

Resistência ao fogo de estruturas em madeira com e sem proteção

Pedro José Vieira Gouveia

Relatório final de Dissertação apresentado à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Industrial

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca

junho 2018

Conteúdo

1	Introdução.....	14
1.1	Apresentação sumária dos capítulos	15
2	Estado da Arte	17
2.1	Introdução	17
2.2	Trabalhos desenvolvidos.....	17
3	Propriedades dos Materiais	21
3.1	Classificação da madeira	21
3.2	Propriedades mecânicas da madeira	22
3.2.1	Módulo de elasticidade.....	22
3.2.2	Coeficiente Poisson	23
3.2.3	Propriedades mecânicas a temperaturas elevadas	24
3.3	Propriedades térmicas da madeira	24
3.3.1	Calor específico	24
3.3.2	Condutividade térmica.....	25
3.3.3	Massa volúmica	26
3.4	Madeira lamelada colada	27
3.5	Propriedades das placas de gesso.....	29
3.6	Difusividade térmica.....	30
4	Viga Simplesmente Apoiada e Carga a Meio Vão à Temperatura Ambiente.....	33
4.1	Introdução	33
4.2	Cálculo elástico.....	33
4.3	Cálculo em projeto seguro	35
4.4	Cálculo plástico.....	37
5	Projeto de Vigas Expostas ao Fogo.....	40
5.1	Introdução	40
5.2	Cálculo da secção necessária	41
5.2.1	Frentes de fogo	41
5.3	Cálculo em projeto seguro em situação de incêndio.....	43
5.4	Cálculo da secção reta com espessura em gesso adicional.....	44
6	Componente Numérica.....	46
6.1	Modelos em análise	46

6.2	Método de elementos finitos	47
7	Apresentação de Resultados	52
7.1	Temperatura ambiente	52
7.2	Exposição ao fogo.....	54
7.3	Exposição ao fogo e carga pontual	57
7.4	Exposição ao fogo em vigas protegidas.....	59
8	Conclusões e Trabalhos Futuros	63
8.1	Trabalhos futuros	64
9	Anexos.....	71
9.1	A1 – Modelo Mecânico	71
9.2	A2 – Modelo Térmico.....	87
9.3	A3 – Modelo Termomecânico	103
9.4	A4 – Modelo com proteção em gesso.....	119
9.5	A5 - Código APDL do modelo mecânico.....	121
9.6	A6 - Código APDL do modelo térmico.....	125
9.7	A7 - Código APDL do modelo termomecânico	129
9.8	A8 - Código APDL do modelo com proteção	136
9.9	A9 - Cálculos analíticos: viga simplesmente apoiada e carga a meio vão à temperatura ambiente.....	137
9.10	A10 - Cálculos analíticos: viga simplesmente apoiada e carga a meio vão, uma frente de fogo.	138
9.11	A11 - Cálculos analíticos: viga simplesmente apoiada e carga a meio vão, três frentes de fogo.	139

Agradecimentos

Aproveito este espaço para agradecer às várias pessoas que tiveram um papel fulcral na realização deste trabalho, porque sem elas o resultado certamente não seria o mesmo.

Em primeiro lugar, deixo o meu agradecimento sincero à minha orientadora Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca, por todo o tempo disponibilizado, pelo encorajamento e compreensão nos momentos em que mais necessitei e por todo o empenho e dedicação que mostrou ao longo de todo este trabalho, tendo sempre uma resposta e uma solução para todas as minhas dúvidas.

À minha família, pelo apoio, motivação e carinho demonstrados ao longo de todo o trabalho.

Aos meus amigos que de alguma forma contribuíram para tornar esta dissertação uma realidade.

Resumo

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar a segurança em projeto de elementos estruturais do tipo viga em madeira, com e sem isolamento. Será determinada a carga em projeto a submeter a meio vão em vigas simplesmente apoiadas à temperatura ambiente e com exposição ao fogo em uma ou três frentes. O estudo incide na avaliação da resistência à flexão e no cumprimento das regras de segurança impostas pelos Eurocódigos. Será apresentado um método analítico de cálculo e propostas equações de projeto de fácil utilização prevendo o efeito da carbonização na madeira pela ação do fogo através da curva padrão ISO 834. O trabalho apresenta ainda a avaliação da resistência ao fogo nestes elementos, quando protegidos com material de isolamento, verificando um atraso no início da carbonização.

Foram desenvolvidos diferentes modelos de cálculo numérico utilizando algoritmos de análise mecânica para carga incremental, análise térmica em regime transiente e análise termomecânica. Para cada um destes modelos foi desenvolvido um código em linguagem APDL do ANSYS de forma a facilitar a obtenção de resultados no estudo de vários modelos.

No total são apresentados 92 modelos de cálculo computacional para a discussão de resultados e comparação com a metodologia de cálculo analítico.

Palavras Chave: Madeira, Fogo, Elementos Finitos, Isolamento.

Abstract

The main objective of this work is to evaluate the structural resistance safety in wooden beam elements, with and without insulation. The design load applied at midspan of the simple supported beam will be determined, at ambient temperature and in fire situations. The study aims to evaluate the bending resistance regarding the safety rules imposed by the Eurocodes. An analytical method will be developed presenting design equations able to predict the wood behaviour under fire conditions, using the standard fire curve ISO 834. This work also presents the beam behaviour under fire conditions, when protected with insulation material, that results in the delaying on the char layer.

Different numerical calculation models were developed using different algorithms mechanical analysis with an incremental load, transient thermal analysis and thermomechanical analysis. For each numerical model, a code in ANSYS APDL language was developed to facilitate the obtained results in the study.

In total, 92 computational models are presented for results discussion and compared with the analytical methodology.

Keywords: Timber, Fire, Finite Elements, Insulation.

Lista de símbolos

Letras Latinas

A - Área (mm^2)

C_p - Calor específico ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)

d_0 - Espessura da camada de pirólise (mm)

$d_{char,0}$ - Camada carbonizada para um lado de exposição ao fogo (mm)

$d_{char,n}$ - Camada carbonizada para efeitos de arredondamento (mm)

D_{ef} - Camada carbonizada efetiva (mm)

T_0 - Temperatura inicial ($^\circ\text{C}$)

t - Tempo decorrido (s)

M_d - Momento à flexão máximo

S_{norm} - Módulo da secção retangular

F_d - Carga aplicada

K_{mod} - Fator de modificação

$K_{mod,fi}$ - Fator de modificação para situação de incêndio

K_h - Fator de profundidade

d - Profundidade da secção reta da viga

b - Largura da secção reta da viga

L - Comprimento da viga

d_{fogo} - Profundidade da secção reta da viga exposta ao fogo

b_{fogo} – Largura da secção reta da viga exposta ao fogo

S_{fogo} – Módulo da secção retangular reduzida pela acção do fogo

$f_{m,k}$ - Resistência à flexão (N/mm²)

$f_{v,g,k}$ - Resistência ao corte (N/mm²)

E_L - Módulo de elasticidade na direcção longitudinal (N/mm²)

E_R - Módulo de elasticidade na direcção radial (N/mm²)

E_T - Módulo de elasticidade na direcção tangencial (N/mm²)

Símbolos gregos

β_0 - Velocidade de carbonização para um lado de exposição ao fogo (mm/min)

β_n - Velocidade de carbonização considerando os efeitos de arredondamento (mm/min)

γ_M – Fator de segurança parcial

$\gamma_{M,fi}$ - Fator de segurança parcial em caso de incêndio

ν - Coeficiente de Poisson

ν_{LR} - Coeficiente de Poisson no plano Longitudinal-Radial

ν_{LT} - Coeficiente de Poisson no plano Longitudinal-Tangencial

ν_{TR} - Coeficiente de Poisson no plano Tangencial-Radial

ν_{RT} - Coeficiente de Poisson no plano Radial-Tangencial

ν_{RL} - Coeficiente de Poisson no plano Radial-Longitudinal

ν_{TL} - Coeficiente de Poisson no plano Tangencial-Longitudinal

ε - Emissividade

σ - Constante de Stefan Boltzmann

K_0 - Fator de superfícies protegidas por revestimento

ρ – Massa volúmica (kg/m³)

λ - Condutividade Térmica (W/mK)

Lista de tabelas

Tabela 1 - Módulo de elasticidade em diferentes tipos de madeira [23].	23
Tabela 2 - Coeficiente Poisson em diferentes tipos de madeira [23].	23
Tabela 3 - Variação Temperatura e Calor Especifico na madeira [28].	25
Tabela 4 - Variação Temperatura – condutividade térmica [28].	26
Tabela 5 - Taxa de densidade em função da temperatura [28].	27
Tabela 6 - Tabela de propriedades GL28H [32].	28
Tabela 7 - Propriedades dos gessos	30
Tabela 8 - Fator parcial γ_M de acordo com o Eurocódigo 5 1-1 [35].	36
Tabela 9 – Seções retangulares para as vigas em estudo.	46
Tabela 10 - Valores da carga plástica e elástica	52
Tabela 11 - Velocidades de carbonização para uma frente de fogo	55
Tabela 12 - Velocidades de carbonização para três frentes de fogo.	56
Tabela 13 - Carga suportada a temperaturas elevadas.	57
Tabela 14 - Velocidades de carbonização com e sem proteção para uma frente de fogo	60
Tabela 15 - Velocidades de carbonização com e sem proteção para três frentes de fogo	61

Lista de figuras

Figura 1 - Rotura após teste ao fogo [11]	18
Figura 2 - CTL após teste ao fogo [14].	19
Figura 3 - Madeira macia (à esquerda) e madeira dura (à direita) [20].....	21
Figura 4 - Direções ou eixos principais [21]	22
Figura 5 - Variação Temperatura e Calor Especifico na madeira.	25
Figura 6 - Variação Temperatura – condutividade térmica.....	26
Figura 7 - Taxa da massa volúmica em função da temperatura	27
Figura 8 - Exemplos de aplicação da madeira lamelada [30].....	28
Figura 9 - Placa de gesso resistente ao fogo [34].	29
Figura 10 - Viga simplesmente apoiada com carga a meio vão.	34
Figura 11 - Redução da secção transversal.....	40
Figura 12 - Viga simplesmente apoiada com carga sujeita ao fogo	41
Figura 13 – Exposição ao fogo em mais que um lado [39]	42
Figura 14 - Exposição ao fogo em apenas um lado, adaptado de [39]......	42
Figura 15 - Desenho 3D da viga em estudo	47
Figura 16 - Malha de elementos finitos e elemento finito de 8 nós.....	49
Figura 17 - Malhas utilizadas para as simulações térmicas com e sem proteção	49
Figura 18 - Carga plástica.....	53
Figura 19 - Carga elástica.....	53
Figura 20 - Carga exposta a uma frente de fogo.....	58
Figura 21 - Carga exposta a três frente de fogo.....	59

Capítulo 1

Introdução

1 Introdução

A madeira é utilizada em diferentes estruturas, paredes, telhados, tendo um vasto leque de aplicações na engenharia e construção. A madeira é um material bastante requisitado dada a sua facilidade de transformação em produto final, em relação a outros materiais de construção, como é o aço ou o betão [1].

Quando exposta a temperaturas elevadas, como é o caso dos incêndios, apresenta uma camada envolvente de carbonização. Esta camada tem o objetivo de atrasar o processo de propagação da temperatura para o seu interior, podendo ser considerada um isolante. O núcleo da madeira pode permanecer a baixas temperaturas, mantendo as suas propriedades inalteradas, em função do tempo de exposição ao fogo e das dimensões do elemento [2].

O facto de ser um material combustível, umas das principais preocupações é a segurança contra incêndios em construções de madeira. Contudo, os edifícios podem ser concebidos e dimensionados para terem um desempenho adequado quando expostos ao fogo. Nos últimos anos, o crescente interesse pela construção com madeira tem levantado algumas questões relativas à segurança, daí a utilização da regulamentação de segurança contra incêndios. Estes regulamentos têm como objetivo reduzir a probabilidade de ocorrência de incêndios, limitar o seu desenvolvimento, facilitar a evacuação e permitir a intervenção eficaz dos meios de socorro [3].

Apesar de ser um material relativamente leve a madeira apresenta altos níveis de resistência mecânica, podendo ser utilizada na sustentação de estruturas, revestimentos de paredes, pisos e confeção de produtos. Apresenta também uma durabilidade aceitável quando exposta à água salgada, oxidação e agentes corrosivos [4].

Os principais objetivos a alcançar com o desenvolvimento deste trabalho é avaliar a segurança em projeto de elementos de viga em madeira simplesmente apoiadas, com e sem isolamento. Será determinada a carga em projeto a meio vão a impor à temperatura ambiente ou com exposição ao fogo. É apresentado um método de cálculo analítico com base nos Eurocódigos e propostas equações de projeto prevendo o efeito da carbonização. Em adição, foram desenvolvidos 92 modelos de cálculo numérico, apoiados na linguagem

APDL do ANSYS, utilizando algoritmos de análise mecânica com carga incremental, térmica em regime transiente e termomecânica.

1.1 Apresentação sumária dos capítulos

O capítulo 1, apresenta uma introdução sobre os vários tipos de utilização da madeira e a sua extrema facilidade de transformação bem como a sua fiabilidade. Neste mesmo capítulo, estão presentes alguns aspetos relacionados com a exposição ao fogo e segurança de estrutura contruídas à base de madeira.

No capítulo 2, é realizada uma listagem cronológica dos principais estudos referentes à análise térmica e modelos numéricos. Estudos de relevância são citados e analisados, e comparados os seus resultados e conclusões.

O capítulo 3, sintetiza as propriedades térmicas e mecânicas da madeira em geral, e especialmente o da Madeira Lamelada Colada (GL28H). Ainda neste capítulo é abordado o tipo de gesso utilizado no estudo, bem como as suas propriedades.

Nos capítulos 4 e 5, estão descritos todas os conceitos teóricos e analíticos para este estudo e apresentadas todas as equações utilizadas. O capítulo 4 descreve o estudo de uma viga simplesmente apoiada com carga a meio vão. No capítulo 5, o estudo da mesma viga com exposição ao fogo num lado e em três lados. Ainda no capítulo 5 é calculada a secção de gesso necessária para a proteção da madeira.

O capítulo 6, sintetiza todas as considerações relacionadas com a simulação numérica. Apresenta todos os modelos em análise, geometrias, dimensões, malha de elementos finitos e as condições de fronteira adotadas.

No capítulo 7, após a realização das simulações, são apresentados os resultados em forma de tabela ou gráfico, velocidades de carbonização e calculada a força de projeto em segurança.

Por fim, no capítulo 8, é realizada a discussão de resultados, comparando-se a capacidade estrutural da viga, velocidades de carbonização nos diferentes estudos e analisada a resistência ao fogo, através do efeito de proteção nas vigas.

Capítulo 2

Estado da Arte

2 Estado da Arte

2.1 Introdução

De forma a prever o desempenho térmico de elementos provenientes da madeira, é indispensável caracterizar o seu comportamento, nomeadamente a presença do fogo. Têm sido muitos os estudos, analíticos e numéricos, que, ao longo do tempo foram desenvolvidos, de forma a aperfeiçoar o conhecimento sobre a transferência de calor nos materiais. Através de uma análise térmica, é possível delimitar a variação da temperatura bem como a sua distribuição e calcular a velocidade ou taxa de carbonização [5].

2.2 Trabalhos desenvolvidos

O interesse pelos métodos numéricos e experimentais para o cálculo da resistência ao fogo de estruturas de madeira aumentou significativamente. Em 1977, já estavam em desenvolvimento alguns modelos que simulavam a exposição ao fogo de vigas e colunas em madeira. Os métodos tinham, como base, os resultados dos estudos teóricos e experimentais. Nesse ano, a comparação com os resultados experimentais revelou a conformidade entre as resistências de fogo calculadas e medidas [6].

Assim como a massa volúmica, a condutividade térmica também é uma importante propriedade do material, sendo a mesma uma característica fundamental para o desenvolvimento de análises numéricas. Em 2002, esta propriedade foi estudada por alguns investigadores, como Henrik Thunman e Bo Leckner, que sugeriram dois modelos numéricos para determinar esta propriedade. Os modelos foram capazes de determinar a condutividade térmica de todo o tipo de espécies de madeira, a partir da sua massa volúmica, teor de humidade e retração [7].

Mais tarde, em 2006, Simon Schnabl trabalhou com modelos matemáticos baseados em equações diferenciais parciais, que tinham como objetivo determinar a taxa de carbonização e os gradientes de temperaturas para transferências de calor em vigas de madeira. Os resultados da sua pesquisa mostraram o bom acordo entre o modelo desenvolvido e os resultados apresentados pela literatura (Fredlund e Eurocódigo 5) [8].

Mais tarde, em 2009 foram desenvolvidos alguns trabalhos por Andrea Frangi que tinha especial atenção ao estudo de paredes e soalho de madeira com cavidades interiores. Neste tipo de estudos há uma carbonização secundária, que ocorre após a degradação por completo de umas das superfícies que por sua vez introduz os efeitos do fogo no interior das cavidades. As conclusões destes trabalhos indicam que o fogo em temperaturas altas atinge o interior das cavidades tão rápido que provoca uma percentagem de carbonização do seu interior. Assim, quanto mais o revestimento de proteção atrasa o início da carbonização, mais a taxa de carbonização aumenta após a falha do revestimento de proteção [9], [10].

No ano seguinte foi concebido um trabalho numérico e experimental por Massimo Fragiaco, Agnese Menis, Peter J. Moss, Isaia Clemente e Andrew H. Buchanan com dois objetivos, o estudo da resistência da estrutura ao fogo com o auxílio do Abaqus seguindo-se da aplicação de uma carga, realizando um estudo estrutural, tendo em consideração a diminuição das propriedades da madeira com o aumento da temperatura ao longo do tempo. Neste estudo obtiveram resultados aceitáveis quanto à temperatura, deslocamento e tempo de falha [11].



Figura 1 - Rotura após teste ao fogo [11]

Em 2014 Joachim Schmid, Alar Just, Michael Klippel e Massimo Fragiaco desenvolveram um estudo com 153 testes de resistência ao fogo a estruturas em madeira, sendo 117 sob o efeito de flexão, 6 à compressão e 30 em tração para que fosse possível validar o método de redução de secção transversal presente no Eurocódigo 5 1-2 [28]. A maior parte da bibliografia analisada possuía pouca informação, inviabilizando o modelo

de projeto ou encontrando grandes desvios nos resultados. Nos casos dos membros sujeitos à tração os resultados preencheram os requisitos, enquanto que os membros sujeitos à compressão obtiveram resultados muitos diferentes dos obtidos pelo método de redução. Contudo, membros sujeitos a flexão apresentam um desvio ainda maior [12].

Em 2015 foi realizado um estudo por Lukáš Blesák, Eva Caldová, František Wald que tinha como principal objetivo determinar a resistência ao fogo de estruturas mistas, contendo madeira e betão. Durante este estudo além das simulações numéricas foi realizada uma componente prática sobre a supervisão da Universidade Técnica Checa em Praga. A principal conclusão deste estudo resume-se à junção da madeira com uma camada fina de betão sendo eficaz em condições de fogo e ajudando a melhorar a resistência ao fogo de uma estrutura [13].

No ano seguinte foi executado um estudo por Sean Lineham, Daniel Thomson, Alastair Bartlett, Luke Bisby e Rory Hadden em painéis CTL (Cross-laminated timber) que se baseava na execução de testes de resistência ao fogo com uma curva de incêndio não normalizada, utilizando um fluxo de calor para causar combustão contínua, sendo também utilizada uma carga na parte superior. Esta análise foi comparada com o Eurocódigo 5 1-2 [28], concluindo que o mesmo não se aplica a curvas de incêndio não normalizadas [14].

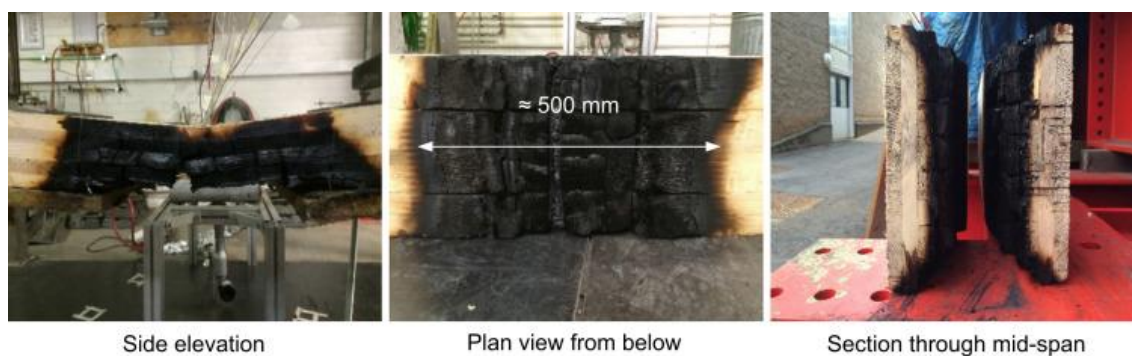


Figura 2 - CTL após teste ao fogo [14].

Capítulo 3

Propriedades dos Materiais

3 Propriedades dos Materiais

3.1 Classificação da madeira

As propriedades da madeira ajudam a caracterizar a sua natureza, para determinar o melhor uso que lhe pode ser atribuído, tendo em conta a massa volúmica, humidade, propriedades mecânicas, térmicas e acústicas [15].

A madeira é um material heterógeno e anisotrópico, que pode ser dividido em dois grupos, a madeira macia e a madeira estrutural. A madeira macia é proveniente de plantas sem flor (gimnospermas) designadas por coníferas, enquanto a madeira estrutural é proveniente de plantas floridas (angiospermas), [16], [17], [18]. Uma madeira estrutural não é necessariamente mais densa e uma madeira macia não é menos densa. Por exemplo, a madeira balsa é uma das madeiras mais leves e menos densa e é considerada uma madeira estrutural. Um exemplo oposto é o teixo que, sendo uma madeira macia, é muito mais dura do que a maioria das madeiras.

Como a madeira estrutural queima durante mais tempo, pode ser utilizada como fonte de aquecimento por ser mais densa. Este tipo de madeira, quando queimada, cria um fogo quente e duradouro sem muito fumo. Embora a madeira macia seja o oposto, tem a vantagem de ser mais barata por possuir um crescimento muito mais rápido, resultando numa madeira mais leve e menos densa [19].



Figura 3 - Madeira macia (à esquerda) e madeira dura (à direita) [20].

3.2 Propriedades mecânicas da madeira

Devido ao facto de a madeira ser um material natural e a árvore estar sujeita a muitas e variadas influências (humidade, condições do solo e espaço para crescimento), as propriedades da madeira variam consideravelmente, mesmo em materiais homogêneos.

A madeira pode ser descrita como um material ortotrópico, isto é, apresenta propriedades mecânicas independentes e únicas nas direções dos três eixos mutuamente perpendiculares: longitudinal, radial e tangencial. O eixo longitudinal L é paralelo às fibras; o eixo radial R é normal aos anéis de crescimento (perpendicular às fibras na direção radial) e o eixo tangencial T é perpendicular às fibras, mas tangente aos anéis de crescimento [21].

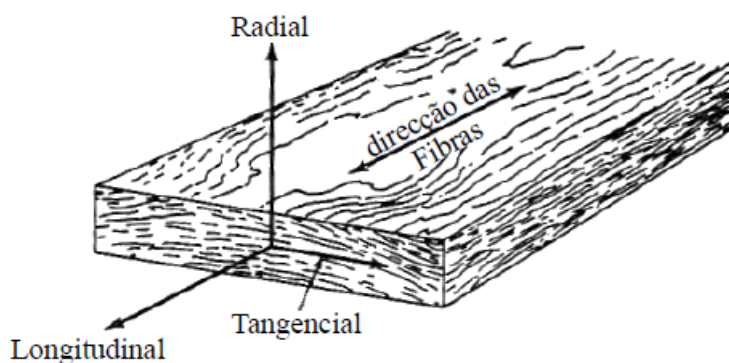


Figura 4 - Direções ou eixos principais [21]

3.2.1 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade ou módulo de Young é um valor constante, designado no século XVIII, por Thomas Young. Este autor descreve as propriedades elásticas de um objeto submetido a tração ou compressão em apenas uma direção, caso de uma mola que, depois de esticada ou comprimida, regressa ao seu comprimento original. Quanto mais rígido o material, maior será o seu módulo de elasticidade. Na tabela 1, estão representados valores dos módulos de elasticidade de diferentes tipos de madeira.

No caso da mola, é possível observar que a força utilizada para a deformar é diretamente proporcional à deformação da mola. Este comportamento é descrito pela Lei de Hooke, onde σ representa a tensão e ε representa a deformação elástica [22].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

Tabela 1 - Módulo de elasticidade em diferentes tipos de madeira [23].

Designação da madeira	Módulo de elasticidade [MPa]
Carvalho	9100 - 11900
Castanheiro	6400 - 8500
Cerejeira	9300 - 103000
Nogueira	9800 - 11600
Loureiro	9600 - 11700

3.2.2 Coeficiente Poisson

O coeficiente de Poisson é uma constante elástica que traduz a proporcionalidade entre a deformação numa direção e a deformação aplicada numa direção que lhe seja perpendicular, sendo uma grandeza sem dimensões. O coeficiente de Poisson varia com o tipo de material, como se pode verificar na tabela 2. No caso específico da madeira, este coeficiente varia com a espécie e de acordo com o teor de humidade existente no material. Na generalidade dos materiais os valores são positivos.

Tabela 2 - Coeficiente Poisson em diferentes tipos de madeira [23].

Espécie	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{TR}	ν_{RT}	ν_{RL}	ν_{TL}
Carvalho	0,369	0,428	0,300	0,618	0,074	0,036
Cerejeira	0,392	0,428	0,282	0,695	0,086	0,048
Nogueira	0,495	0,632	0,378	0,718	0,052	0,035
Pinheiro	0,329	0,344	0,344	0,410	-	-

Na designação, o primeiro índice é referente à direção em que é aplicada a tensão e o segundo à direção onde se faz sentir a deformação transversal. A letra *L* corresponde à direção longitudinal, *R* à direção radial e *T* à direção tangencial [24].

3.2.3 Propriedades mecânicas a temperaturas elevadas

Ao longo dos anos, foram vários os estudos realizados para determinar a influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas. Este efeito pode manifestar-se de forma permanente ou apenas temporário, de acordo com a duração de tempo em que foi exposta ao calor. Os efeitos permanentes ocorrem a temperaturas superiores a 65° C e não desaparecem com o arrefecimento da madeira [25].

3.3 Propriedades térmicas da madeira

As propriedades térmicas de um material permitem avaliar a sua reação quando sujeitos ao calor. O calor específico, a condutividade térmica e a massa volúmica são propriedades de grande importância para a avaliação do comportamento de um material, quando este é sujeito a uma mudança.

O calor específico (C_p) [kJ/kg°C] de um material é a capacidade que este tem para armazenar calor ou energia, ou seja, a energia necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa em um grau (aumentar a temperatura de um quilograma em 1°C ou °K).

A condutividade térmica consiste na taxa de energia calorífica que passa através de 1 [m²] de área transversal, por cada diferença de grau, ao longo da superfície. Quanto maior a condutividade de um determinado material, melhor condutor será.

A massa específica é a relação entre a massa de um elemento e o volume que este ocupa. Esta propriedade não é fixa, pelo que depende da pressão e da temperatura [26].

3.3.1 Calor específico

O calor específico de um dado material é obtido através da relação entre a sua capacidade de aquecimento e a da água. A capacidade de aquecimento de um material representa a energia térmica necessária para causar a troca de uma unidade de temperatura de massa. No caso da madeira, o calor específico é dependente da temperatura e do teor

de humidade, sendo, porém, independente do tipo de madeira [27]. Os valores presentes no Eurocódigo 5 1-2 [28] estão representados na tabela 3 e figura 5 [28].

Tabela 3 - Variação Temperatura e Calor Especifico na madeira [28].

Temperatura [°C]	Calor específico [kJ/kg°C]
20	1,53
99	1,77
99	13,60
120	13,50
120	2,12
200	2,00
250	1,62
300	0,71
350	0,58
400	1,00
600	1,40
800	1,65
1200	1,65

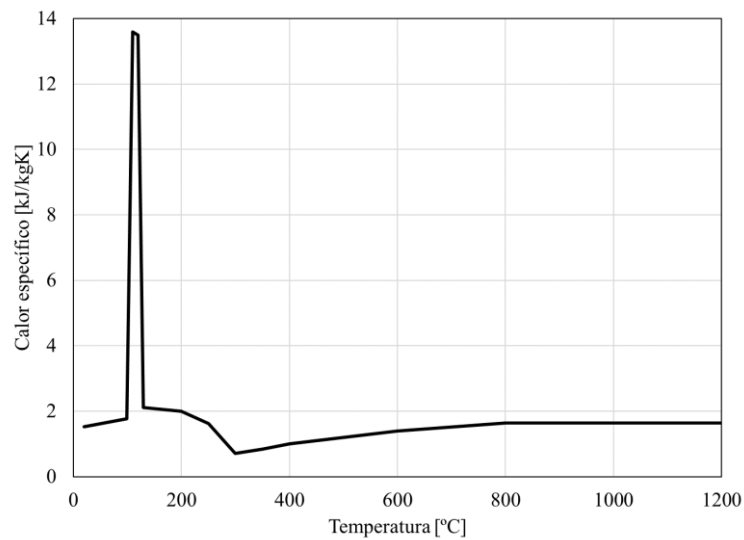


Figura 5 - Variação Temperatura e Calor Especifico na madeira.

3.3.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma característica específica de cada material e representa o fluxo de calor que ele é capaz de conduzir, estando intimamente relacionada com a equação de transporte de Stefan Boltzmann. Em elementos estruturais de madeira a con-

Conductividade térmica é reduzida quando comparada com a condutividade térmica dos materiais metálicos, por exemplo [29]. Os valores presentes no Eurocódigo 5 1-2 [28], estão representados na tabela 4 e figura 6 [28].

Tabela 4 - Variação Temperatura – condutividade térmica [28].

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

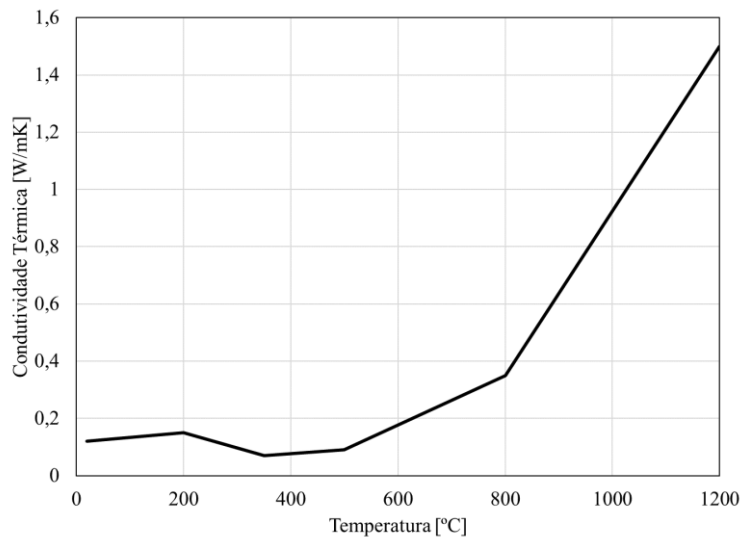


Figura 6 - Variação Temperatura – condutividade térmica

3.3.3 Massa volúmica

A presença de água na madeira provoca variações, tanto a nível volumétrico como de massa, afetando a sua massa volúmica. A massa volúmica assume valores que dependem do teor de humidade na madeira, sendo maior quanto mais elevado o teor de água. A variação com o teor de água é aproximadamente linear até cerca de 25 a 30% do valor de água. A massa volúmica da madeira seca, tendo em conta um teor inicial de 12%, é em função dos valores apresentados na tabela 5 e figura 7.

Tabela 5 - Taxa de densidade em função da temperatura [28].

