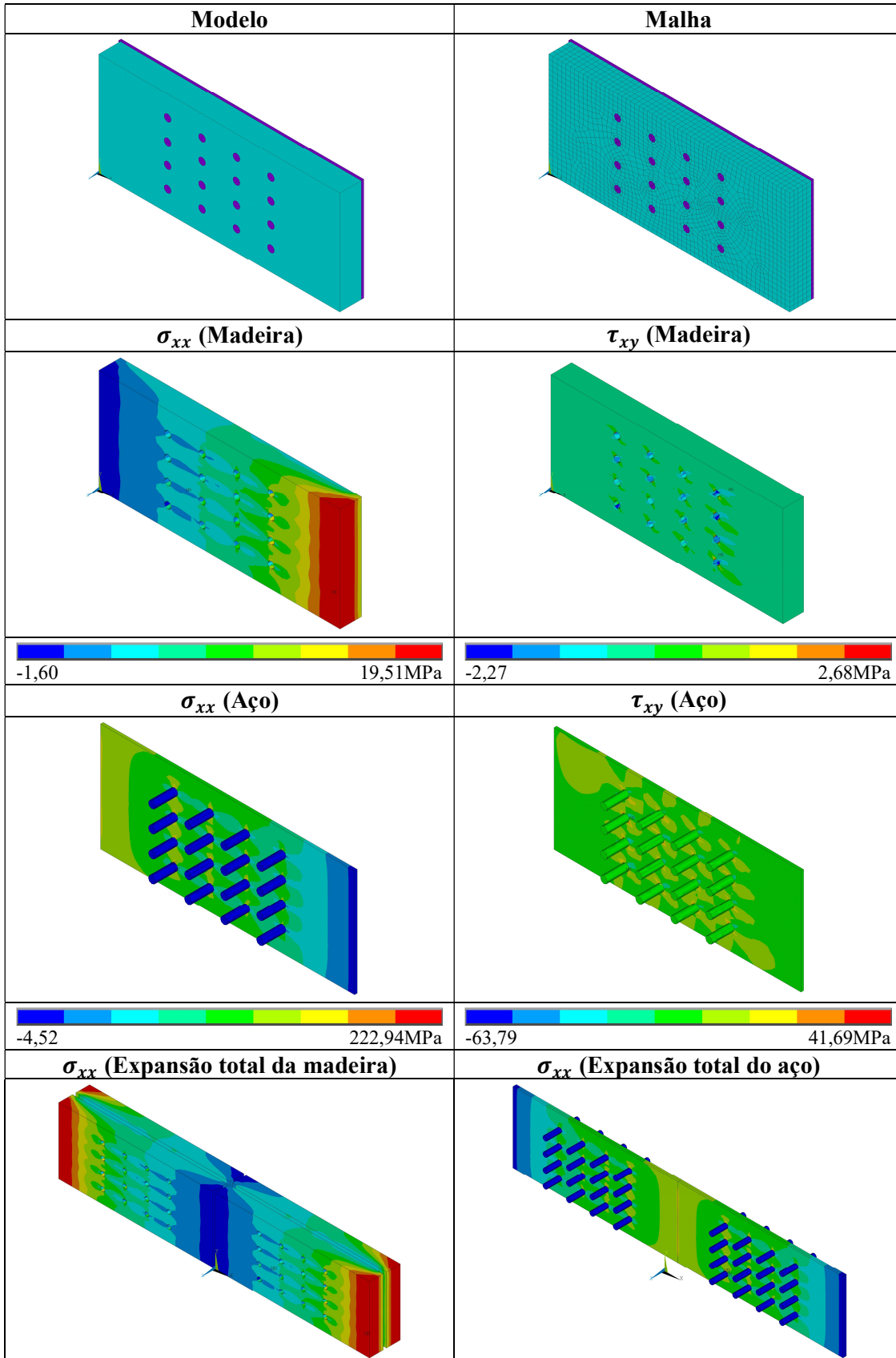


Tabela B.8: Tensões na ligação 8.

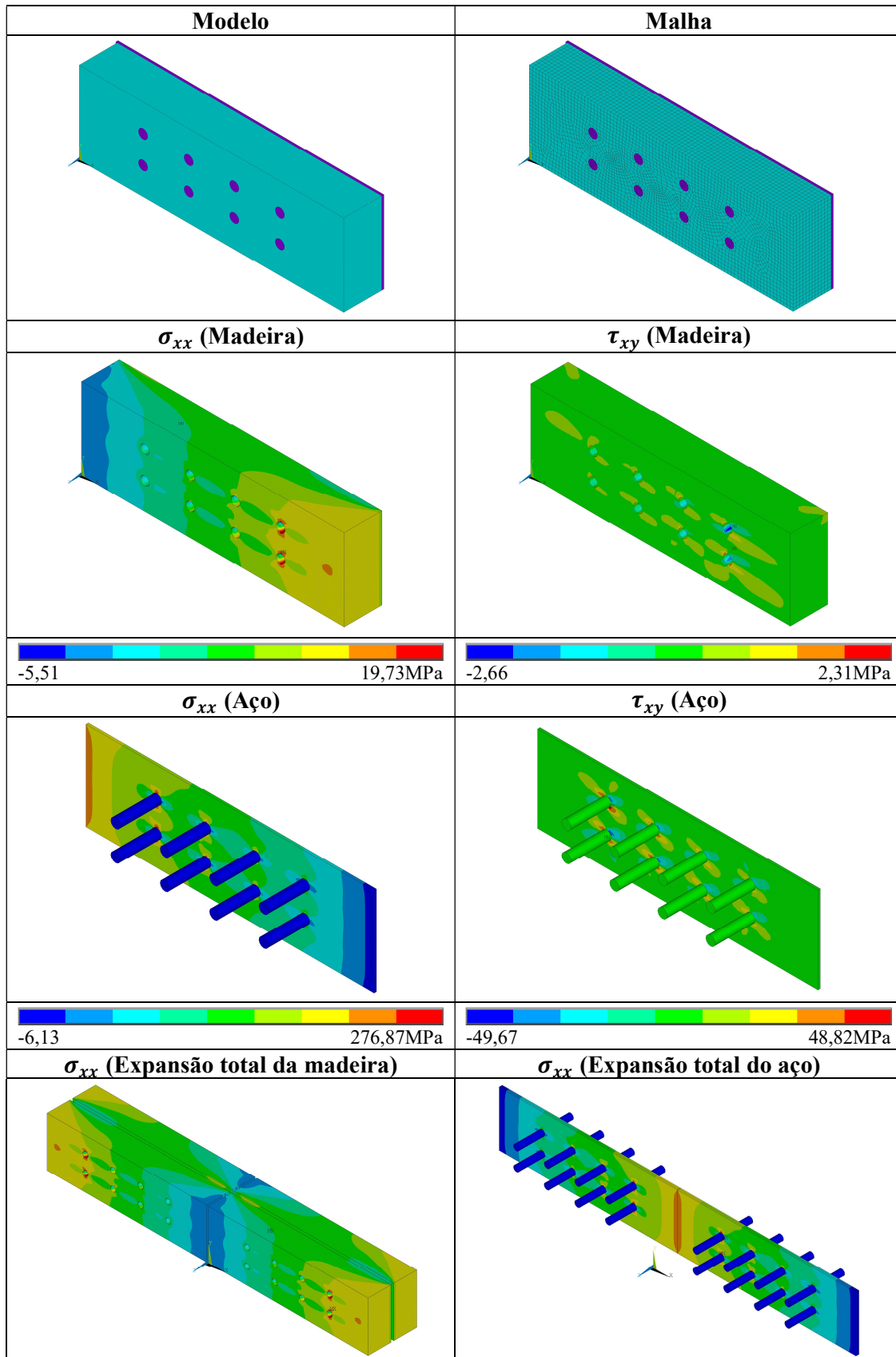


Tabela B.9: Tensões na ligação 9.

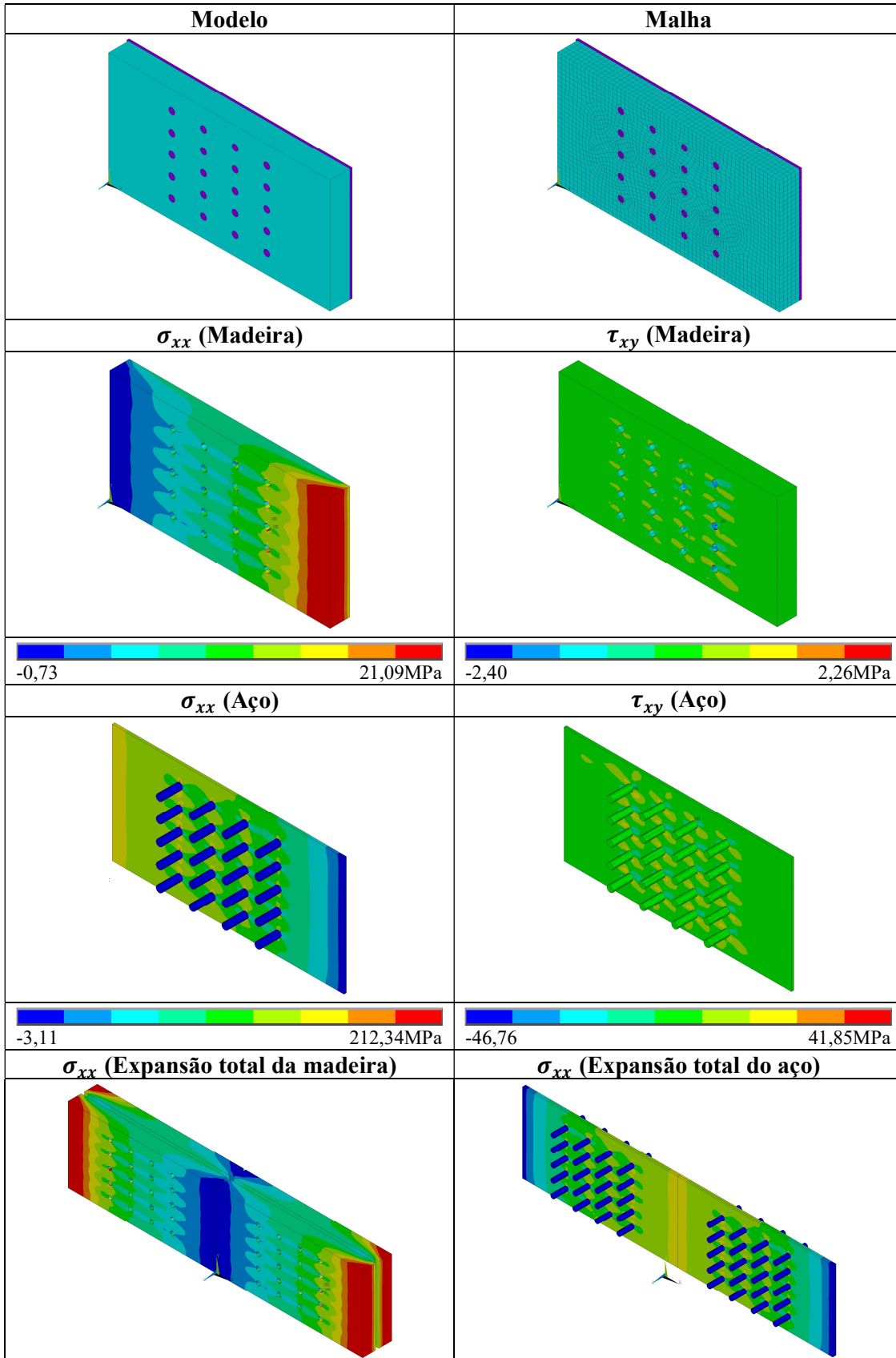
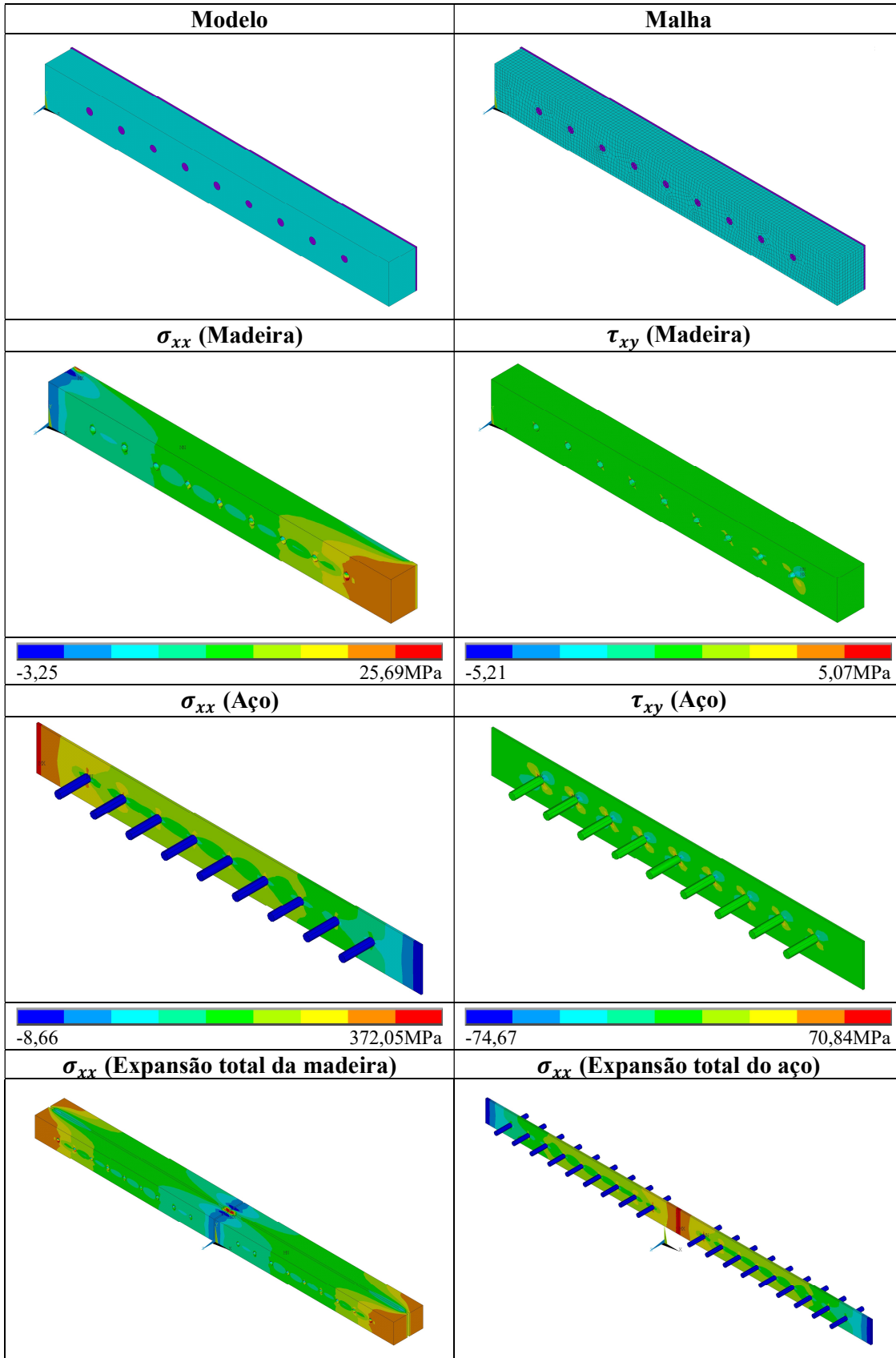


Tabela B.10: Tensões na ligação 10.



