

# **EFEITO DO FOGO LOCALIZADO EM UM ESTACIONAMENTO ABERTO**

**Edson Machado e Silva Junior**

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

para obtenção do grau de Mestre em

**Engenharia Industrial**  
**(Ramo da Engenharia Mecânica)**

No âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná

**Julho 2018**

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

# **EFEITO DO FOGO LOCALIZADO EM UM ESTACIONAMENTO ABERTO**

**Edson Machado e Silva Junior**

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

para obtenção do grau de Mestre em

**Engenharia Industrial**

(Ramo da Engenharia Mecânica)

No âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná

Orientador no IPB: Prof. Dr. Paulo Alexandre Gonçalves Piloto  
Coorientador na UTFPR: Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes

**Julho 2018**

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho contou com a ajuda, direta e indiretamente, de muitas pessoas e sem essas pessoas eu não seria capaz de defender uma tese de mestrado fora do meu país de nascença.

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, porque sem ele somos nada, e com Ele temos tudo.

Em segundo lugar gostaria de agradecer a UTFPR pela oportunidade de realizar uma dupla diplomação em Portugal e também quero agradecer ao IPB que me recebeu de braços abertos e me ajudou em tudo para a minha melhor adaptação aqui em Portugal. Estendo meus agradecimentos ao meu orientador, professor Paulo Piloto, por todos os ensinamentos transmitidos a mim, bem como pelo tempo disponibilizado para nossas reuniões semanais e a prontidão em me ajudar sempre que foi preciso. Agradeço também ao meu coorientador, professor Francisco Gomes, que mesmo estando tão longe nunca se pesou em me ajudar da maneira que fosse preciso.

Cabe aqui também o agradecimento a todos os meus professores, desde o ensino fundamental até aqui, ao longo dos meus 16 anos de estudo, porque sem eles eu com certeza não teria feito sequer metade do que eu já fiz aos meus 21 anos de vida.

Quero também agradecer a todos os meus amigos e familiares que sempre me dão apoio em minhas escolhas e suporte em momentos de instabilidade.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta tese a minha família, pois eles sempre estão dispostos a me ajudar no que eu preciso e todos me apoiaram muito quando surgiu a oportunidade de eu fazer um intercâmbio em Portugal, sendo que sem este apoio eu jamais estaria aqui.

Gostaria de fazer uma dedicatória especial ao meu irmão Tiago, que mora comigo há 4 anos e compartilha a mesma profissão que eu. Ele foi uma pessoa muito importante para mim, pois me ajudou muito na minha adaptação quando saí da casa dos meus pais, em minha cidade natal, para estudar em Pato Branco. Meu irmão, muito obrigado por tudo que você fez e ainda faz por mim, saiba que todos os dias eu agradeço por você ser meu irmão e por nós sermos tão amigos.

Dedico também a minha irmã Francini, que posso considerar uma segunda mãe, devido as inúmeras vezes que ela cuidou de mim quando eu era pequeno. Ela sempre preocupada em como eu estou me sentindo, sempre melhorando o meu humor e me ajudando a enfrentar os mais diversos problemas que podem me afetar. Fran, você é a minha irmã mais velha e sabe que é a minha inspiração. Muito obrigado por tudo que você faz por mim.

Para finalizar a seção, dedico esta tese as pessoas mais importantes da minha vida, àqueles que me deram a vida, que me deram educação e me fizeram gente. Obrigado pai e mãe, Edson e Margarida, por todos os sacrifícios que vocês fizeram nas suas vidas para que fosse possível criar 3 filhos no caminho certo em um mundo com tantos desvios. Quero agradecer também, do fundo do meu coração, por vocês tornarem realidade meu sonho de realizar um intercâmbio e por sempre confiarem em mim e em minhas escolhas. Obrigado meus pais por vocês serem assim, e acima de tudo muitíssimo obrigado por serem meus pais.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## **ABSTRACT**

Due to the recent fire events in open car parks and in order to increase the fire safety in this type of the building structures, simple calculation methods should be developed to estimate the thermal effects of a localized fire. This thesis deals with a parametric analysis, using different fire events (different vehicle classes), fire scenarios (different relative position of the vehicle with respect to the main element of the structure and dimensions of the compartment) and section factor of the main supporting element of the structure (dimensions of the beam cross section). The temperature was calculated for each fire scenario, around the beam (gas temperature) and also in the steel beam (steel temperature). The thermal effect on part of the structure was calculated by three different methods: mixed formulation, taking into consideration the Heskestad and Hasemi methods to evaluate the temperature of the gas and also the lumped thermal model for the calculation of the steel temperature; use of Elefir-EN software that just used the Hasemi method in our scenarios; and finally, use of ANSYS Fluent software for computational fluid dynamics (CFD) simulation. By means of the finite volume method the fluid dynamics is calculate and the thermal behaviour of the solid part of the structure is also calculated (the temperature of the concrete slab).