Temperatura [°C]	Taxa da massa volúmica [kg/m ³]
200	1+w
99	1+w
120	1,00
200	1,00
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0,00

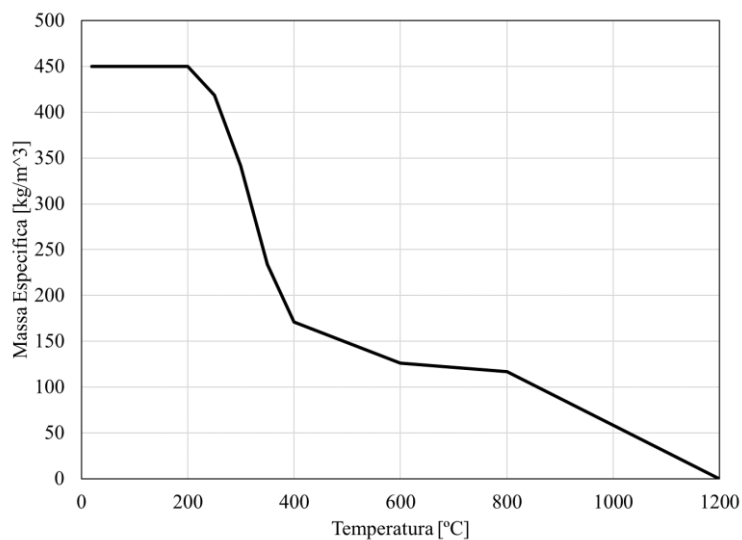


Figura 7 - Taxa da massa volúmica em função da temperatura

3.4 Madeira lamelada colada

A madeira lamelada colada, também conhecida como *Glulam*, é um produto destinado à construção de estruturas, composto por madeira proveniente de florestas sustentáveis. As vigas são formadas por lâminas de madeira coladas entre si, sendo feito o corte de acordo com as dimensões pretendidas e são coladas com cola de resorcina (cor escura) ou cola de melamina (cor clara). É um material bastante versátil que permite uma grande diversidade de formas sendo ideal para a construção de estruturas de grandes dimensões. Pode ser utilizada para habitação, edifícios agrícolas e industriais, pavilhões desportivos, passagens pedonais, estruturas de cobertura, entre outros.

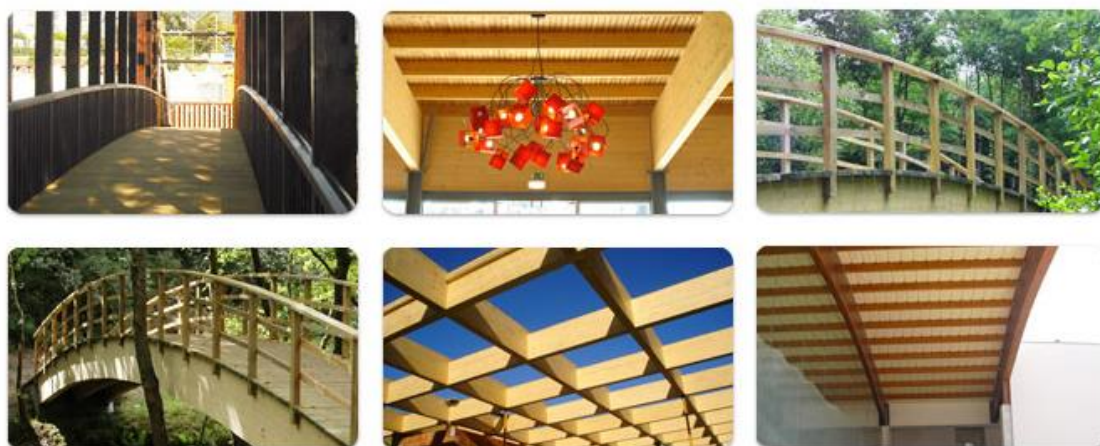


Figura 8 - Exemplos de aplicação da madeira lamelada [30].

Este tipo de madeira tem como vantagens, o facto de ser forte e resistente, ter um design flexível, em que as vigas podem ser retas ou curvas, fácil de combinar com outros materiais e possuir boas propriedades acústicas e uma estética agradável [31]. Na tabela 6, são apresentadas algumas propriedades deste tipo de madeira, GL28H.

Tabela 6 - Tabela de propriedades GL28H [32].

Propriedade	GL28H	
Resistência, N/mm²		
Flexão	f_{m,g,k}	28
Tração	f_{t,0,g,k}	22,3
Tração perpendicular	f_{t,90,g,k}	0,5
Compressão paralela	f_{t,0,g,k}	28
Compressão perpendicular	f_{c,90,g,k}	2,5
Cortante	f_{v,g,k}	3,5
Rigidez, kN/mm²	GL28H	
Módulo de elasticidade paralelo médio	E_{0,g,médio}	12,6
Módulo de elasticidade paralelo 5º percentil	E_{0,g,k}	10,5
Módulo transversal médio	E_{90,g,médio}	0,3
Módulo de elasticidade perpendicular médio	G_{g,médio}	0,65
Densidade característica	R_{g,k}	425

3.5 Propriedades das placas de gesso

As placas de gesso laminado, também conhecidas como gesso cartonado, têm-se destacado na indústria da construção civil por serem um produto leve e de rápida instalação, atendendo à atual procura no sentido de facilitar a construção, evitando dessa forma desperdício e otimizando etapas.

O gesso é um material que apresenta propriedades muito atrativas para a produção de materiais de construção tais como: endurecimento rápido, propriedades mecânicas, boa aderência a substratos e excelente acabamento superficial. Além destas vantagens, destacam-se também excelentes propriedades acústicas, térmicas, bem como resistência ao fogo.

Uma das maiores desvantagens do gesso, enquanto material de construção, é a sua diminuição de resistência na presença de água, ainda que, atualmente este aspecto seja minimizado mediante a incorporação de aditivos hidrófugos. Este aditivo, faz com que quando em contacto com a água, a placa demore aproximadamente 48 horas a absorver o suficiente para aumentar o seu peso em 10%, originando, nesse momento, uma perda de resistência [33].



Figura 9 - Placa de gesso resistente ao fogo [34].

Quando submetidas a elevadas temperaturas, as placas de gesso libertam água de hidratação, atrasando, assim, a transferência de calor. Contudo, essa perda de água provoca uma retração na placa, provocando fissuras que permitem a passagem do calor e, dependendo dos danos causados, poderá também dar-se a passagem de fogo. Para minimizar esse problema, foi desenvolvida uma placa resistente ao fogo, que contém fibras não combustíveis na camada de gesso, sendo comum o uso de fibras de vidro [36].

Nas simulações térmicas com proteção, foram utilizados dois tipos diferentes de gesso. Na tabela seguinte, estão indicadas todas as propriedades dos dois tipos de gesso.

Tabela 7 - Propriedades dos gessos

Massa volúmica (kg/mm ³)		Condutividade (W/mm °C), função da temperatura (°C)		Calor específico (J/kg °C), função da temperatura (°C)		Emissividade
Gesso 1						
7.27×10^{-7}		2.0×10^{-4}	10 °C	925.04	10 °C	0.85
		2.18×10^{-4}	150 °C	941.5	95 °C	
		1.03×10^{-4}	155 °C	24572	125 °C	
		3.19×10^{-4}	1200 °C	953.14	155 °C	
					1097.5	
Gesso 2						
6.98×10^{-7}	20 °C	2.5×10^{-4}	10 °C	1499.92	10 °C	0.85
5.76×10^{-7}	80 °C	2.5×10^{-4}	20 °C	1499.92	20 °C	
		1.2×10^{-4}	100 °C	1842	78 °C	
		1.3×10^{-4}	400 °C	2769	85 °C	
		2.7×10^{-4}	800 °C	5861	97 °C	
		5.3×10^{-4}	1200 °C	18479	124 °C	
				2006	139 °C	
				1001.04	148 °C	
				714	373 °C	
				714.98	430 °C	
				570.78	571 °C	
				617.8	609 °C	
				3000	662 °C	
				3070	670 °C	
				571	685 °C	
		571	900 °C			

3.6 Difusividade térmica

A difusividade térmica e a condutividade térmica são dois parâmetros de grande importância em processos de transferência de calor. A difusividade térmica influencia

diretamente a velocidade de propagação de calor através do meio enquanto que a condutividade térmica é um indicador da resistência térmica ao fluxo do calor no meio.

Embora exista informação sobre estes parâmetros para uma grande variedade de materiais, verifica-se certa carência de dados confiáveis na literatura especializada em relação a produtos processados, como é o caso de placas de gesso usadas na construção.

Existem diversos métodos experimentais para determinação destes parâmetros. Um dos métodos para determinar a difusividade térmica é baseado na própria definição deste parâmetro, que representa uma relação entre a condutividade térmica, a massa volumica e o calor específico do meio. Este método representado na equação (2) exige o conhecimento prévio das propriedades.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \times C_p} \quad (2)$$

Quanto maior for a difusividade térmica do material, maior serão as temperaturas ao longo do tempo, aumentando dessa forma as velocidades de carbonização [37], [38].

Nos gessos em estudo o primeiro apresenta uma difusividade térmica de 0.13 mm²/s enquanto que o gesso 2 tem 0.32 mm²/s, o que significa que teoricamente o segundo isolante deverá ter temperaturas mais elevadas bem como as velocidades de carbonização.

Capítulo 4

Viga Simplesmente Apoiada com Carga a Meio Vão
à Temperatura Ambiente

4 Viga Simplesmente Apoiada e Carga a Meio Vão à Temperatura Ambiente

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as equações necessárias para o projeto do tipo de vigas em estudo com base na aplicação da teoria da elasticidade, cujo objetivo é a determinação da carga pontual a que podem estar sujeitas.

O cálculo estrutural linear elástico é simples e bastante útil, traduzindo-se numa abordagem em engenharia com resultados muito aceitáveis. Com a utilização de ferramentas avançadas e associadas aos problemas e comportamento mais real das estruturas, modelos de comportamento não linear têm sido investigados. Neste capítulo, é assim também apresentada, a carga de colapso obtida através do comportamento plástico da estrutura.

4.2 Cálculo elástico

Inicialmente é calculado o momento fletor, que representa a soma algébrica dos momentos relativos a secção YX, contidos no eixo da viga, gerados por cargas aplicadas transversalmente ao eixo longitudinal e que produz um esforço que tende a curvar esse mesmo eixo, provocando tensões normais de tração e compressão na estrutura.

De seguida é calculado o esforço cortante que representa o efeito da força aplicada ao longo da viga, sendo neste caso constante para a determinação da tensão de corte.

É também calculada a deformada máxima, que mostra existência de forças por unidade de área ou concentradas, que se traduzem na alteração da geometria da estrutura.

O passo seguinte é calcular a tensão normal devido à flexão que representa a intensidade da força atuando perpendicularmente a um plano em compressão ou tensão, com base no cálculo do módulo da secção retangular.

Na figura 10 está representado o esquema de uma viga simplesmente apoiada com uma carga Fd concentrada a meio vão. No presente estudo consideraram-se vigas com secção retangular, com dimensão b (base) e d (altura).

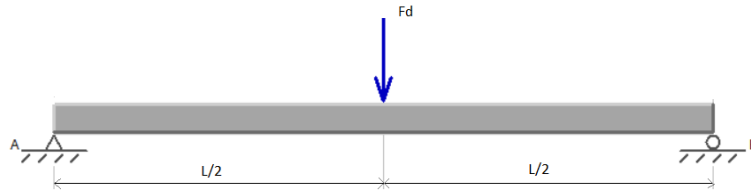


Figura 10 - Viga simplesmente apoiada com carga a meio vão.

Considerando a resistência à flexão, o máximo momento fletor a meio vão é obtido pela equação (3), em que F_d é a força aplicada na viga e L o seu comprimento.

$$M_{máx} = \frac{F_d}{2} \times \frac{L}{2} \quad (3)$$

O esforço cortante ao longo da viga é constante e função da equação (4).

$$V_{máx} = \left| \frac{F_d}{2} \right| \quad (4)$$

Nestas condições, a deformada máxima é obtida pela equação (5), em que E é o módulo de elasticidade e I o momento de inércia da secção transversal da viga.

$$W_{máx} = \frac{1}{48} \times \frac{F_d \times L^3}{E \times I} \quad (5)$$

A máxima tensão normal [MPa] devido à flexão é calculada através da equação (6).

$$\sigma_{máx} = \frac{M_{f máx} \times \frac{d}{2}}{\frac{b \times d^3}{12}} = \frac{M_{f máx}}{\left[\frac{bd^2}{6} \right]} \quad (6)$$

De seguida, é calculado o módulo da secção retangular, pela equação (7).

$$S_{norm} = \frac{bd^2}{6} \quad (7)$$

Por último, é calculada a tensão de corte, equação (8).

$$\tau_{máx} = \frac{3}{4} \times \frac{Fd}{(b \times d)} \quad (8)$$

Neste problema e para a determinação da carga elástica admite-se a inversão da equação 6 em que a máxima tensão corresponde à resistência à tração da madeira lamela colada $f, 0, g, k$. O cálculo é efetuado através do módulo da secção retangular da viga S_{norm} , e do comprimento da viga L .

$$Pel = f, 0, g, k \times S_{norm} \times \frac{4}{L} \quad (9)$$

4.3 Cálculo em projeto seguro

Para o cálculo em projeto seguro e à temperatura ambiente, foi respeitado o Eurocódigo 5 parte 1-1 [35]. À temperatura ambiente, a madeira mantém as suas propriedades, degradando-se à medida que a temperatura aumenta. Todos os cálculos estão presentes no anexo 9.

Para que a resistência à flexão seja garantida, deve ser considerada a seguinte expressão apresentada no Eurocódigo 5 parte 1-1 [35]. Esta equação deve ser considerada apenas se existir um único momento aplicado ao eixo.

$$R_d > \sigma_{m,d} \quad (10)$$

Em que R_d representa a resistência à flexão em segurança e $\sigma_{m,d}$ é a tensão normal calculada.

Para a análise à temperatura ambiente, o primeiro passo é o calculo da tensão normal pela equação (11), em que M_d é o momento à flexão máximo e S_{norm} é o módulo da secção retangular da viga em estudo.

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{S_{norm}} = \frac{F_d \times L}{\frac{bd^2}{6} \times 4} = \frac{F_d \times L \times 3}{b \times d^2 \times 2} \quad (11)$$

De acordo com o Eurocódigo 5 1-1 [35], existem alguns fatores de segurança que devem ser levados em conta neste tipo de estudo. O fator de modificação para a imposição de uma carga de média duração (K_{mod}) para o tipo de madeira em estudo tem o valor de 0,8 na classe de serviço igual a 2. O fator de profundidade da *Glulam* K_h é dado pela equação (12) em que o h representa a altura da viga em mm, para um valor dessa altura inferior ou igual a 600[mm].

$$K_h = \min \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{600}{h}\right)^{0,1} \\ 1,1 \end{array} \right. \quad (12)$$

Conforme a tabela 2.3 do Eurocódigo 5 1-1 [35], o fator parcial de segurança para a propriedade do material (γ_M) é de 1,25 para o tipo de madeira em estudo.

Tabela 8 - Fator parcial de segurança γ_M de acordo com o Eurocódigo 5 1-1 [35]

Materiais	γ_M
Madeira maciça	1.3
Madeira lamelada colada	1.25
Contraplacado	1.2
Aglomerado de madeira	1.3
Placas de fibras rígidas	1.3
Placas de fibras, médias	1.3
Placas de fibras, FMD	1.3
Placas de fibras, macia	1.3
Ligadores	1.3
Fixadores de placas de metal	1.25
Combinações acidentais	1.0

Através destes fatores de segurança, é possível determinar a resistência à flexão, de acordo com a equação (13) em que R_k é o valor da carga resistente.

$$R_d = K_{mod} \times \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (13)$$

Para o caso em estudo, é calculada a força pontual F_d a aplicar em condições de segurança de projeto utilizando a equação seguinte, função da secção retangular da viga S_{norm} , resistência a flexão R_d e o comprimento da viga L .

$$F_d = R_d \times 4 \times \frac{S_{norm}}{L} \quad (14)$$

4.4 Cálculo plástico

Na generalidade dos projetos de componentes admite-se que as solicitações conduzem ao comportamento elástico da estrutura. No entanto, e em situações de segurança, é necessário prever o comportamento estrutural para possíveis ocorrências de deformações plásticas.

O aparecimento do comportamento plástico é condicionado em geral por um critério de cedência atendendo ao tipo de materiais utilizados (por exemplo, critério de von Mises, Tresca, tensão normal máxima, critério de Mohr-Coulomb).

Em geral, para as secções retas mais usuais, há uma relação entre a cedência elástica e a plasticidade de uma secção através de um fator de forma conhecido.

Para o caso de vigas com secção retangular a relação entre o momento plástico e o momento elástico é de 1,5. A imposição deste valor limite considera que todo o núcleo elástico da secção desaparece e toda a secção plastifica uma vez que alcança o seu momento plástico, formando um mecanismo ou uma rótula plástica.

Assim, a carga de colapso caracterizada pelo comportamento plástico na viga em análise através da formação de uma rótula, é calculada pelo módulo da secção retangular da viga S_{norm} , resistência à tração da madeira lamelada colada $f_{0,g,k}$ e do comprimento da viga L .

$$Ppl = 6 \times \frac{S_{norm}}{L} \times \mathbf{f}, \mathbf{0}, \mathbf{g}, \mathbf{k} \quad (15)$$

Capítulo 5

Projeto de Vigas Expostas ao Fogo

5 Projeto de Vigas Expostas ao Fogo

5.1 Introdução

A madeira é classificada como um material combustível sólido, que sofre degradação quando submetida à elevação da temperatura. As consequências da ação térmica na madeira como material estrutural resulta em alterações das suas propriedades de resistência e rigidez. Estas modificações alteram a estabilidade da estrutura, podendo entrar em colapso se a força que atua no elemento estrutural for superior aquela para que está dimensionado.

Com base no Eurocódigo 5 1-2 [28] é possível obter informação adicional sobre o comportamento ao fogo do material em madeira. A velocidade de carbonização β_n para *glued laminated timber* com massa volúmica superior a 290kg/m^3 tem o valor de $0,7\text{ mm/min}$. O cálculo da profundidade de carbonização numa secção reta em madeira é dado pela equação (16), em que t representa o tempo decorrido da exposição ao fogo.

$$d_{char,n} = \beta_n \times t \quad (16)$$

O método de secção reduzida está englobado no Eurocódigo 5 1-2 [28] para o projeto de elementos de madeira em condições de incêndio. O método considera a redução de resistência e rigidez abaixo da camada carbonizada, adicionando uma profundidade adicional (conhecida como camada de “resistência zero”) à profundidade da mesma. A camada de resistência zero é um dos principais parâmetros para o projeto de incêndio de elementos em madeira.

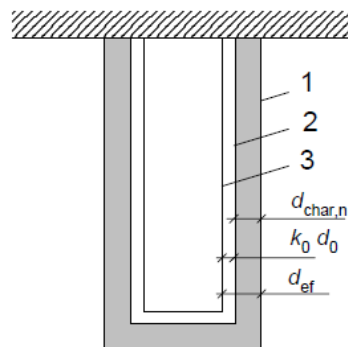


Figura 11 - Redução da secção transversal

O método da secção reduzida para um tempo igual ou superior a 20min em que k_0 é igual a 1,0 para superfícies sem qualquer proteção, e d_0 é igual a 7mm, é dado pela equação (17) que permite o cálculo da espessura reduzida na secção.

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \times d_0 \quad (17)$$

A condição de projeto para o cálculo do momento fletor em função da ação do fogo é dada pela equação (18) em que η_{fi} é igual a 0,6, de acordo com Eurocódigo 5 1-2 [28].

$$M_{d,fogo} = \eta_{fi} \times M_{d,norm} = 0,6 \times F_d \times \frac{L}{4} \quad (18)$$

5.2 Cálculo da secção necessária

5.2.1 Frentes de fogo

Na figura 12, está representada a viga em estudo, com a carga $F_{d,f}$ a meio vão sujeita à presença do fogo. Esta viga é simplesmente apoiada, contendo nas suas extremidades um apoio fixo e um apoio móvel de forma a garantir a elasticidade da estrutura.

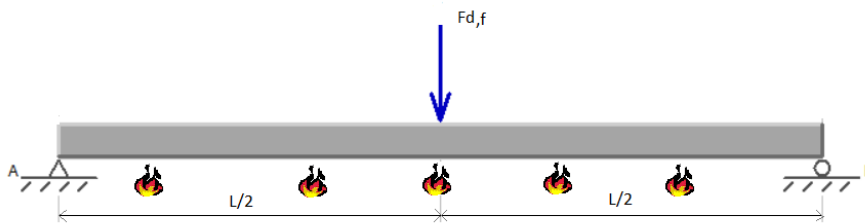


Figura 12 - Viga simplesmente apoiada com carga sujeita ao fogo

Neste subcapítulo serão apresentadas as equações utilizadas para o cálculo da secção necessária, sendo elas a profundidade (d) e largura (b), no caso de três frente de fogo.

Na figura seguinte está representada a viga, com as 3 frentes de fogo utilizados neste estudo.

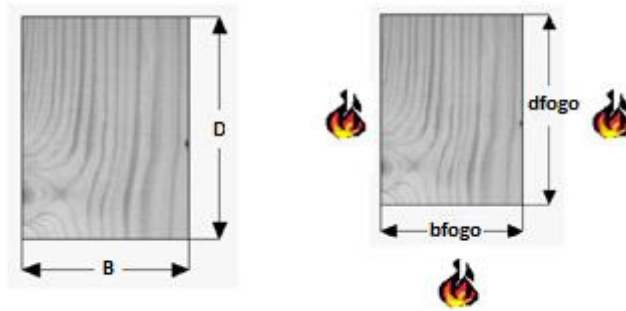


Figura 13 – Exposição ao fogo em mais que um lado [39]

Para o cálculo da largura necessária, é utilizada a equação (19) em que B é a largura inicial e d_{ef} é a espessura que carbonizou na secção reduzida.

$$b_{fogo} = B - 2 \times d_{ef} \quad (19)$$

Para calcular a profundidade necessária, é utilizada a equação (20) em que D é profundidade inicial e d_{ef} a espessura na secção reduzida, calculada pela equação (17).

$$d_{fogo} = D - d_{ef} \quad (20)$$

No caso em que apenas existe um lado exposto ao fogo é calculada a profundidade (d) e largura (b) da secção reta através do mesmo processo.



Figura 14 - Exposição ao fogo em apenas um lado, adaptado de [39].

Neste caso, como a equação (21) indica, as larguras possuem o mesmo valor.

$$b_{fogo} = B \quad (21)$$

A profundidade é calculada pela equação (22), em que D é a profundidade e d_{ef} a secção reduzida.

$$d_{fogo} = D - d_{ef} \quad (22)$$

O módulo da secção reta da viga exposta ao fogo é calculada através da equação (23), utilizando os valores obtidos em (21) e (22).

$$S_{fogo} = \frac{b_{fogo} \times d_{fogo}^2}{6} \quad (23)$$

A tensão normal devido à flexão é dada pela equação (24), em que é utilizada a profundidade, largura, força e comprimento da viga.

$$\sigma_{m,d,fogo} = \frac{0,6 \times F_d \times L}{4} \times \frac{6}{b_{fogo} \times d_{fogo}^2} = \frac{0,6 \times F_d \times L \times 3}{2 \times b_{fogo} \times d_{fogo}^2} \quad (24)$$

5.3 Cálculo em projeto seguro em situação de incêndio

A verificação da resistência ao fogo pode ser realizada através da equação (25), em que $k_{mod,fi}$ é o fator de modificação, $\gamma_{M,fi}$ é fator parcal de segurança para madeira em situação de fogo que, de acordo com o Eurocódigo 5 1-2 [28], sendo ambos igual a 1 em situação de fogo. Por fim, e na mesma equação, f_{20} corresponde a 20% da força resistente à temperatura ambiente e pode ser calculado com base na equação (26), utilizando o valor do coeficiente k_{fi} tendo o valor de 1,15 para o tipo de madeira em estudo e da resistência à tração paralela à fibra da madeira, f_k .

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (25)$$

$$f_{20} = k_{fi} \times f_k \quad (26)$$

Pela equação (27), se a resistência ao fogo em segurança for maior que a tensão de flexão significa que a resistência à flexão é a adequada.

$$\frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} \times (f_k \times k_{fi}) \geq \frac{0,6 \times F \times L \times 3}{2 \times b_{fogo} \times d^2_{fogo}} \quad (27)$$

Simplificando a equação em ordem a Fd para o cálculo da força pontual a utilizar na viga em estudo obtêm-se:

$$F_d \leq \left[\frac{k_{mod,fi}}{\gamma_{M,fi}} \times (f_k \times k_{fi}) \right] \times \frac{2 \times b_{fogo} \times d^2_{fogo}}{0,6 \times L \times 3} \quad (28)$$

5.4 Cálculo da secção reta com espessura em gesso adicional

De acordo com o Eurocódigo 5 1-2 [28], o cálculo da espessura de gesso necessário para a proteção da madeira é dado em função do tipo de material.

No caso do gesso tipo F utilizado neste estudo, a espessura necessária à proteção da viga é obtida através das expressão (29), onde t_{ch} é o tempo até o início da carbonização e h_p a espessura do gesso necessário em mm.

$$t_{ch} = 2,8 \times h_p - 14 \quad (29)$$

Simplificando a equação (30) em ordem a h_p , obtêm-se:

$$h_p = \frac{t_{ch} - 14}{2,8} \quad (30)$$

Capítulo 6

Componente Numérica

6 Componente Numérica

6.1 Modelos em análise

Foram utilizados diferentes tamanhos de seções retas de vigas para estudo. Num total de 16 combinações, apenas o comprimento é constante. Quanto à profundidade e largura da secção retangular, as dimensões variam entre 80 e 140mm. Na tabela seguinte estão representadas todas as combinações em estudo.

Tabela 9 – Seções retangulares para as vigas em estudo

Geometria da Viga		
b	d	L
mm	mm	mm
80	80	2000
80	100	2000
80	120	2000
80	140	2000
100	80	2000
100	100	2000
100	120	2000
100	140	2000
120	80	2000
120	100	2000
120	120	2000
120	140	2000
140	80	2000
140	100	2000
140	120	2000
140	140	2000

Para estas 16 combinações, foram executadas simulações computacionais à temperatura ambiente, exposição ao fogo num lado da secção e exposição ao fogo em três frentes da secção reta. Na figura seguinte está representado um desenho 3D da viga em estudo.

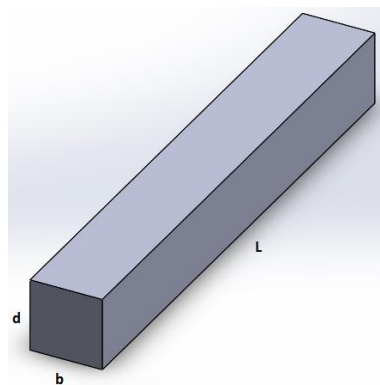


Figura 15 - Desenho 3D da viga em estudo

Nas análises computacionais das vigas com exposição ao fogo foram efetuados diferentes estudos: simulações térmicas nas vigas não protegidas em regime transiente, simulações termomecânicas para instante de tempo final na obtenção do perfil de temperaturas, e simulações térmicas nas vigas protegidas. No total foram desenvolvidas 92 simulações.

Neste trabalho foi utilizado o programa Ansys baseado no método de elementos finitos. O tempo gasto durante o pré-processamento é relativamente grande. O Ansys possibilita utilizar uma linguagem conhecida como APDL (ANSYS Parametric Design Language) que é uma importante ferramenta de programação do código. Esta linguagem facilita a atribuição de variáveis durante a construção da geometria, introdução de materiais, condições fronteira e desenvolvimento da solução, baseando-se na utilização de operadores matemáticos e funções paramétricas.

Todos os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho foram baseados na linguagem APDL através da escrita em arquivos do tipo “*.txt”. Alguns dos exemplos destes códigos encontram-se colocados em Anexo a esta tese.

6.2 Método de elementos finitos

A simulação computacional é uma ferramenta importante na análise e na melhoria da qualidade dos projetos. A utilização do método dos elementos finitos tem vindo a evo-

luir consideravelmente, procurando aperfeiçoar as análises, melhorando a criação das malhas de elementos finitos, novas técnicas de modelação, utilização de diferentes critérios e algoritmos para a análise de problemas.

É possível obter uma resposta aos problemas mais complexos, com maior precisão e num curto espaço de tempo, desde os problemas com comportamento linear aos problemas não-lineares.

A elaboração de um modelo numérico é composta por diferentes fases. Na fase de pré-processamento, são inseridas as propriedades do material, construção do modelo geométrico, escolha do tipo de elemento finito, imposição de carregamento e condições fronteira. Esta etapa é muito importante para que a fase de solução seja obtida com sucesso na resolução do problema. A última etapa é o pós-processamento onde são obtidos os resultados do problema.

A malha de elementos finitos é escolhida de acordo com o tipo de elemento utilizado no estudo. No caso do estudo de vigas à temperatura ambiente, foi utilizado o elemento SOLID185 que é definido por oito nós e três graus de liberdade.

Para a análise mecânica foi imposta uma carga incremental linear através de uma solução incremental e iterativa, para obtenção do valor da carga máxima atingida pela cedência plástica no material. As condições de fronteira foram aplicadas em função de deslocamentos prescritos nas linhas médias laterais da viga.

Para o tempo total da análise de 1800 segundos, foi escolhido um incremento de tempo (time step) máximo de 0.25 segundos e um mínimo de 0.05 segundos. Foi utilizado um critério de convergência com um valor de referência mínimo de 1 e 0.001 de tolerância.

Na figura seguinte, está representada a malha que foi gerada para a viga com as dimensões de secção reta 100mm por 80mm. Os elementos finitos considerados na malha de toda a viga têm um tamanho de 20mm. O tamanho do elemento foi imposto, após efetuados testes de convergência de malha na obtenção da solução e atendendo ao limite máximo de graus de liberdade a utilizar no programa.

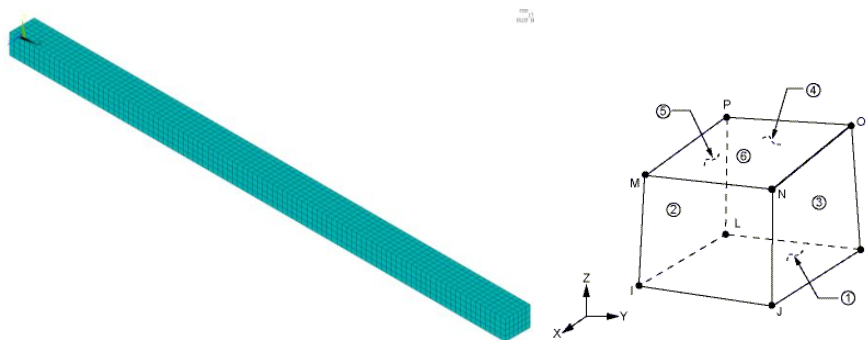


Figura 16 - Malha de elementos finitos e elemento finito de 8 nós.

Em relação ao estudo das vigas com exposição ao fogo, uma ou três frentes, o elemento utilizado foi o SOLID278 que é definido por oito nós e 1 grau de liberdade (temperatura). Este estudo é composto por um modelo de análise térmica em regime transiente, com propriedades não lineares. A malha mantém-se uniforme e com elementos de tamanho de 20mm, sendo a mesma gerada de forma automática. Na figura seguinte estão representadas as diferentes malhas utilizadas para as simulações mecânicas e térmicas com proteção.

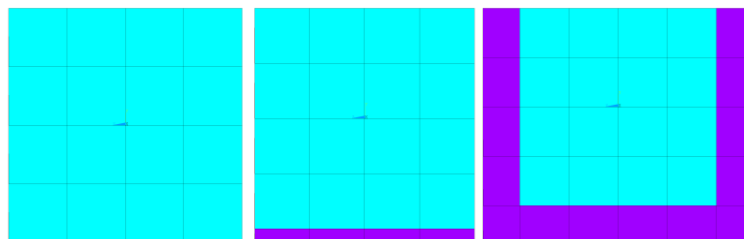


Figura 17 - Malhas utilizadas para as simulações térmicas com e sem proteção

Na análise térmica as condições de fronteira baseiam-se na aplicação da convecção e radiação nas frentes de exposição ao fogo, para uma temperatura inicial do modelo de 20°C. Foi imposta a curva padrão do fogo para a evolução da temperatura ambiente.