Anexo C

Análise Térmica das ligações

Tabela C.1: Ligação 1 não protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de um lado, exposição de 12,90 minutos.

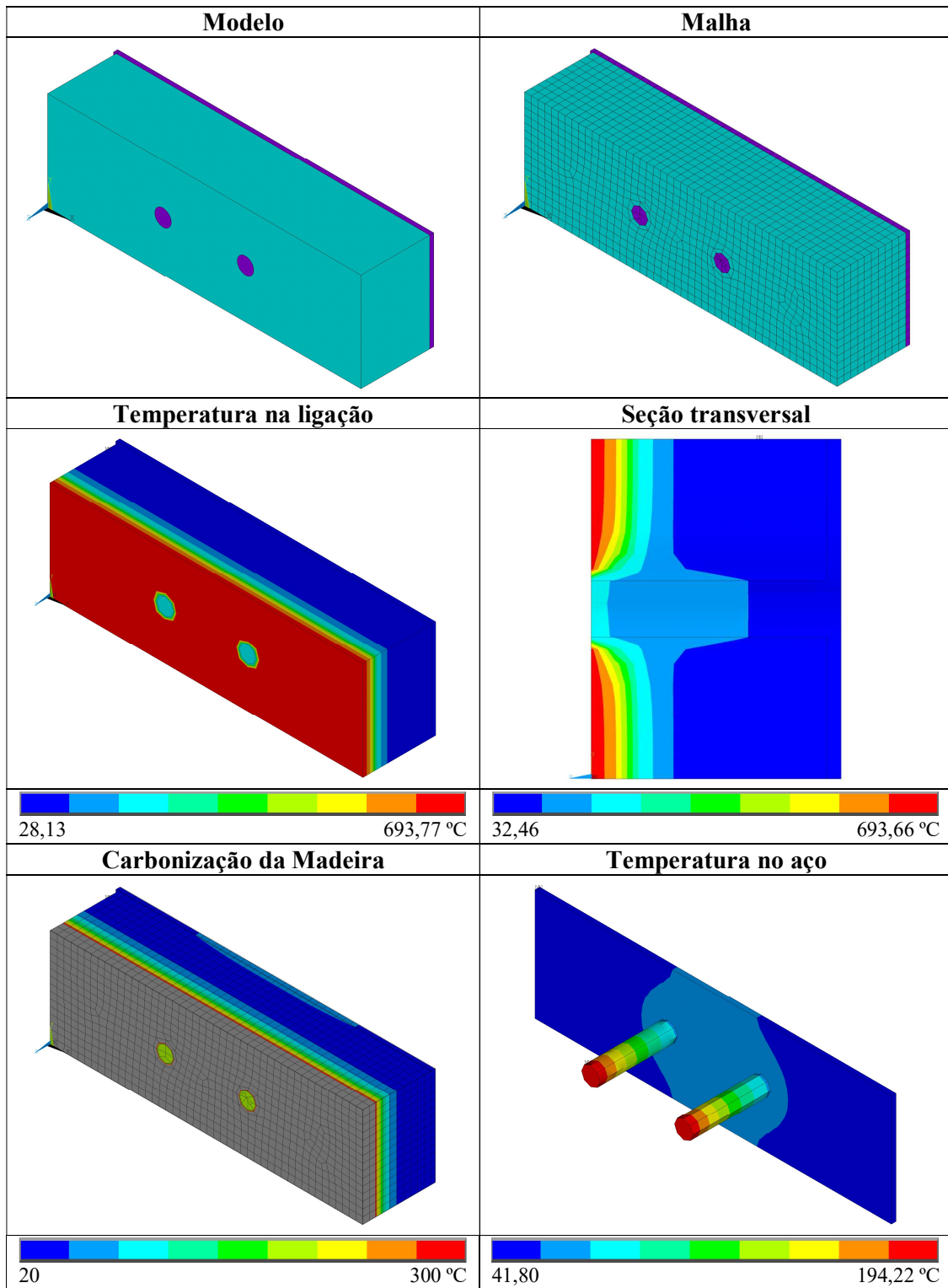


Tabela C.2: Ligação 2 não protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de um lado, exposição de 12,90 minutos.

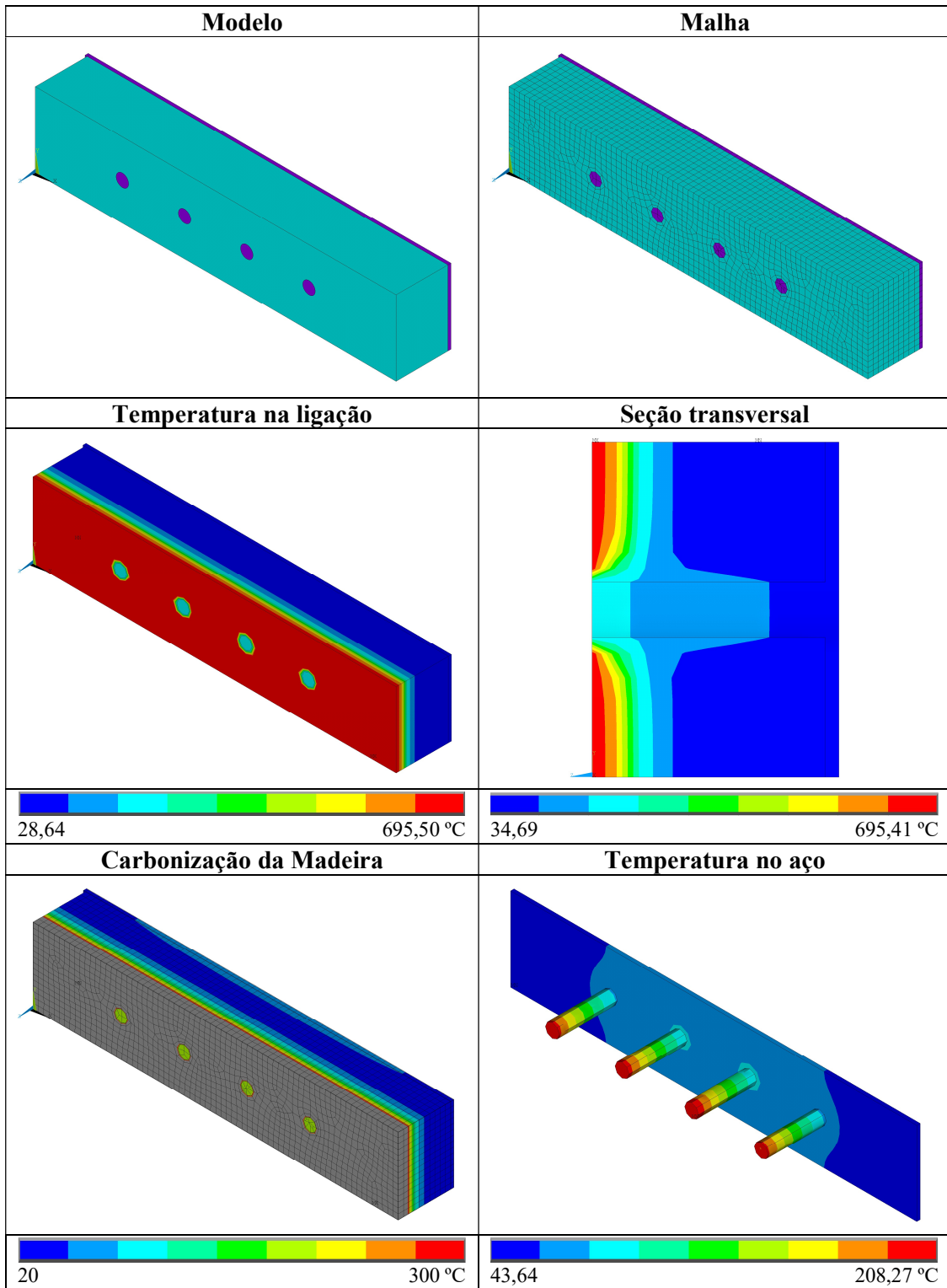


Tabela C.3: Ligação 3 não protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de um lado, exposição de 12,90 minutos.

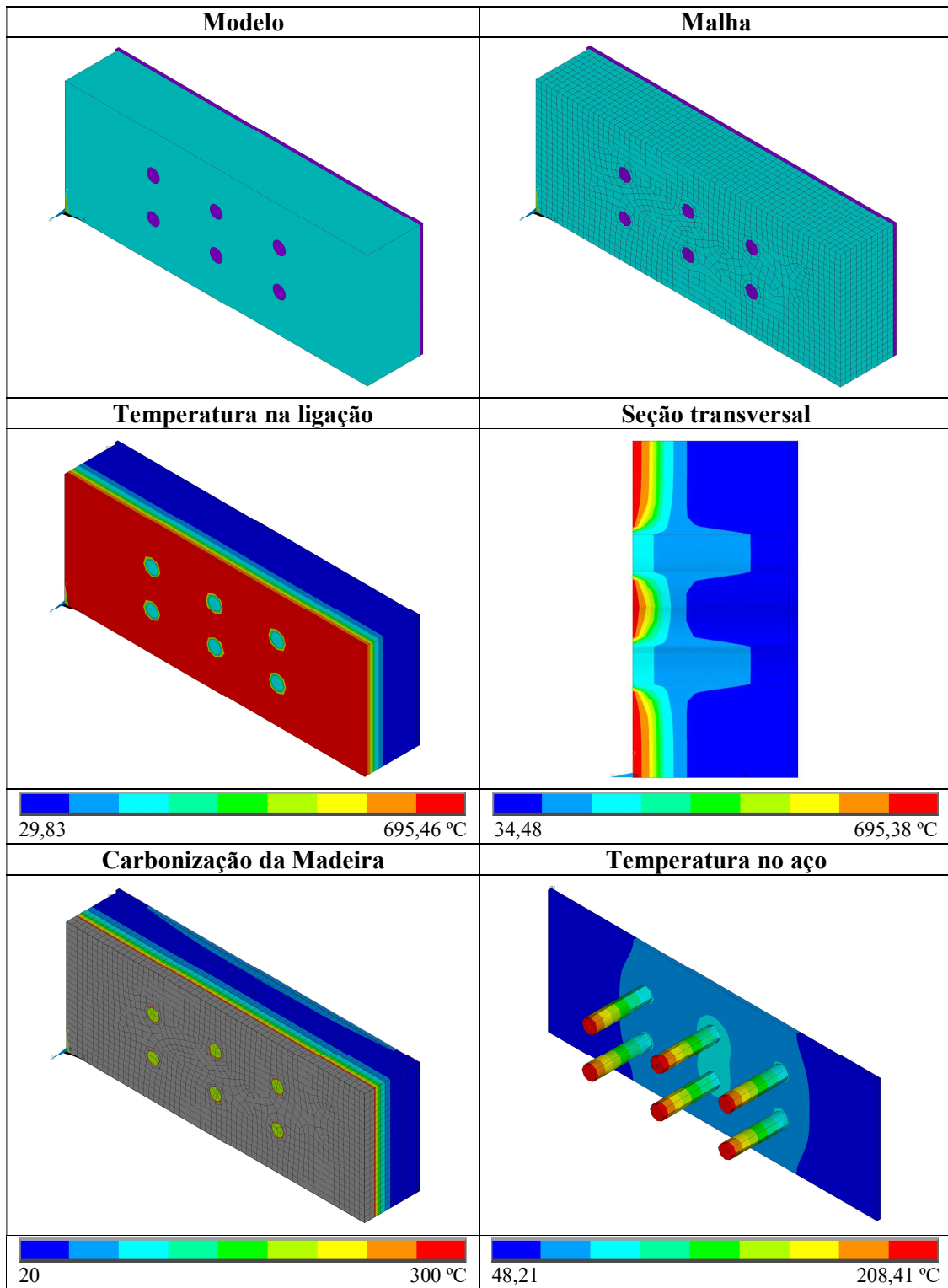


Tabela C.4: Ligação 4 não protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de um lado, exposição de 12,90 minutos.