Keywords: Open car parks, localised fire, gas temperature, steel temperature, ANSYS, Elefir-EN, Heskestad method, Hasemi method.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## RESUMO

Devido a recentes incêndios ocasionados em estacionamentos abertos e com o intuito aumentar a segurança neste tipo de estabelecimento, os métodos simplificados de cálculos deveriam ser utilizados para estimar o efeito térmico de um incêndio localizado numa estrutura. Esta tese apresenta uma análise paramétrica de incêndios desenvolvidos em parques de estacionamento abertos, usando diferentes eventos de incêndio (diferentes classes de veículos), cenários de incêndio (diferentes posições relativas do veículo com respeito ao elemento principal da estrutura e as dimensões do compartimento), considerando ainda diferentes fatores de secção do elemento de suporte principal da estrutura (dimensões da secção transversal da viga). A temperatura foi calculada para cada cenário de incêndio, ao redor da viga (temperatura do gás) e também na viga em aço (temperatura do aço). O efeito térmico em parte da estrutura foi calculado por meio de 3 métodos: método simplificado de cálculo com formulações mistas, levando em consideração os métodos de Heskestad e Hasemi para avaliar a temperatura do gás próxima a viga e o modelo térmico de capacitância para calcular a temperatura na viga; método simplificado com utilização do programa Elefir-EN, fazendo uso unicamente do método de Hasemi; e, por fim o método avançado de cálculo, usando o programa ANSYS Fluent, com a utilização do método dos volumes finitos, por meio de simulações computacionais de dinâmica de fluidos (CFD) e simulações térmicas em sólidos. Estas simulações permitem ainda obter a temperatura do concreto na laje do parque de estacionamento.

Palavras-chave: Parques de estacionamentos abertos, incêndio localizado, temperatura do gás, temperatura do aço, ANSYS, Elefir-EN, método de Heskestad, método de Hasemi.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
DEDICATÓRIA.....	iii
ABSTRACT .....	v
RESUMO .....	vii
NOMENCLATURA.....	xxiii
1- INTRODUÇÃO .....	1
1.1- Fogo.....	1
1.2- Transferência de calor envolvida em incêndios .....	2
1.3- Definição de cenários de incêndio .....	4
1.4- Estado da arte .....	4
1.5- Testes de incêndio em veículos.....	7
1.6- Testes de incêndio em parques de estacionamento aberto .....	8
1.7- Objetivo da tese.....	12
1.8- Motivação da tese.....	12
1.9- Apresentação da tese .....	12
2- INCÊNDIOS EM ESTACIONAMENTOS ABERTOS .....	15
2.1- Eventos históricos .....	15
2.1.1- Haarlem (Holanda).....	15
2.1.2- Aeroporto Stanstead (Reino Unido).....	16
2.1.3- Gretzenbach (Suíça).....	17
2.1.4- Monica Wills House (Inglaterra) .....	17
2.1.4- Liverpool Echo Arena (Inglaterra).....	18
2.2- Requisitos de incêndio em diferentes países .....	19
2.3- Estatísticas de incêndio em estacionamentos abertos .....	20
3- CENÁRIOS DE INCÊNDIO EM ESTACIONAMENTO ABERTO .....	23
3.1- Compartimento de incêndio .....	23