Para o tempo total da análise de 1800 segundos, e tal como no modelo mecânico, também na análise térmica foi escolhido um incremento de tempo (time step) máximo de 5 segundos e um mínimo de 0.1 segundos. Foi utilizado um critério de convergência com um valor de referência mínimo de 1×10^{-6} e 0.1 de tolerância.

Considerou-se um coeficiente convectivo de 25×10^{-6} [W/mm²K] para a superfície exposta à troca de calor por convecção. Para os efeitos de radiação, ambas as emissividades (madeira e fogo) respeitaram a recomendação do EC5 e assumiram ambos o valor de 1. A temperatura ambiente considerada foi de 20 [°C].

Na análise termomecânica obteve-se o campo de temperaturas na viga em estudo para o instante final de exposição ao fogo, e adicionou-se o efeito térmico à ação de uma carga incremental linear. De realçar a importância na utilização da mesma malha de elementos finitos da solução térmica para o acoplamento das temperaturas à solução mecânica.

Capítulo 7

Apresentação de Resultados

7 Apresentação de Resultados

7.1 Temperatura ambiente

Neste capítulo, são apresentados os valores da carga plástica e elástica obtida para cada viga à temperatura ambiente. Na tabela seguinte, estão representados os valores da carga elástica e plástica obtidas no ANSYS. Os valores da carga elástica variam entre os 3800N e os 20000N, enquanto que a carga plástica varia entre os 5200N e os 27000N, de acordo com a geometria da viga em estudo.

Tabela 10 - Valores da carga plástica e elástica

Geometria da Viga			Resultados Analíticos		Resultados Ansys		% Erro Relativo	
b	d	L	Pel_Analítico	Ppl_Analítico	Pel_Ansys	Ppl_Ansys	%Erro Pel	%Erro Ppl
80	80	2000	3806	5709	4500	5225	18,24	8,47
80	100	2000	5947	8920	6750	9196	13,51	3,09
80	120	2000	8563	12845	9500	13517	10,94	5,23
80	140	2000	11655	17483	12750	17075	9,39	2,33
100	80	2000	4757	7136	5500	7604	15,61	6,56
100	100	2000	7433	11150	8250	11518	10,99	3,30
100	120	2000	10704	16056	12000	15950	12,11	0,66
100	140	2000	14569	21854	16250	21750	11,54	0,48
120	80	2000	5709	8563	6750	9279	18,24	8,36
120	100	2000	8920	13380	10000	14126	12,11	5,58
120	120	2000	12845	19267	14500	21361	12,89	10,87
120	140	2000	17483	26225	19500	26700	11,54	1,81
140	80	2000	6660	9990	8000	10900	20,12	9,10
140	100	2000	10407	15610	11750	15525	12,91	0,54
140	120	2000	14986	22478	17250	22775	15,11	1,32
140	140	2000	20397	30596	23500	26100	15,21	14,69

Para uma melhor interpretação dos resultados, foram criados dois gráficos que relacionam os valores da carga elástica e plástica presentes na tabela anterior.

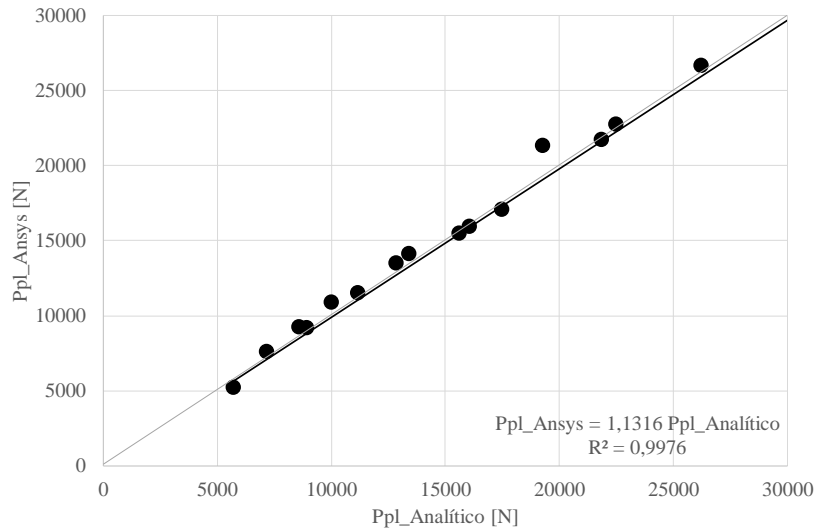


Figura 18 - Carga plástica

A análise do gráfico da carga plástica em que, no eixo das ordenadas, está o valor da carga obtido através do ANSYS e no eixo das abscissas o valor obtido analiticamente permite observar que os valores estão bastante próximos, o que origina uma linha de tendência aproximada à reta que seria considerada ideal. Para a carga plástica, o erro máximo obtido foi de 14.69% para a viga de secção reta de dimensão $b=140\text{mm}$ e $d=140\text{mm}$.

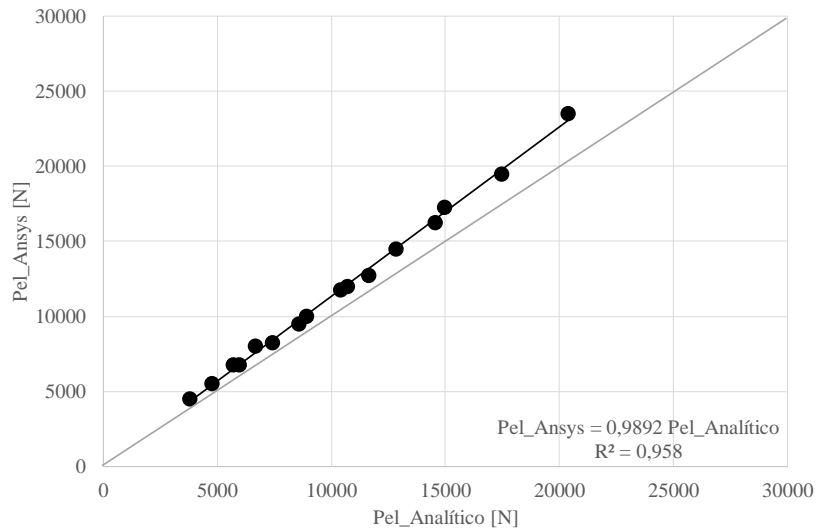


Figura 19 - Carga elástica

No caso da carga elástica, é possível observar que os valores analíticos e numéricos possuem alguma diferença, originando, assim, uma linha de tendência ligeiramente distante da reta que seria o ideal, identificada a cinzento no gráfico anterior. Para a carga elástica, o erro máximo obtido foi de 20.12% para a secção $b=140\text{mm}$ e $d=80\text{mm}$.

O resultado obtido para a carga plástica é superior ao admitido em regime elástico em ambas as soluções de cálculo. Na solução numérica esse valor é alcançado quando as fibras da viga madeira alcançam a cedência do material.

Os erros relativos apresentados anteriormente para as duas cargas são calculados através da equação (31). Estas percentagens podem significar pequenos erros de aproximação pois os métodos analíticos conduzem a soluções exatas para problemas, enquanto que os métodos numéricos produzem, em geral, soluções aproximadas. A influência na discretização da malha de elementos finitos poderia levar a uma melhoria da solução.

$$\text{Erro Relativo} = \frac{\text{Analítico} - \text{Numérico}}{\text{Analítico}} \times 100 \quad (31)$$

Como conclusão, pode afirmar-se que, para o problema proposto da viga, a solução obtida por elementos finitos é fiável. Além de resultados compatíveis, a utilização do programa, neste caso, mostrou ser uma ferramenta ágil para a análise, em relação ao cálculo analítico.

No anexo 1, encontram-se os resultados obtidos em termos de tensões e deformações elásticas e plásticas, a deformada e a respetiva malha de elementos finitos utilizada. Para cada modelo efetua-se o registo da carga máxima alcançada em regime elástico e plástico para as diferentes vigas em análise.

7.2 Exposição ao fogo

Neste subcapítulo, são apresentados os resultados do estudo da viga com uma frente e três frentes de fogo. São calculadas as velocidades de carbonização para cada um dos casos e posteriormente comparadas ao Eurocódigo 5 1-2 [28], bem como a espessura total carbonizada. Na tabela seguinte, estão representadas as velocidades de carbonização de cada viga, com exposição ao fogo numa frente.

De acordo com a tabela, a velocidade de carbonização β_0 varia entre 0,53 e 0,55 mm/min, apresentando um valor médio de 0,53, o que acontece apenas quando a temperatura da madeira é superior a 300°C. A relação entre os valores obtidos e o Eurocódigo 5 [28] (EC5) apresenta um erro máximo de 23,08%, ocorrendo sempre nas vigas de maior dimensão.

Neste estudo é apenas calculada a carbonização na vertical, uma vez que o fogo se encontra apenas na parte inferior da viga.

Tabela 11 - Velocidades de carbonização para uma frente de fogo

Geometria da Viga			β_0 (mm/min)		
b	d	L	Y mm	EC5	Erro %
mm	mm	mm	mm		
80	80	2000	0,55	0,65	15,38
80	100	2000	0,5		23,08
80	120	2000	0,55		15,38
80	140	2000	0,5		23,08
		Média	0,53		
100	80	2000	0,55	0,65	15,38
100	100	2000	0,5		15,38
100	120	2000	0,55		15,38
100	140	2000	0,5		23,08
		Média	0,53		
120	80	2000	0,55	0,65	15,38
120	100	2000	0,5		23,08
120	120	2000	0,55		15,38
120	140	2000	0,5		23,08
		Média	0,53		
140	80	2000	0,55	0,65	15,38
140	100	2000	0,5		23,08
140	120	2000	0,55		15,38
140	140	2000	0,5		23,08
		Média	0,53		

Na tabela seguinte, estão representados os valores obtidos através do ANSYS para as vigas em estudo, com três frentes de fogo. Como análise referente à velocidade de carbonização para a viga em estudo com três frentes de fogo, é possível observar que os

valores variam entre 0,50 e 0,85, originando assim um erro relativo maior, sendo o máximo 28,57%.

O valor da carbonização para a análise em três frentes é calculado através da carbonização na horizontal e vertical, sendo depois feita uma média que, por sua vez, é comparada com o Eurocódigo 5 [28].

O erro obtido para as duas situações anteriores poderá estar relacionado com o tipo de malha utilizada, uma vez que elementos de dimensão de 20mm leva a uma solução de cálculo da espessura carbonizada mais complicada.

No anexo 2, estão representadas as imagens das temperaturas aos 30 minutos, bem como a parte carbonizada de cada combinação, para uma e três frentes de fogo.

Tabela 12 - Velocidades de carbonização para três frentes de fogo

Geometria da Viga			β_n (mm/min)				
b	d	L	X mm	Y mm	Média	EC5	Erro %
mm	mm	mm					
80	80	2000	0,57	1,13	0,85	0,70	21,43
80	100	2000	0,55	0,98	0,77		9,52
80	120	2000	0,57	1,13	0,85		21,43
80	140	2000	0,57	1,13	0,85		21,43
Média					0,83		
100	80	2000	0,58	0,67	0,63	0,70	10,71
100	100	2000	0,55	0,67	0,61		13,10
100	120	2000	0,50	0,67	0,58		16,67
100	140	2000	0,52	0,82	0,67		4,76
Média					0,62		
120	80	2000	0,58	0,60	0,59	0,70	15,48
120	100	2000	0,55	0,70	0,63		10,71
120	120	2000	0,55	0,60	0,58		17,86
120	140	2000	0,55	0,62	0,58		16,67
Média					0,59		
140	80	2000	0,53	0,58	0,56	0,70	20,24
140	100	2000	0,50	0,53	0,52		26,19
140	120	2000	0,50	0,58	0,54		22,62
140	140	2000	0,48	0,52	0,50		28,57
Média					0,53		

7.3 Exposição ao fogo e carga pontual

Nesta fase, foram realizadas simulações que incluíam uma parte térmica com distribuição de temperaturas devido à exposição do fogo no instante final da simulação, e uma componente mecânica função de uma carga concentrada a meio vão. O objetivo destas simulações é verificar qual a carga máxima que a viga suporta a altas temperaturas. Durante este processo, foram realizadas trinta e duas simulações, dezasseis possuíam apenas uma frente de fogo e as restantes três frentes de exposição. Na tabela seguinte, estão representados os valores da carga plástica obtidos para uma e três frente de fogo.

Tabela 13 - Carga suportada a temperaturas elevadas

Geometria da Viga			3 frentes de fogo			Erro	1 frente de fogo		Erro
b	d	L	Ppl_Analítico	Ppl_Ansys	Ppl_Analítico		Ppl_Ansys		
mm	mm	mm	N	N	%	N	N	%	
80	80	2000	434	392	9,82	1532	1325	13,50	
80	100	2000	1387	1668	20,24	2891	2470	14,57	
80	120	2000	2265	2296	1,37	4679	4682	0,07	
80	140	2000	3357	3866	15,17	6895	6937	0,62	
100	80	2000	1327	1502	13,22	1915	2217	15,78	
100	100	2000	2543	3013	18,47	3614	3572	1,17	
100	120	2000	4152	4875	17,40	5849	6078	3,92	
100	140	2000	6154	7330	19,11	8618	9994	15,96	
120	80	2000	1930	1954	1,27	2298	2610	13,59	
120	100	2000	3699	4270	15,43	4337	4307	0,69	
120	120	2000	6040	7180	18,88	7018	7320	4,30	
120	140	2000	8951	9660	7,92	10342	10307	0,34	
140	80	2000	2533	3027	19,52	2681	2550	4,88	
140	100	2000	4855	5186	6,81	5060	5134	1,47	
140	120	2000	7927	9000	13,53	8188	7940	3,03	
140	140	2000	11749	14420	22,74	12066	11180	7,34	

Com base na tabela anterior, foram elaborados dois gráficos, sendo um apenas para uma frente e outro para três frentes.

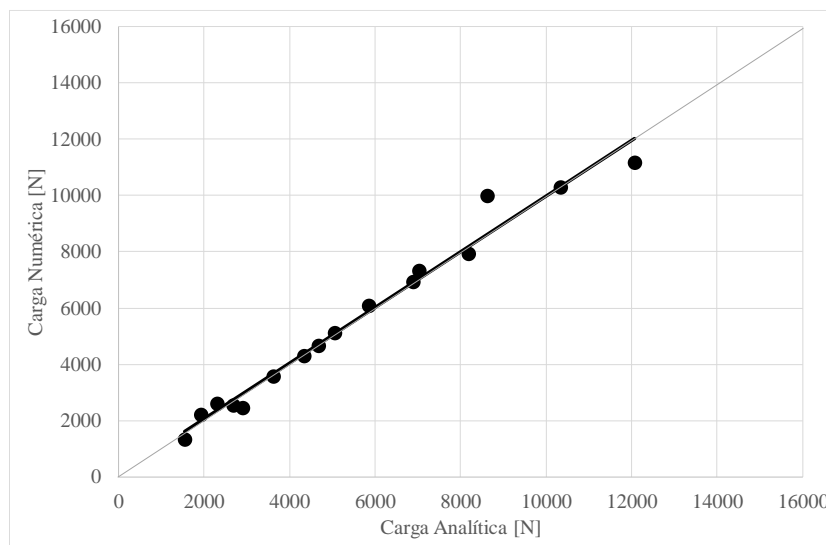


Figura 20 - Carga exposta a uma frente de fogo

A análise ao gráfico da carga exposta apenas a uma frente de fogo em que no eixo das ordenadas apresenta-se o valor da carga obtida no ANSYS e no eixo das abscissas, a carga obtida analiticamente, permite observar que os valores são próximos com a exceção da viga com secção reta $b=100\text{mm}$ e $d=140\text{mm}$, com erro de 15.96%.

Uma vez que os erros são estáveis, estes dão origem a uma linha de tendência aproximada à reta. A maior carga registada é para a viga com secção reta maior de $b=140\text{mm}$ e $d=140\text{mm}$ no valor de 11180N.

No caso da carga exposta a três frentes de fogo, os valores não são tão próximos que o conjunto anterior. O erro mais alto destas simulações foi de 22.74% para a viga $b=140\text{mm}$ e $d=140\text{mm}$. Estes erros foram novamente calculados pela equação (29) e podem estar associados a aproximações ou diferenças relativas das malhas utilizadas na parte numérica.

Comparando os gráficos apresentados na análise mecânica e na análise termomecânica para o cálculo da carga a considerar na viga em estudo, verifica-se uma diminuição acentuada dos valores máximos a atingir nas vigas com secções reduzidas pelo efeito do fogo. Os valores máximos passaram de 26kN para 12kN, sensivelmente uma redução na ordem de 50% para a imposição de carga em projeto na presença da ação do fogo para 30min.

No anexo 3 estão representadas as tensões normais axiais como a distribuição de temperaturas na secção reta em estudo, contendo a camada carbonizada a cinza, para exposição ao fogo em uma e três frentes.

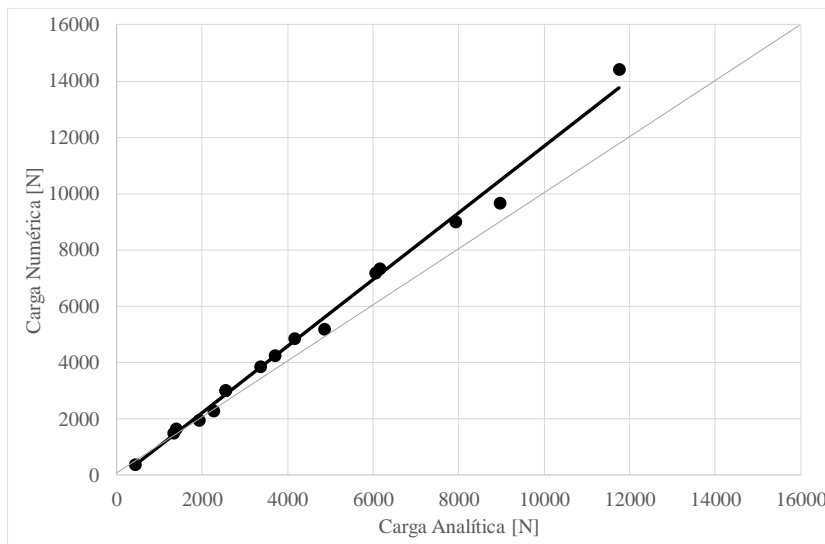


Figura 21 - Carga exposta a três frente de fogo

7.4 Exposição ao fogo em vigas protegidas

Neste capítulo, são apresentados os resultados das simulações com a exposição ao fogo em uma e três frentes da secção reta, durante trinta minutos, utilizando dois tipos de gesso. Neste caso em específico, são calculadas as velocidades de carbonização que são posteriormente comparadas com as mesmas velocidades sem proteção já calculadas.

Na tabela são representadas as velocidades de carbonização para as diferentes espessuras de gesso, bem como a velocidade sem proteção da viga em questão.

É possível notar que os gessos atingem a temperatura de 300°C para tempos diferentes, a partir do qual o gesso transmite calor à madeira carbonizando-a. O tempo de cálculo apresentado é o tempo de resistência ao fogo, que se considera para o tipo de gesso e espessura considerada, protegendo nesse tempo o interior da secção reta da viga.

Com o aumento da espessura do gesso nota-se que a velocidade de carbonização tem tendência a diminuir em cada estudo.

O maior tempo de resistência ao fogo registado foi de 29 minutos para o gesso 1 e de 27 minutos para o gesso 2, ambos para a espessura de 15mm.

Neste estudo, o gesso 1 destaca-se com uma redução na velocidade de carbonização de aproximadamente 93%, sendo que o gesso 2 apenas reduz 75%.

Tabela 14 - Velocidades de carbonização com e sem proteção para uma frente de fogo

Gesso 1						
Geometria da Viga			Espessura Gesso	Tempo de resistência	Y	β_0(mm/min)
b	d	L				
mm	mm	mm	mm	min		Sem proteção
80	80	2000	5	14	0,26	0,55
			10	22	0,19	
			15	29	0,03	
Gesso 2						
Geometria da Viga			Espessura Gesso	Tempo de resistência	Y	β_0(mm/min)
b	d	L				
mm	mm	mm	mm	min		Sem proteção
80	80	2000	5	14	0,55	0,55
			10	20	0,42	
			15	27	0,13	

Na tabela seguinte, estão representados todos valores referentes ao estudo com três frentes.

Para todas as simulações obtêm-se o cálculo da velocidade de carbonização e o tempo de resistência ao fogo nas vigas protegidas.

No caso do estudo com três frentes, o maior tempo de resistência obtido foi de aproximadamente 27 minutos para o Gesso 1 e de 25 minutos para o Gesso 2, ambos com 15mm de espessura.

Ainda na tabela, estão presentes as médias das velocidades de carbonização, sendo que com qualquer um dos Gessos, esta velocidade diminui em relação à mesma obtida sem qualquer tipo de proteção que, neste caso, é de 0.85mm/min.

No anexo 4, estão representadas todas as imagens relativas ao cálculo da distribuição das temperaturas na secção reta com e sem material de proteção a diferentes espessuras.

Tabela 15 - Velocidades de carbonização com e sem proteção para três frentes de fogo

Gesso 1								
Geometria da Viga			Espessura Gesso	Tempo de resistência	β_n(mm/min)			
b	d	L			X	Y	Média	Sem proteção
mm	mm	mm	mm	min				
80	80	2000	5	13	0,25	0,28	0,27	0,85
			10	20	0,20	0,22	0,21	0,85
			15	27	0,03	0,07	0,05	0,85
Gesso 2								
Geometria da Viga			Espessura Gesso	Tempo de resistência	β_n(mm/min)			
b	d	L			X	Y	Média	Sem proteção
mm	mm	mm	mm	min				
80	80	2000	5	12	0,52	0,58	0,55	0,85
			10	19	0,43	0,45	0,44	0,85
			15	25	0,40	0,40	0,40	0,85

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos Futuros

8 Conclusões e Trabalhos Futuros

A madeira é um material em crescente utilização na construção civil, devido às propriedades físicas e mecânicas que apresenta. Com base neste facto, muitos são os estudos numéricos e experimentais que se vem desenvolvendo.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento de vigas simplesmente apoiadas com carga a meio vão em madeira à temperatura ambiente ou expostas a um incêndio, propondo equações de projeto de utilização fácil. As vigas foram também avaliadas com placas de proteção em gesso para verificação da sua resistência ao fogo.

Apresentou-se uma metodologia analítica para o cálculo simplificado em projetos de vigas simplesmente apoiadas com cargas pontuais em segurança à temperatura ambiente ou sob exposição de um incêndio utilizando o método da secção reduzida. Essas equações podem ser úteis na utilização prática de projeto e prever um dimensionamento correto.

Todo o procedimento analítico foi comparado com diferentes simulações numéricas de forma a garantir a aplicabilidade das funções propostas.

Foram efetuadas diferentes simulações computacionais, análise estrutural com carga incremental, análise térmica em regime transiente e análise termomecânica. Foram consideradas as propriedades não-lineares do material (curva tensão-deformação em tração e compressão do material ortotrópico para a madeira, e curvas não-lineares das propriedades térmicas da madeira).

Nas simulações mecânicas, apenas com carga concentrada a meio vão da viga, os valores foram regulares, o que significa que os resultados dos cálculos analíticos coincidiavam com os valores numéricos. Desta forma, o maior erro encontrado foi de 14.69%, para a maior viga em estudo com secção $b=140\text{mm}$ e $d=140\text{mm}$.

No caso das simulações térmicas o modelo revelou-se de grande importância na determinação da camada carbonizada. Para além do cálculo do perfil de temperaturas em regime transiente, foi possível registar e calcular a velocidade da camada de carbonização. Nas simulações para uma frente de fogo, a velocidade média de carbonização foi de 0.53mm/min que, de acordo com o Eurocódigo 5 [28], deveria atingir os 0.65mm/min . Desta forma, o erro máximo obtido foi de 23%. Nas simulações para três frentes de fogo,

a velocidade média de carbonização teve uma maior variação originando, assim, um erro maior.

Nas simulações com carga, utilizando as características térmicas e mecânicas da madeira referida anteriormente, e admitindo a existência de carregamento mecânico uniforme, foi criado um modelo computacional. Este modelo permitiu analisar as tensões desenvolvidas numa viga simplesmente apoiada. Neste caso os valores coincidiram, mais uma vez, com os cálculos analíticos, obtendo um erro máximo de 22% para a viga $b=140\text{mm}$ e $d=140\text{mm}$, com três frentes de fogo. Os valores indicam que a capacidade de carga suportada em cada combinação diminui em relação às vigas à temperatura ambiente quando expostas ao fogo devido à diminuição da secção transversal.

Por fim, nas simulações com proteção, foram utilizados dois tipos diferentes de gesso com três espessuras distintas (5, 10 e 15mm) com um total de doze simulações. De acordo com o Eurocódigo 5 1-2 [28], a espessura ideal para proteger as vigas em questão era de 15,7mm. Através dos resultados das simulações, é possível observar que as velocidades de carbonização diminuem, de acordo com o aumento da espessura do gesso, sendo que, com 15mm a velocidade, é quase nula. Dos dois tipos de gesso, o que se destaca com melhores resultados é o gesso 1. Quanto à difusividade térmica, verificou-se que no gesso 2 esta propriedade era mais elevada, pelo que transmitiu temperaturas e velocidades de carbonização maiores.

8.1 Trabalhos futuros

No seguimento do trabalho da presente dissertação, apresentam-se algumas sugestões, tendo como objetivo futuros desenvolvimentos nesta área de investigação.

- Realizar o mesmo estudo apresentado, mas de forma experimental, desde a validação das propriedades tabeladas, até à avaliação da capacidade resistente máxima, com vigas sujeitas à situação de incêndio.
- Realizar o mesmo estudo apresentado, para outro tipo de carregamento mecânico.
- Estudar o comportamento da madeira protegida com outro tipo isolamento, submetida à ação do fogo.

Referências bibliográficas

Referências bibliográficas

- [1] Winandy J.E. (1994). Wood properties. *Encyclopedia of Agricultural Science*, 4, 549-561.
- [2] Diana.C.V. Coelho (2011). *Modelo Computacional para Avaliação Térmica e Mecânica de Estruturas em Madeira*, Dissertação em Mestrado em Engenharia da Construção, Instituto Politécnico de Bragança, P 08-27.
- [3] Palma, Pedro (2010). Segurança contra incêndio em habitações unifamiliares de madeira: *Revista Construção Magazine*, nº 40, P48-49.
- [4] Cachim P. (2007). *Construções em madeira - a madeira como material de construção*. Porto: Publindustria.
- [5] Janssens, M. L. (2004). Modeling of the thermal degradation of structural wood members exposed to fire. *Fire and materials*, 28, 199-207.
- [6] Lie, T. T. (1977). A method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 4, 161-169.
- [7] Thunman H., Leckner B. (2002). Thermal conductivity of wood—models for different stages of combustion. *Biomass and Bioenergy*, 23, 47-54.
- [8] Schabl S., Turk G. (2006). Coupled heat and moisture transfer in timber beams exposed to fire. In *Proceedings of the world conference on timber engineering*. Portland.
- [9] Frangi A., Knobloch M., Fontana M. (2009). Fire design of timber slabs made of hollow core elements. *Engineering Structures*, 31.
- [10] Frangi A., Erchinger C., Fontana M. (2008). Charring model for timber frame floor assemblies with void cavities. *Fire Safety Journal*, 43.
- [11] Fragiacomio, M., Menis, A., Moss, P. J., Buchanan, A. H., & Clemente, I. (2010). Numerical and experimental evaluation of the temperature distribution within laminated veneer lumber (LVL) exposed to fire. *Journal of Fire Engineering*, 1.

- [12] Schmid, J., Klippel, M., Just, A., & Frangi, A. (2014). Review and analysis of fire resistance tests of timber members in bending, tension and compression with respect to the Reduced Cross-Section Method. *Fire Safety Journal*, 68, 81–99.
- [13] Blesák, L., Caldová, E., Wald, F. (2015). Unprotected Timber – Fiber Reinforced Concrete Slab in Fire. Department of Steel and Timber Structures. Czech Technical University in Prague.
- [14] Lineham, S., Thomson, D., Bartlett, A., Bisby, L., Hadden, R. (2016). Structural response of fire-exposed cross-laminated timber beams under sustained loads. *Fire Safety Journal*, 85, 23–34.
- [15] Timber Research and Development Association (2012). Timber Species United States Department of Agriculture (2010). Wood Handbook – Wood as an Engineering material.
- [16] United States Department of Agriculture (2010). Wood Handbook – Wood as an Engineering material.
- [17] Abderrahim Aissa (2017). Computational Model for Timber Connections Exposed to High Temperatures - Tese de Mestrado - Instituto Politécnico de Bragança
- [18] R. J. Schmidt (2002). Introduction to properties of wood.
- [19] Firewood for life – Firewood basics. Hardwood vs Softwood. Consultado 10 Novembro 2017 Web ‘<http://www.firewood-for-life.com/hardwood-vs-softwood.html>’.
- [20] Terry Conners. Distinguishing Softwoods from Hardwoods.
- [21] Joana de Sousa Coutinho (1999). Materiais de Construção – Madeira.
- [22] Encyclopædia Britannica. Young’s modulus Consultado 11 Novembro 2017 Web: ‘<https://www.britannica.com/science/Youngs-modulus>’.
- [23] D.W. Green, Mechanical Properties of Wood, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Chapter 4: P 01-26, 1999 Revised June 2002.
- [24] Tomas Martins (2010). Dimensionamento de Estruturas em Madeira Dissertação em Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico.