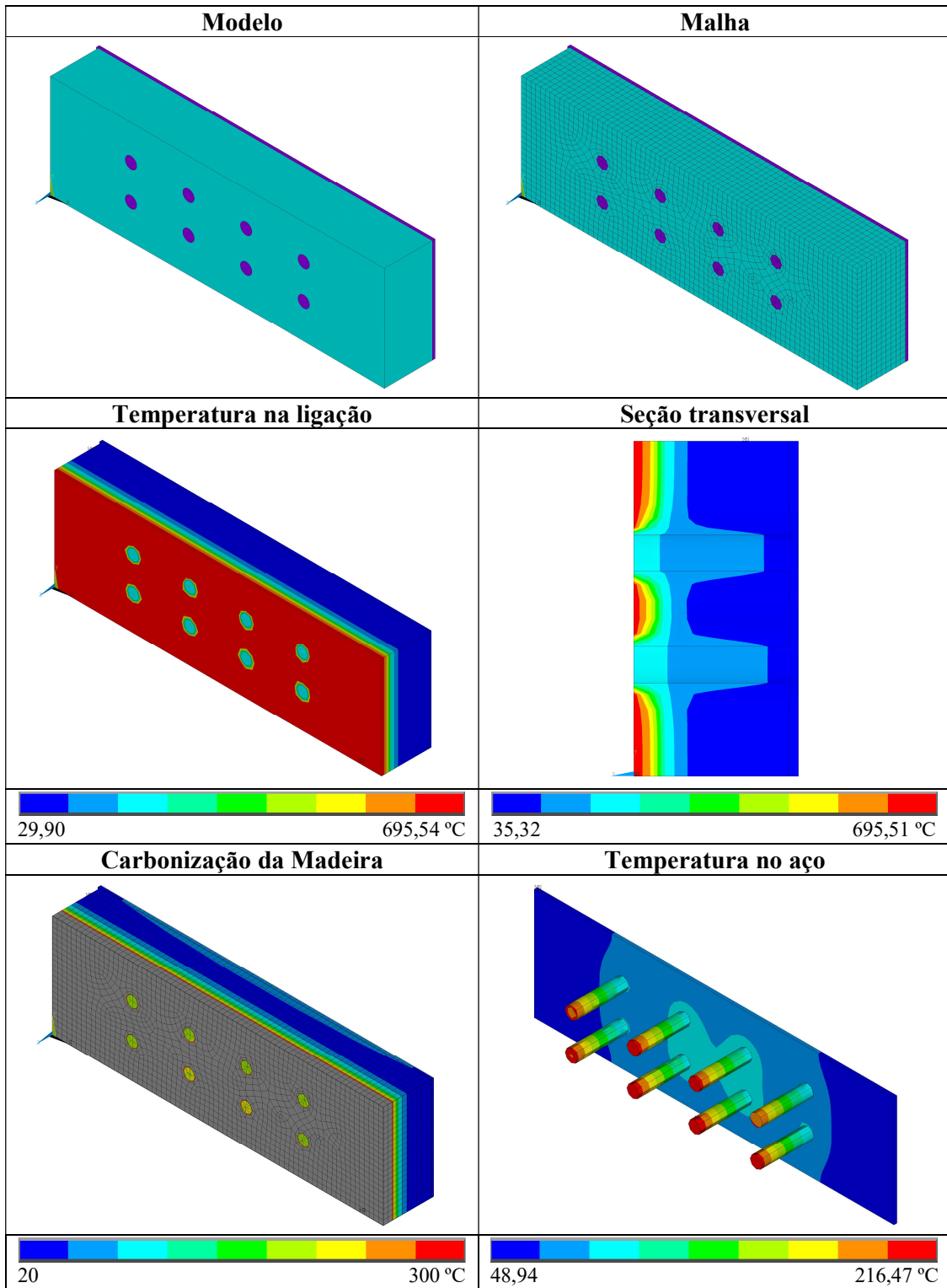


Tabela C.5: Ligação 5 não protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de um lado, exposição de 12,90 minutos.

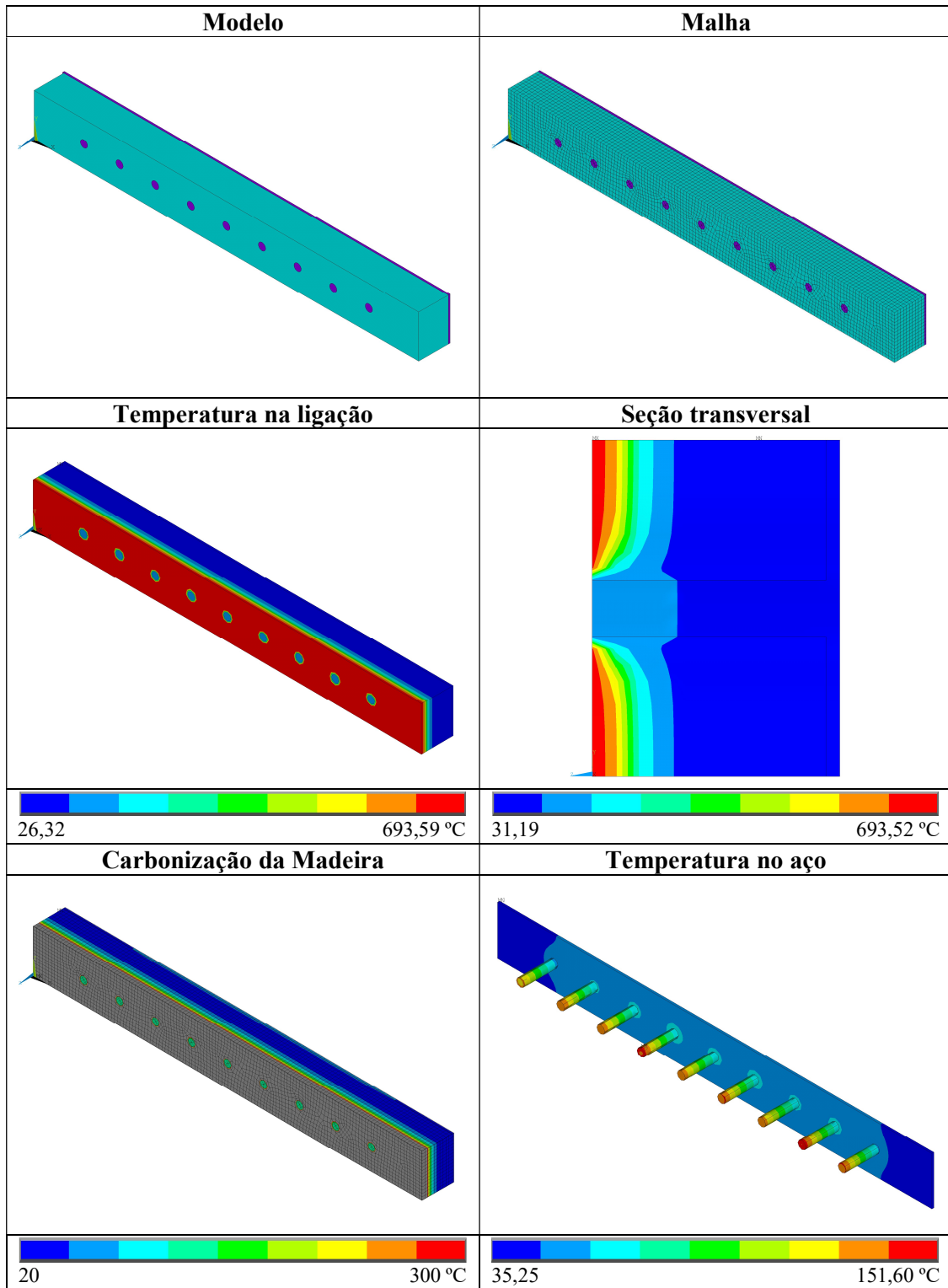


Tabela C.6: Ligação 1 protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de um lado, exposição de 30 minutos.

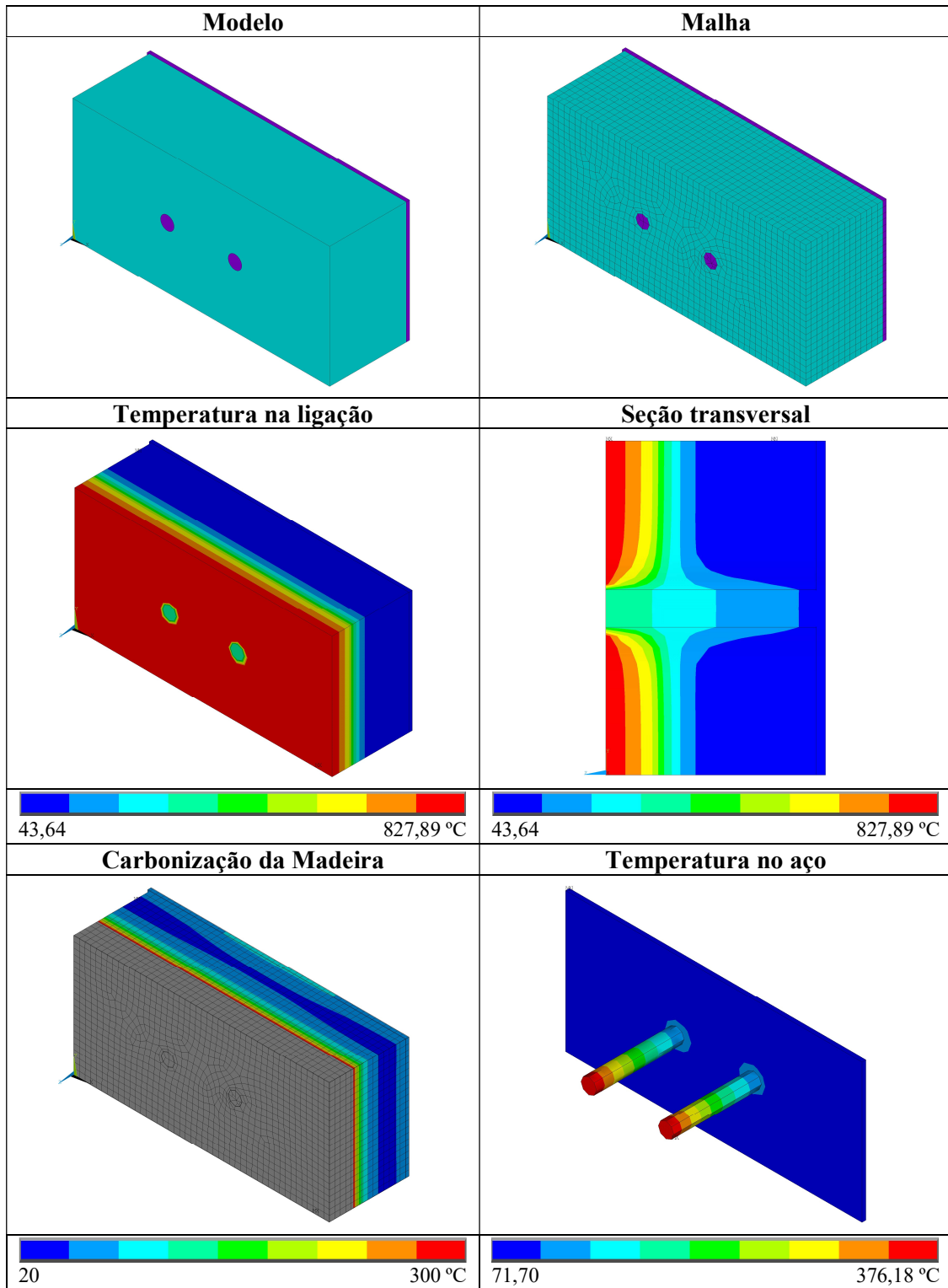


Tabela C.7: Ligação 2 protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de um lado, exposição de 30 minutos.

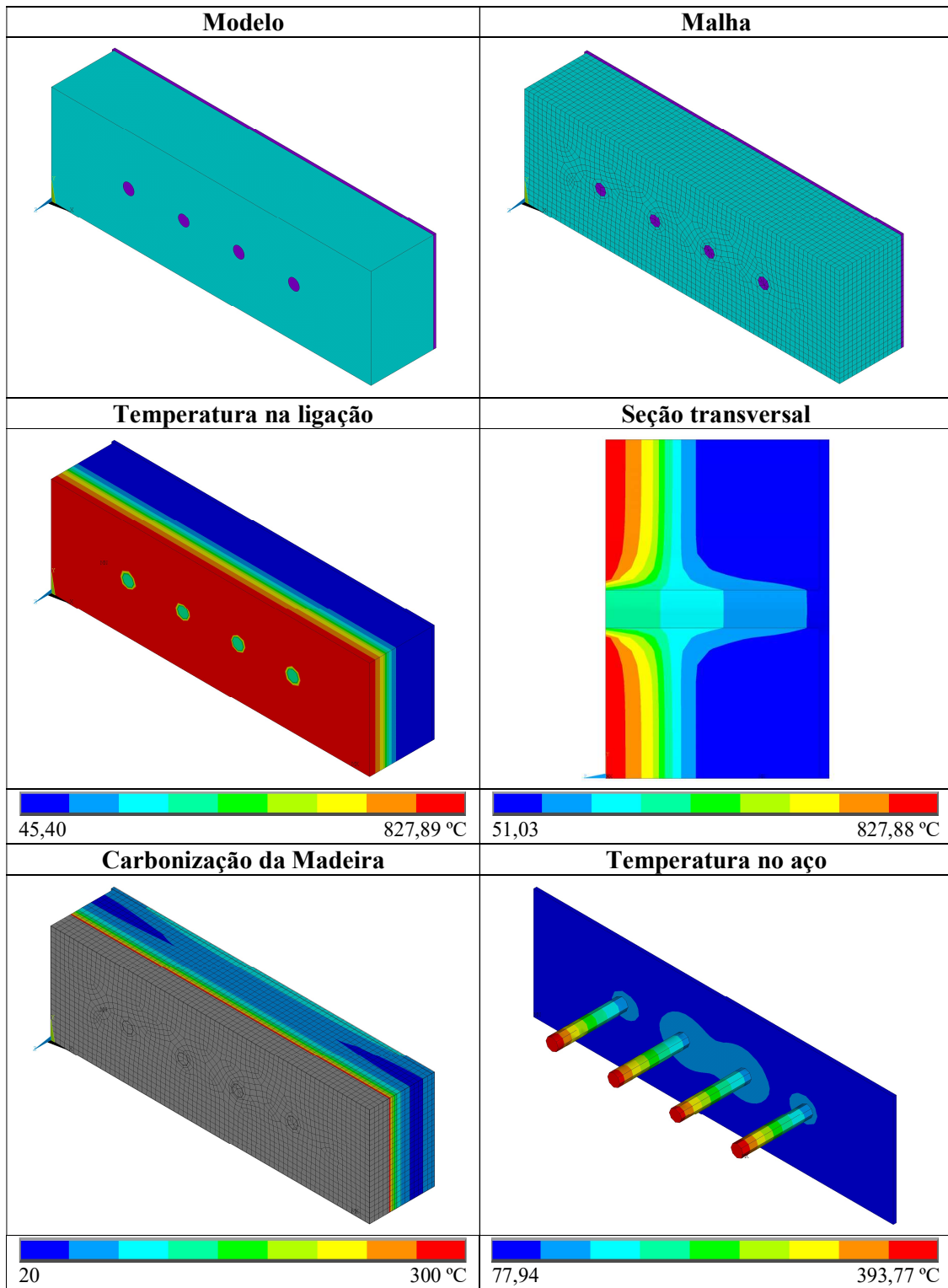


Tabela C.8: Ligação 3 protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de um lado, exposição de 30 minutos.