3.1.1- Compartimento utilizado 1 .....	23
3.1.2- Compartimento utilizado 2.....	23
3.1.3- Fases do fogo em um compartimento .....	24
3.2- Cenários de incêndio mais significativos .....	25
3.2.1- Cenários de incêndio analisados .....	27
3.3- Classificação dos automóveis .....	28
3.4- Taxa de liberação de calor de automóveis .....	29
3.5- Incêndios localizados .....	31
3.6.1- Modelo de Heskestad .....	32
3.6.2- Modelo de Hasemi .....	33
3.6.3- Área do incêndio .....	38
4- ANÁLISE TÉRMICA - MÉTODO DO CÁLCULO SIMPLIFICADO.....	41
4.1- Propriedades termofísicas dos materiais .....	42
4.1.1- Aço estrutural .....	43
4.1.2- Concreto .....	45
4.1.3- Ar.....	48
4.2- Cálculo da temperatura .....	49
4.2.1- Posição relativa do veículo.....	50
4.2.2- Seção transversal da viga .....	50
4.2.3- Desenvolvimento da temperatura na viga .....	51
4.2.4- Desenvolvimento da temperatura na viga de aço IPE500.....	52
4.2.5- Desenvolvimento da temperatura na viga de aço IPE600.....	56
4.2.6- Discussão dos resultados obtidos pelo cálculo simplificado.....	59
5- ANÁLISE TÉRMICA – ELEFIR-EN .....	63
5.1- Apresentação do programa Elefir-EN .....	63
5.2- Condições utilizadas no programa Elefir-EN.....	64
5.3- Resultados apresentados com a utilização do programa Elefir-EN .....	64

5.3.1- Viga em aço com perfil IPE500 .....	64
5.3.2- Viga em aço com perfil IPE600 .....	67
5.3.3- Discussão dos resultados obtidos através do programa Elefir-EN.....	70
6- ANÁLISE TÉRMICA - MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO .....	73
6.1- Equações a serem resolvidas pelos modelos .....	74
6.2- Modelo utilizado .....	77
6.2.1- Condições de contorno do programa ANSYS Fluent .....	78
6.2.2- Incêndio localizado do veículo classe 3 .....	79
6.2.3- Teste de convergência da solução .....	79
6.2.4- Temperatura no perfil da viga em aço IPE500.....	85
6.2.5- Temperatura no perfil da viga em aço IPE600.....	86
6.2.6- Temperatura no concreto.....	88
6.2.7- Discussão dos resultados obtidos no ANSYS .....	90
6.3- Comparação de resultados.....	91
7- CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	101
ANEXO A: RESULTADOS PARA O MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO	107
ANEXO B: RESULTADOS PARA O PROGRAMA ELEFIR-EN.....	147
ANEXO C: RESULTADOS PARA O MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO.....	183

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Triângulo do fogo [3].....	1
Figura 2 - Esquemático do calor sendo transferido de um incêndio para uma estrutura exposta próxima [2] .....	2
Figura 3 - Configuração do teste com a utilização de um calorímetro de cone [19].....	8
Figura 4 - Teste com a utilização do calorímetro de cone em execução [19]. .....	8
Figura 5 - Imagem do teste realizado por Butcher (1968) [22].....	9
Figura 8 - Estacionamento de vários andares utilizado para o teste de Gewain (1973) [22]. .....	9
Figura 6 - Estacionamento aberto utilizado por Bennetts et al (1985) [22]. .....	10
Figura 7 - Cenários de incêndio utilizados nos testes realizados pela CTICM [22]. ....	11
Figura 9 - Incêndio num parque de estacionamento subterrâneo em Haarlem [30].....	16
Figura 10 - Incêndio no parque de estacionamento do aeroporto de Stanstead [31].....	16
Figura 11 – Incêndio ocasionado em Gretzenbach num parque de estacionamento subterrâneo localizado num complexo de apartamentos [33]. .....	17
Figura 12 - Incêndio no parque de estacionamento do edifício Monica Wills House [34]. .....	18
Figura 13 - Foto tirada do veículo que supostamente iniciou o incêndio na Liverpool Echo Arena [36].....	18
Figura 14 – Danos estruturais ao estacionamento provocados pelo incêndio [35]. .....	19
Figura 15 - Número de veículos envolvido nos incêndios em estacionamentos abertos [19]. .....	21
Figura 16 - Classificação dos veículos queimados [19]. .....	22
Figura 17 - Tempo de extinção dos incêndios [19]. .....	22
Figura 18 - Dimensões do compartimento de incêndio 1 utilizado (cotas em metros). .	23
Figura 19 - Dimensões do compartimento de incêndio 2 utilizado (cotas em metros). .	24
Figura 20 – Variação da temperatura com o tempo, destacando as fases do incêndio...	24
Figura 21 - Cenários de incêndio [42]. .....	27
Figura 22 - Cenário de incêndio utilizado para ambos os compartimentos (cotas em metros).....	28
Figura 23 - Curva de referência e os valores reais obtidos no teste de número 7 [9].....	30
Figura 24 - Curvas HRR para as diversas classes de automóveis .....	31
Figura 25 - Modelo de incêndio localizado com as chamas sem tocar o teto. ....	33