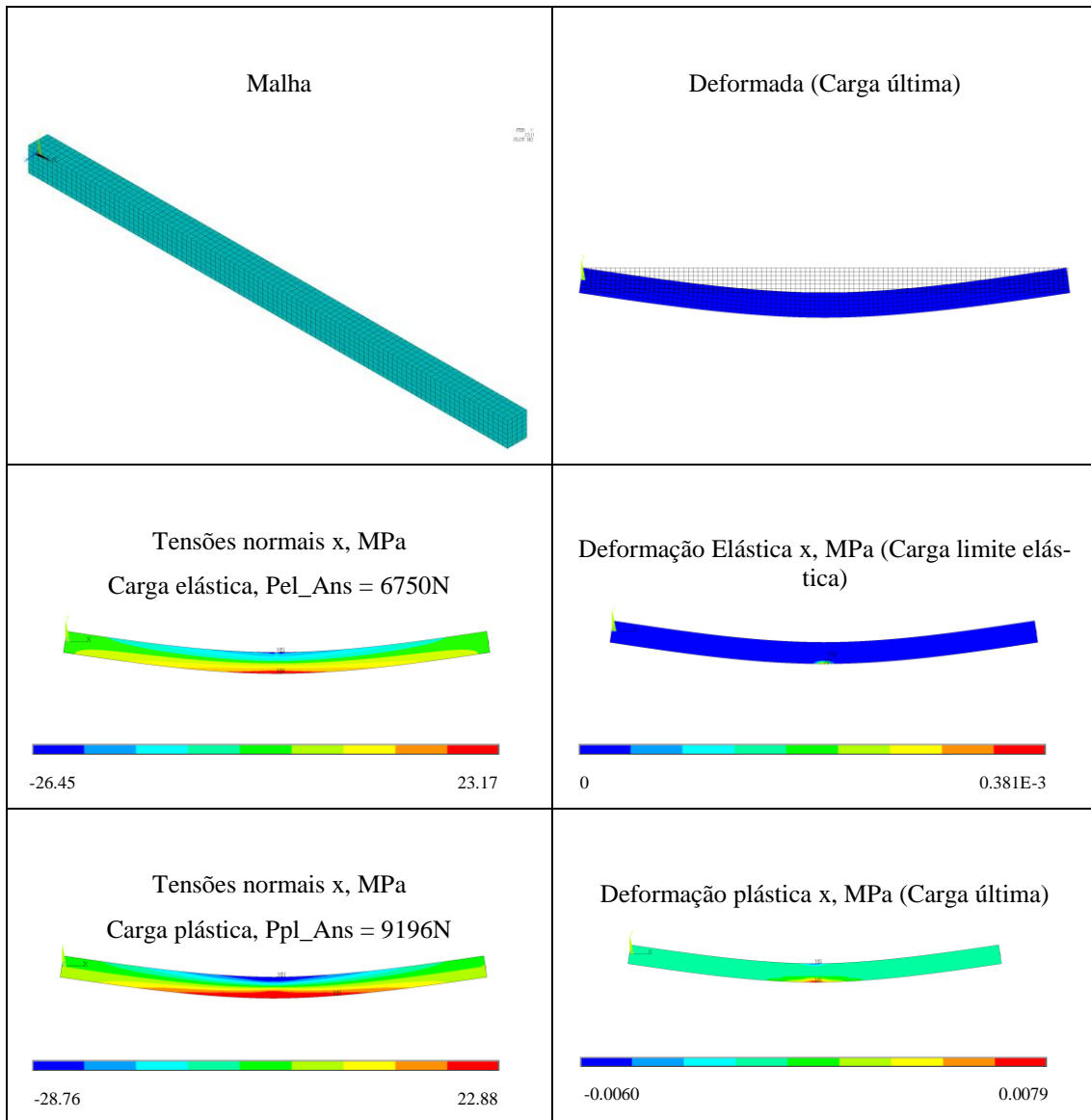
- [25] Moraes, P. D. De, & Figueroa, M. J. M. (2009). Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. *Ambiente Construído*, 9(4), 157–174.
- [26] Liliana, D. e Simone, T. (2014). Análise Computacional do Reforço de Vigas em Madeira com Secções de perfis Em Aço Submetidas ao Fogo, Relatório de projeto em Engenharia Mecânica, IPB.
- [27] K. W. Ragland, D. J. Aerts, A. J. Baker (1991). Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison. Properties of wood for Combustion Analysis.
- [28] EN, EN1995-1-2: Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-2: General Structural fire design, Brussels, 2003.
- [29] João Carlos Moreschi (2010). Propriedades térmicas da Madeira. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, 2010. Vol. 3ª edição.
- [30] Imowood Imóveis de Madeira – Madeira Lamelada ou Controlada. Consultado 27 Novembro 2017. Web: <http://www.imowood.pt/madeira-lamelada/>.
- [31] JULAR Madeira. Madeira Lamelada Colada. Consultado 27 de Novembro 2017. Web: <https://www.jular.pt/produtos/estruturas-em-madeira/madeira-lamelada-colada>.
- [32] Banema – Madeira e Derivados. Consultado 27 Novembro 2017 Web: www.banema.pt/getfile.php?xp=2&src=file701_pt&ext=pdf.
- [33] Oliveira M (2009). “Materiais compósitos á base de gesso contento EVA (etileno acetato de vinila) e vermiculita: otimização e propriedades termodinâmicas” – Tese de Doutoramento – Universidade Federal de Paraíba.
- [34] Regal Lamination - Consultado 18 Junho 2017 Web: <http://www.regallamination.com/product/UCC-Fire-Resistant-Board-928>.
- [36] Taniguti E (1999). “Método construtivo de vedação interna de chapas de gesso acartonado” – Tese de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [35] EN, EN1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings.
- [37] Gabriel Costa (2017). Análise térmica de lajes em madeira com e sem proteção – Tese de Mestrado - Instituto Politécnico de Bragança

[38] G. Ayugi, E.J.K.B. Banda, F.M. D'Ujanga (2011). Local Thermal Insulating Materials For Thermal Energy Storage.

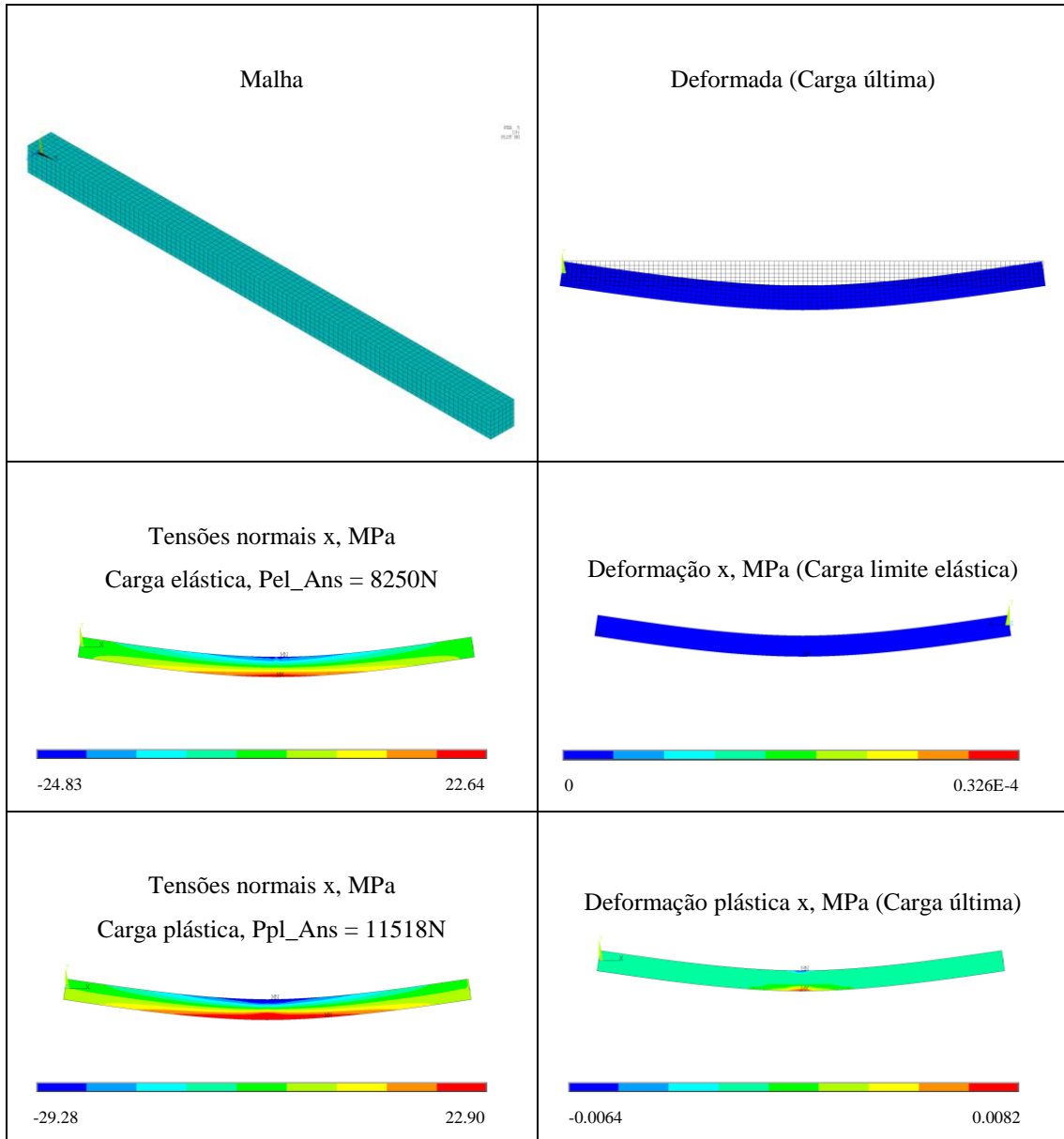
[39] Fonseca, E., Gouveia, P. (2018). Analysis of simply supported wood beams at ambient and high temperatures. *International Journal of Engineering & Technology*, 7, 180-183.