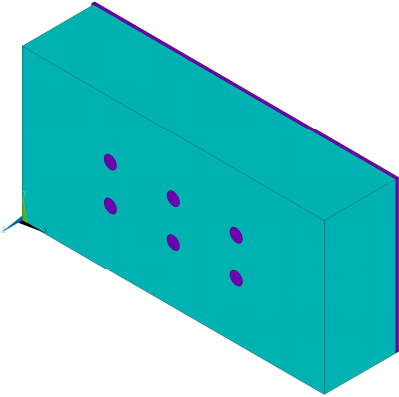
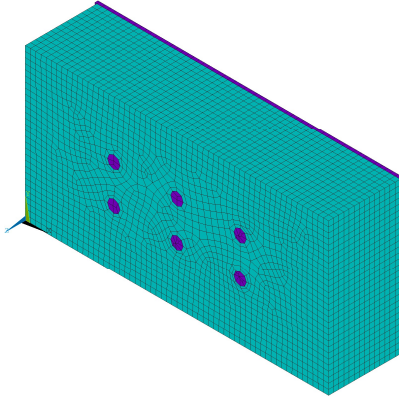
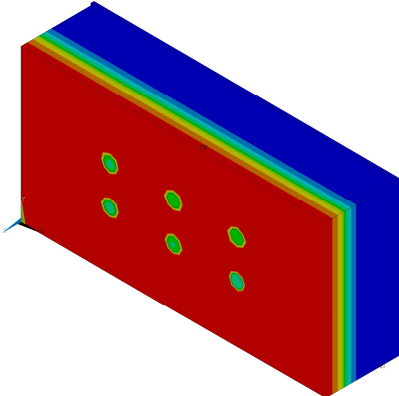
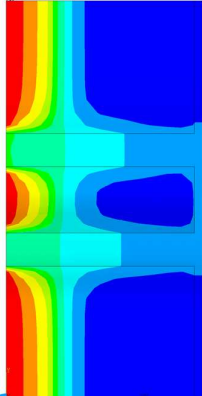


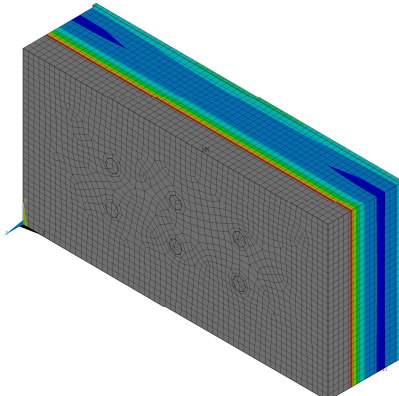
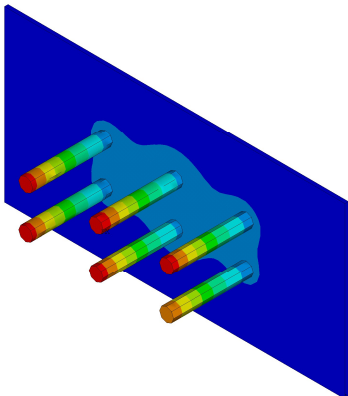


Modelo	Malha
	
Temperatura na ligação	Seção transversal
	
	
Carbonização da Madeira	Temperatura no aço
	
	

Tabela C.9: Ligação 4 protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de um lado, exposição de 30 minutos.

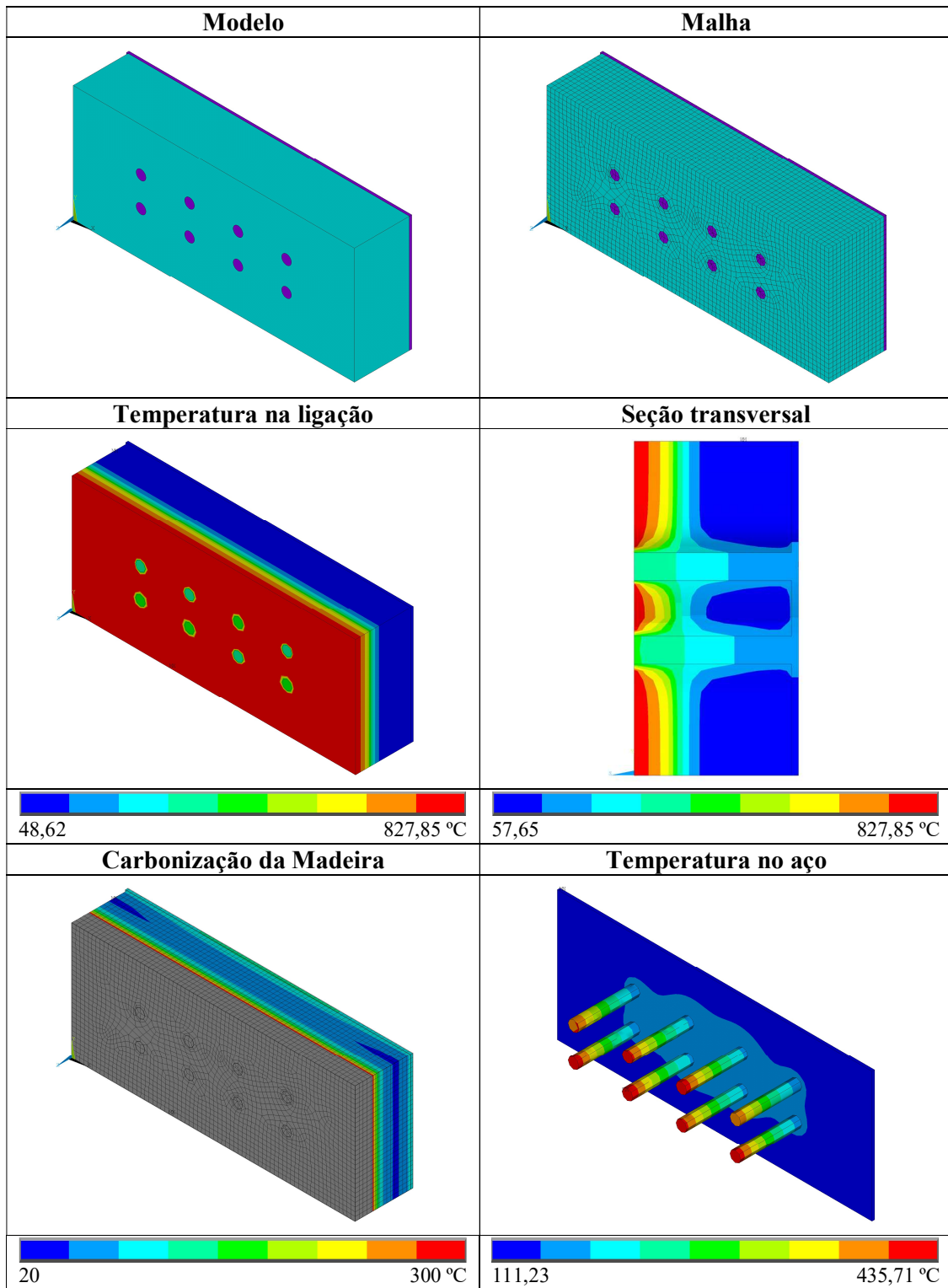


Tabela C.10: Ligação 5 protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de um lado, exposição de 30 minutos.

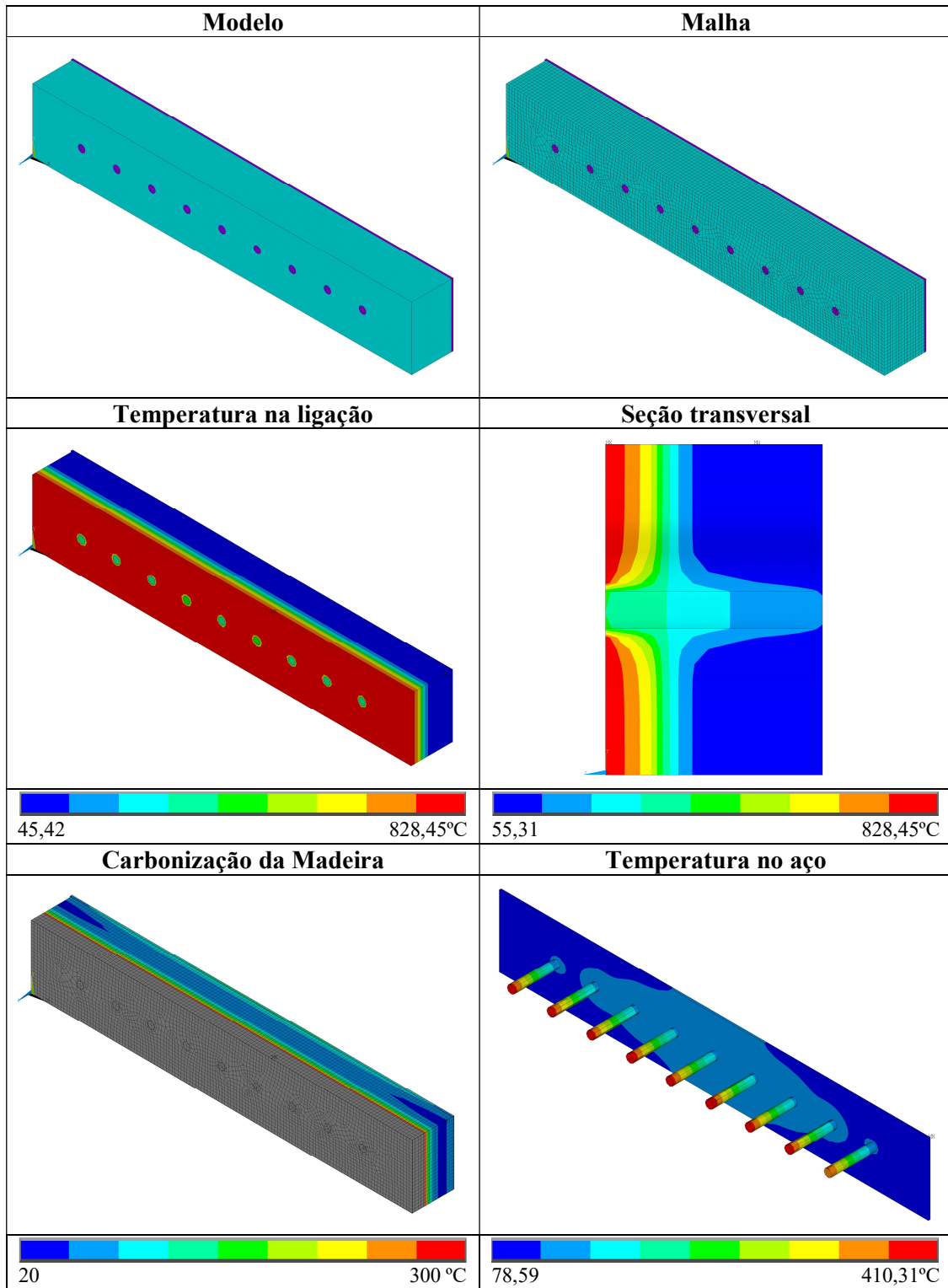


Tabela C.11: Ligação 1 não protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de três lados, exposição de 12,90 minutos.

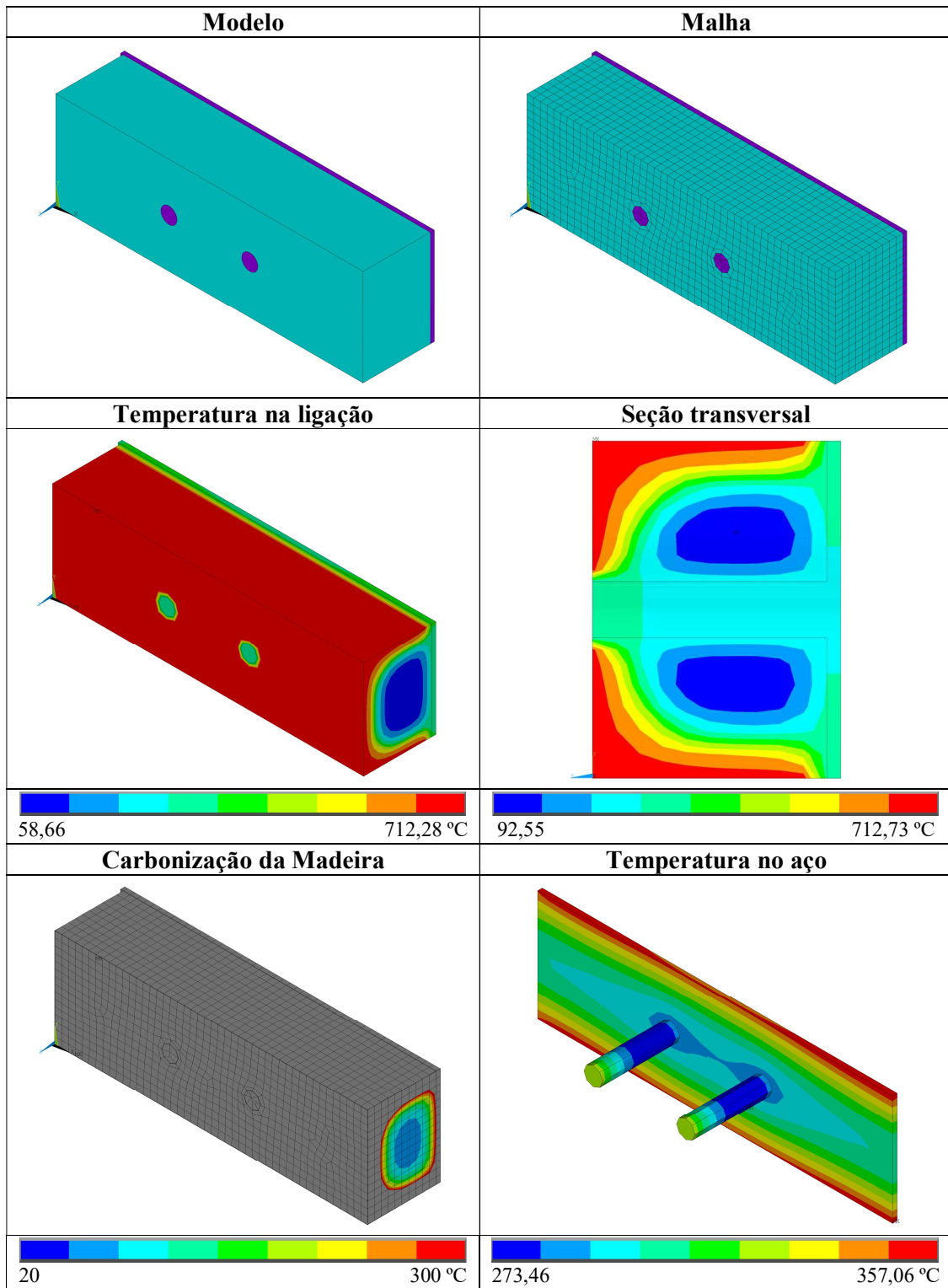


Tabela C.12: Ligação 2 não protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de três lados, exposição de 12,90 minutos.