Figura 26 - Modelo de incêndio localizado com as chamas tocando o teto. ....	33
Figura 27 - Ilustração do equilíbrio térmico existente entre o gás e o elemento imaginário. .....	35
Figura 28 – Representação do método de Newton Raphson. ....	36
Figura 29 - Diâmetro do incêndio variando com o tempo de incêndio. ....	39
Figura 30 - Diâmetro máximo de um incêndio de um veículo [12]. ....	40
Figura 31 - Altura da chama com relação ao tempo de incêndio. ....	41
Figura 32 – Calor específico do aço carbono em função da temperatura.....	43
Figura 33 – Condutividade térmica do aço carbono em função da temperatura. ....	44
Figura 34 – Densidade do aço carbono em função da temperatura. ....	45
Figura 35 – Calor específico do concreto em função da temperatura. ....	46
Figura 36 – Condutividade térmica do concreto em função da temperatura.....	47
Figura 37 - Densidade do concreto em função da temperatura. ....	48
Figura 38 - Calor específico do ar em função da temperatura.....	48
Figura 39 - Condutividade térmica do ar em função da temperatura. ....	49
Figura 40 - Densidade do ar em função da temperatura.....	49
Figura 41 – Posições relativas do veículo com relação a viga secundária. ....	50
Figura 42 – Secção transversal de uma viga em I com suas dimensões principais destacadas. ....	51
Figura 43 - Temperatura dos gases e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 1, R=0). ....	53
Figura 44 - Temperatura dos gases e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 2, R=0). ....	54
Figura 45 - Temperatura dos gases da viga em aço (compartimento 1).....	55
Figura 46 - Temperatura dos gases e da viga em aço (compartimento 2). ....	56
Figura 47 - Temperatura dos gases e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 1, R=0). ....	57
Figura 48 - Temperatura dos gases e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 2, R=0). ....	57
Figura 49 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço (compartimento 1). .....	58
Figura 50 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço (compartimento 2). .....	59
Figura 51 - Tela de abertura do programa Elefir-EN. ....	64

Figura 52 - Temperatura da chama e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 1, R=0). .....	65
Figura 53 - Temperatura da chama e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 2, R=0). .....	65
Figura 54 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço (compartimento 1). .....	66
Figura 55 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço (compartimento 2). .....	67
Figura 56 - Temperatura da chama e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 1, R=0). .....	68
Figura 57 - Temperatura da chama e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 2, R=0). .....	68
Figura 58 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço (compartimento 1). .....	69
Figura 59 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço (compartimento 2). .....	70
Figura 60 - Modelo 2D utilizado: (a) modelo idealizado; (b) modelo ANSYS. ....	78
Figura 61 - Condições de contorno utilizadas no programa para ambos os compartimentos (cotas em metros).....	78
Figura 62 - (a) Temperatura do incêndio; (b) Velocidade do incêndio. ....	79
Figura 63 - Pontos analisados para o teste de convergência.....	80
Figura 64 - Resultado para o teste de convergência. ....	81
Figura 65 - Malha utilizada para as simulações: (a) geometria completa; (b) ampliação no refinamento utilizado nos limites com ênfase para o elemento de viga. ....	82
Figura 66 – Campo de temperatura considerando R=0, compartimento 1.....	82
Figura 67 - Campo de temperatura considerando R=2, compartimento 1. ....	83
Figura 68 - Campo de temperatura considerando R=5, compartimento. ....	83
Figura 69 - Posições escolhidas para determinação da temperatura da viga e para determinação da temperatura dos gases: (a) viga em aço R=5; (b) viga em aço e gás para R=5. (c) gás para R=0; (d) gás para R=1,2,3,4.....	84
Figura 70 - Evolução da temperatura para o aço e para os gases obtidas por meio da simulação CFD. ....	85
Figura 71 - Evolução da temperatura para o aço e para os gases, obtidas por meio da simulação CFD. ....	86