Anexos

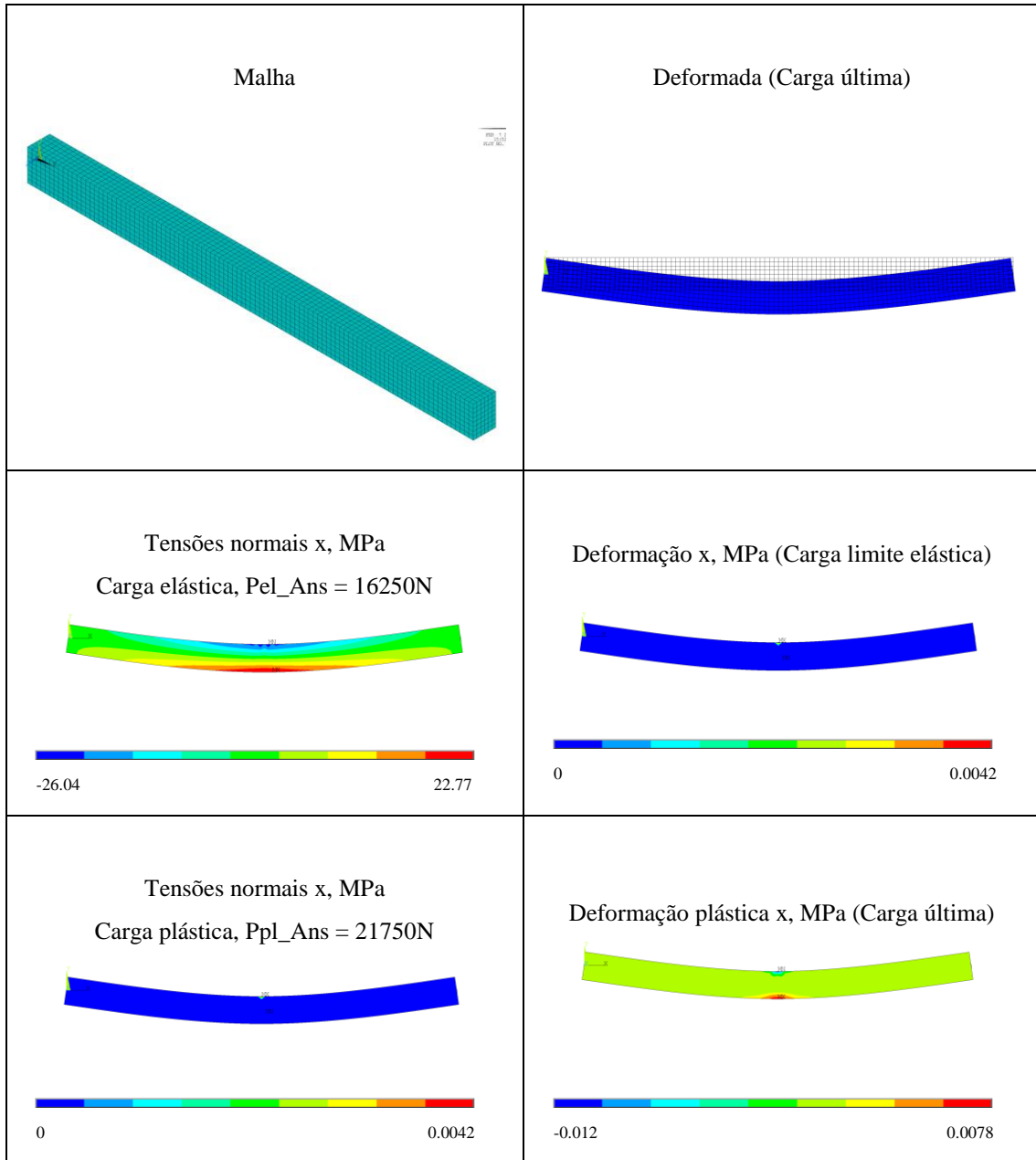
Anexo 1.2 – Viga 80x100x2000mm



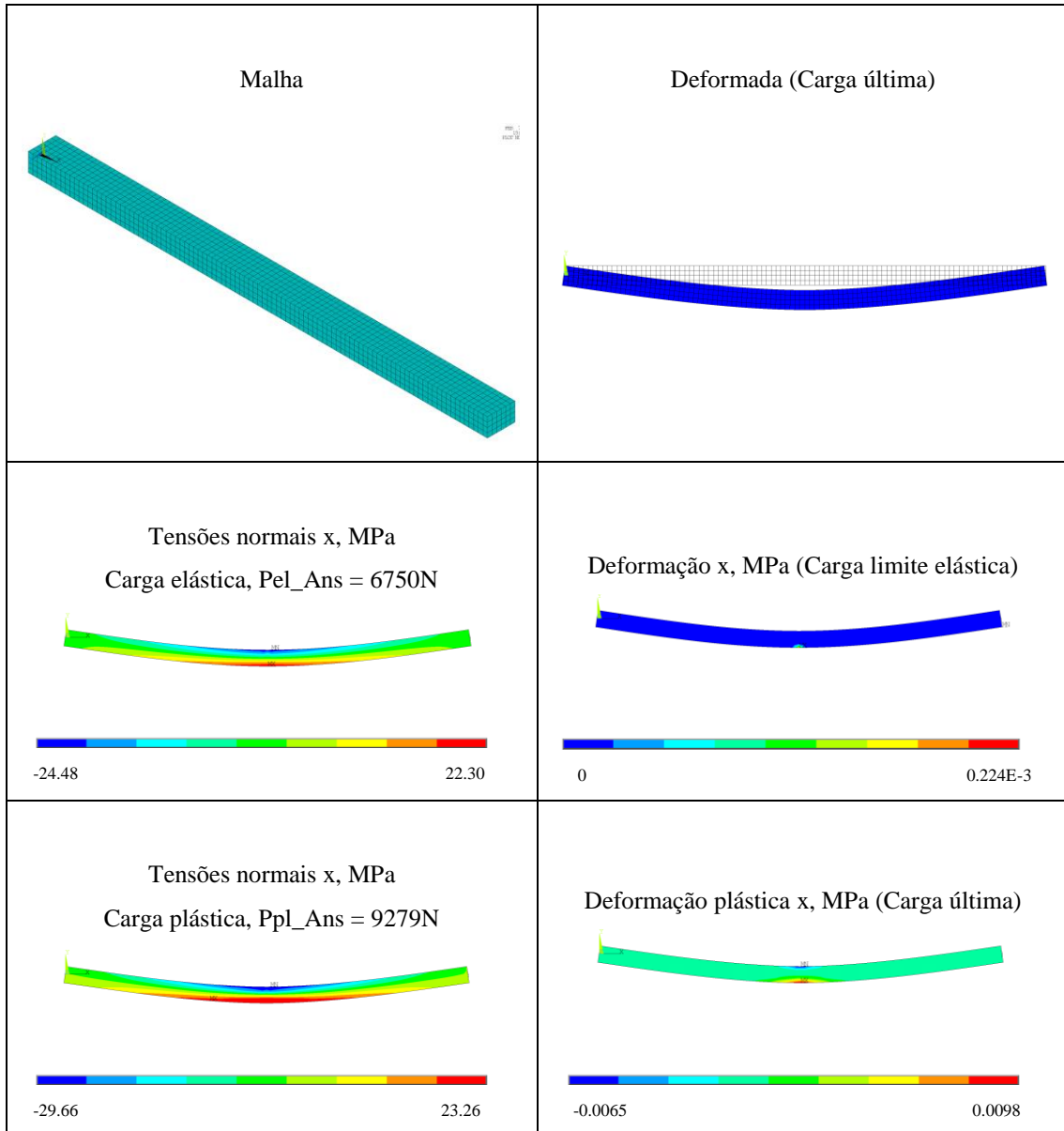
Anexo 1.6 – Viga 100x100x2000mm



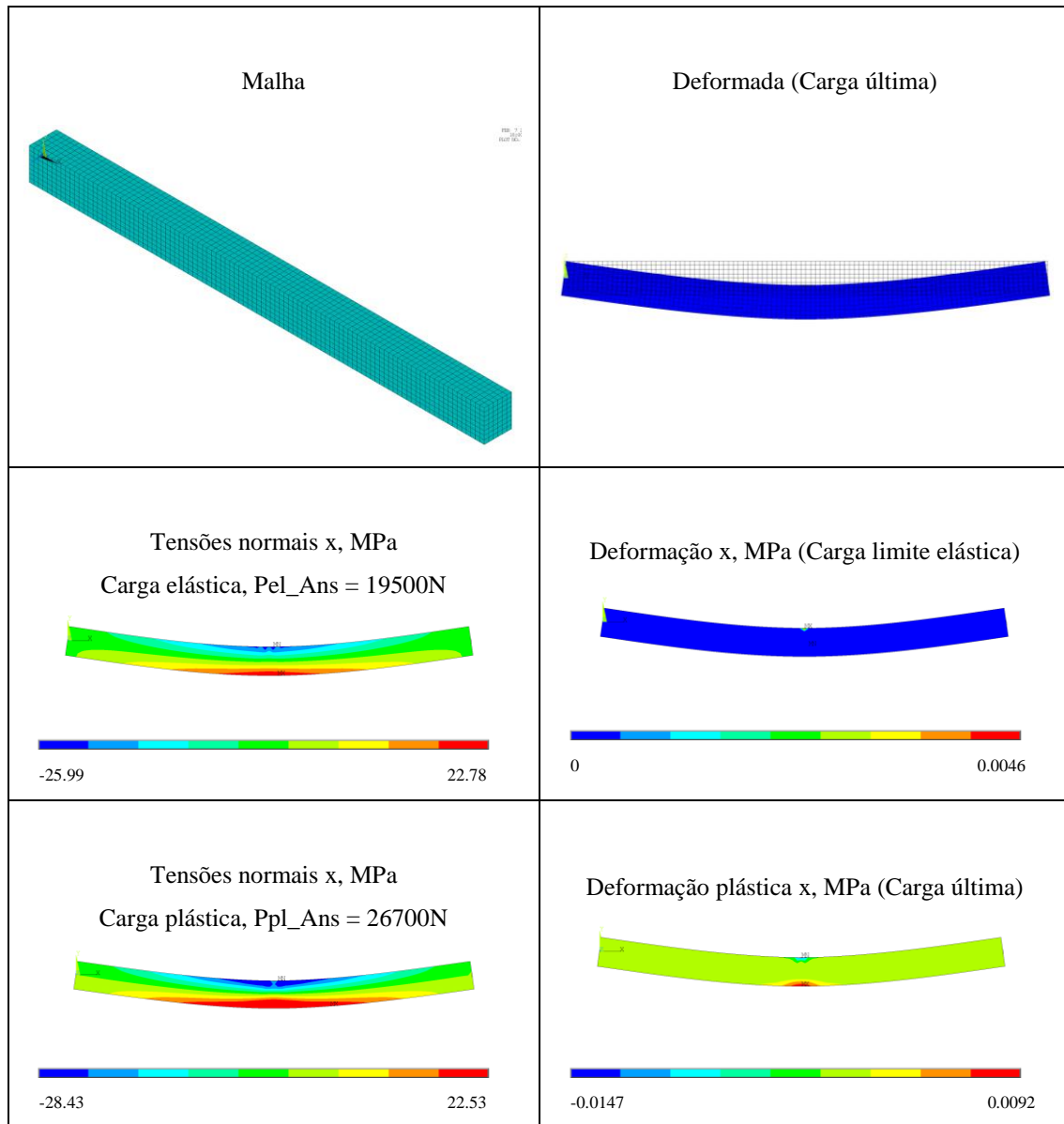
Anexo 1.8 – Viga 100x140x2000mm



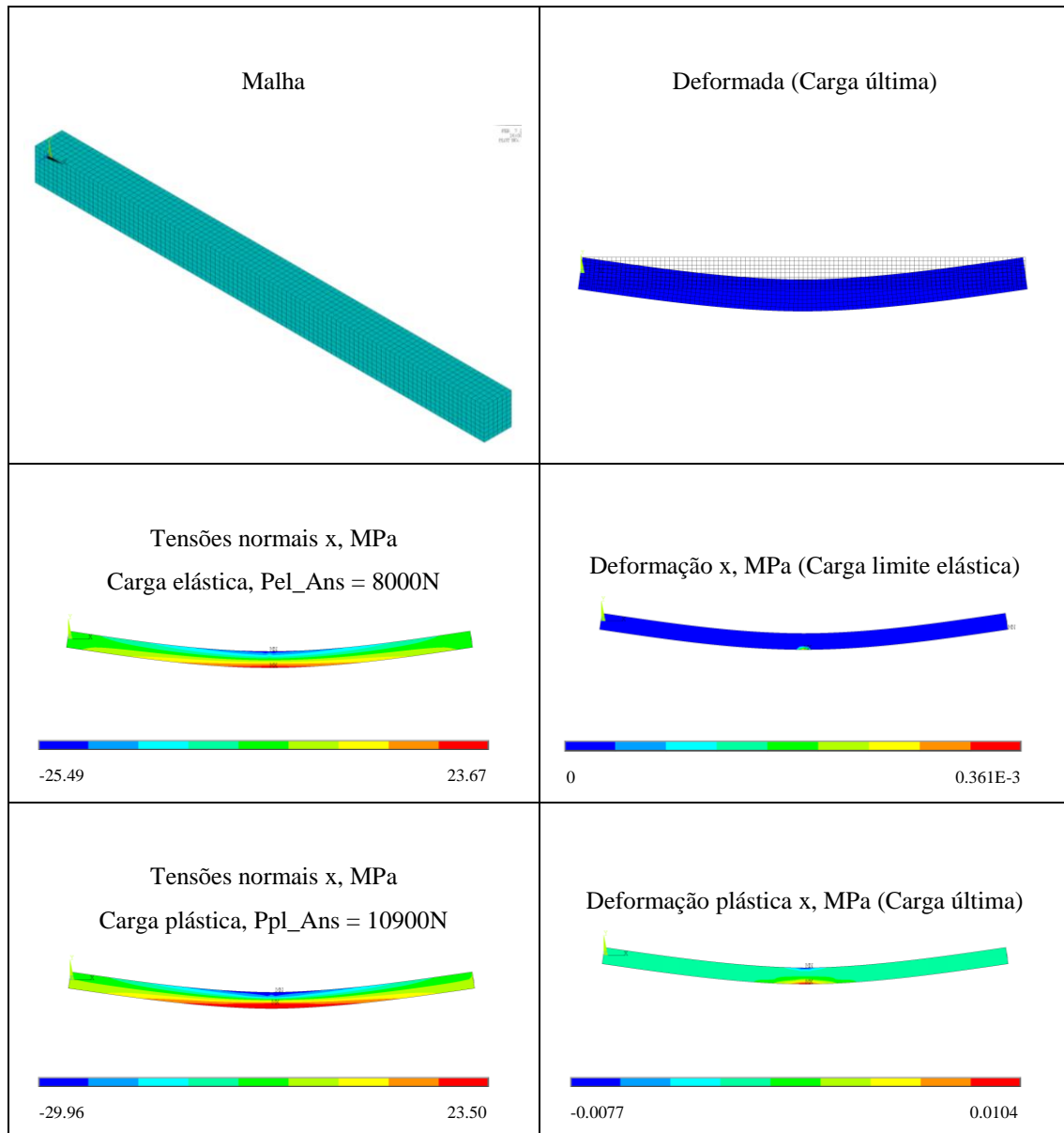
Anexo 1.9 – Viga 120x80x2000mm



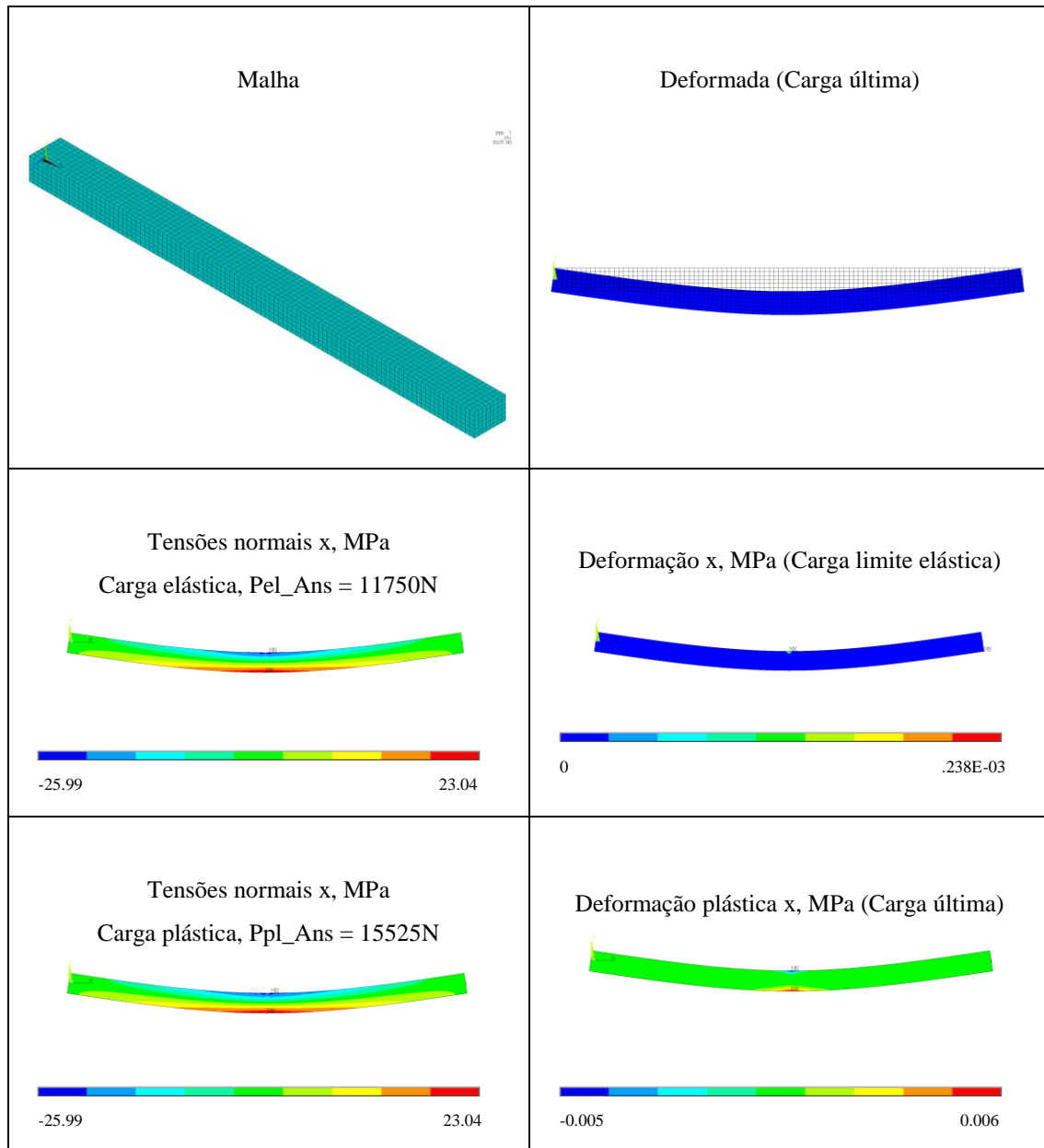
Anexo 1.12 – Viga 120x140x2000mm



Anexo 1.13 – Viga 140x80x2000mm



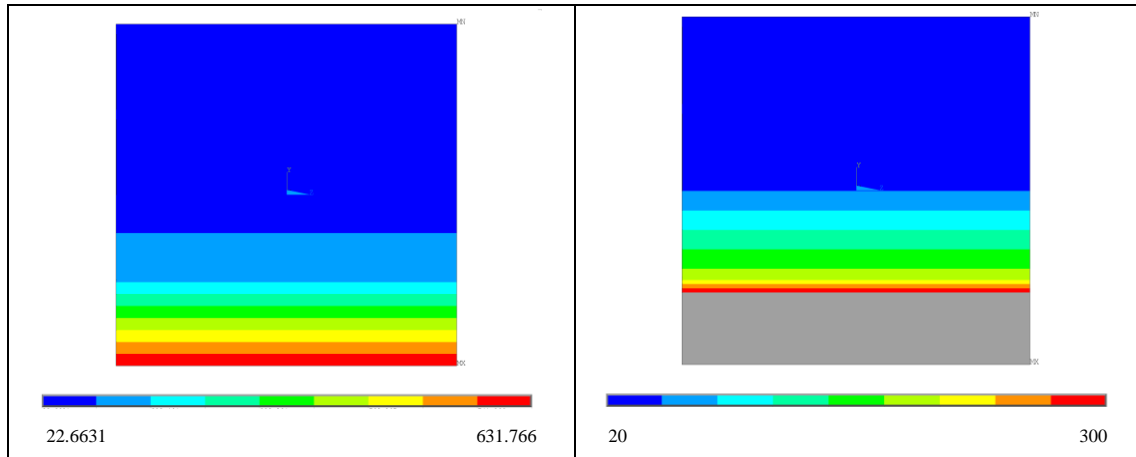
Anexo 1.14 – Viga 140x100x2000mm



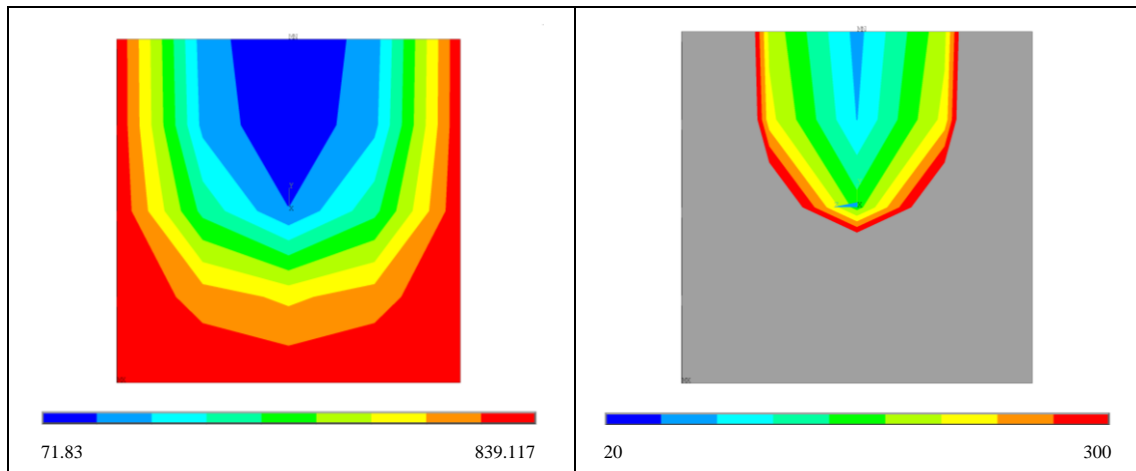
9.2 A2 – Modelo Térmico

Anexo 2.1 – Viga 80x80x2000mm

1 Frente de fogo

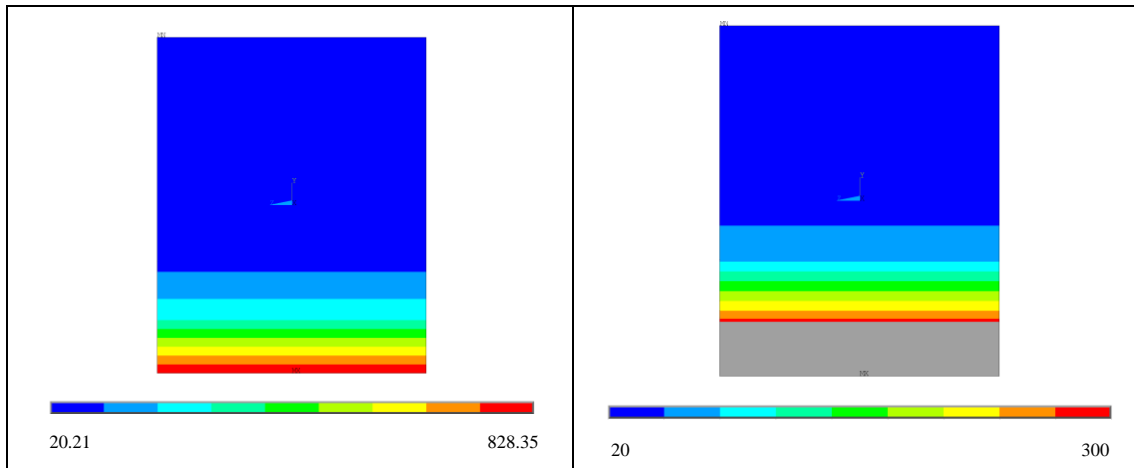


3 Frentes de fogo

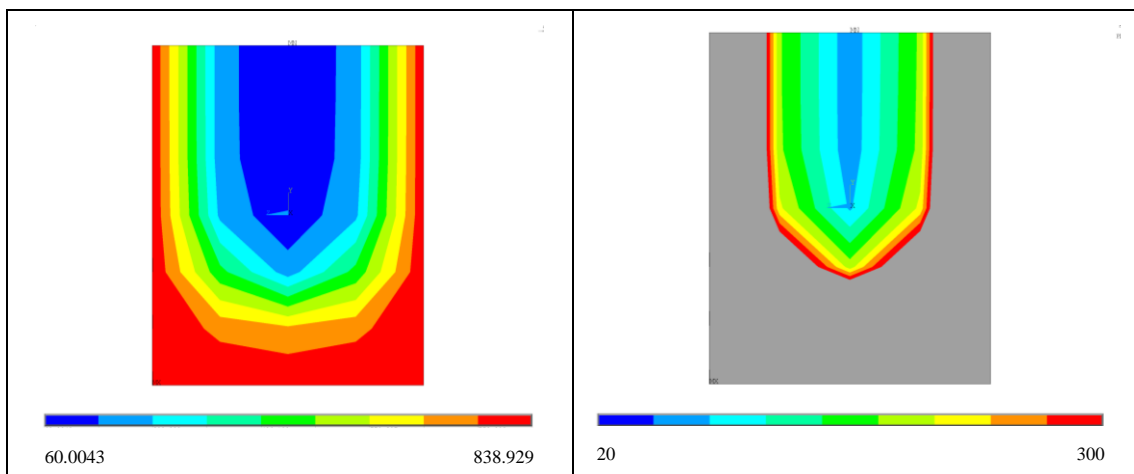


Anexo 2.2 – Viga 80x100x2000mm

1 Frente de fogo

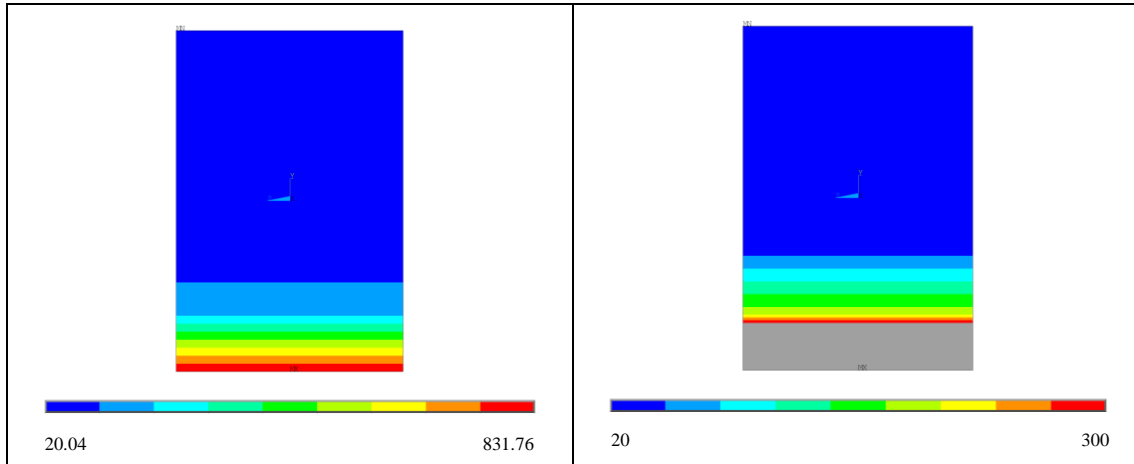


3 Frentes de fogo

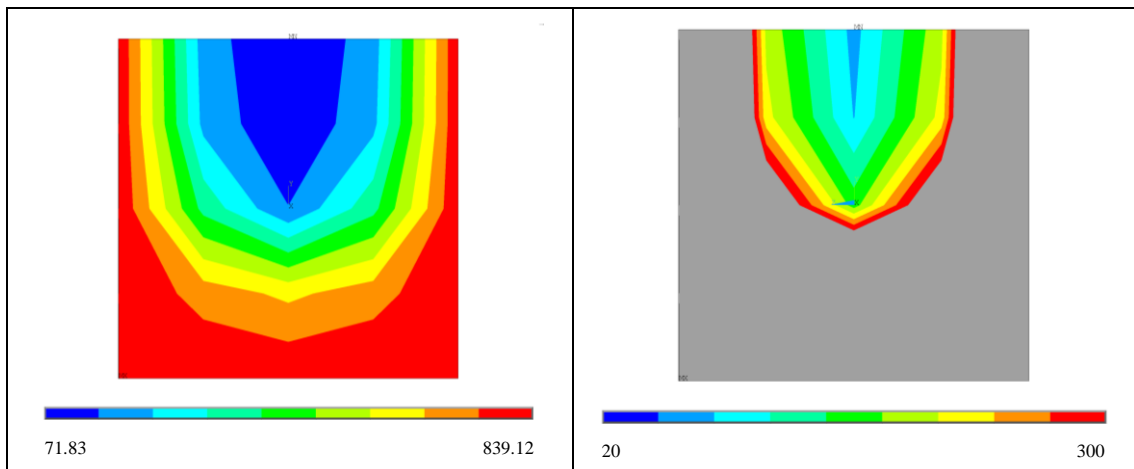


Anexo 2.3 – Viga 80x120x2000mm

1 Frente de fogo

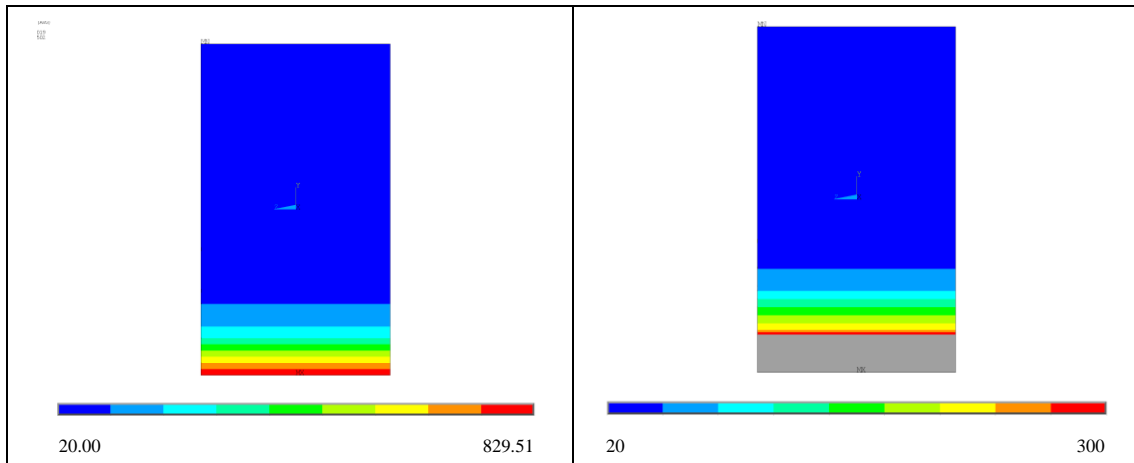


3 Frentes de fogo

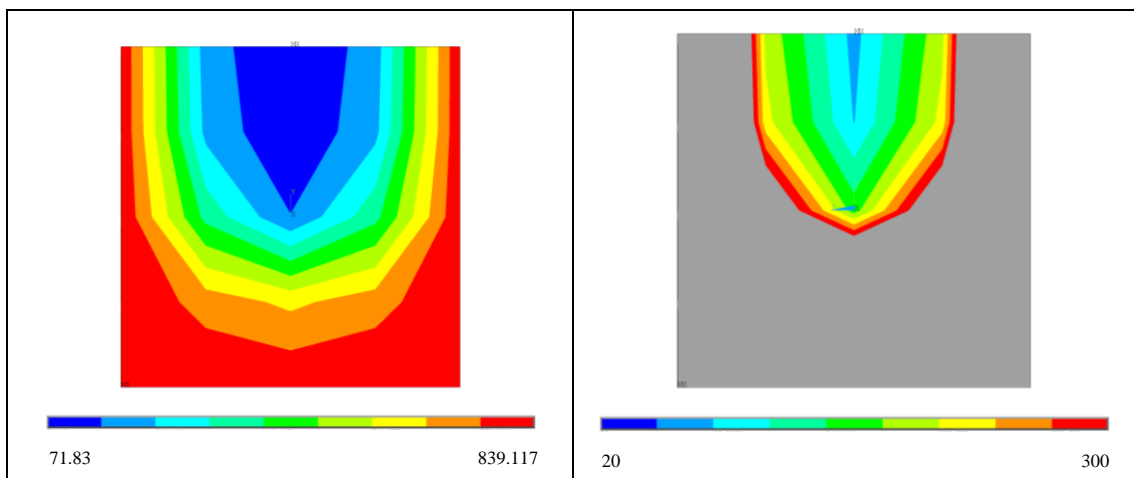


Anexo 2.4 – Viga 80x140x2000mm

1 Frente de fogo

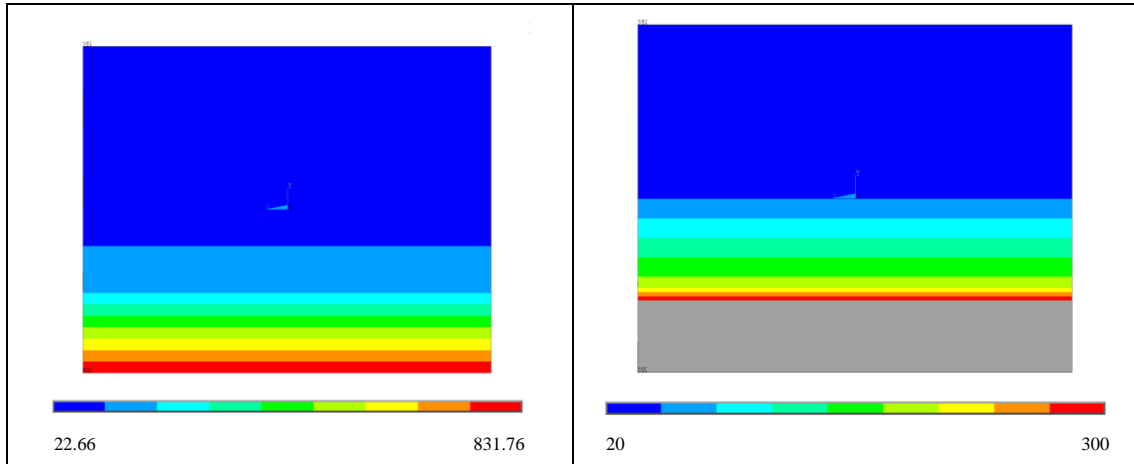


3 Frentes de fogo

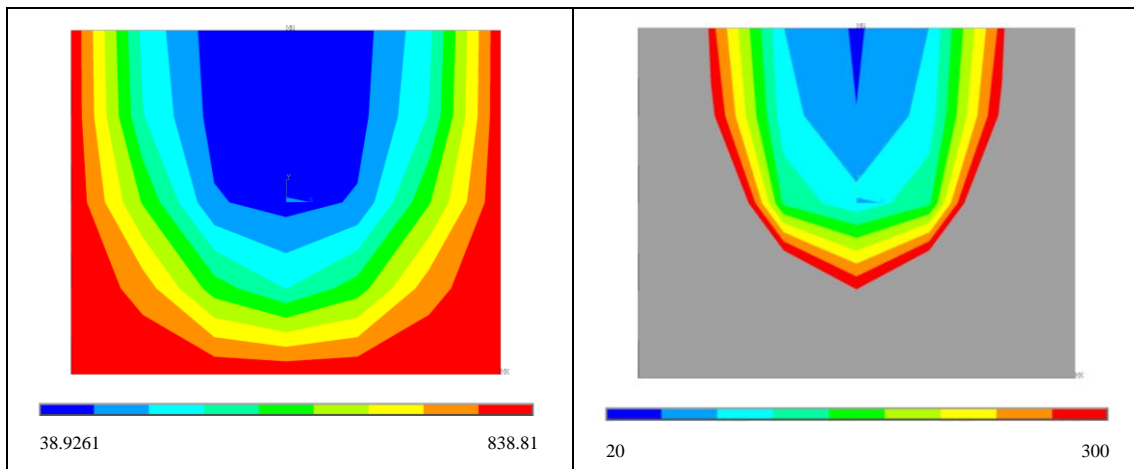


Anexo 2.5 – Viga 100x80x2000mm

1 Frente de fogo

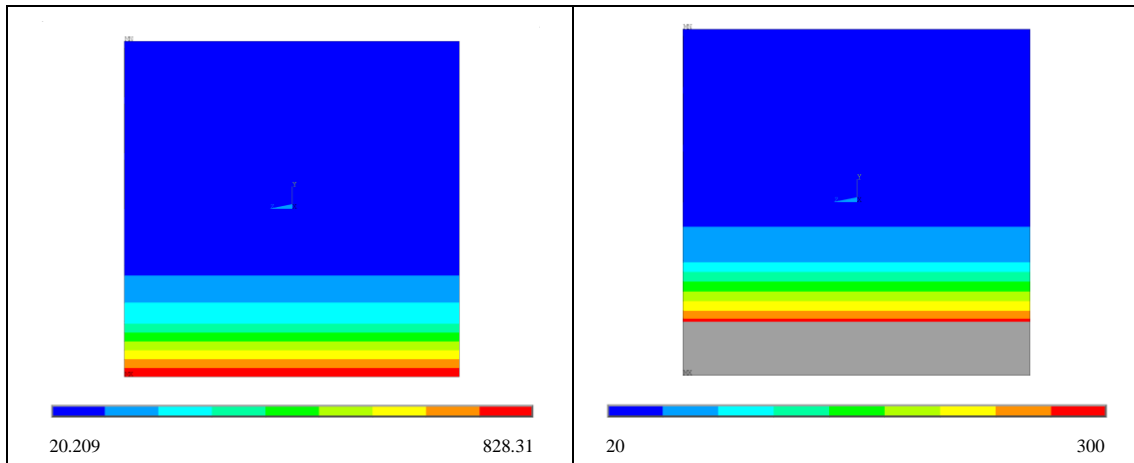


3 Frentes de fogo

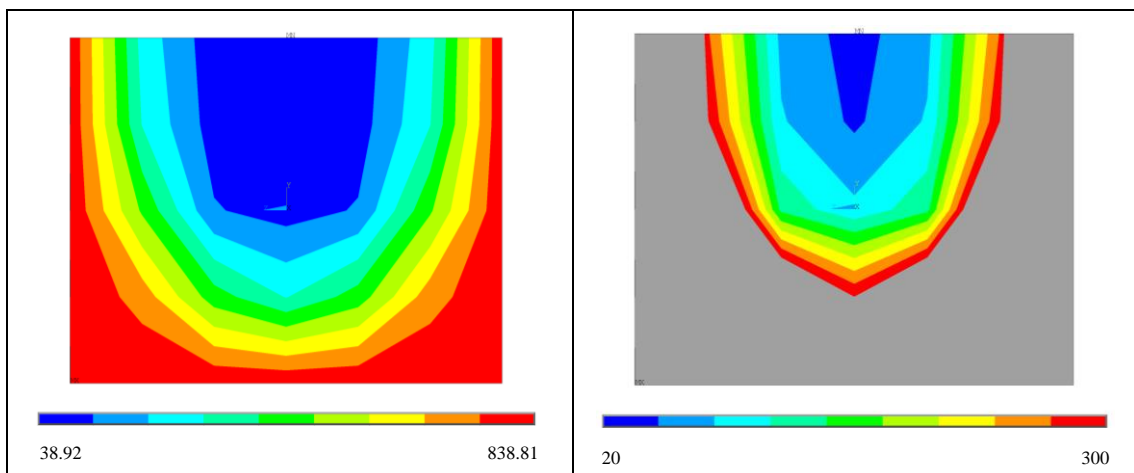


Anexo 2.6 – Viga 100x100x2000mm

1 Frente de fogo

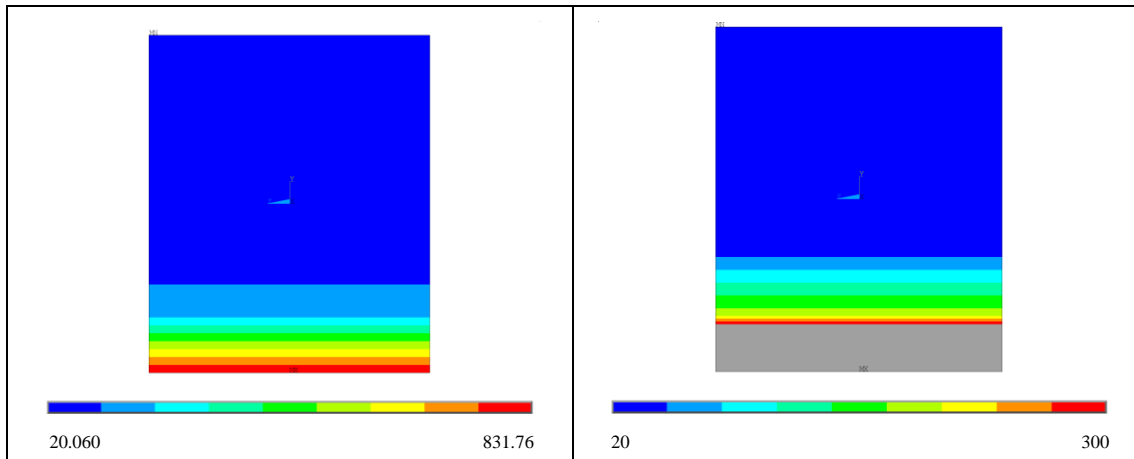


3 Frentes de fogo

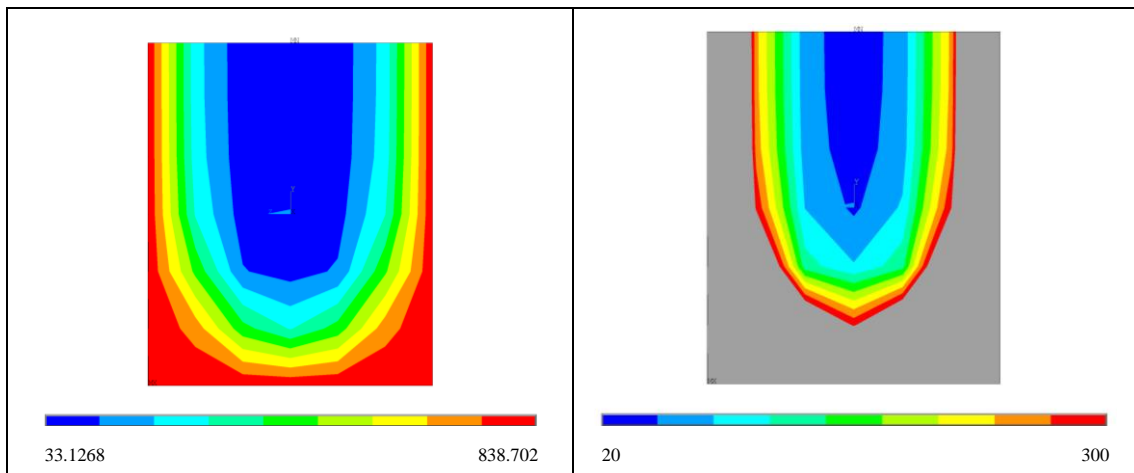


Anexo 2.7 – Viga 100x120x2000mm

1 Frente de fogo

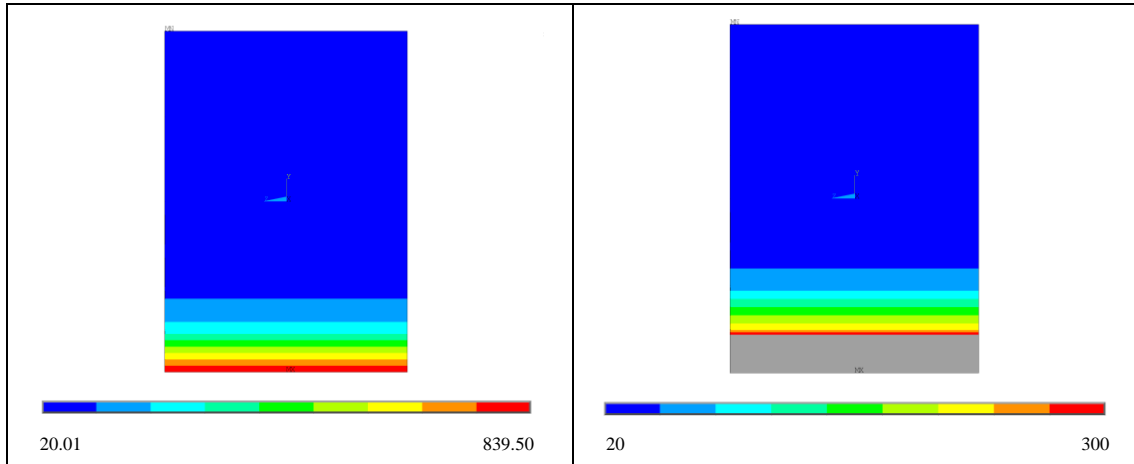


3 Frentes de fogo

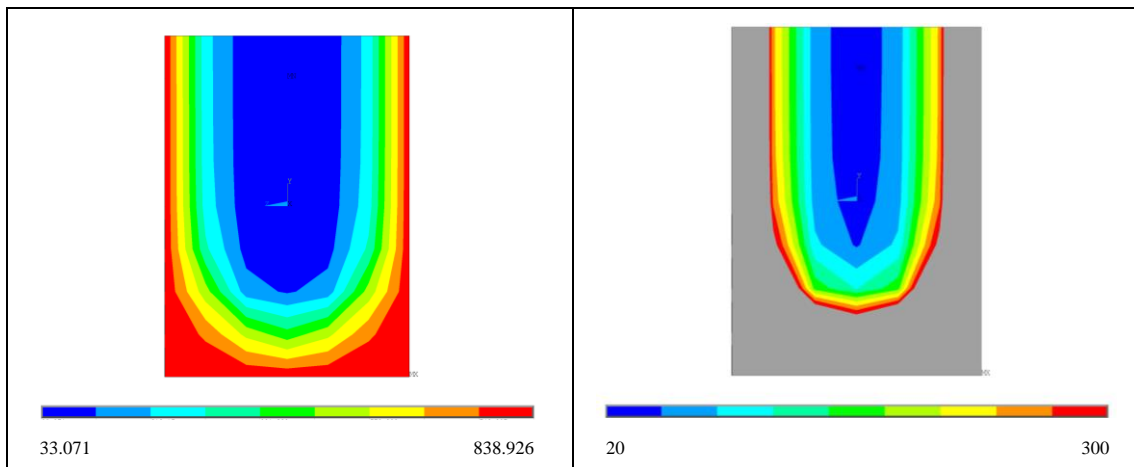