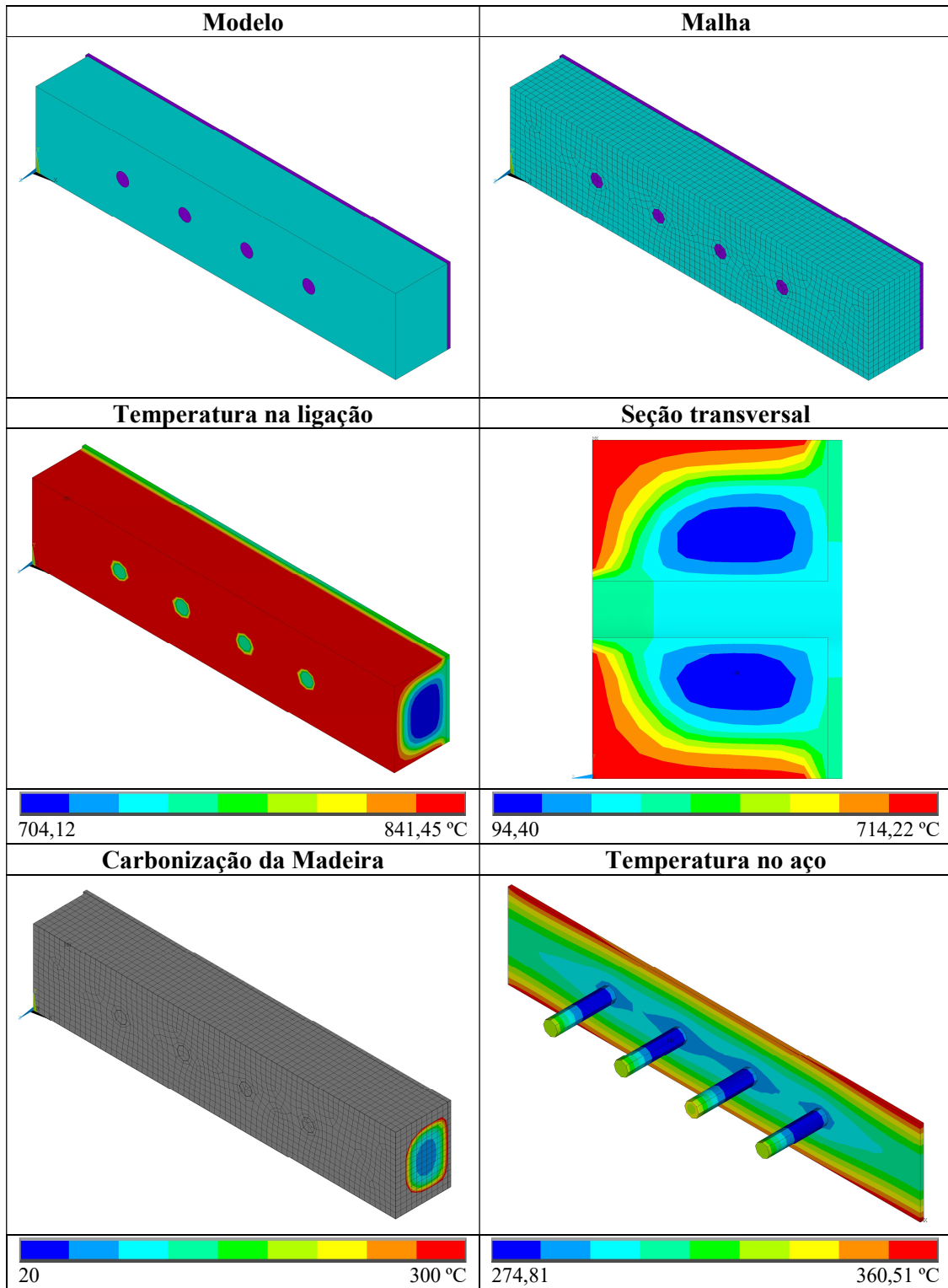


Tabela C.13: Ligação 3 não protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de três lados, exposição de 12,90 minutos.

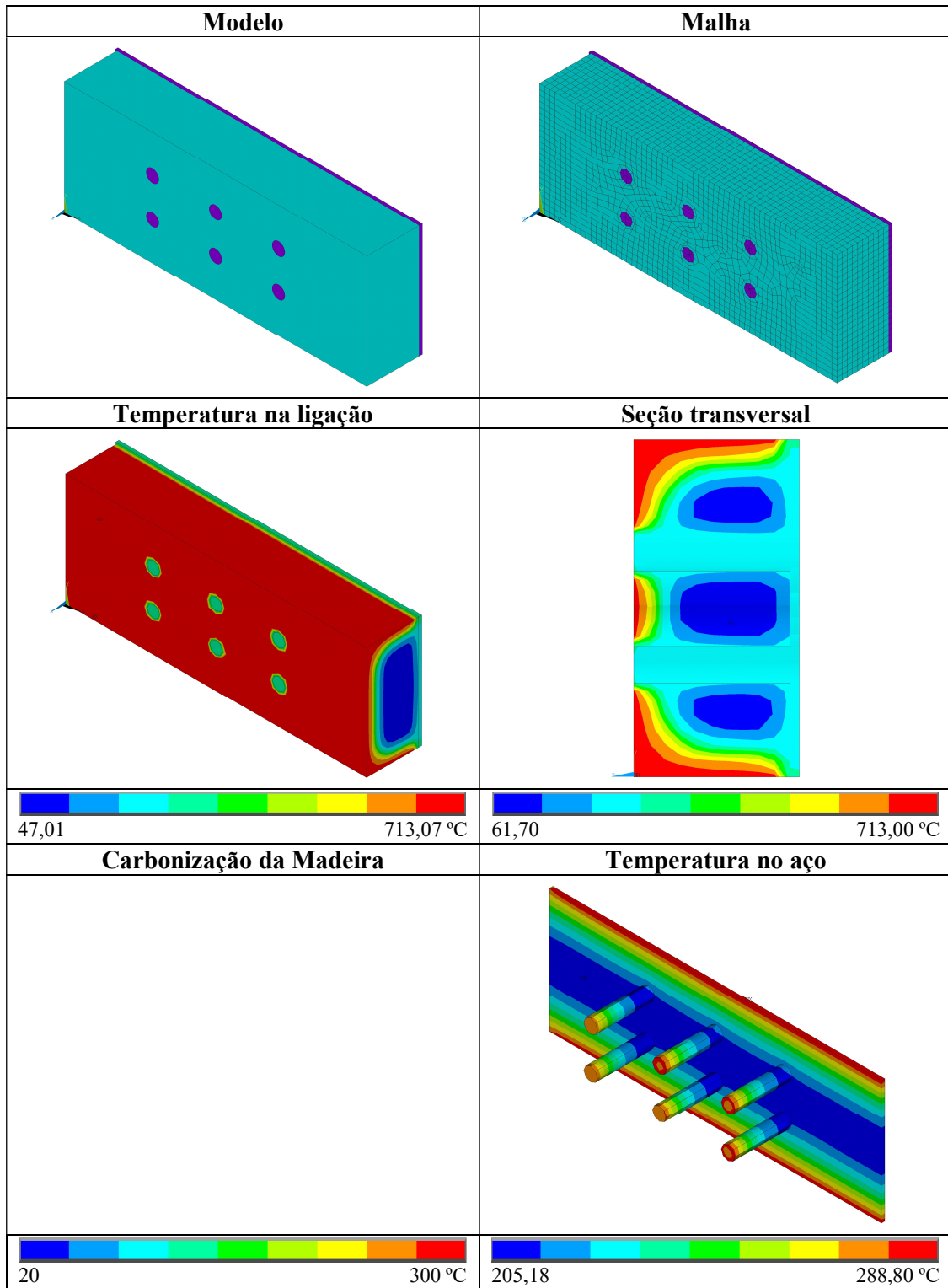


Tabela C.14: Ligação 4 não protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de três lados, exposição de 12,90 minutos.

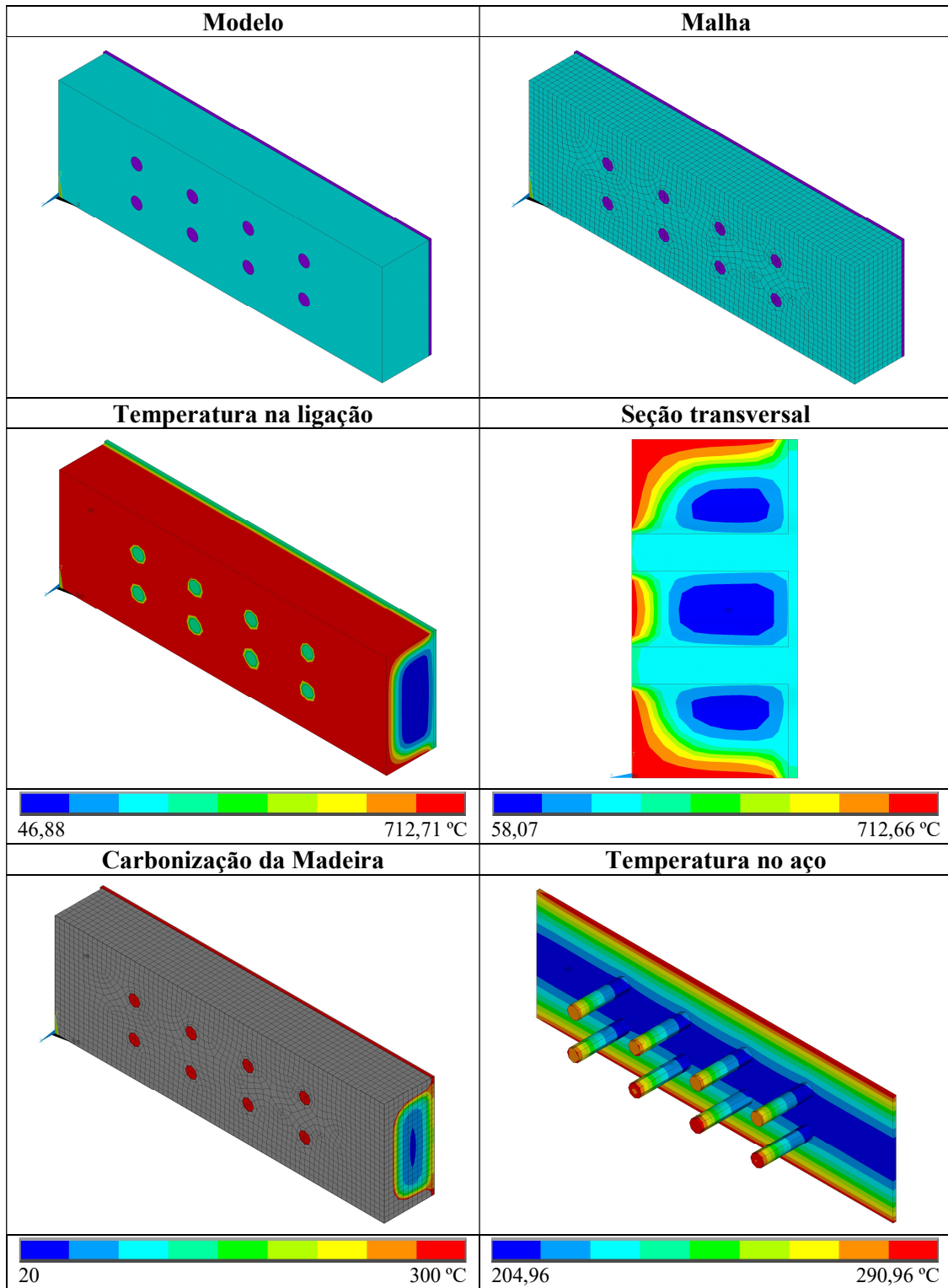


Tabela C.15: Ligação 5 não protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de três lados, exposição de 12,90 minutos.