Figura 72 - Temperaturas para o aço e o ar obtidas por meio da simulação CFD, compartimento 1.....	87
Figura 73 - Temperaturas para o aço e o ar obtidas por meio da simulação CFD, compartimento 2.....	88
Figura 74 - Posições superiores e inferiores em estudo no concreto.....	89
Figura 75 - Temperatura do concreto para os pontos superiores e inferiores (cenários considerando todas as posições radiais). ....	90
Figura 76 - Máxima temperatura para o aço: método do cálculo simplificado (MS) e Elefir-EN para ambos os compartimentos C1 e C2.....	92
Figura 77 - Máxima temperatura do gás, de acordo com a classe de veículo e posição relativa da viga R=0, para ambos os compartimentos C1 e C2: MS – método simplificado de cálculo.....	93
Figura 78 – Máxima temperatura do gás, de acordo com a classe de veículo e a posição relativa da viga, para ambos os compartimentos C1 e C2. $X - CiY$ , sendo: $X$ o tipo de evento (classe de veículo), $i$ o número do compartimento e $Y$ o tipo de método utilizado que pode ser: S – método simplificado de cálculo, E – Elefir-EN. ....	94
Figura 79 - Máxima temperatura do aço, de acordo com a classe de veículo e a posição relativa da viga, para ambos os compartimentos C1 e C2. $X - CiY$ , sendo: $X$ o tipo de evento (classe do veículo), $i$ o número do compartimento e $Y$ o tipo de método utilizado que pode ser: S – método simplificado de cálculo, E – Elefir-EN. ....	95
Figura 80 – Temperatura máxima na viga em aço, considerando o incêndio de um veículo classe 3 para ambos compartimentos C1 e C2. Métodos de solução: – método simplificado de cálculo (MS e Elefir-EN), método avançado de cálculo (ANSYS).....	96
Figura 81 - Máxima temperatura para o aço para os três métodos de resolução, considerando a queima de um veículo da classe 3, todos os perfis de viga empregados e ambos os compartimentos C1 e C2. ....	97
Figura 82 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	108
Figura 83 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	109
Figura 84 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	110
Figura 85 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	111
Figura 86 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	112
Figura 87 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	113
Figura 88 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	114
Figura 89 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	115

Figura 90 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	116
Figura 91 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	117
Figura 92 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	119
Figura 93 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	120
Figura 94 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	121
Figura 95 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	122
Figura 96 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	123
Figura 97 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	124
Figura 98 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	125
Figura 99 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	126
Figura 100 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	127
Figura 101 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	128
Figura 102 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	130
Figura 103 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	131
Figura 104 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	132
Figura 105 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	133
Figura 106 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	134
Figura 107 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	135
Figura 108 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	137
Figura 109 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	138
Figura 110 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	139
Figura 111 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	140
Figura 112 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	141
Figura 113 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	142
Figura 114 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	143
Figura 115 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	144
Figura 116 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	145
Figura 117 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	146
Figura 118 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	148
Figura 119 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	148
Figura 120 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	149
Figura 121 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	150
Figura 122 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	151
Figura 123 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	152

Figura 124 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	153
Figura 125 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	154
Figura 126 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	155
Figura 127 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	156
Figura 128 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	157
Figura 129 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	158
Figura 130 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	159
Figura 131 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	160
Figura 132 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	161
Figura 133 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	162
Figura 134 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	163
Figura 135 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	164
Figura 136 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	165
Figura 137 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	166
Figura 138 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	167
Figura 139 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	168
Figura 140 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	169
Figura 141 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	170
Figura 142 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	171
Figura 143 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	172
Figura 144 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	173
Figura 145 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	174
Figura 146 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	175
Figura 147 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	176
Figura 148 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	177
Figura 149 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	178
Figura 150 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	179
Figura 151 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	180
Figura 152 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	181
Figura 153 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	182
Figura 154 - Campo de velocidade para R=0 e C1. ....	184
Figura 155 - Campo de velocidade para R=2 e C1. ....	185
Figura 156 - Campo de velocidade para R=5 e C1. ....	185
Figura 157 - Campo de temperatura para R=0 e C2.....	186

Figura 158 - Campo de temperatura para R=2 e C2.....	186
Figura 159 - Campo de temperatura para R=5 e C2.....	187
Figura 160 - Campo de velocidade para R=0 e C2. ....	187
Figura 161 - Campo de temperatura para R=2 e C2.....	188
Figura 162 - Campo de velocidade para R=5 e C2. ....	188
Figura 163 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	190
Figura 164 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	191
Figura 165 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	192
Figura 166 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	193
Figura 167 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	194
Figura 168 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.....	195