Anexo 2.8 – Viga 100x140x2000mm

1 Frente de fogo

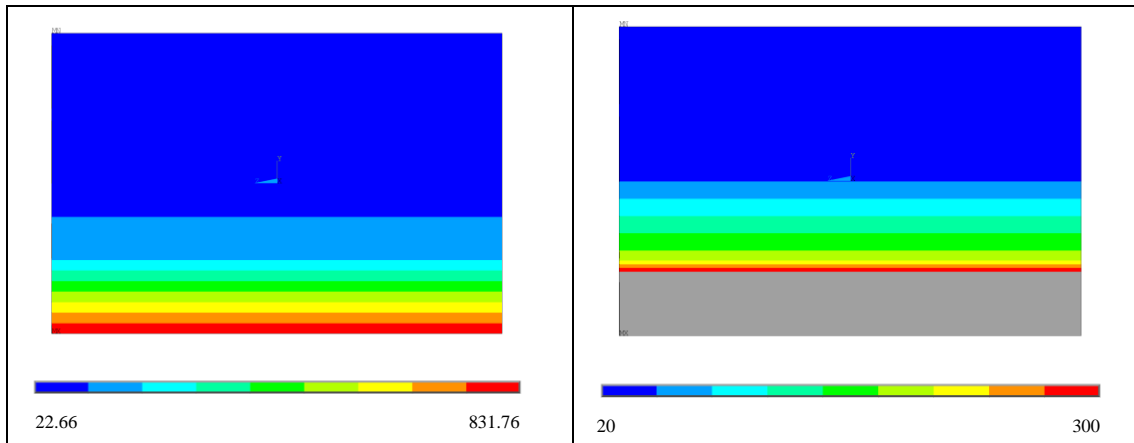


3 Frentes de fogo

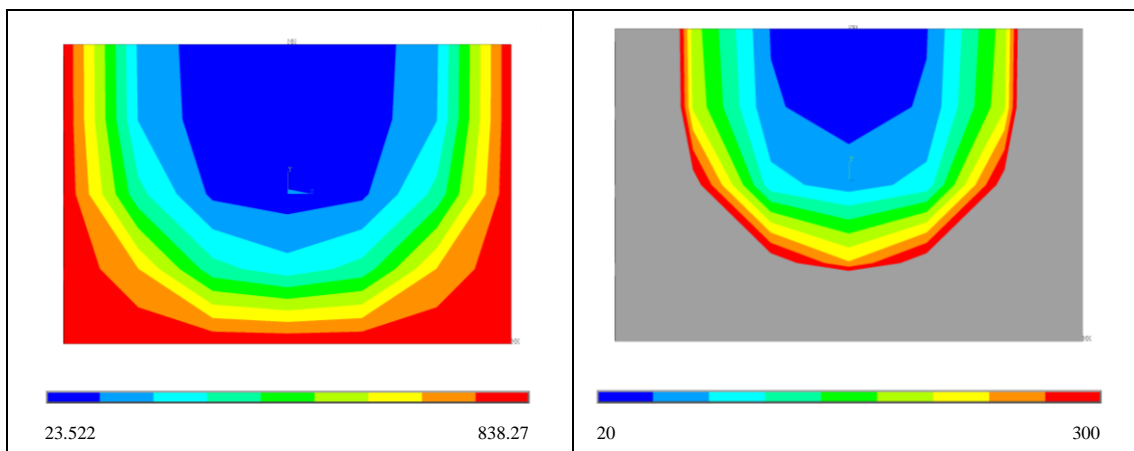


Anexo 2.9 – Viga 120x80x2000mm

1 Frente de fogo

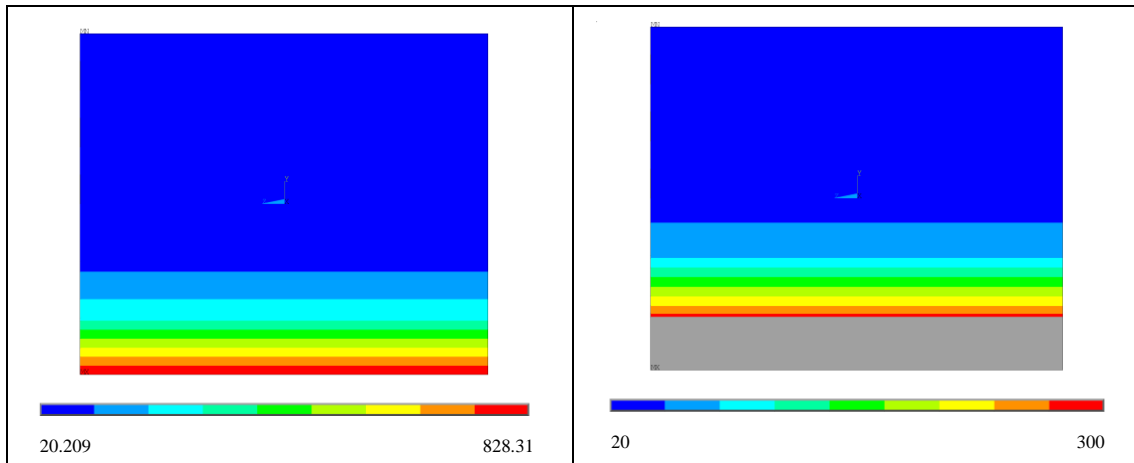


3 Frentes de fogo

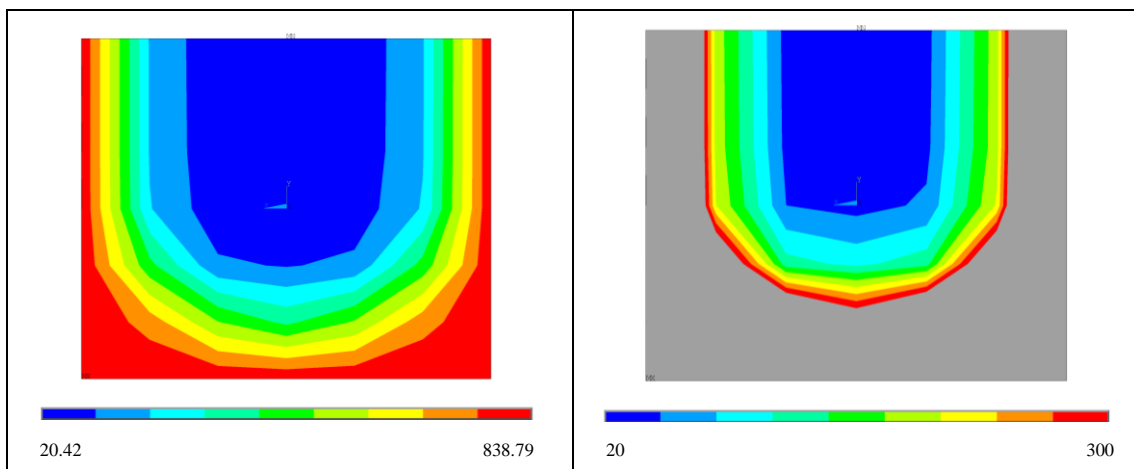


Anexo 2.10 – Viga 120x100x2000mm

1 Frente de fogo

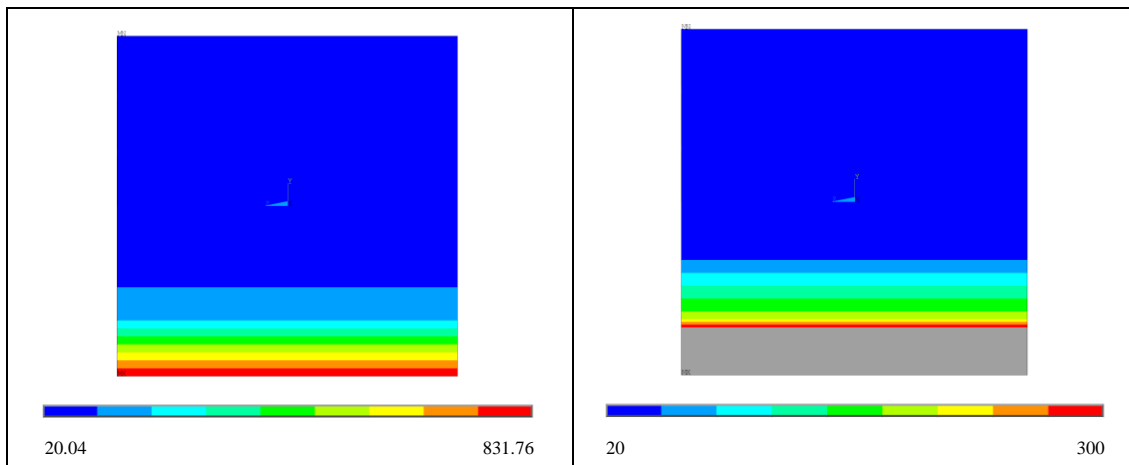


3 Frentes de fogo

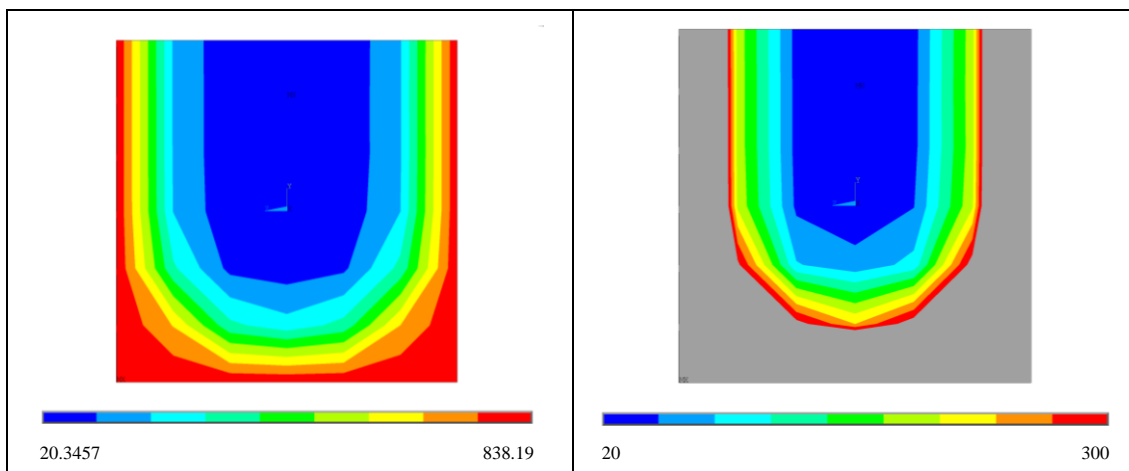


Anexo 2.11 – Viga 120x120x2000mm

1 Frente de fogo

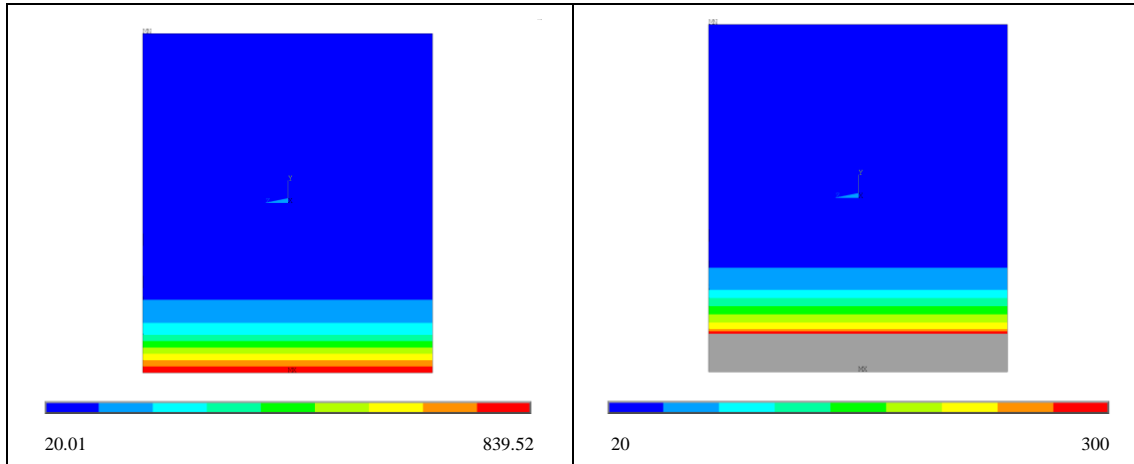


3 Frentes de fogo

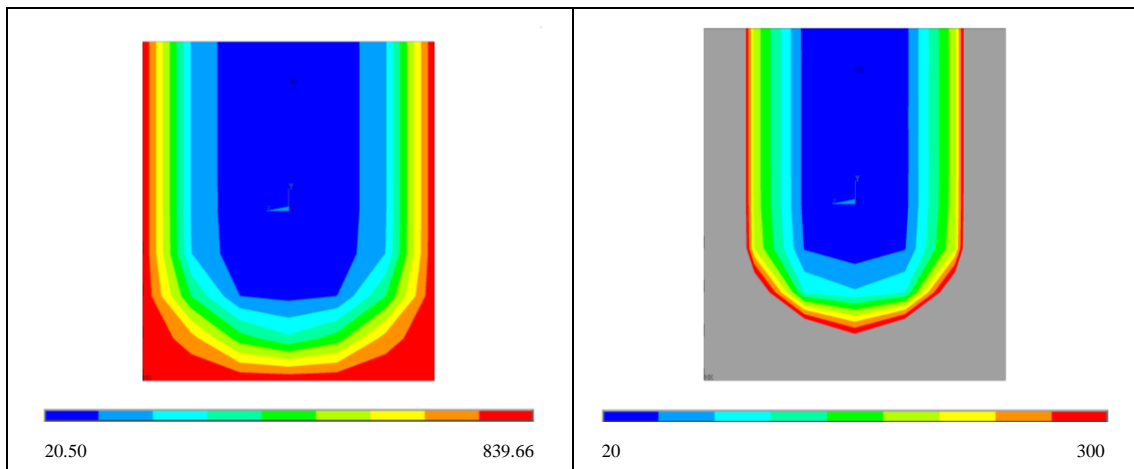


Anexo 2.12 – Viga 120x140x2000mm

1 Frente de fogo

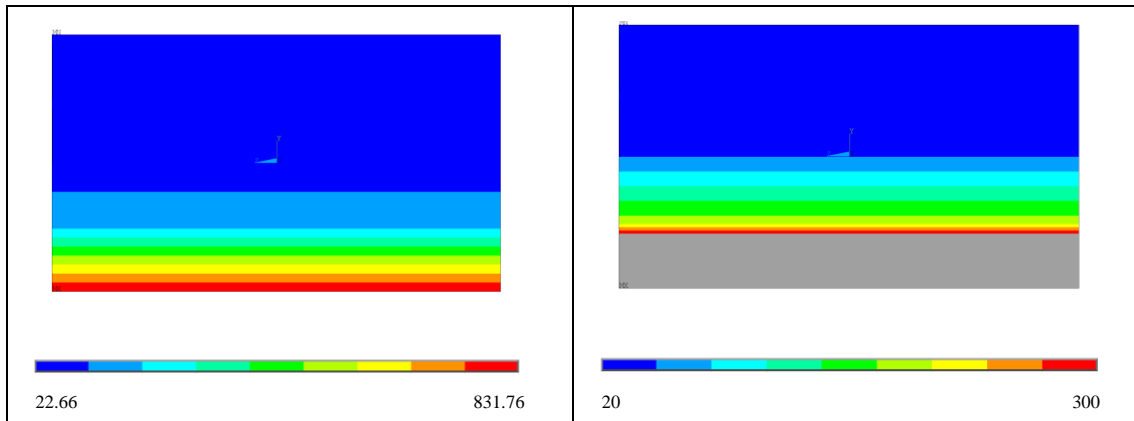


3 Frentes de fogo

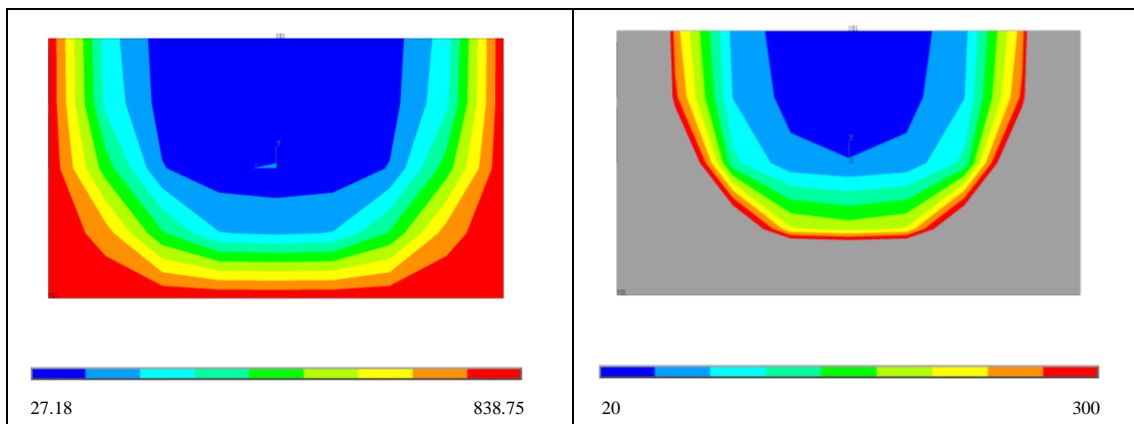


Anexo 2.13 – Viga 140x80x2000mm

1 Frente de fogo

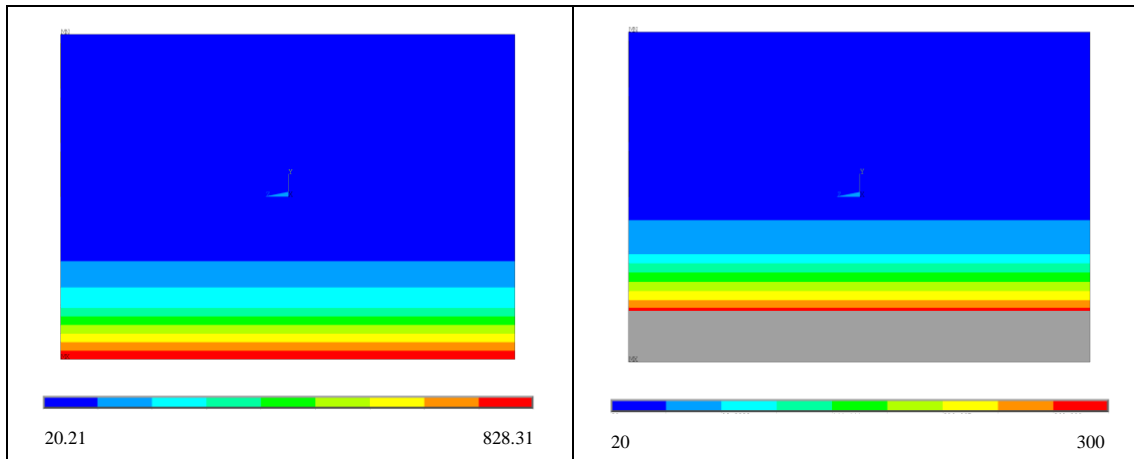


3 Frentes de fogo

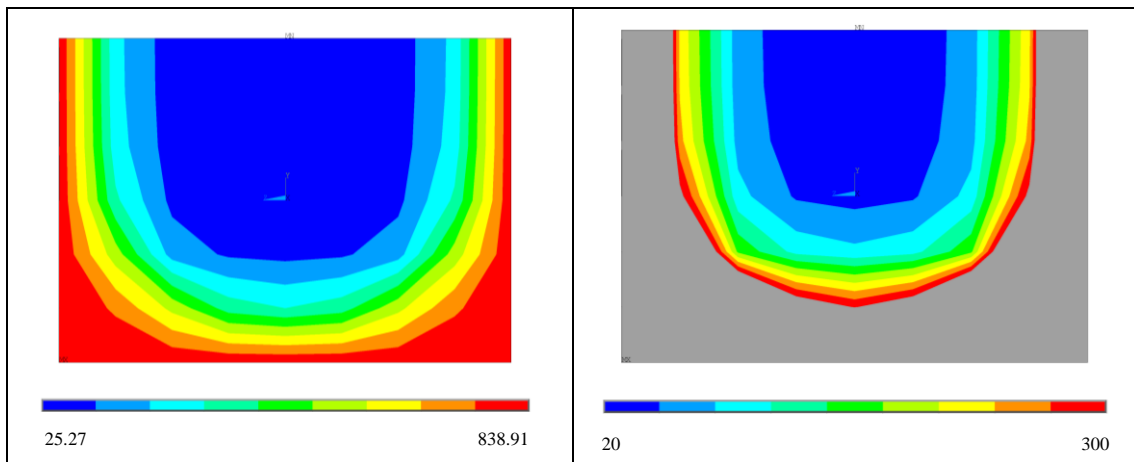


Anexo 2.14 – Viga 140x100x2000mm

1 Frente de fogo

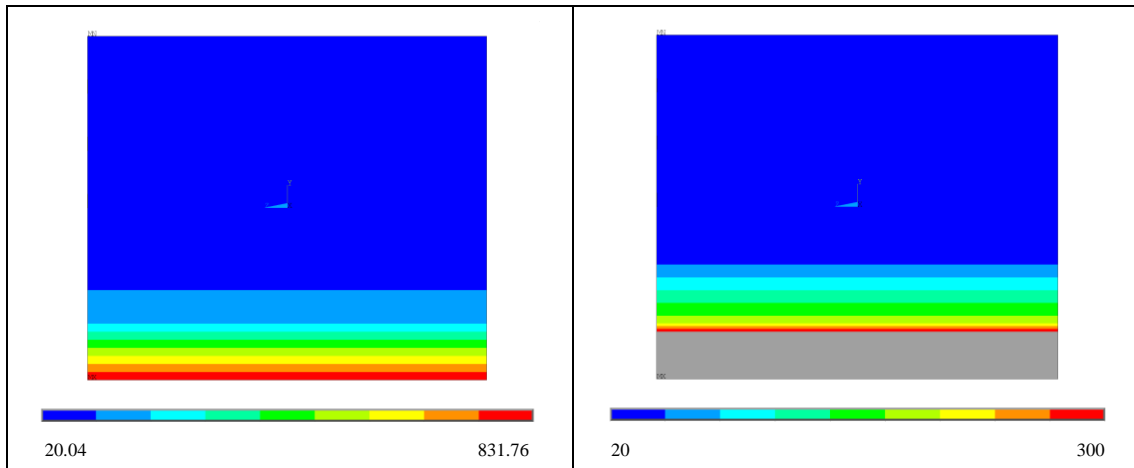


3 Frentes de fogo

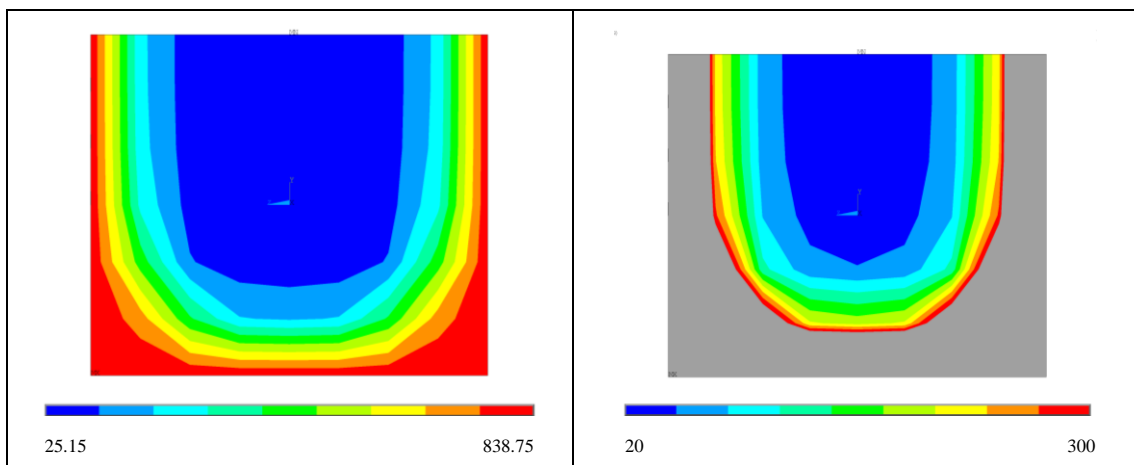


Anexo 2.15 – Viga 140x120x2000mm

1 Frente de fogo

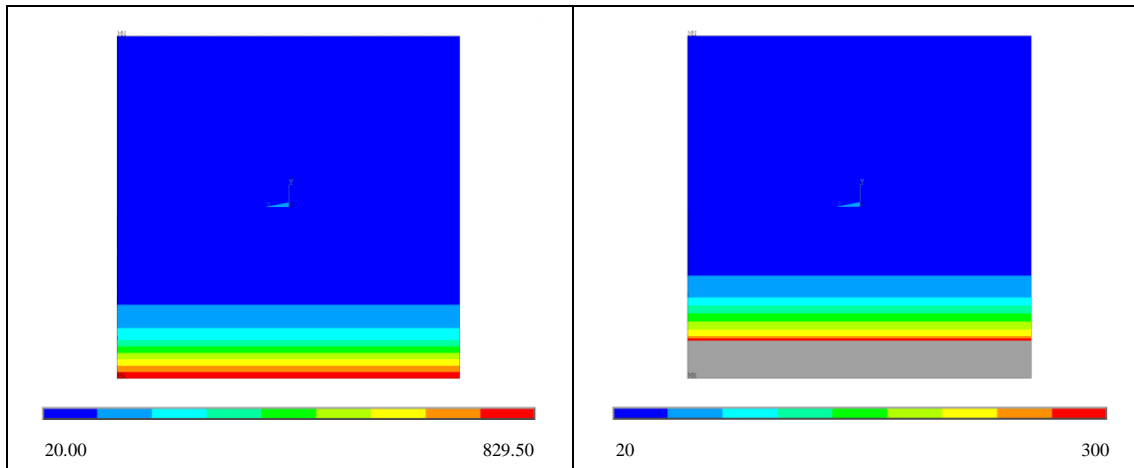


3 Frentes de fogo

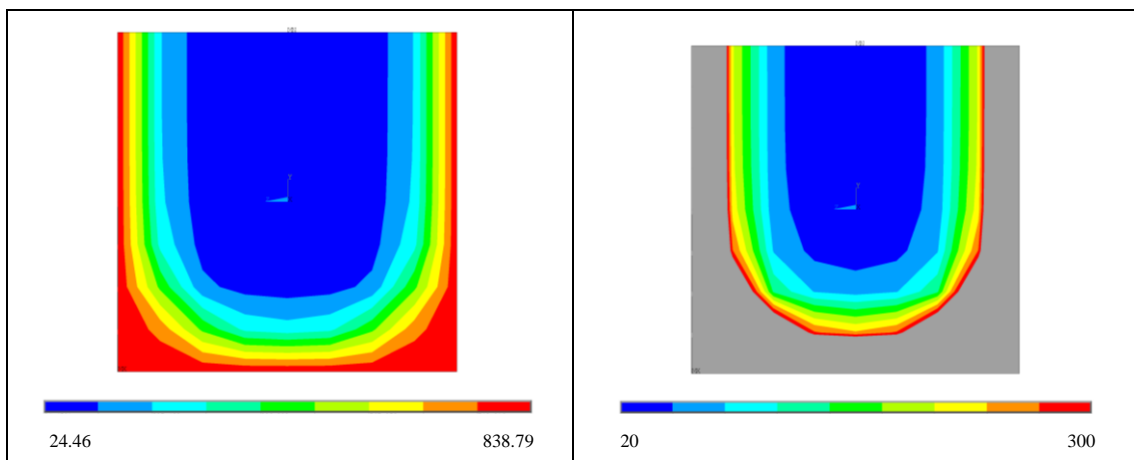


Anexo 2.16 – Viga 140x140x2000mm

1 Frente de fogo

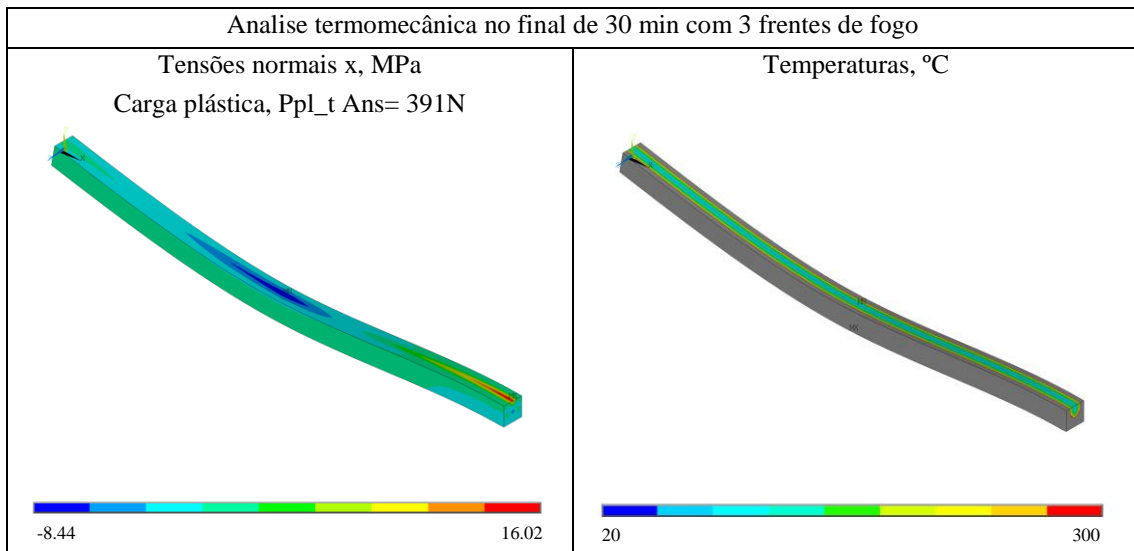
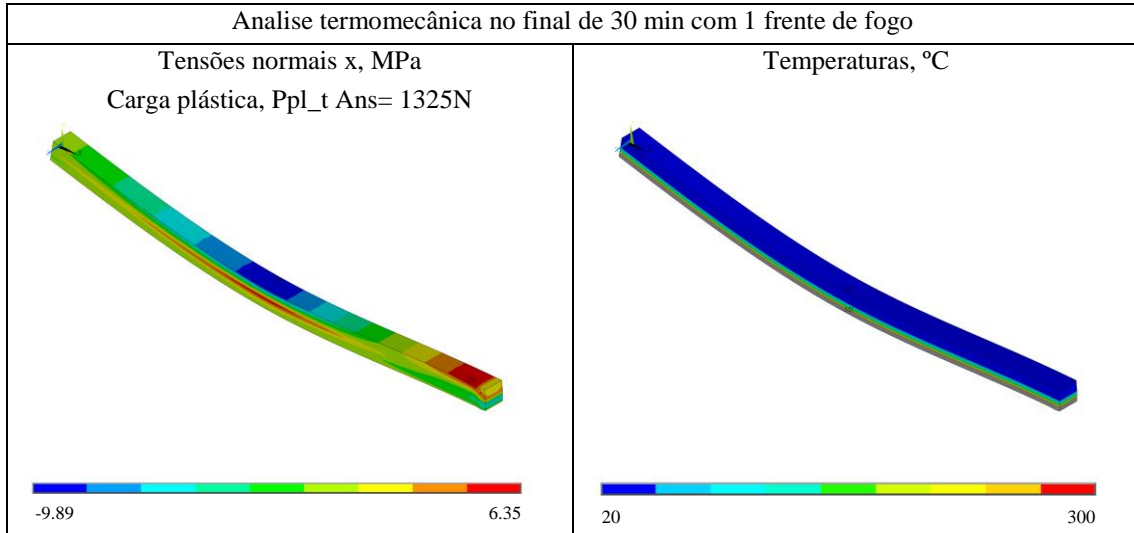


3 Frentes de fogo

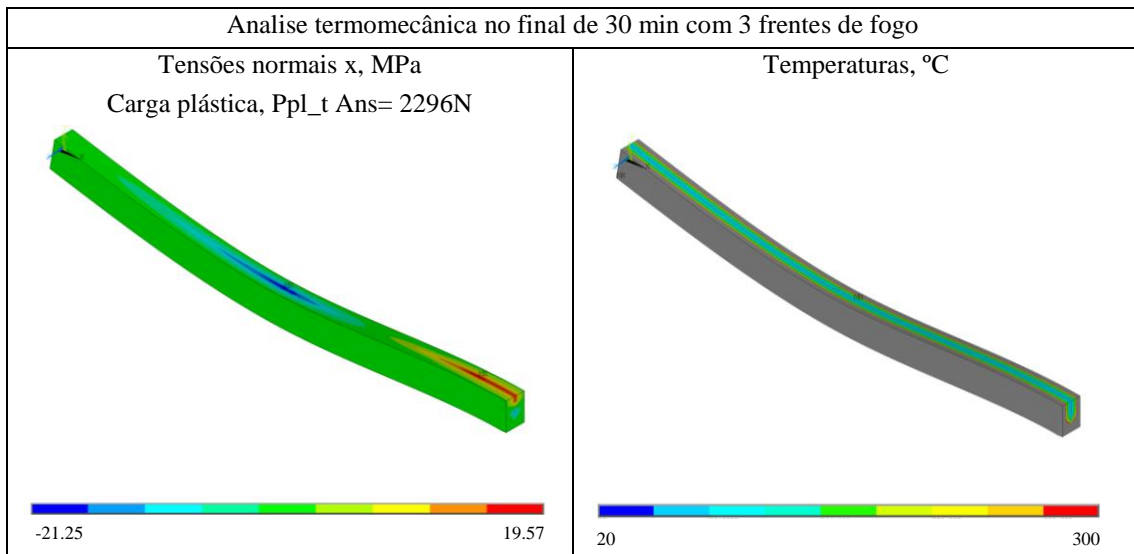
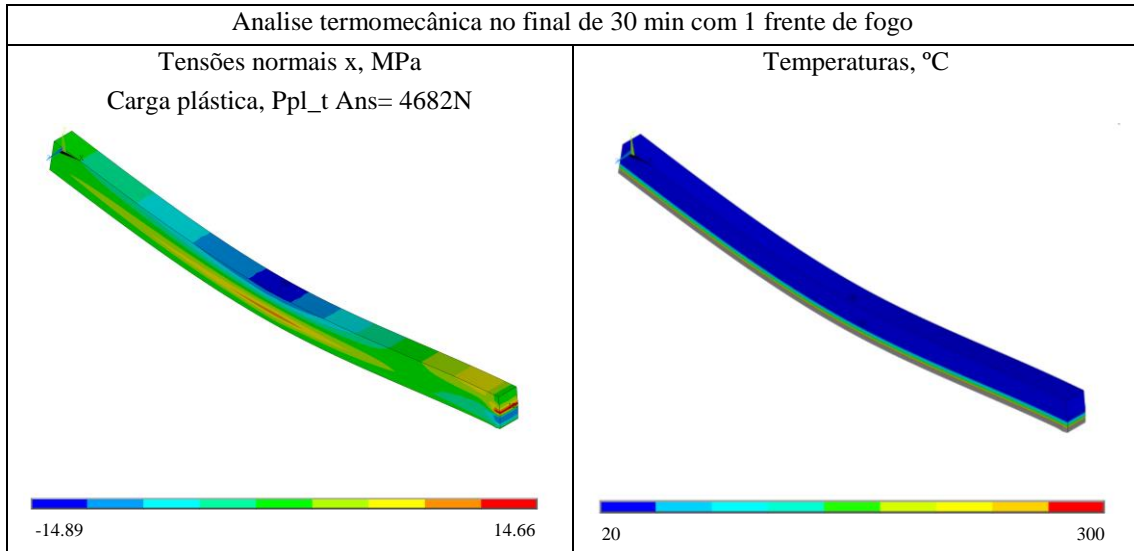


9.3 A3 – Modelo Termomecânico

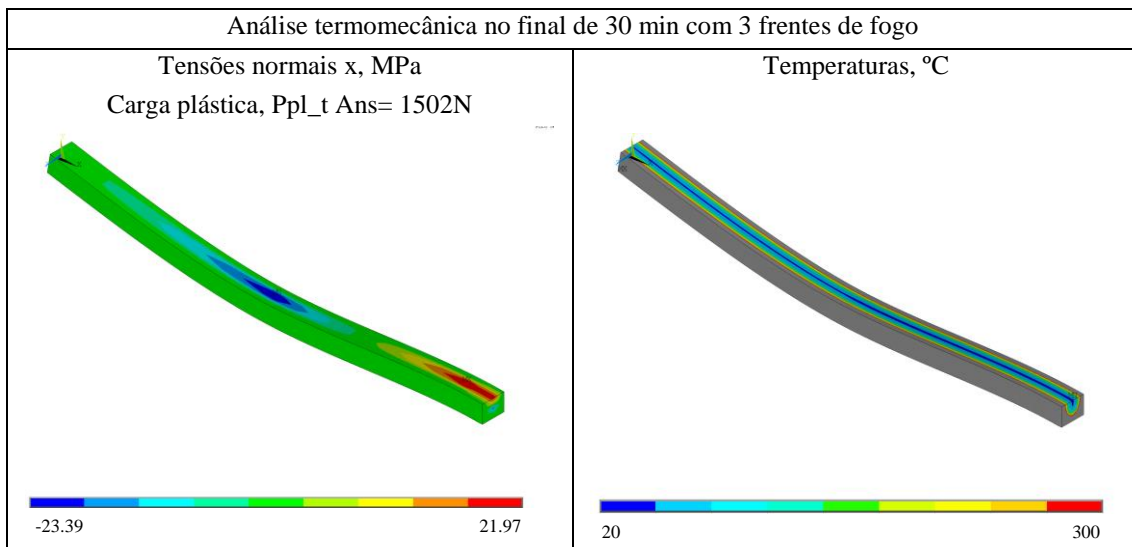
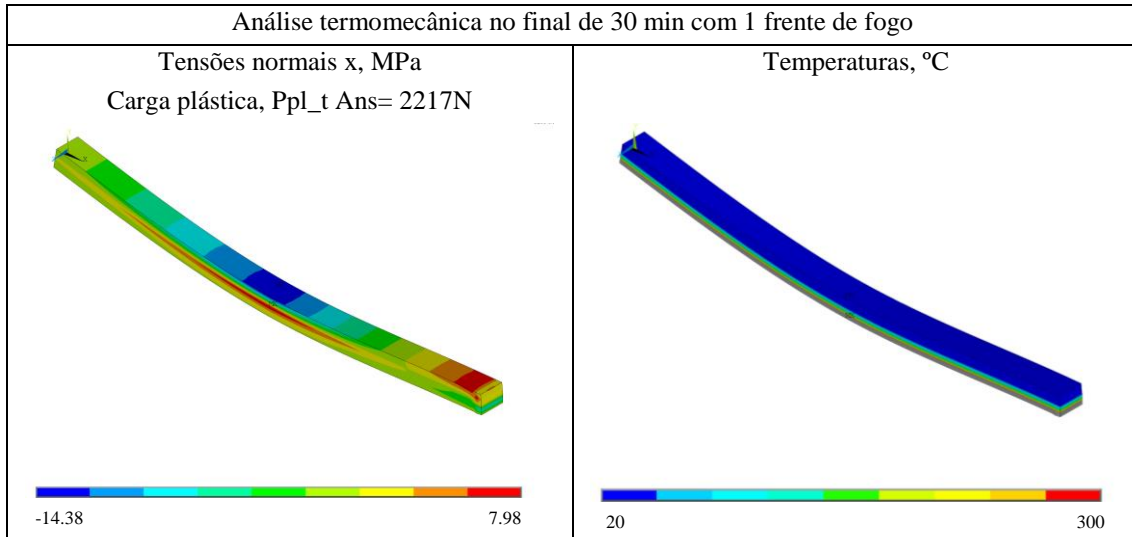
Anexo 3.1 – Viga 80x80x2000mm