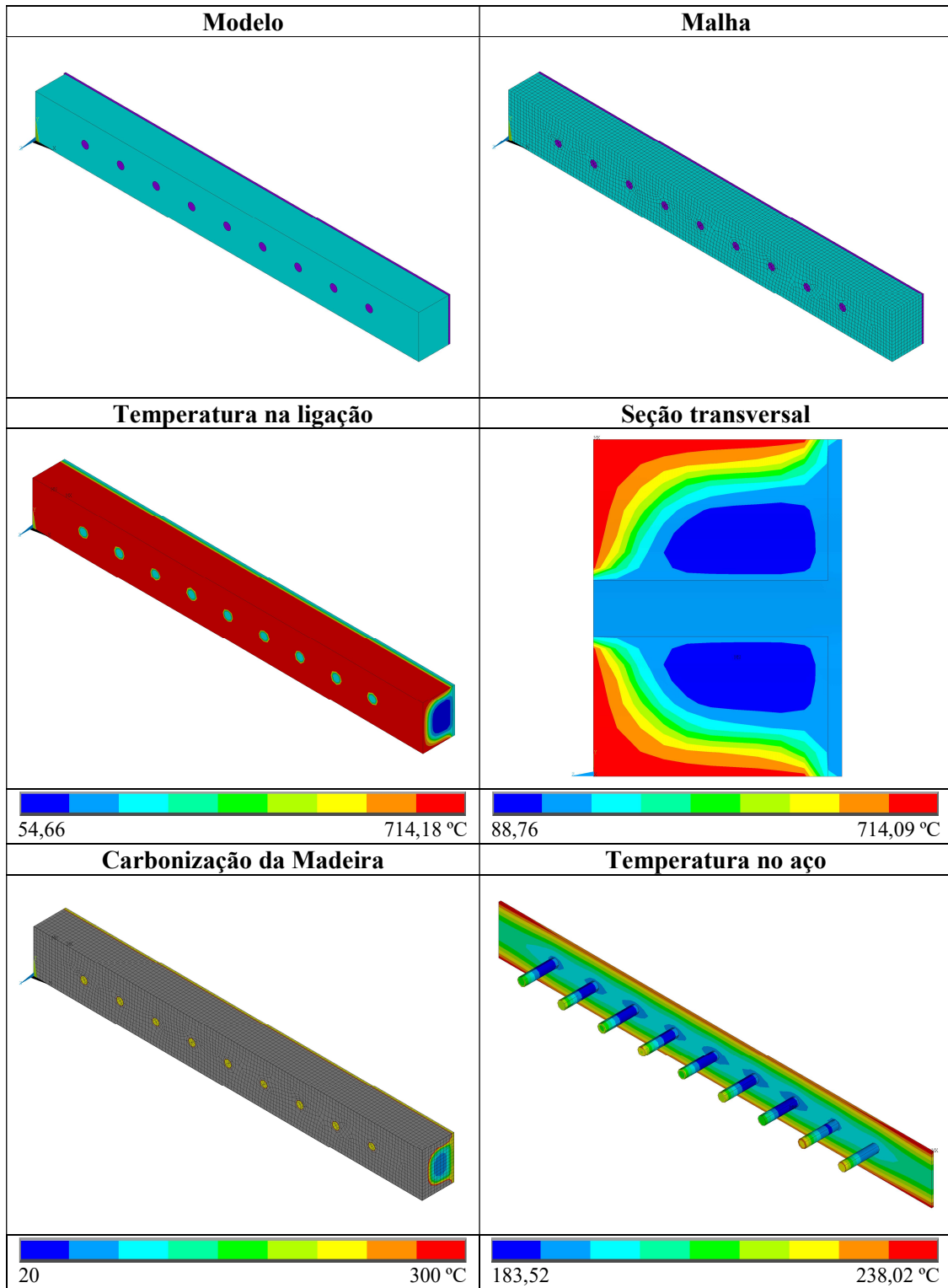


Tabela C.16: Ligação 1 protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de três lados, exposição de 30 minutos.

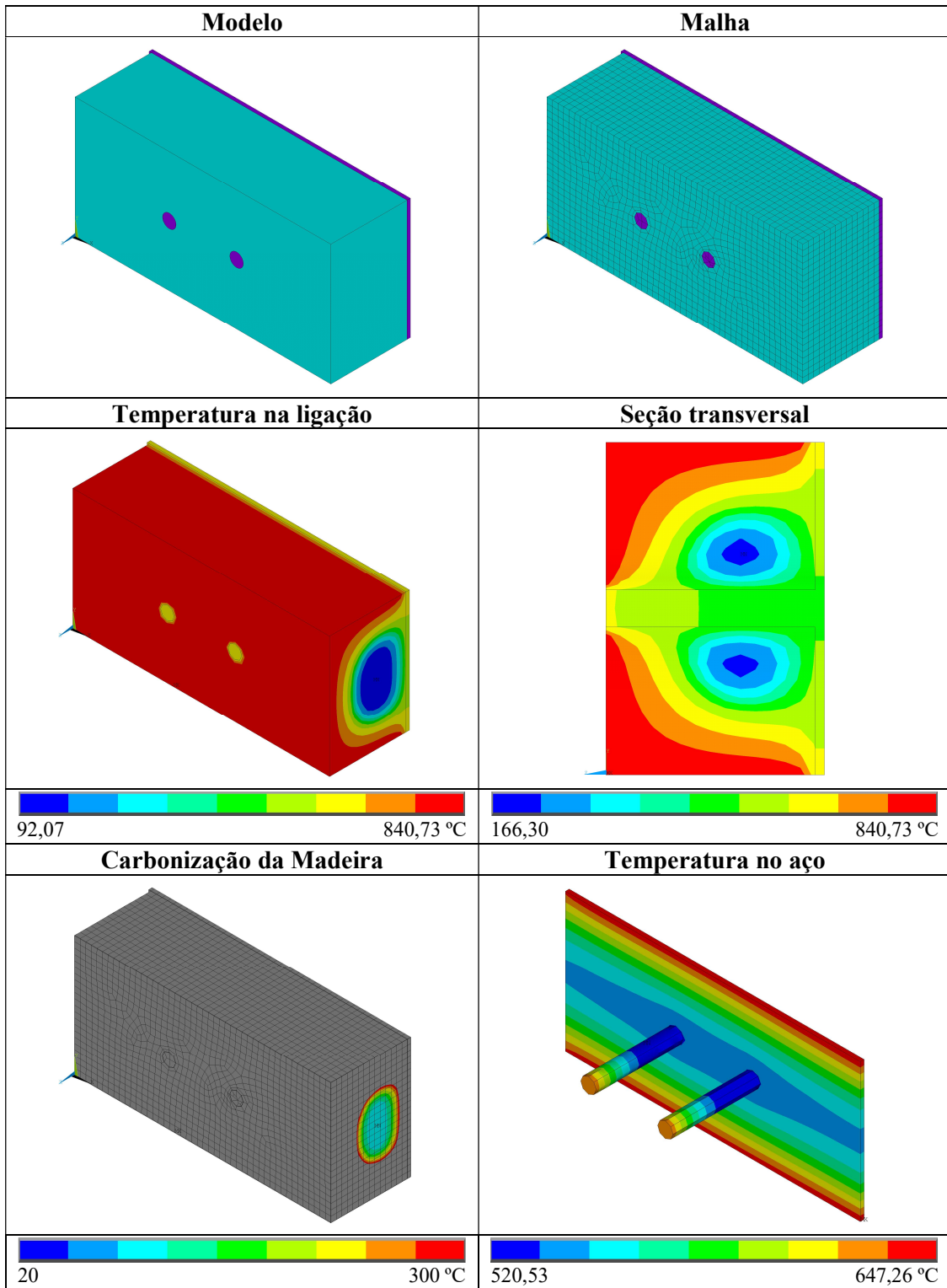


Tabela C. 17: Ligação 2 protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de três lados, exposição de 30 minutos.

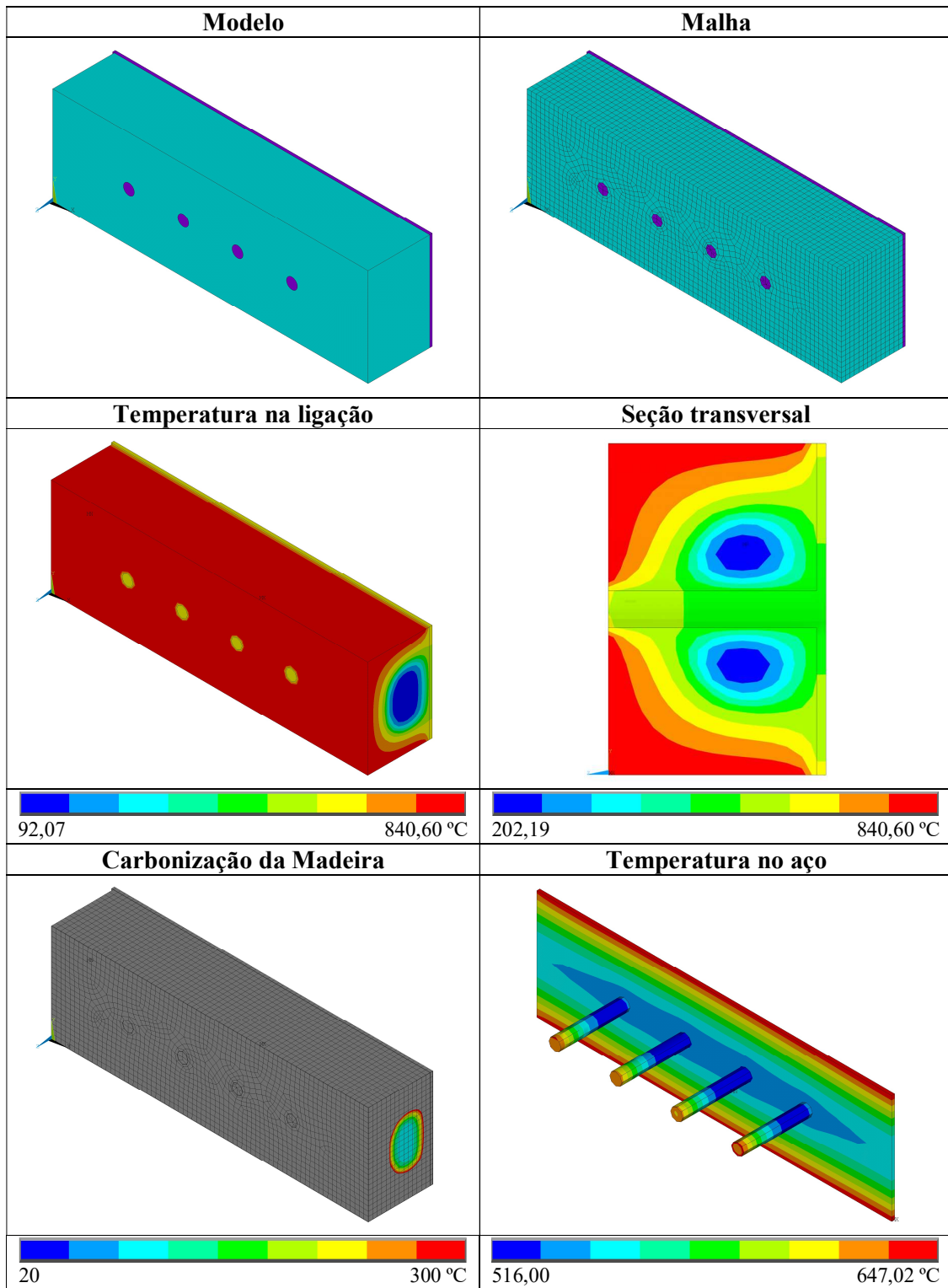


Tabela C.18: Ligação 3 protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de três lados, exposição de 30 minutos.

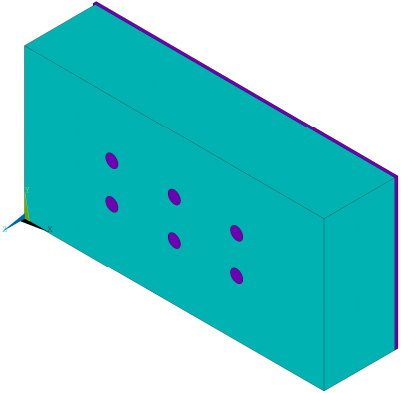
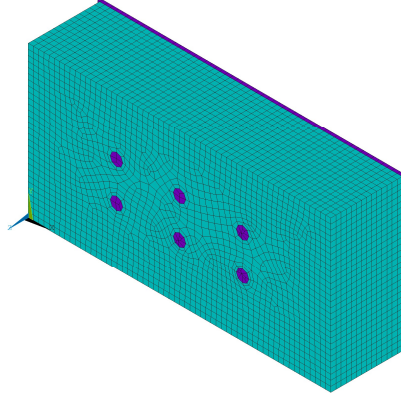
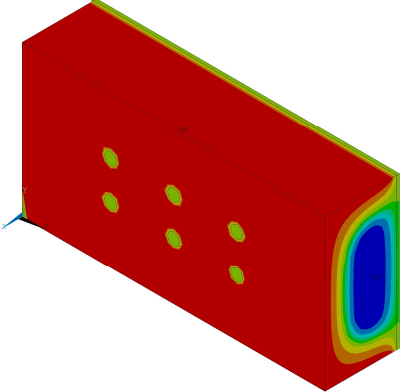
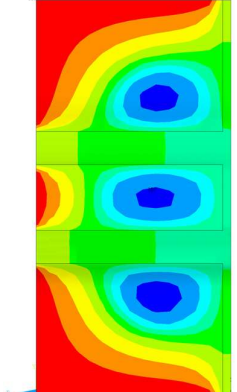


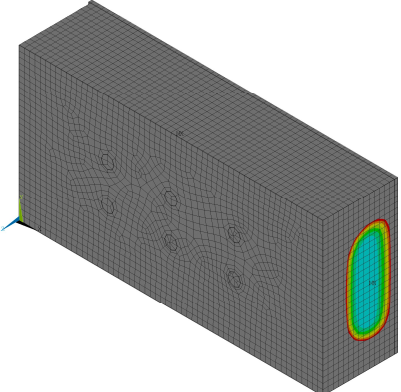
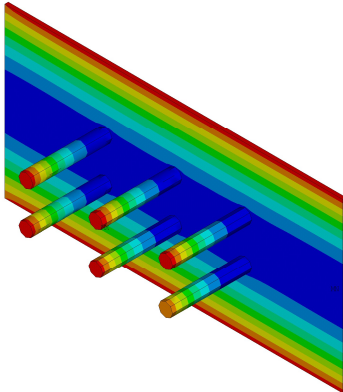


Modelo	Malha
	
Temperatura na ligação	Seção transversal
	
	
Carbonização da Madeira	Temperatura no aço
	
	

Tabela C.19: Ligação 4 protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de três lados, exposição de 30 minutos.