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Teste de incêndio em vários países [adaptada] [22].....	11
Tabela 2 - Requisitos de incêndio para estacionamentos abertos em diferentes países [adaptada] [12].....	19
Tabela 3 – Veículos de alguns fabricantes para as diferentes classes de veículos e a energia teórica de queima das classes [6] [adaptada].....	29
Tabela 4 - Pontos utilizados na curva de referência para incêndio de um automóvel [9] [adaptada]. ....	30
Tabela 5 - Classificação dos automóveis segundo potencial de queima. ....	31
Tabela 6 - Iterações realizadas para encontrar a temperatura do gás ao entorno da viga com a utilização do Método de Newton Raphson para o tempo de 25 minutos considerando um veículo classe 3. ....	37
Tabela 7 - Períodos de utilização dos métodos de Heskestad e Hasemi para as diferentes classes de veículos considerando o compartimento de incêndio 1.....	42
Tabela 8 - Períodos de utilização dos métodos de Heskestad e Hasemi para as diferentes classes de veículos considerando o compartimento de incêndio 2.....	42
Tabela 9 – Vigas escolhidas e suas dimensões principais. ....	51
Tabela 10 - Valores limites dos parâmetros iterados.....	77
Tabela 11 - Simulações realizadas para o teste de convergência. ....	80
Tabela 12 - Temperaturas máximas no aço para C1 e C2 no teste de convergência.....	81
Tabela 13 - Temperaturas máximas encontradas para a viga em aço: veículo classe 3, R=0 e C1.....	98
Tabela 14 - Temperaturas máximas encontradas para a viga em aço: veículo classe 3, R=0 e C2.....	98
Tabela 15 - Temperaturas máximas encontradas para o gás: veículo classe 3, R=0 para C1 e C2. ....	98

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## NOMENCLATURA

### Letras do alfabeto latino minúsculas

$c_a$	Calor específico do aço [ $J/kg K$ ]
$c_c$	Calor específico do concreto [ $J/kg K$ ]
$c_g$	Calor específico do ar [ $J/kg K$ ]
$h$	Coeficiente convectivo [ $W/m^2K$ ]
$\dot{h}$	Fluxo de calor [ $kW/m^2$ ]
$\dot{h}_{liq}$	Fluxo de calor líquido total na superfície exposta ao fogo [ $kW/m^2$ ]
$k_{sh}$	Fator de correção para efeito sombra
$z$	Altura ao longo do eixo da chama [ $m$ ]
$z_0$	Origem virtual do incêndio [ $m$ ]

### Letras do alfabeto latino maiúsculas

$A$	Área do incêndio [ $m^2$ ]
$A_m$	Área superficial do membro por unidade de comprimento [ $m^2/m$ ]
$D$	Diâmetro do incêndio [ $m$ ]
$H$	Distância entre a fonte de incêndio e o teto [ $m$ ]
$L_f$	Comprimento da chama [ $m$ ]
$L_h$	Comprimento horizontal da chama [ $m$ ]
$Q$	Taxa de transferência de calor (HRR) [ $kW$ ]
$Q_c$	Taxa de transferência de calor convectiva [ $kW$ ]
$R$	Distância horizontal do eixo da chama até o ponto analisado [ $m$ ]
$Q_H^*$	Taxa de transferência de calor não dimensional
$Q_D^*$	Taxa de transferência de calor relacionada ao diâmetro do incêndio
$V$	Volume do membro por unidade de comprimento [ $m^3/m$ ]

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

$\alpha$	Absortividade da superfície
$\alpha_c$	Coefficiente de transferência de calor por convecção [ $W/m^2K$ ]
$\varepsilon$	Emissividade
$\varepsilon_f$	Emissividade do fogo
$\varepsilon_m$	Emissividade na superfície do elemento exposto ao fogo
$\theta_a$	Temperatura do aço [ $^{\circ}C$ ]
$\theta_c$	Temperatura do concreto [ $^{\circ}C$ ]
$\theta_g$	Temperatura do gás na vizinhança do elemento exposto ao fogo [ $^{\circ}C$ ]
$\theta_m$	Temperatura na superfície do elemento exposto ao fogo [ $^{\circ}C$ ]
$\lambda_a$	Condutividade térmica do aço [ $W/m K$ ]
$\lambda_c$	Condutividade térmica do concreto [ $W/m K$ ]
$\lambda_g$	Condutividade térmica do ar [ $W/m K$ ]
$\rho_a$	Densidade do aço [ $kg/m^3$ ]
$\rho_c$	Densidade do concreto [ $kg/m^3$ ]
$\rho_g$	Densidade do ar [ $kg/m^3$ ]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann [ $5,670 * 10^{-8} W/m^2K^4$ ]

### **Letra do alfabeto grego maiúscula**

$\phi$	Fator de configuração
--------	-----------------------

## 1- INTRODUÇÃO

Os incêndios causam diversos problemas a saúde humana, assim como, dependendo do tipo de incêndio, pode ocasionar a perda de vidas humanas e a perda de bens.