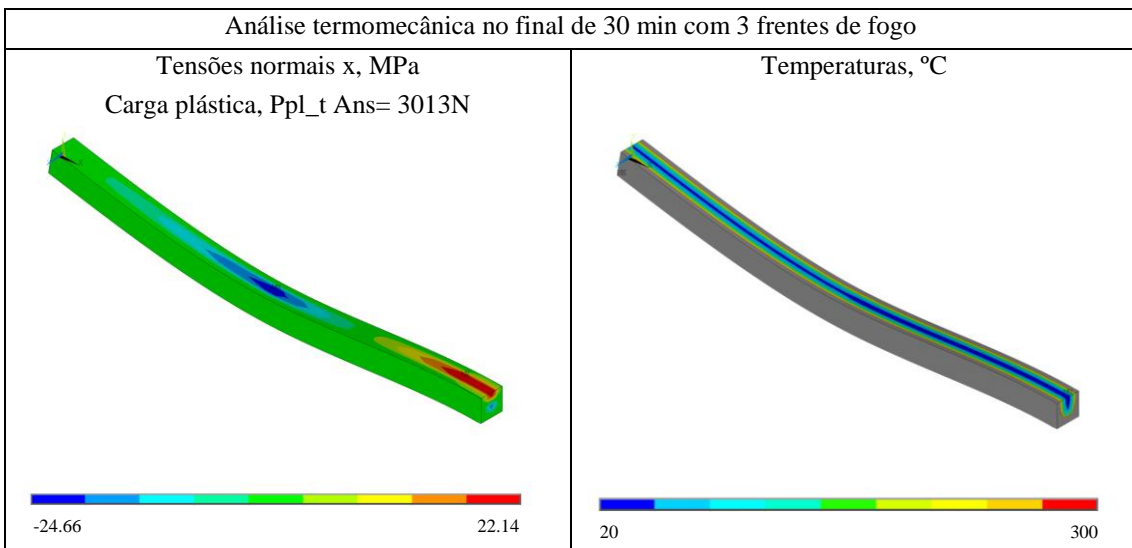
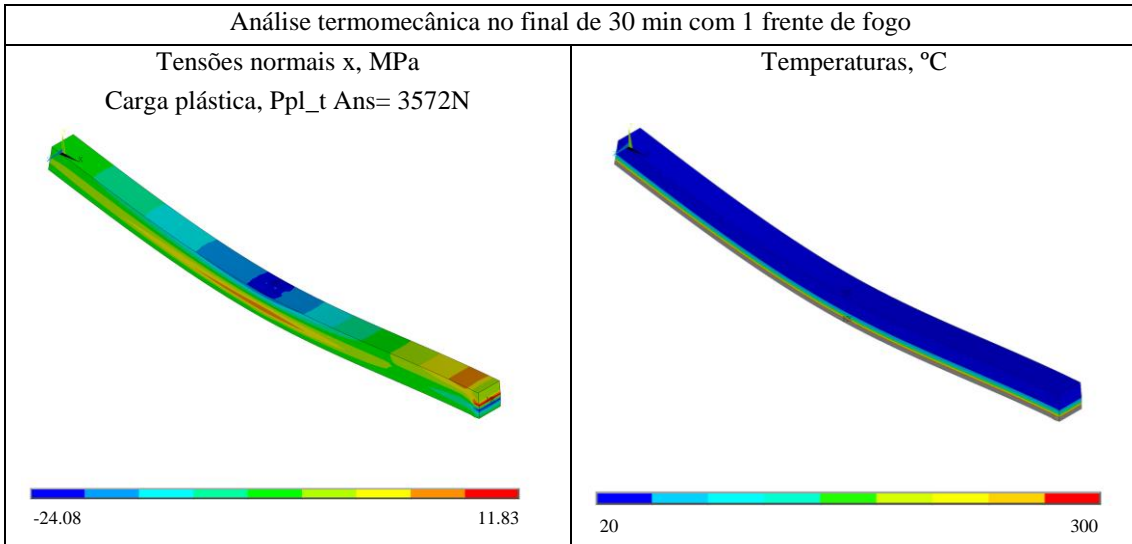
Anexo 3.1 – Viga 80x120x2000mm



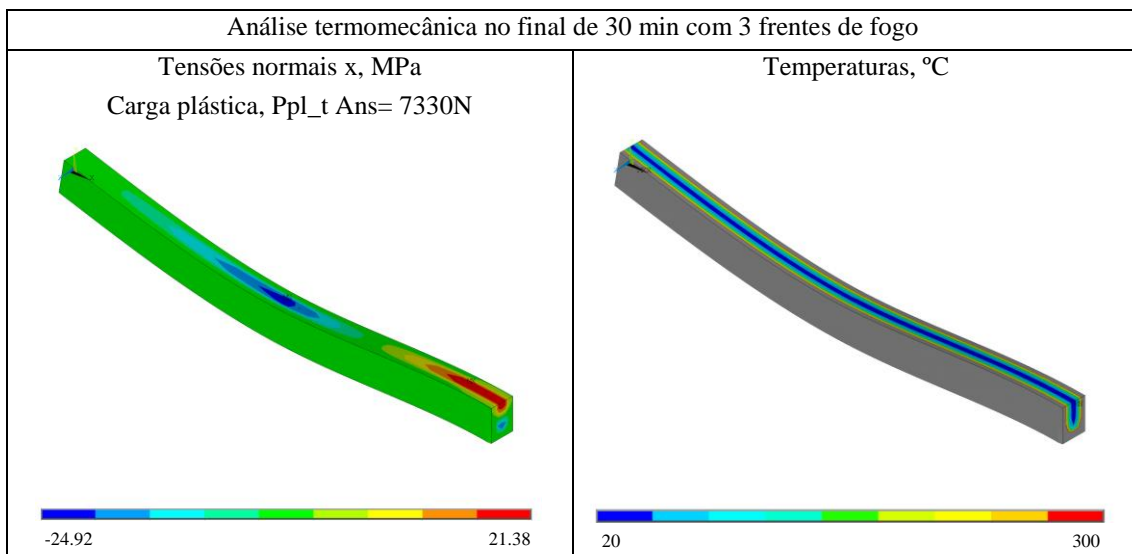
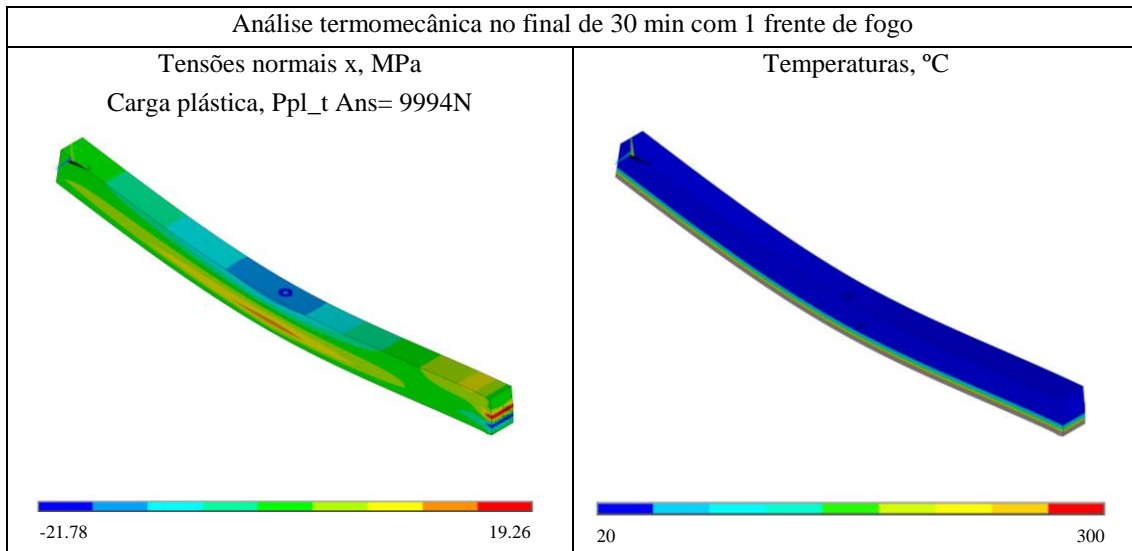
Anexo 3.1 – Viga 100x80x2000mm



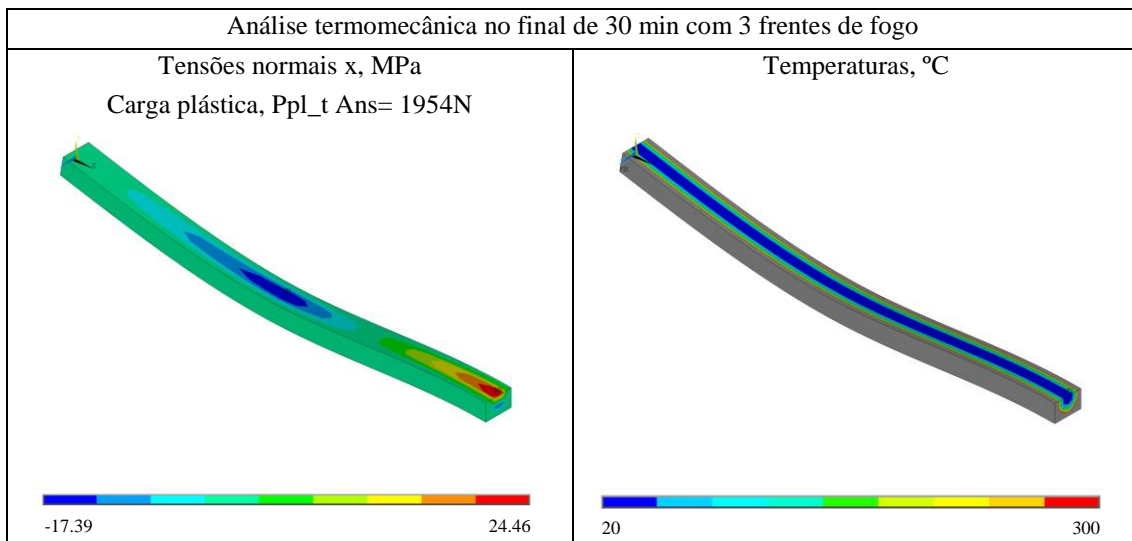
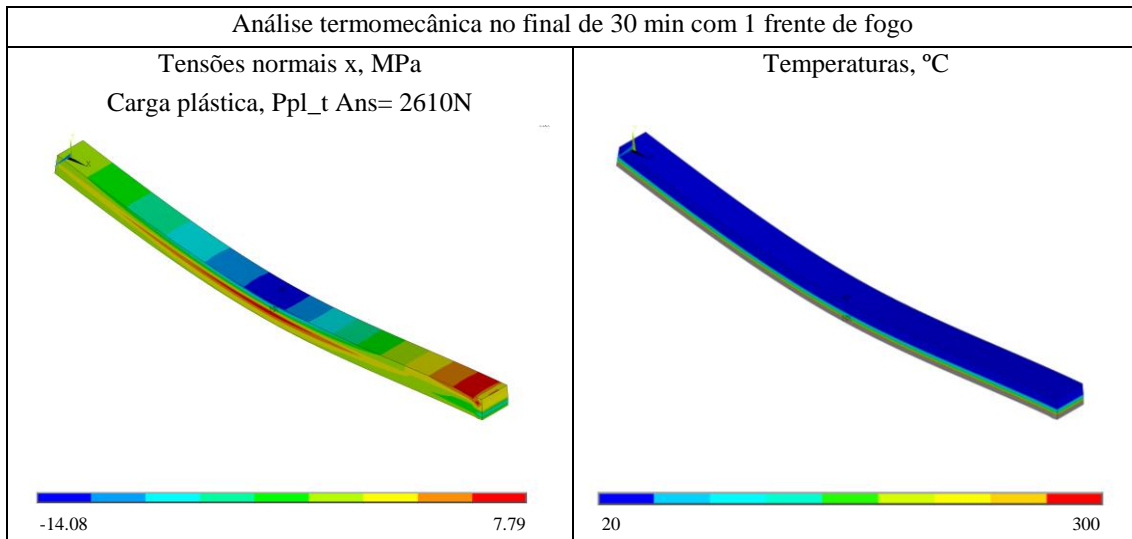
Anexo 3.1 – Viga 100x100x2000mm



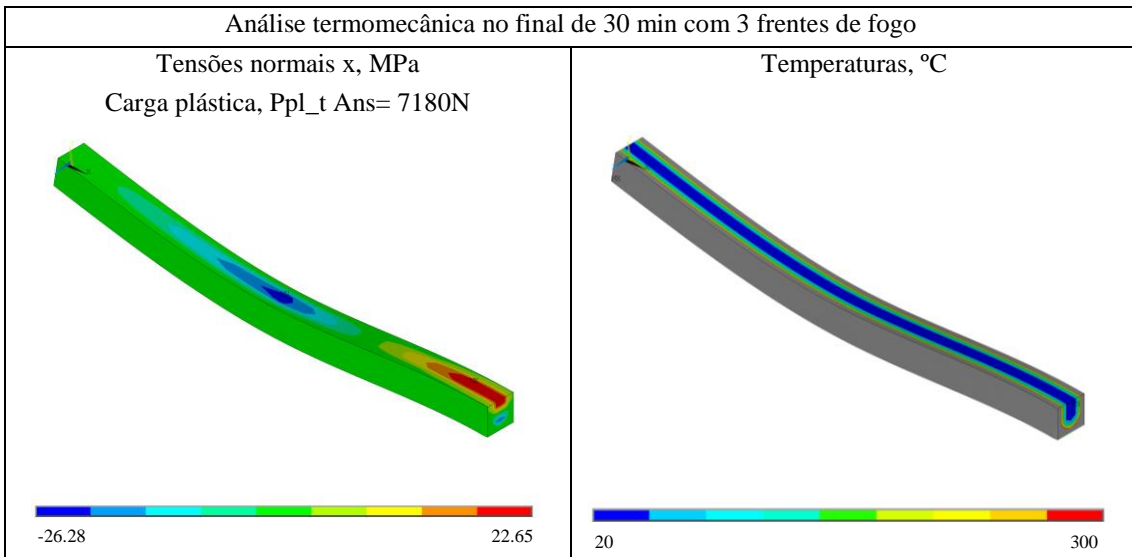
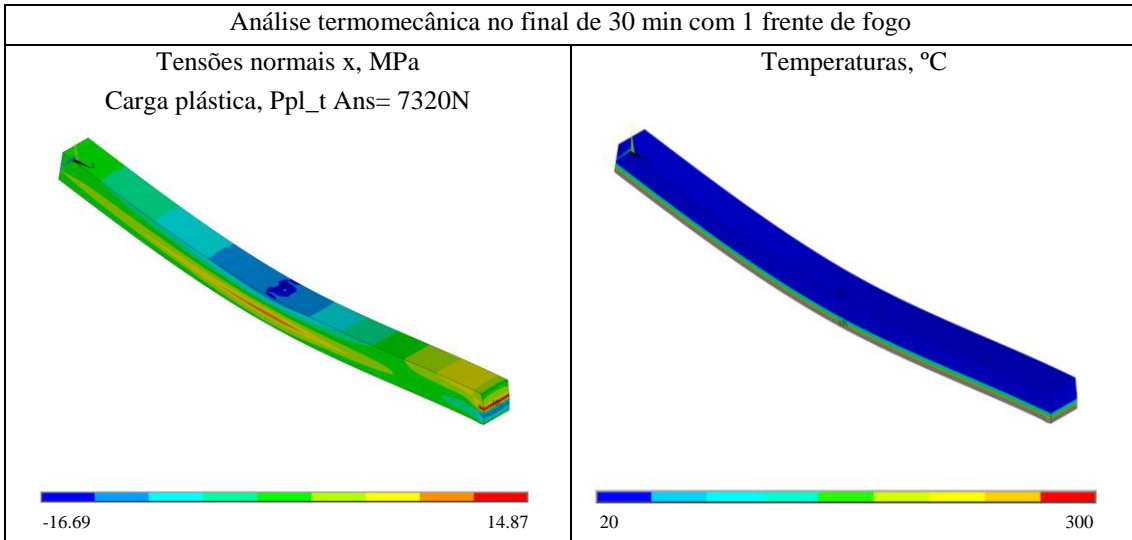
Anexo 3.1 – Viga 100x140x2000mm



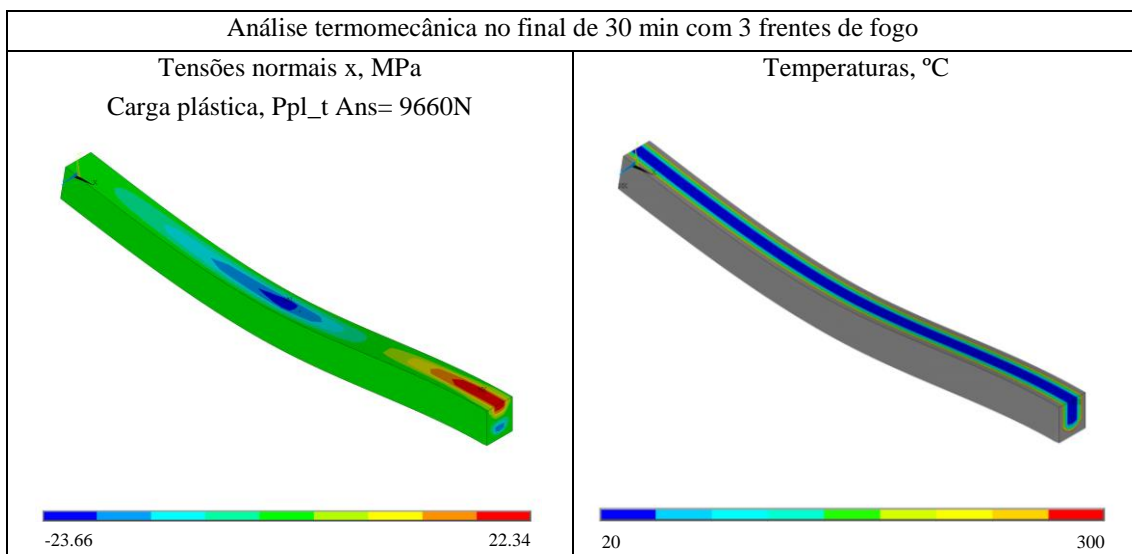
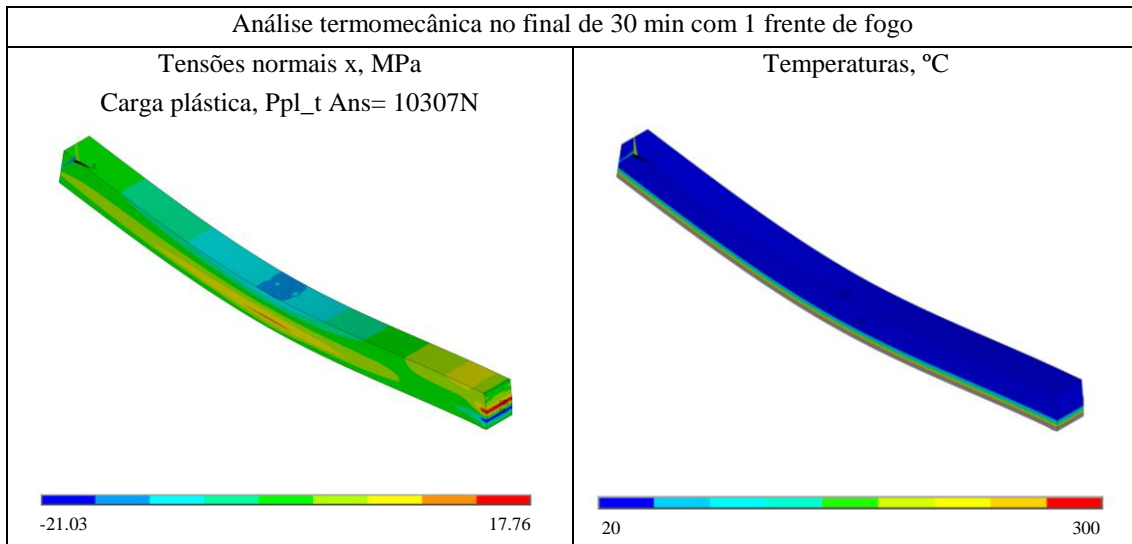
Anexo 3.1 – Viga 120x80x2000mm



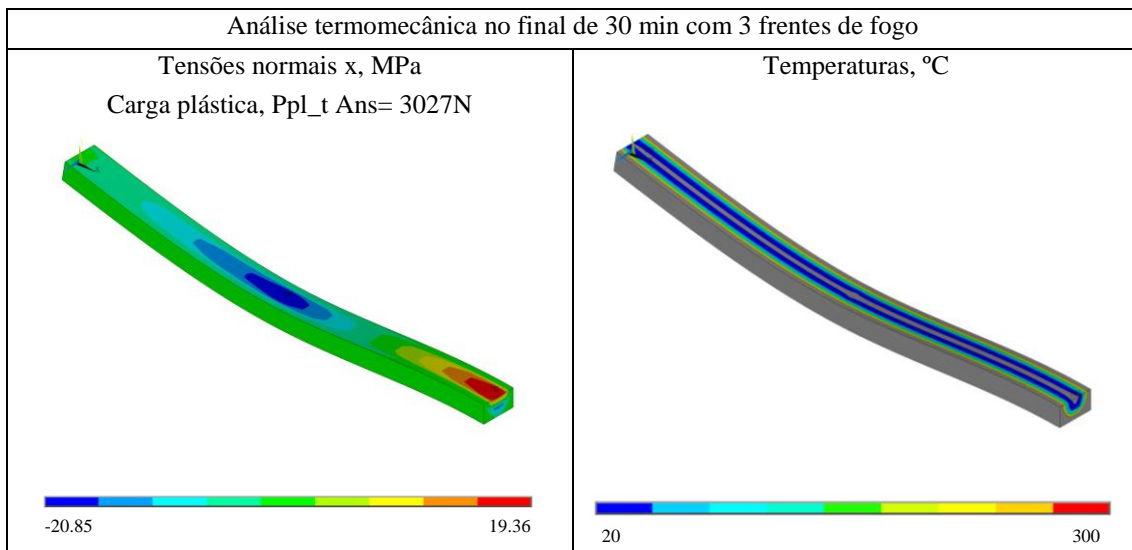
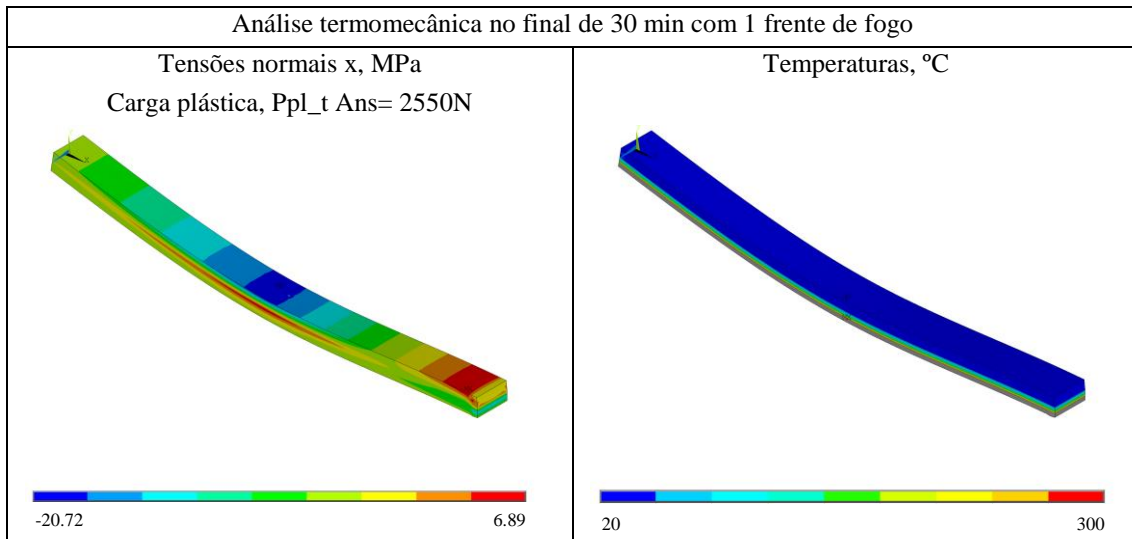
Anexo 3.1 – Viga 120x120x2000mm



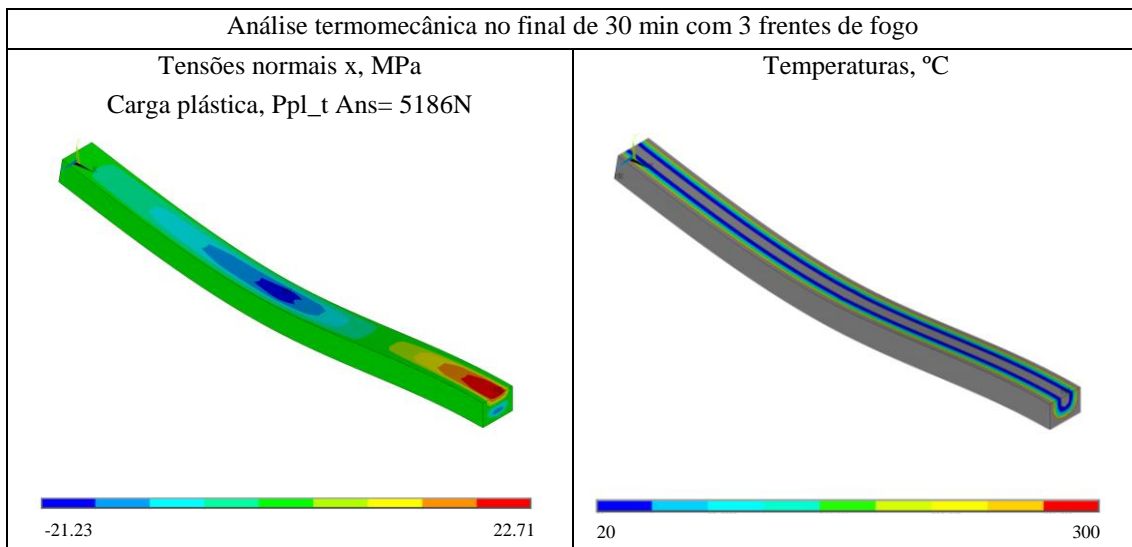
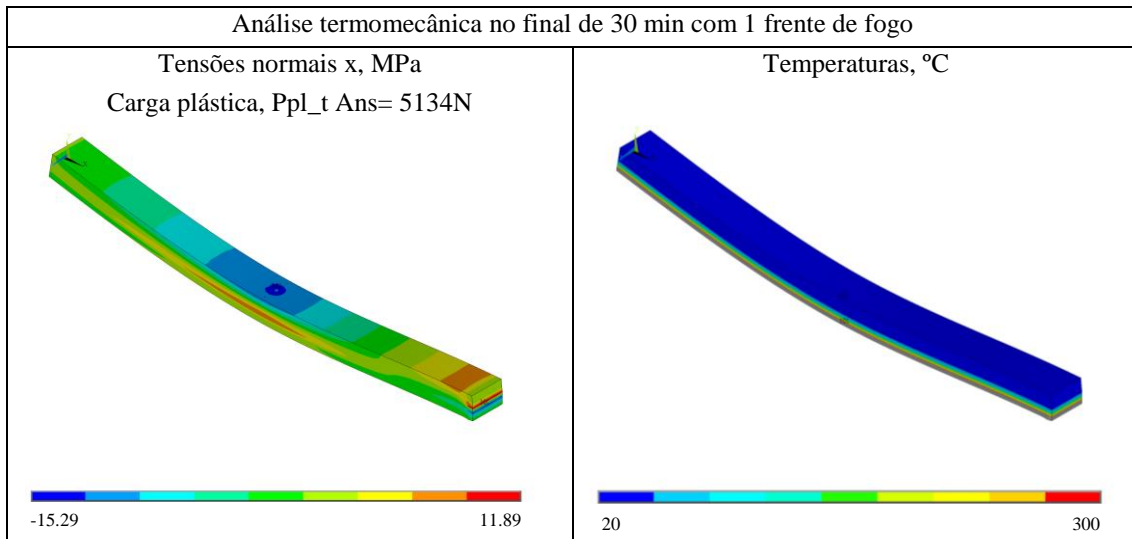
Anexo 3.1 – Viga 120x140x2000mm



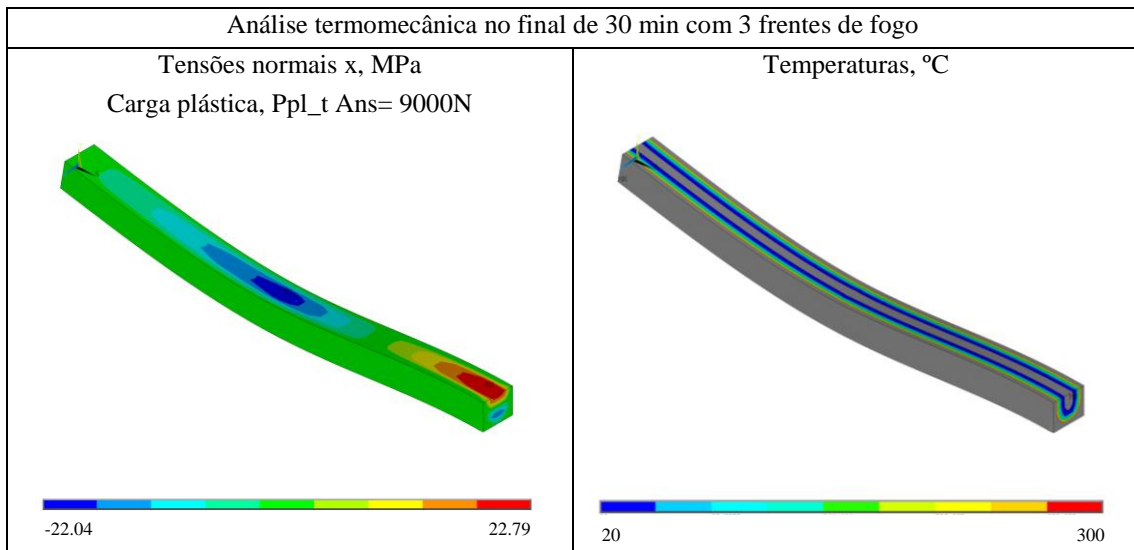
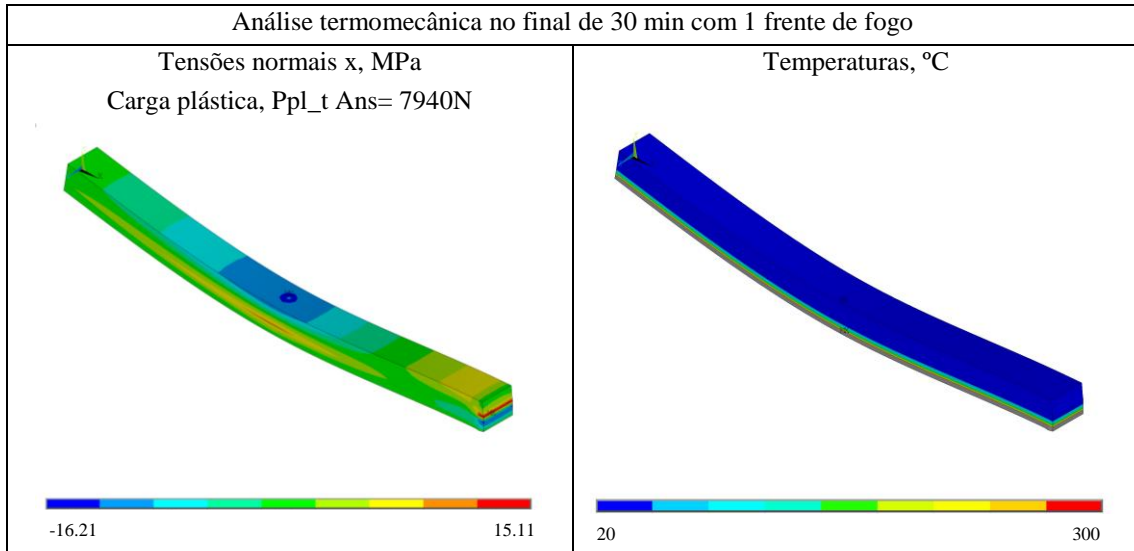
Anexo 3.1 – Viga 140x80x2000mm