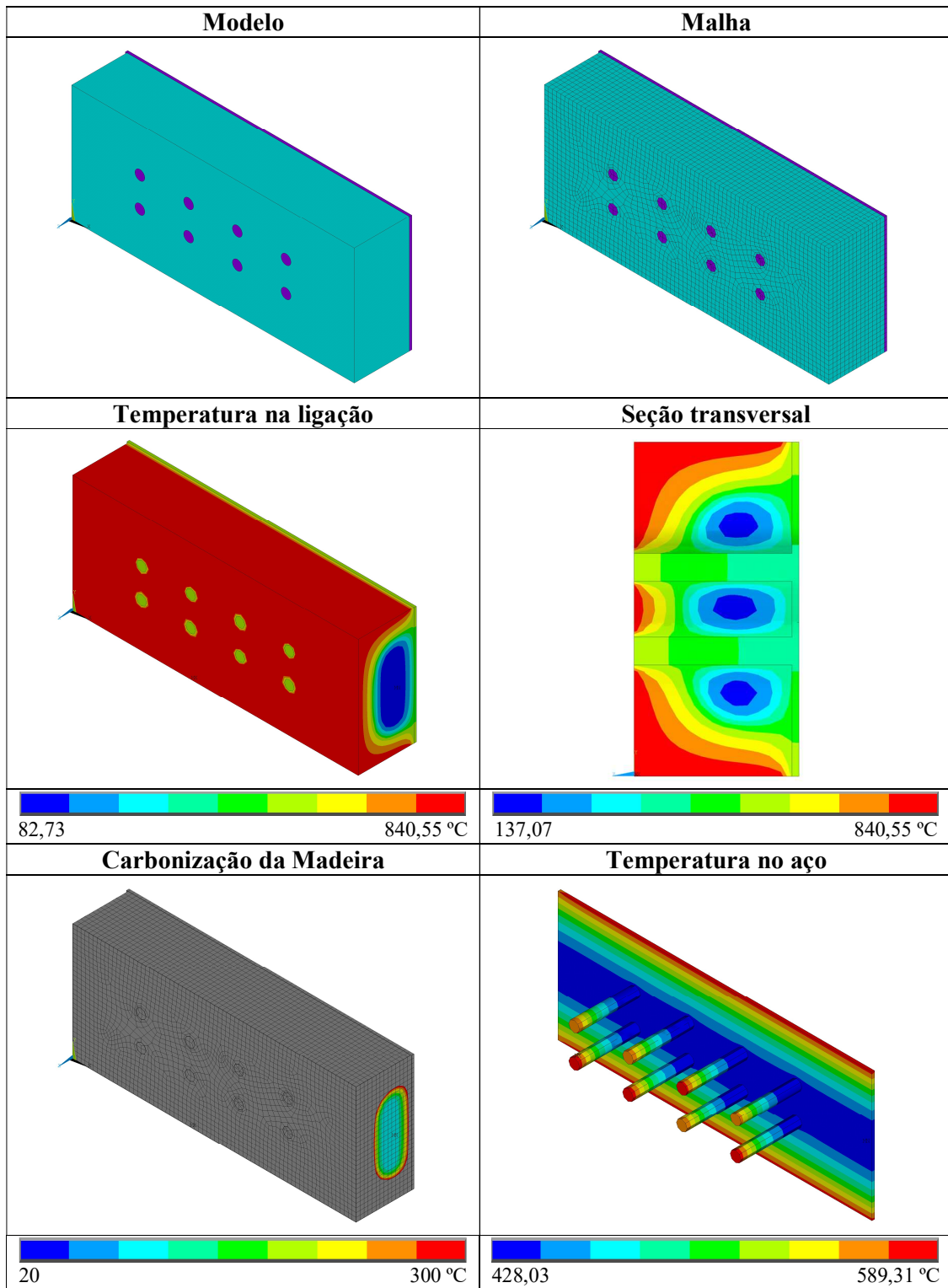
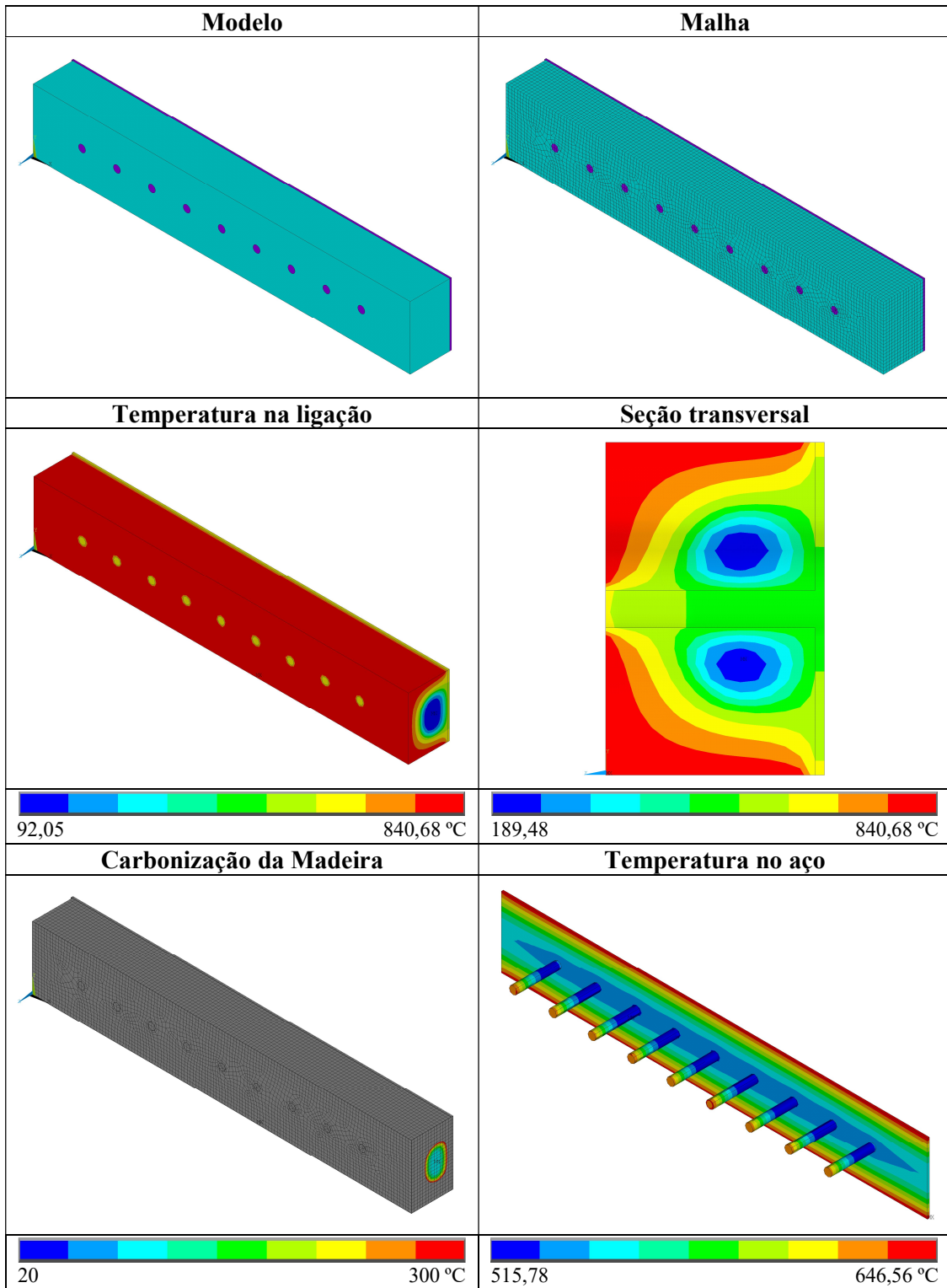


Tabela C.20: Ligação 5 protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de três lados, exposição de 30 minutos.



Anexo D

Código APDL

D.1. CÓDIGO APDL PARA ANÁLISE MECÂNICA INCREMENTAL

A seguir é apresentado o código APDL utilizado no ANSYS® para construção do modelo da análise mecânica da ligação 4.

D.1.1. DEFINIÇÃO DA PREFERÊNCIA DA ANÁLISE E ESCOLHA DO ELEMENTO

```
/BATCH
/input,menust,tmp,"
WPSTYLE,,,,,,,,,0
/NOPR
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
/GO
/PREP7
ET,1,SOLID185
KEYOPT,1,2,1
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,6,0
KEYOPT,1,8,0
```

D.1.2. PARÂMETROS DE PROJETO

```
*SET,ts,6
*SET,t1,50
*SET,d,12
*SET,cn,4
*SET,ln,1
*SET,a1,60
*SET,a2,36
*SET,a3t,84
*SET,a4c,36
*SET,h,72
*SET,l,348
```

D.1.3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS:

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,11000
```

MPDATA,EY,1,,550
 MPDATA,EZ,1,,850
 MPDATA,PRXY,1,,0.451
 MPDATA,PRYZ,1,,0.697
 MPDATA,PRXZ,1,,0.426
 MPDATA,GXY,1,,748
 MPDATA,GYZ,1,,187
 MPDATA,GXZ,1,,814
 TB,MISO,1,1,1,0
 TBTEMP,0
 TBPT,,0.00177273,19.5
 MPTEMP,,,,,,,,
 MPTEMP,1,0
 MPDATA,EX,2,,210000
 MPDATA,PRXY,2,,0.3
 TB,MISO,2,1,1,0
 TBTEMP,0
 TBPT,,0.00130952,275

D.1.4. GEOMETRIA (PONTOS, LINHAS, ÁREAS E VOLUMES)

K,1,,,,
 K,2,1,,
 K,3,0,h,,
 K,4,1,h,,
 LSTR, 1, 2
 LSTR, 2, 4
 LSTR, 4, 3
 LSTR, 3, 1
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,1
 FITEM,2,2
 FITEM,2,3
 FITEM,2,4
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,1
 FITEM,2,2
 FITEM,2,3
 FITEM,2,4
 AL,P51X
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,1
 VEXT,P51X, , ,0,0,-t1,,,,
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,2
 VEXT,P51X, , ,0,0,-ts/2,,,,
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,11
 VEXT,P51X, , , -2,0,0,,,,
 CYL4,a3t,a4c,d/2

CYL4,a3t+a1,a4c,d/2
CYL4,a3t+2*a1,a4c,d/2
CYL4,a3t+3*a1,a4c,d/2
FLST,2,4,5,ORDE,2
FITEM,2,17
FITEM,2,-20
VEXT,P51X, , ,0,0,-t1-ts/2,,,
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FLST,3,4,6,ORDE,2
FITEM,3,4
FITEM,3,-7
VSBV,P51X,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,44
FITEM,2,41
FITEM,2,42
FITEM,2,43
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,40
FITEM,2,37
FITEM,2,38
FITEM,2,39
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,36
FITEM,2,33
FITEM,2,34
FITEM,2,35
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,32
FITEM,2,29
FITEM,2,30
FITEM,2,31
AL,P51X
FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,17
VEXT,P51X, , ,0,0,-t1-ts/2,,,

D.1.5. ATRIBUIÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AÇO AOS VOLUMES DAS CAVILHAS E PLACA DE AÇO

FLST,5,6,6,ORDE,3
FITEM,5,1
FITEM,5,-5

```

FITEM,5,9
CM,_Y,VOLU
VSEL,, ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT, 2,, 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
NUMMRG,ALL,,0.001,,LOW
NUMCMP,ALL

```

D.1.6. DEFINIÇÃO DO TAMANHO E GERAÇÃO DA MALHA

```

LESIZE,ALL,4,, ,1,, ,1,
FLST,5,7,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-7
CM,_Y,VOLU
VSEL,, ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VSWEEP,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

```

D.1.7. DEFINIÇÃO DO ATRITO ENTRE AS SUPERFÍCIES DOS ELEMENTOS E CRIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SIMETRIA

```

CM,_TARGET,AREA
CM,_CONTACT,AREA
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
MP,MU,1,0.3
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,3
REAL,3
ET,2,170
ET,3,174
R,3,,,0.1,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0

```

RMORE,,,,,1.0
KEYOPT,3,4,0
KEYOPT,3,5,0
KEYOPT,3,7,0
KEYOPT,3,8,0
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,0
KEYOPT,3,11,0
KEYOPT,3,12,0
KEYOPT,3,14,0
KEYOPT,3,18,0
KEYOPT,3,2,1
KEYOPT,2,5,0
ASEL,S,,,3
ASEL,A,,,4
ASEL,A,,,5
ASEL,A,,,6
ASEL,A,,,8
ASEL,A,,,9
ASEL,A,,,10
ASEL,A,,,11
ASEL,A,,,38
ASEL,A,,,39
ASEL,A,,,40
ASEL,A,,,41
ASEL,A,,,42
ASEL,A,,,43
ASEL,A,,,44
ASEL,A,,,45
ASEL,A,,,46
ASEL,A,,,47
ASEL,A,,,48
ASEL,A,,,49
ASEL,A,,,50
ASEL,A,,,51
ASEL,A,,,52
ASEL,A,,,53
ASEL,A,,,54
ASEL,A,,,56
ASEL,A,,,57
ASEL,A,,,58
ASEL,A,,,59
ASEL,A,,,60
ASEL,A,,,61
ASEL,A,,,62
ASEL,A,,,63
ASEL,A,,,64
ASEL,A,,,65
ASEL,A,,,66
ASEL,A,,,67