Dos diversos tipos de incêndio existentes, vale a pena destacar aqueles que ocorrem em parques de estacionamento, pois esses locais geralmente possuem muito material combustível proveniente dos veículos, sendo este tipo de construção cada vez mais comum nos dias de hoje. Devem ser tomados os devidos cuidados com estes tipos de incêndio, pois eles possuem diversos fatores que os tornam ainda mais severos.

Os fatores que intensificam a severidade dos incêndios em parques de estacionamentos são: a grande taxa de liberação de calor (HRR) presente nos veículos, taxa esta que com o evoluir dos tempos tem aumentado bastante [1], sendo que alguns anos atrás o HRR dos veículos era cerca de 4 MW e hoje em dia este valor já supera 8 MW; a quantidade de combustível presente nos automóveis aumentou muito, saltando de 400 MJ para 4000 MJ. Os incêndios de hoje, devido ao aumento dos materiais inflamáveis em veículos e também devido ao aumento na quantidade de combustível, tem potencial para causar danos estruturais, no aço exposto ou concreto, devido as altas temperaturas que suas chamas podem desenvolver [2].

### 1.1- Fogo

Define-se fogo como sendo a produção simultânea de calor, luz e gases resultantes da combustão de substâncias combustíveis. O fogo é sustentado por três elementos básicos, sendo eles: calor, combustível e comburente (gás oxigênio), os quais podem ser observados no triângulo do fogo destacado na Figura 1.



Figura 1 - Triângulo do fogo [3].

Cada um dos elementos possui uma função, e caso algum deles seja retirado do fogo, este se apaga. O calor possui a função de aumentar a temperatura do combustível para que seja disponibilizado ao meio, vapor suficiente para que ocorra a ignição. O comburente ( $O_2$  – gás oxigênio) é o responsável por permitir que a combustão ocorra. E o combustível é o elemento capaz de queimar na presença do oxigênio e de uma determinada energia de ativação [4].

Para que o fogo se apague basta retirar um dos elementos do triângulo do fogo. Isso pode ser feito: retirando calor do fogo (resfriando o fogo); retirando o oxigênio do fogo (abafando o fogo); ou, retirando o combustível do fogo (retirar o material que está em combustão).

## 1.2- Transferência de calor envolvida em incêndios

O calor pode ser transferido para uma estrutura em situação de incêndio por meio das chamas e dos gases quentes presentes no fogo. Esta transferência de calor se dá pelos processos de radiação e convecção, conforme observa-se na Figura 2, sendo assim o fluxo total de calor em um incêndio ( $q''_{tot}$ ) é definido como sendo [5]:

$$q''_{tot} = q''_{rad} + q''_{conv} [W * m^{-2}] \quad (1)$$

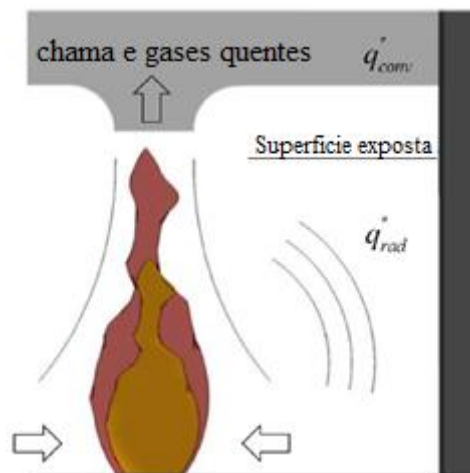


Figura 2 - Esquemático do calor sendo transferido de um incêndio para uma estrutura exposta próxima [2]

O fluxo de calor radiativo pode ser obtido através do balanço de calor absorvido e emitido por esta superfície, podendo ser representado pela seguinte equação:

$$q''_{rad} = q''_{r,abs} - q''_{r,emi} [W * m^{-2}] \quad (2)$$

A energia radiativa absorvida pela superfície exposta ao fogo pode ser expressada como parte da energia incidente radiativa ( $e''_{r,inc}$ ), ou seja, a energia absorvida pela superfície será a energia incidente multiplicada pelo coeficiente de absorção da superfície ( $\alpha$ ), conforme equação abaixo. A energia radiativa incidida tem que ser igual a energia radiativa absorvida mais a refletida. Neste estudo não falaremos sobre a energia radiativa refletida ( $e''_{r,ref}$ ), pois estamos interessados em saber o calor que chega a superfície e não o que a deixa [5].