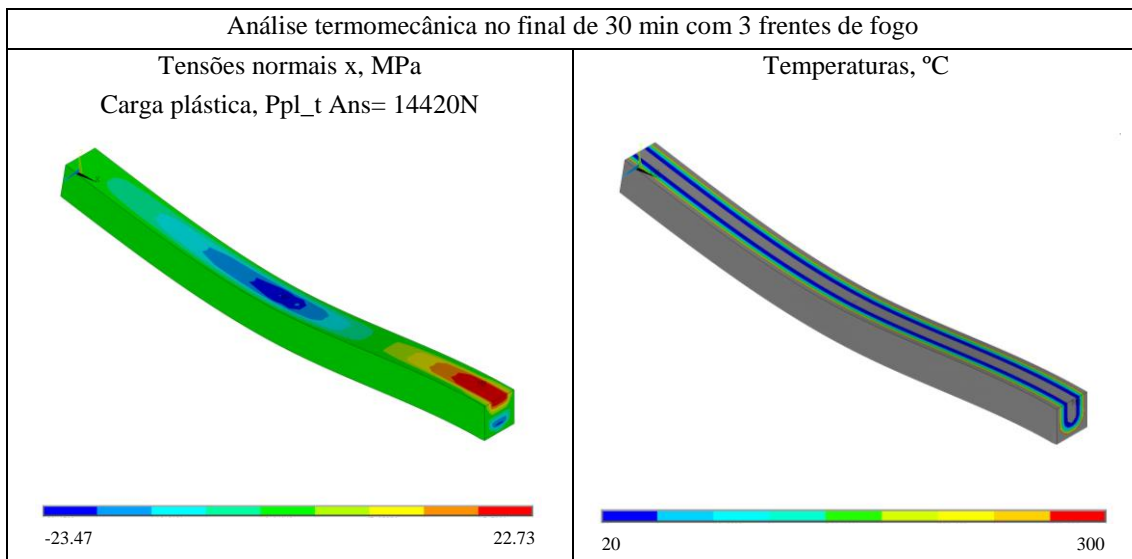
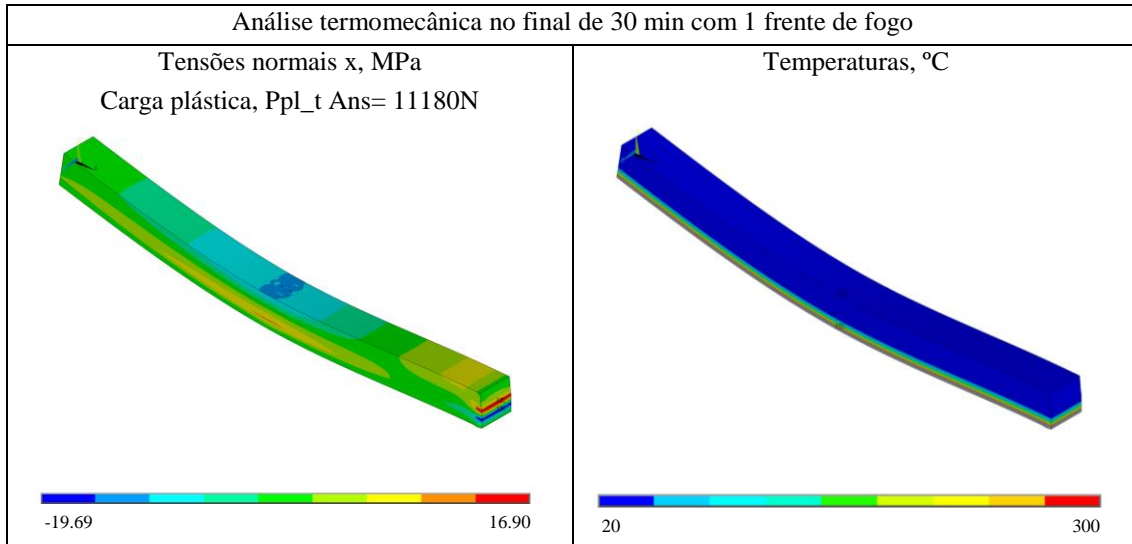
Anexo 3.1 – Viga 140x100x2000mm



Anexo 3.1 – Viga 140x120x2000mm

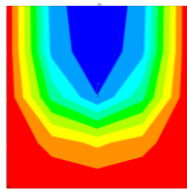
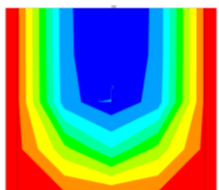
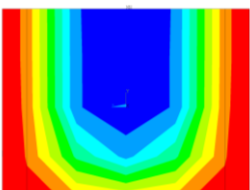
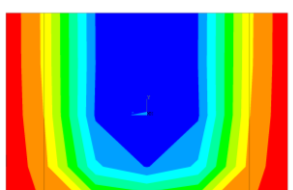


Anexo 3.1 – Viga 140x140x2000mm

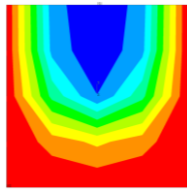
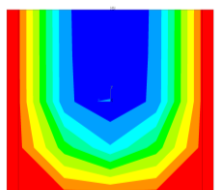
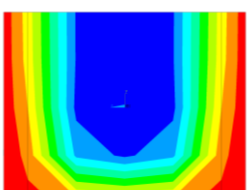
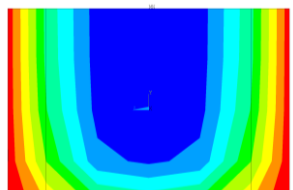


9.4 A4 – Modelo com proteção em gesso

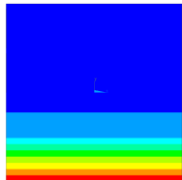
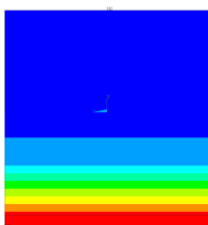
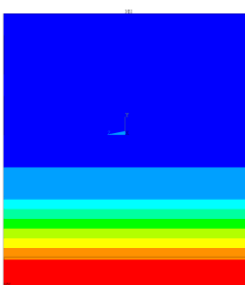
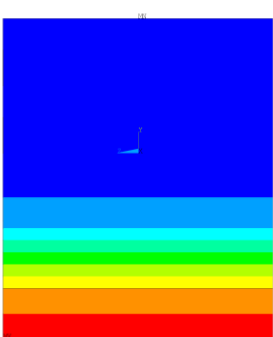
Anexo 4.1 – Viga 80x80x2000mm sem proteção e com proteção de três lado, Gesso 1 (tempo 1800s)

Sem proteção	Proteção 5mm	Proteção 10mm	Proteção 15mm
			
71.83 839.12	61.69 837.64	61.66 837.44	60.79 837.27

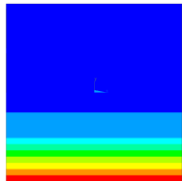
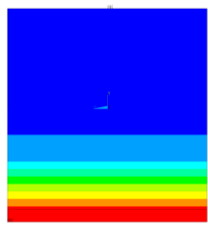
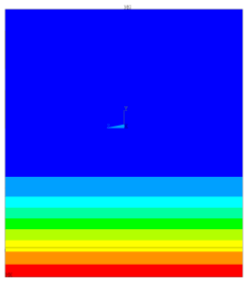
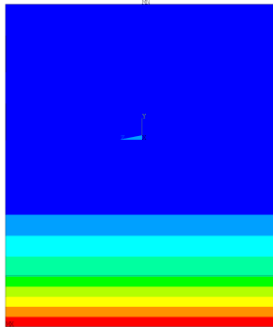
Anexo 4.2 – Viga 80x80x2000mm sem proteção e com proteção de três lado, Gesso 2 (tempo 1800s)

Sem proteção	Proteção 5mm	Proteção 10mm	Proteção 15mm
			
71.83 839.12	59.30 83.95	50.40 837.15	37.39 834.89

Anexo 4.3 – Viga 80x80x2000mm sem proteção e com proteção de um lado, Gesso 1 (tempo 1800s)

Sem proteção	Proteção 5mm	Proteção 10mm	Proteção 15mm
			
22.66 831.76	21.64 823.07	21.16 823.38	20.81 818.71

Anexo 4.4 – Viga 80x80x2000mm com proteção de um lado, Gesso 2 (tempo 1800s)

Sem proteção	Proteção 5mm	Proteção 10mm	Proteção 15mm
			
22.66 831.76	20.05 823.15	20.48 807.73	20.29 802.23

9.5 A5 - Código APDL do modelo mecânico

Escolha do tipo de análise

```
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
```

Introdução das dimensões da viga e tipo de elemento

```
*SET,b,80
*SET,d,80
*SET,l,2000
ET,1,SOLID185
```

Introdução das propriedades da madeira

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,12600
MPDATA,EY,1,,630
MPDATA,EZ,1,,856.8
MPDATA,PRXY,1,,0.449
MPDATA,PRYZ,1,,0.374
MPDATA,PRXZ,1,,0.292
MPDATA,GXY,1,,982.8
MPDATA,GYZ,1,,88.2
MPDATA,GXZ,1,,806.4
TB,CAST,1,1,1,1
TBTEMP,0
TBDATA,,0.4,,,,,
TB,UNIACOMP,1,1,1,COMP
TBTEMP,0
TBPT,,0.002222222,28
TB,UNIATENS,1,1,1,TENS
TBTEMP,0
TBPT,,0.00176984127,22.3
```

Criação da geometria utilizada

```
K,1,0,-d/2,-b/2,
```

K,2,0,-d/2,0,
 K,3,0,-d/2,b/2,
 K,4,0,0,-b/2,
 K,5,0,0,0,
 K,6,0,0,b/2,
 K,7,0,d/2,-b/2,
 K,8,0,d/2,0,
 K,9,0,d/2,b/2,
 LSTR, 3, 2
 LSTR, 2, 1
 LSTR, 1, 4
 LSTR, 4, 7
 LSTR, 7, 8
 LSTR, 8, 9
 LSTR, 9, 6
 LSTR, 6, 3
 LSTR, 6, 5
 LSTR, 5, 2
 LSTR, 5, 4
 LSTR, 8, 5
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,8
 FITEM,2,1
 FITEM,2,10
 FITEM,2,9
 AL,P51X
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,7
 FITEM,2,6
 FITEM,2,12
 FITEM,2,9
 AL,P51X
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,12
 FITEM,2,5
 FITEM,2,4
 FITEM,2,11
 AL,P51X
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,10
 FITEM,2,11
 FITEM,2,3

FITEM,2,2
AL,P51X
FLST,2,4,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-4
VEXT,P51X, , ,1/2,0,0,,
FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,5
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,18
VEXT,P51X, , ,1/2,0,0,,

Introdução da tabela da força

*DIM,cargafy,TABLE,2,1,1, , ,
*SET,CARGAFY(1,0,1) , 0
*SET,CARGAFY(2,0,1) , 50
*SET,CARGAFY(2,1,1) , -25000
*DIM,cargafy2,TABLE,2,1,1, , ,
*SET,CARGAFY2(1,0,1) , 0
*SET,CARGAFY2(2,0,1) , 50
*SET,CARGAFY2(2,1,1) , -12500

Criação dos pontos da carga

K,20000,1/2,d/2,0,
K,20001,1/2,d/2,-b/2,
K,20002,1/2,d/2,b/2,

Implementação da malha

LESIZE,ALL,20, , , ,1, , ,1,
FLST,5,8,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-8
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VSWEEP,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

Inclusão das condições de fronteira

FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,9

FITEM,2,11
DL,P51X, ,ALL,
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,37
FITEM,2,47
DL,P51X, ,UY,
FLST,2,1,3,ORDE,1

Aplicação da carga e tolerância

FITEM,2,20000
FK,P51X,FY, %CARGAFY%
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,20001
FK,P51X,FY, %CARGAFY2%
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,20002
FK,P51X,FY, %CARGAFY2%
SBCTRAN
NUMMRG,ALL, ,0.001, ,LOW
NUMCMP,ALL

Introdução do método de solução, time steps, numero de iterações e tempo final para a simulação

/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
DELTIM,0.25,0.05,0.25
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
NCNV,2,0,0,0,0
NEQIT,5
TIME,50

9.6 A6 - Código APDL do modelo térmico

Escolha do tipo de análise

```
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
```

Introdução das dimensões da viga e tipo de elemento

```
*SET,b,80
*SET,d,80
*SET,1,2000
ET,1,SOLID278
```

Introdução das propriedades da madeira

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,12600
MPDATA,EY,1,,630
MPDATA,EZ,1,,856.8
MPDATA,PRXY,1,,0.449
MPDATA,PRYZ,1,,0.374
MPDATA,PRXZ,1,,0.292
MPDATA,GXY,1,,982.8
MPDATA,GYZ,1,,88.2
MPDATA,GXZ,1,,806.4
TB,CAST,1,1,1,1
TBTEMP,0
TBDATA,,0.4,,,,
TB,UNIACOMP,1,1,1,COMP
TBTEMP,0
TBPT,,0.002222222,28
TB,UNIATENS,1,1,1,TENS
TBTEMP,0
TBPT,,0.00176984127,22.3
```

Criação da geometria utilizada

```
K,1,0,-d/2,-b/2,
K,2,0,-d/2,0,
```

K,3,0,-d/2,b/2,
 K,4,0,0,-b/2,
 K,5,0,0,0,
 K,6,0,0,b/2,
 K,7,0,d/2,-b/2,
 K,8,0,d/2,0,
 K,9,0,d/2,b/2,
 LSTR, 3, 2
 LSTR, 2, 1
 LSTR, 1, 4
 LSTR, 4, 7
 LSTR, 7, 8
 LSTR, 8, 9
 LSTR, 9, 6
 LSTR, 6, 3
 LSTR, 6, 5
 LSTR, 5, 2
 LSTR, 5, 4
 LSTR, 8, 5
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,8
 FITEM,2,1
 FITEM,2,10
 FITEM,2,9
 AL,P51X
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,7
 FITEM,2,6
 FITEM,2,12
 FITEM,2,9
 AL,P51X
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,12
 FITEM,2,5
 FITEM,2,4
 FITEM,2,11
 AL,P51X
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,10
 FITEM,2,11
 FITEM,2,3
 FITEM,2,2

AL,P51X
 FLST,2,4,5,ORDE,2
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-4
 VEXT,P51X, , ,1/2,0,0,,,
 FLST,2,4,5,ORDE,4
 FITEM,2,5
 FITEM,2,10
 FITEM,2,14
 FITEM,2,18
 VEXT,P51X, , ,1/2,0,0,,,

Criação do nó de aplicação da curva de incêndio

NUMMRG,ALL, ,0.001, ,LOW
 NUMCMP,ALL
 N,15000,1/2,-d/2-d/4,0,,,

Implementação da malha

LESIZE,ALL,20, , , ,1, , ,1,
 FLST,5,8,6,ORDE,2
 FITEM,5,1
 FITEM,5,-8
 CM,_Y,VOLU
 VSEL, , , ,P51X
 CM,_Y1,VOLU
 CHKMSH,'VOLU'
 CMSEL,S,_Y
 VSWEEP,_Y1
 CMDELE,_Y
 CMDELE,_Y1
 CMDELE,_Y2

Introdução da curva de incêndio,

*DIM,ISO834,TABLE,181,1,1,,
 *SET,ISO834(1,0,1) , 0
 *SET,ISO834(1,1,1) , 20
 *SET,ISO834(2,0,1) , 60
 *SET,ISO834(2,1,1) , 349.2
 *SET,ISO834(3,0,1) , 120
 *SET,ISO834(3,1,1) , 444.5
 *SET,ISO834(4,0,1) , 180

 *SET,ISO834(180,1,1) , 1108.9
 *SET,ISO834(181,0,1) , 10800
 *SET,ISO834(181,1,1) , 1109.7

Introdução da radiação, convecção, temperatura inicial, e aplicação da curva de incendio no nó 15000

```
STEF,0.567E-13
TOFFST,273.15
RADOPT,0.10000000149,0.999999974738E-04,0,1000,0.10000000149,0.10000000149, , , , 0
SPCNOD,1,15000
FLST,2,2526,1,ORDE,2
FITEM,2,15000
FITEM,2,-17525
IC,P51X,TEMP,20,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,15000
D,P51X, , %ISO834% , , , ,TEMP, , , , ,
FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,6
FITEM,2,11
FITEM,2,22
FITEM,2,27
SFA,P51X,1,CONV,25E-6, %ISO834%
FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,6
FITEM,2,11
FITEM,2,22
FITEM,2,27
SFA,P51X, ,RDSF,1,1,
```

Introdução do método de solução, time steps, numero de iterações e tempo final para a simulação

```
/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,1
CNVTOL,HEAT, ,0.1,2, ,
DELTIM,5,0.1,5
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
NCNV,2,0,0,0,0
TIME,1800
```

9.7 A7 - Código APDL do modelo termomecânico

Alteração do tipo de análise

```
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
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_MULTI,1
```

Introdução das propriedades mecânicas

```
ETCHG,TTS
MPDE,ALL,1
TBDE,ALL,1
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,12600
MPDATA,EY,1,,630
MPDATA,EZ,1,,856.8
MPDATA,PRXY,1,,0.449
MPDATA,PRYZ,1,,0.374
MPDATA,PRXZ,1,,0.292
MPDATA,GXY,1,,982.8
MPDATA,GYZ,1,,88.2
MPDATA,GXZ,1,,806.4
TB,CAST,1,1,1,1
TBTEMP,0
TBDATA,,0.4,,,,
TB,UNIACOMP,1,1,1,COMP
TBTEMP,0
TBPT,,0.0022222222,28
TB,UNIATENS,1,1,1,TENS
TBTEMP,0
TBPT,,0.00176984127,22.3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,300
MPDE,NUXY,1
```

MPDE,NUYZ,1
MPDE,NUXZ,1
MPDE,PRXY,1
MPDE,PRYZ,1
MPDE,PRXZ,1
MPDE,EX,1
MPDATA,EX,1,,12600
MPDATA,EX,1,,126
MPDE,EY,1
MPDATA,EY,1,,630
MPDATA,EY,1,,6.3
MPDE,EZ,1
MPDATA,EZ,1,,856.8
MPDATA,EZ,1,,8.568
MPDATA,PRXY,1,,0.449
MPDATA,PRXY,1,,0.00449
MPDATA,PRYZ,1,,0.374
MPDATA,PRYZ,1,,0.00374
MPDATA,PRXZ,1,,0.292
MPDATA,PRXZ,1,,0.00292
MPDE,GXY,1
MPDATA,GXY,1,,982.8
MPDATA,GXY,1,,9.828
MPDE,GYZ,1
MPDATA,GYZ,1,,88.2
MPDATA,GYZ,1,,0.882
MPDE,GXZ,1
MPDATA,GXZ,1,,806.4
MPDATA,GXZ,1,,8.064
TBDE,UNIATENS,1,,,TENS
TB,UNIATENS,1,2,1,TENS
TBTEMP,20
TBPT,,0.0017698,22.3
TBTEMP,300
TBPT,,0.0017698,0.223
TBDE,UNIACOMP,1,,,COMP
TB,UNIACOMP,1,2,1,COMP
TBTEMP,20
TBPT,,0.0022222,28
TBTEMP,300
TBPT,,0.0022222,0.28
TBDE,UNIATENS,1,,,TENS

TB,UNIATENS,1,2,1,TENS
TBTEMP,20
TBPT,,0.0017698,22.3
TBTEMP,300
TBPT,,0.0017698,0.223
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,300
MPTEMP,3,1000
MPDE,NUXY,1
MPDE,NUYZ,1
MPDE,NUXZ,1
MPDE,PRXY,1
MPDE,PRYZ,1
MPDE,PRXZ,1
MPDE,EX,1
MPDATA,EX,1,,12600
MPDATA,EX,1,,126
MPDATA,EX,1,,126
MPDE,EY,1
MPDATA,EY,1,,630
MPDATA,EY,1,,6.3
MPDATA,EY,1,,6.3
MPDE,EZ,1
MPDATA,EZ,1,,856.8
MPDATA,EZ,1,,8.568
MPDATA,EZ,1,,8.568
MPDATA,PRXY,1,,0.449
MPDATA,PRXY,1,,0.00449
MPDATA,PRXY,1,,0.00449
MPDATA,PRYZ,1,,0.374
MPDATA,PRYZ,1,,0.00374
MPDATA,PRYZ,1,,0.00374
MPDATA,PRXZ,1,,0.292
MPDATA,PRXZ,1,,0.00292
MPDATA,PRXZ,1,,0.00292
MPDE,GXY,1
MPDATA,GXY,1,,982.8
MPDATA,GXY,1,,9.828
MPDATA,GXY,1,,9.828
MPDE,GYZ,1
MPDATA,GYZ,1,,88.2

MPDATA,GYZ,1,,0.882
MPDATA,GYZ,1,,0.882
MPDE,GXZ,1
MPDATA,GXZ,1,,806.4
MPDATA,GXZ,1,,8.064
MPDATA,GXZ,1,,8.064
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,300
MPTEMP,3,1000
MPDE,NUXY,1
MPDE,NUYZ,1
MPDE,NUXZ,1
MPDE,PRXY,1
MPDE,PRYZ,1
MPDE,PRXZ,1
MPDE,EX,1
MPDATA,EX,1,,12600
MPDATA,EX,1,,126
MPDATA,EX,1,,126
MPDE,EY,1
MPDATA,EY,1,,630
MPDATA,EY,1,,6.3
MPDATA,EY,1,,6.3
MPDE,EZ,1
MPDATA,EZ,1,,856.8
MPDATA,EZ,1,,8.568
MPDATA,EZ,1,,8.568
MPDATA,PRXY,1,,0.449
MPDATA,PRXY,1,,0.00449
MPDATA,PRXY,1,,0.00449
MPDATA,PRYZ,1,,0.374
MPDATA,PRYZ,1,,0.00374
MPDATA,PRYZ,1,,0.00374
MPDATA,PRXZ,1,,0.292
MPDATA,PRXZ,1,,0.00292
MPDATA,PRXZ,1,,0.00292
MPDE,GXY,1
MPDATA,GXY,1,,982.8
MPDATA,GXY,1,,9.828
MPDATA,GXY,1,,9.828
MPDE,GYZ,1

MPDATA,GYZ,1,,88.2
MPDATA,GYZ,1,,0.882
MPDATA,GYZ,1,,0.882
MPDE,GXZ,1
MPDATA,GXZ,1,,806.4
MPDATA,GXZ,1,,8.064
MPDATA,GXZ,1,,8.064
TBDE,CAST,1,,
TB,CAST,1,1,1,1
TBTEMP,0
TBDATA,,0.4,,,,
TBDE,UNIATENS,1,,TENS
TB,UNIATENS,1,3,1,TENS
TBTEMP,20
TBPT,,0.0017698,22.3
TBTEMP,300
TBPT,,0.0017698,0.223
TBTEMP,1000
TBPT,,0.0017698,0.223
TBDE,UNIACOMP,1,,COMP
TB,UNIACOMP,1,3,1,COMP
TBTEMP,20
TBPT,,0.0022222,28
TBTEMP,300
TBPT,,0.0022222,0.28
TBTEMP,1000
TBPT,,0.0022222,0.28
TBDE,UNIATENS,1,,TENS
TB,UNIATENS,1,3,1,TENS
TBTEMP,20
TBPT,,0.0017698,22.3
TBTEMP,300
TBPT,,0.0017698,0.223
TBTEMP,1000
TBPT,,0.0017698,0.223
TBDE,UNIACOMP,1,,COMP
TB,UNIACOMP,1,3,1,COMP
TBTEMP,20
TBPT,,0.0022222,28
TBTEMP,300
TBPT,,0.0022222,0.28
TBTEMP,1000

TBPT,,0.0022222,0.28

TBDE,UNIACOMP,1,,COMP

TB,UNIACOMP,1,3,1,COMP

TBTEMP,20

TBPT,,0.0022222,28

TBTEMP,300

TBPT,,0.0022222,0.28

TBTEMP,1000

TBPT,,0.0022222,0.28

Exclusão dos dados da simulação Térmica

MPTEMP ,,,,,,

MPTEMP,1,0

UIMP,1,REFT,,

MPDATA,ALPX,1,,4e-6

LSCLEAR,ALL

LSCLEAR,SOLID

LSCLEAR,FE

Colocação da carga e leitura do ficheiro .rth da simulação térmica

*DEL,,3

*DIM,force,TABLE,2,1,1, , ,

*SET,FORCE(1,0,1) , 0

*SET,FORCE(2,0,1) , 50

*SET,FORCE(2,1,1) , -50000

FLST,2,4,5,ORDE,4

FITEM,2,21

FITEM,2,26

FITEM,2,30

FITEM,2,34

DA,P51X,ALL,

FLST,2,4,5,ORDE,2

FITEM,2,1

FITEM,2,-4

DA,P51X,UY,

FLST,2,1,3,ORDE,1

FITEM,2,16

FK,P51X,FY, %FORCE%

LDREAD,TEMP,,1800, 'file','rth',''

Introdução do método de solução, time steps, numero de iterações e tempo final para a simulação

/SOL

CNVTOL,F, ,0.1,2, ,

DELTIM,0.1,0.01,0.1

OUTRES,ERASE

OUTRES,ALL,ALL
NCNV,2,0,0,0,0
NEQIT,6
TIME,50

9.8 A8 - Código APDL do modelo com proteção

Introdução da geometria do gesso

FLST,2,4,5,ORDE,4

FITEM,2,6

FITEM,2,11

FITEM,2,22

FITEM,2,27

VEXT,P51X, , ,0,-10,0,,,

Inclusão das propriedades do gesso

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,KXX,2,,0.25e-3

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,C,2,,900e-9

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EMIS,2,,0.85

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,DENS,2,,900e-9

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDE,C,2

MPDATA,C,2,,1000

9.9 A9 - Cálculos analíticos: viga simplesmente apoiada e carga a meio vão à temperatura ambiente.

Geometria da Viga			GL28H			Snorm	EC5, 1-1				Resistencia a Flexão Rd	Força Fd	Carga Elastica Pel	Carga Plastica Ppl	Carga Elastica ANSYS	Carga Plastica ANSYS
b	d	L	f _{0,g,k}	E	f _{v,g,k}		Kmod	(600/d) ^{0,1}	Khmin	γM						
mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm ³					N/mm ²	N	N	N	N	N
80	80	2000	22,3	12600	3,5	85333,33	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	2679,33	3806	5709	4500	5225
80	100	2000	22,3	12600	3,5	133333,33	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	4186,45	5947	8920	6750	9196
80	120	2000	22,3	12600	3,5	192000,00	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	6028,49	8563	12845	9500	13517
80	140	2000	22,3	12600	3,5	261333,33	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	8205,45	11655	17483	12750	17075
100	80	2000	22,3	12600	3,5	106666,67	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	3349,16	4757	7136	5500	7604
100	100	2000	22,3	12600	3,5	166666,67	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	5233,07	7433	11150	8250	11518
100	120	2000	22,3	12600	3,5	240000,00	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	7535,62	10704	16056	12000	15950
100	140	2000	22,3	12600	3,5	326666,67	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	10256,81	14569	21854	16250	21750
120	80	2000	22,3	12600	3,5	128000,00	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	4019,00	5709	8563	6750	9279
120	100	2000	22,3	12600	3,5	200000,00	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	6279,68	8920	13380	10000	14126
120	120	2000	22,3	12600	3,5	288000,00	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	9042,74	12845	19267	14500	21361
120	140	2000	22,3	12600	3,5	392000,00	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	12308,17	17483	26225	19500	26700
140	80	2000	22,3	12600	3,5	149333,33	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	4688,83	6660	9990	8000	10900
140	100	2000	22,3	12600	3,5	233333,33	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	7326,29	10407	15610	11750	15525
140	120	2000	22,3	12600	3,5	336000,00	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	10549,86	14986	22478	17250	22775
140	140	2000	22,3	12600	3,5	457333,33	0,8	1,2	1,1	1,25	15,70	14359,53	20397	30596	23500	26100

9.10 A10 - Cálculos analíticos: viga simplesmente apoiada e carga a meio vão, uma frente de fogo.

Geometria da Viga			GL28H			t= 30 Minutos			1 lado de fogo		Sfogo	EC5, 1-2			Resistencia a Flexão Rd	Força Fd	Carga Elastica Pel	Carga Plastica Ppl	Carga Plastica ANSYS
b	d	L	f,0,g,k	E	fv,g,k	Bn	dchar,n	def	b	dfogo		Kmod,fi	Kfi	gM,fi					
mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm/min	mm	mm	mm	mm	mm ³				N/mm ²	N	N	N	N
80	80	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	80	53,5	38163,3	1	1,15	1	25,645	1174,44	1021,25	1531,88	1325,00
80	100	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	80	73,5	72030,0	1	1,15	1	25,645	2216,65	1927,52	2891,28	2470,00
80	120	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	80	93,5	116563,3	1	1,15	1	25,645	3587,12	3119,23	4678,85	4682,00
80	140	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	80	113,5	171763,3	1	1,15	1	25,645	5285,84	4596,39	6894,58	6937,00
100	80	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	100	53,5	47704,2	1	1,15	1	25,645	1468,05	1276,56	1914,85	2217,00
100	100	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	100	73,5	90037,5	1	1,15	1	25,645	2770,81	2409,40	3614,11	3572,00
100	120	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	100	93,5	145704,2	1	1,15	1	25,645	4483,90	3899,04	5848,57	6078,00
100	140	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	100	113,5	214704,2	1	1,15	1	25,645	6607,31	5745,48	8618,23	9994,00
120	80	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	120	53,5	57245,0	1	1,15	1	25,645	1761,66	1531,88	2297,81	2610,00
120	100	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	120	73,5	108045,0	1	1,15	1	25,645	3324,98	2891,28	4336,93	4307,00
120	120	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	120	93,5	174845,0	1	1,15	1	25,645	5380,68	4678,85	7018,28	7320,00
120	140	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	120	113,5	257645,0	1	1,15	1	25,645	7928,77	6894,58	10341,87	10307,00
140	80	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	140	53,5	66785,8	1	1,15	1	25,645	2055,27	1787,19	2680,78	2550,00
140	100	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	140	73,5	126052,5	1	1,15	1	25,645	3879,14	3373,16	5059,75	5134,00
140	120	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	140	93,5	203985,8	1	1,15	1	25,645	6277,46	5458,66	8187,99	7940,00
140	140	2000	22,3	12600	3,5	0,65	19,5	26,5	140	113,5	300585,8	1	1,15	1	25,645	9250,23	8043,68	12065,52	11180,00

9.11 A11 - Cálculos analíticos: viga simplesmente apoiada e carga a meio vão, três frentes de fogo.

Geometria da Viga			GL28H			t= 30 Minutos			3 lados de fogo		Sfogo	EC5, 1-2			Resistencia a Flexão Rd	Força Fd	Carga Elastica Pel	Carga Plastica Ppl	Carga Plastica ANSYS
b	d	L	f,0,g,k	E	fv,g,k	Bn	dchar,n	def	bfogo	dfogo		Kmod,fi	Kfi	gM,fi					
mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm/min	mm	mm	mm	mm	mm ³				N/mm ²	N	N	N	N
80	80	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	24	52	10816,0	1	1,15	1	25,65	332,85	289,44	434,15	391,50
80	100	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	24	72	20736,0	1	1,15	1	25,65	638,13	924,83	1387,24	1668,00
80	120	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	24	92	33856,0	1	1,15	1	25,65	1041,88	1509,98	2264,97	2296,00
80	140	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	24	112	50176,0	1	1,15	1	25,65	1544,12	2237,85	3356,77	3866,00
100	80	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	44	52	19829,3	1	1,15	1	25,65	610,23	884,39	1326,58	1502,00
100	100	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	44	72	38016,0	1	1,15	1	25,65	1169,90	1695,51	2543,27	3013,00
100	120	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	44	92	62069,3	1	1,15	1	25,65	1910,12	2768,29	4152,44	4875,00
100	140	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	44	112	91989,3	1	1,15	1	25,65	2830,88	4102,72	6154,09	7330,00
120	80	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	64	52	28842,7	1	1,15	1	25,65	887,60	1286,38	1929,57	1954,00
120	100	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	64	72	55296,0	1	1,15	1	25,65	1701,68	2466,20	3699,30	4270,00
120	120	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	64	92	90282,7	1	1,15	1	25,65	2778,36	4026,61	6039,91	7180,00
120	140	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	64	112	133802,7	1	1,15	1	25,65	4117,64	5967,60	8951,40	9660,00
140	80	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	84	52	37856,0	1	1,15	1	25,65	1164,98	1688,38	2532,57	3027,00
140	100	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	84	72	72576,0	1	1,15	1	25,65	2233,45	3236,89	4855,33	5186,00
140	120	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	84	92	118496,0	1	1,15	1	25,65	3646,60	5284,92	7927,38	9000,00
140	140	2000	22,3	12600	3,5	0,7	21	28	84	112	175616,0	1	1,15	1	25,65	5404,41	7832,47	11748,71	14420,00