```
ASEL,A,,,68
ASEL,A,,,69
ASEL,A,,,70
ASEL,A,,,71
ASEL,A,,,72
CM,_TARGET,AREA
TYPE,2
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
ASEL,S,,,1
ASEL,A,,,2
ASEL,A,,,7
ASEL,A,,,17
ASEL,A,,,18
ASEL,A,,,19
ASEL,A,,,20
ASEL,A,,,21
ASEL,A,,,22
ASEL,A,,,23
ASEL,A,,,24
ASEL,A,,,25
ASEL,A,,,26
ASEL,A,,,27
ASEL,A,,,28
ASEL,A,,,29
ASEL,A,,,30
ASEL,A,,,31
ASEL,A,,,32
ASEL,A,,,33
ASEL,A,,,34
ASEL,A,,,35
ASEL,A,,,36
ASEL,A,,,37
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ESEL,ALL
```

```

ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
DA, 72,SYMM
DA, 15,SYMM
DA, 12,SYMM

```

D.1.8. CRIAÇÃO DA TABELA INCREMENTAL DE CARGA E APLICAÇÃO NO MEMBRO DE MADEIRA

```

*DIM,carga, TABLE,2,1,1, , ,
*SET,CARGA(1,0,1) , 0
*SET,CARGA(2,0,1) , 200
*SET,CARGA(2,1,1) , -27.777777777778
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,4
/GO
SFA,P51X,1,PRES, %CARGA%
FINISH

```

D.1.9. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA SOLUÇÃO (TIPO DE ANÁLISE, PASSOS DE TEMPO, TOLERÂNCIA, ITERAÇÕES DE EQUILÍBRIO, CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA)

```

/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
CNVTOL,U, ,0.001,2, ,
DELTIM,10,1,10
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
NCNV,2,0,0,0,0
NEQIT,4
TIME,200
SOLVE

```

D.2. CÓDIGO APDL PARA ANÁLISE TÉRMICA TRANSIENTE

A seguir é apresentado o código APDL utilizado no ANSYS® para construção do modelo da análise térmica da ligação 2, não protegida ou protegida pelo aumento da espessura da madeira, com exposição de um lado.

D.2.1. PREFERÊNCIAS DA ANÁLISE E ESCOLHA DO ELEMENTO

```
BATCH
/input,menust,tmp,"
WPSTYLE,,,,,,,,,0
/NOPR
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,0
KEYW,PR_THERM,1
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULT1,0
/GO
/PREP7
ET,1,SOLID278
```

D.2.2. PARÂMETROS DE PROJETO

```
*SET,ts,6
*SET,t1,50
*SET,d,12
*SET,a1,60
*SET,a2,36
*SET,a3t,84
*SET,a4c,36
*SET,h,72
*SET,l,348
*SET,cn,4
*SET,ln,1
```

D.2.3. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,200
MPTEMP,3,350
MPTEMP,4,500
MPTEMP,5,800
```

MPTEMP,6,1200
MPDATA,KXX,1,,0.12e-3
MPDATA,KXX,1,,0.15e-3
MPDATA,KXX,1,,0.07e-3
MPDATA,KXX,1,,0.09e-3
MPDATA,KXX,1,,0.35e-3
MPDATA,KXX,1,,1.5e-3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,99
MPTEMP,3,110
MPTEMP,4,120
MPTEMP,5,130
MPTEMP,6,200
MPTEMP,7,250
MPTEMP,8,300
MPTEMP,9,350
MPTEMP,10,400
MPTEMP,11,600
MPTEMP,12,800
MPTEMP,13,1200
MPDATA,C,1,,1.53e3
MPDATA,C,1,,1.77e3
MPDATA,C,1,,13.6e3
MPDATA,C,1,,13.5e3
MPDATA,C,1,,2.12e3
MPDATA,C,1,,2e3
MPDATA,C,1,,1.62e3
MPDATA,C,1,,.71e3
MPDATA,C,1,,.85e3
MPDATA,C,1,,1e3
MPDATA,C,1,,1.4e3
MPDATA,C,1,,1.65e3
MPDATA,C,1,,1.65e3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,99
MPTEMP,3,120
MPTEMP,4,200
MPTEMP,5,250
MPTEMP,6,300
MPTEMP,7,350
MPTEMP,8,400
MPTEMP,9,600
MPTEMP,10,800
MPTEMP,11,1200
MPDATA,DENS,1,,459.2e-9
MPDATA,DENS,1,,459.2e-9
MPDATA,DENS,1,,410e-9
MPDATA,DENS,1,,410e-9

MPDATA,DENS,1,,381.3e-9
MPDATA,DENS,1,,311.6e-9
MPDATA,DENS,1,,213.2e-9
MPDATA,DENS,1,,155.8e-9
MPDATA,DENS,1,,114.8e-9
MPDATA,DENS,1,,106.6e-9
MPDATA,DENS,1,,1e-9
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EMIS,1,,0.8
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EMIS,2,,0.7
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,799
MPTEMP,3,1200
MPDATA,KXX,2,,53.33e-3
MPDATA,KXX,2,,27.3933e-3
MPDATA,KXX,2,,27.3e-3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,2,,7.85e-6
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,50
MPTEMP,3,100
MPTEMP,4,150
MPTEMP,5,200
MPTEMP,6,250
MPTEMP,7,300
MPTEMP,8,350
MPTEMP,9,400
MPTEMP,10,450
MPTEMP,11,500
MPTEMP,12,550
MPTEMP,13,600
MPTEMP,14,650
MPTEMP,15,700
MPTEMP,16,730
MPTEMP,17,735
MPTEMP,18,750
MPTEMP,19,785
MPTEMP,20,800
MPTEMP,21,825
MPTEMP,22,850
MPTEMP,23,890
MPTEMP,24,1200
MPDATA,C,2,,439.802
MPDATA,C,2,,459.70

MPDATA,C,2,,487.62
 MPDATA,C,2,,510.42
 MPDATA,C,2,,529.76
 MPDATA,C,2,,547.31
 MPDATA,C,2,,564.74
 MPDATA,C,2,,583.71
 MPDATA,C,2,,605.88
 MPDATA,C,2,,632.92
 MPDATA,C,2,,666.5
 MPDATA,C,2,,708.28
 MPDATA,C,2,,760.22
 MPDATA,C,2,,813.75
 MPDATA,C,2,,1008.16
 MPDATA,C,2,,2291.25
 MPDATA,C,2,,5000
 MPDATA,C,2,,1482.89
 MPDATA,C,2,,875
 MPDATA,C,2,,803.26
 MPDATA,C,2,,734.57
 MPDATA,C,2,,694.75
 MPDATA,C,2,,657.08
 MPDATA,C,2,,650

D.2.4. GEOMETRIA (PONTOS, LINHAS, ÁREAS E VOLUMES)

K,1,,,
 K,2,1,,
 K,3,,h,,
 K,4,l,h,,
 LSTR, 1, 2
 LSTR, 2, 4
 LSTR, 4, 3
 LSTR, 3, 1
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,1
 FITEM,2,2
 FITEM,2,3
 FITEM,2,4
 AL,P51X
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,1
 VEXT,P51X, , ,0,0,-t1,,,,
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,2
 VEXT,P51X, , ,0,0,-ts/2,,,,
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,11
 VEXT,P51X, , , -2,0,0,,,,
 CYL4,a3t,a4c,d/2
 CYL4,a3t+a1,a4c,d/2

CYL4,A3T+2*A1,A4C,D/2
CYL4,A3T+3*A1,A4C,D/2
FLST,2,4,5,ORDE,2
FITEM,2,17
FITEM,2,-20
VEXT,P51X, , ,0,0,-t1-ts/2,,,,
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FLST,3,4,6,ORDE,2
FITEM,3,4
FITEM,3,-7
VSBV,P51X,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,44
FITEM,2,41
FITEM,2,42
FITEM,2,43
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,40
FITEM,2,37
FITEM,2,38
FITEM,2,39
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,36
FITEM,2,33
FITEM,2,34
FITEM,2,35
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,32
FITEM,2,29
FITEM,2,30
FITEM,2,31
AL,P51X
FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,17
FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,17
VEXT,P51X, , ,0,0,-t1,,,,
FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,18

FITEM,2,23
FITEM,2,28
FITEM,2,33
VEXT,P51X, , ,0,0,-ts/2, , , ,

D.2.5. ATRIBUIÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AÇO AOS VOLUMES DAS CAVILHAS E PLACA DE AÇO

FLST,5,10,6,ORDE,4
FITEM,5,1
FITEM,5,-7
FITEM,5,9
FITEM,5,-11
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT, 1, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
FLST,5,10,6,ORDE,4
FITEM,5,1
FITEM,5,-7
FITEM,5,9
FITEM,5,-11
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT, 2, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
NUMMRG,ALL, ,0.001, ,LOW
NUMCMP,ALL

D.2.6. DEFINIÇÃO DE UM NÓ AFASTADO PRA APLICAR A FONTE DE CALOR

N,15000,1/2,h/2,t1, , , ,

D.2.7. DEFINIÇÃO DO TAMANHO E GERAÇÃO DA MALHA

LESIZE,ALL,5, , ,1, , ,1,
FLST,5,11,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-11
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X

CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VSWEEP,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FLST,5,2002,2,ORDE,113
FITEM,5,6
FITEM,5,10
FITEM,5,40
FITEM,5,-51
FITEM,5,123
FITEM,5,-134
FITEM,5,177
FITEM,5,-179
FITEM,5,184
FITEM,5,203
FITEM,5,-204
FITEM,5,247
FITEM,5,-258
FITEM,5,326
FITEM,5,-337
FITEM,5,392
FITEM,5,-403
FITEM,5,467
FITEM,5,-478
FITEM,5,549
FITEM,5,-560
FITEM,5,613
FITEM,5,-624
FITEM,5,687
FITEM,5,-699
FITEM,5,756
FITEM,5,-766
FITEM,5,860
FITEM,5,-870
FITEM,5,890
FITEM,5,-901
FITEM,5,903
FITEM,5,905
FITEM,5,-911
FITEM,5,938
FITEM,5,-941
FITEM,5,961
FITEM,5,-963
FITEM,5,967
FITEM,5,-968
FITEM,5,978
FITEM,5,-979

FITEM,5,998
FITEM,5,-999
FITEM,5,1002
FITEM,5,-1003
FITEM,5,1006
FITEM,5,-1008
FITEM,5,1301
FITEM,5,-1420
FITEM,5,2131
FITEM,5,-2250
FITEM,5,2671
FITEM,5,-2700
FITEM,5,2741
FITEM,5,-2750
FITEM,5,2931
FITEM,5,-2950
FITEM,5,3371
FITEM,5,-3490
FITEM,5,4161
FITEM,5,-4280
FITEM,5,4821
FITEM,5,-4940
FITEM,5,5571
FITEM,5,-5690
FITEM,5,6391
FITEM,5,-6510
FITEM,5,7031
FITEM,5,-7150
FITEM,5,7771
FITEM,5,-7900
FITEM,5,8461
FITEM,5,-8570
FITEM,5,9501
FITEM,5,-9610
FITEM,5,9801
FITEM,5,-9920
FITEM,5,9931
FITEM,5,-9940
FITEM,5,9951
FITEM,5,-10020
FITEM,5,10281
FITEM,5,-10320
FITEM,5,10511
FITEM,5,-10540
FITEM,5,10571
FITEM,5,-10590
FITEM,5,10681
FITEM,5,-10700
FITEM,5,10881
FITEM,5,-10900

FITEM,5,10921
FITEM,5,-10940
FITEM,5,10961
FITEM,5,-10990
FITEM,5,11013
FITEM,5,-11014
FITEM,5,11016
FITEM,5,11018
FITEM,5,11020
FITEM,5,11081
FITEM,5,-11090
FITEM,5,11121
FITEM,5,-11130
FITEM,5,11166
FITEM,5,-11185
FITEM,5,11196
FITEM,5,-11205
FITEM,5,11216
FITEM,5,-11225
FITEM,5,11236
FITEM,5,-11245
ESEL,S,,P51X
FLST,5,11345,2,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-11345
ESEL,S,,P51X

D.2.8. TABELA DE TEMPERATURAS DE ACORDO COM A ISO 834

*DIM,ISO834, TABLE,181,1,1,,
*SET,ISO834(1,0,1) , 0
*SET,ISO834(1,1,1) , 20
*SET,ISO834(5,0,1) , 240
*SET,ISO834(5,1,1) , 543.9
*SET,ISO834(9,0,1) , 480
*SET,ISO834(9,1,1) , 645.5
*SET,ISO834(19,0,1) , 1080
*SET,ISO834(19,1,1) , 765.7
*SET,ISO834(26,0,1) , 1500
*SET,ISO834(26,1,1) , 814.6
*SET,ISO834(31,0,1) , 1800
*SET,ISO834(31,1,1) , 841.8

D.2.9. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA E APLICAÇÃO DA TABELA DE TEMPERATURA ISO 834 NO NÓ

STEF,0.567E-13
TOFFST,273.15
RADOPT,0.10000000149,0.999999974738E-04,0,1000,0.10000000149,0.10000000149,, , , ,0
SPCNOD,1,15000
FLST,2,14033,1,ORDE,2

```

FITEM,2,15000
FITEM,2,-29032
FLST,2,14033,1,ORDE,2
FITEM,2,15000
FITEM,2,-29032
IC,P51X,TEMP,20,
FLST,2,13425,1,ORDE,2
FITEM,2,15000
FITEM,2,-28424
IC,P51X,TEMP,20,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,15000
/GO
D,P51X, , %ISO834% , , , ,TEMP, , , , ,
FLST,2,5,5,ORDE,5
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,17
FITEM,2,41
/GO
SFA,P51X,1,CONV,25E-6, %ISO834%
FLST,2,5,5,ORDE,5
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,17
FITEM,2,41
SFA,P51X, ,RDSF,1,1,
FINISH

```

D.2.10. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA SOLUÇÃO (TIPO DE ANÁLISE, PASSOS DE TEMPO, TOLERÂNCIA, ITERAÇÕES DE EQUILÍBRIO, CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA)

```

/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,1
CNVTOL,TEMP, ,0.9,2, ,
DELTIM,10,0.5,10
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,1
NCNV,2,0,0,0,0
TIME,1800
SOLVE

```