$$e''_{r,abs} = \alpha * e''_{r,inc} \quad (3)$$

Seguindo a lei de Stefan-Boltzmann o poder emissivo total de um corpo negro ( $E_{cn}$ ) é definido como sendo [6]:

$$E_{cn} = \sigma * T^4 \quad (4)$$

Onde a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma$ ) é igual a

$$\sigma = 5,670 * 10^{-8} W * (m^2 * K^4)^{-1}$$

Escrevendo a equação de Stefan-Boltzmann (4) com relação a energia emitida ( $e''_{r,emi}$ ) temos:

$$e''_{r,emi} = \varepsilon * \sigma * T_s^4 \quad (5)$$

Onde  $\varepsilon$  representa a emissividade e  $T_s$  a temperatura da superfície exposta que deve ser trabalhada em unidades de valor absoluto, em Kelvin ( $K$ ).

Unindo as equações (3) e (5), e levando em consideração que segundo a Lei de Kirchoff a absorvidade ( $\alpha$ ) e a emissividade ( $\varepsilon$ ) da superfície são iguais, conseguimos obter uma relação para encontrar o fluxo de calor radiativo total ( $q''_{rad}$ ), conforme equação (6) [5, 6]:

$$q''_{rad} = \varepsilon * (e''_{r,inc} - \sigma * T_s^4) \quad (6)$$

O fluxo de calor convectivo pode ser definido segundo a lei do resfriamento de Newton como sendo [5, 6]:

$$q''_{conv} = h * (T_g - T_s) \quad (7)$$

Neste caso:  $T_g$  será a temperatura do gás ao entorno da superfície exposta, enquanto  $T_s$  será a temperatura da superfície e  $h$  será o coeficiente convectivo.

Dessa forma podemos reescrever a equação (1), com base nas equações (6) e (7).

$$q''_{tot} = \varepsilon * (e''_{r,inc} - \sigma * T_s^4) + h * (T_g - T_s) \quad (8)$$

Por meio da equação (8) é possível calcularmos o fluxo total de calor em um incêndio.

### 1.3- Definição de cenários de incêndio

O cenário de incêndio define as condições e características do ambiente em que o incêndio ocorre. Ele depende de diversos fatores como: classes dos veículos envolvidos (evento), posição relativa do veículo com relação ao elemento principal da estrutura (viga), dimensões do compartimento de incêndio e fator de secção do elemento principal de suporte da laje. Neste trabalho serão apresentados vários eventos e testados vários cenários de incêndio.

### 1.4- Estado da arte

Em julho de 1968, na Grã-Bretanha, Butcher [7] realizou 3 testes de incêndio em automóveis em um edifício com estrutura em aço e um teto isolado, com altura do compartimento de aproximadamente 2,1 metros acima do piso. Nove carros foram utilizados, dispostos em uma matriz 3x3. O carro que ocupava a posição central foi incendiado, mas o fogo não se alastrou para nenhum dos veículos que ocupavam posições adjacentes. As máximas temperaturas medidas foram de 840 °C no ar, 360 °C na coluna

de aço e 275 °C na viga de aço. Nestes testes os danos sofridos na estrutura do estacionamento não foram críticos [7].

Em 1970 a Companhia Siderúrgica Japonesa [8] conduziu 5 testes de incêndio variando a ventilação do ambiente, obtendo como resultado uma temperatura no aço desprotegido não superior a 245 °C [9].

Em 1973, Gewain [10] realizou um teste de incêndio à escala real num parque de estacionamento aberto de vários andares com estrutura em aço desprotegida e lajes de concreto. Três carros foram utilizados no teste, sendo o veículo central incendiado. A máxima temperatura do ar foi de 432 °C (acima do para-brisas, após 11 minutos de incêndio). A temperatura do ar para as demais partes do edifício foi inferior a 204 °C e a máxima temperatura encontrada no aço foi de 226 °C. A deflexão e a deformação dos elementos foram nulas após o resfriamento. O fogo não se propagou para nenhum dos carros que ocupavam posições adjacentes durante os 50 minutos de ensaio [10].

Em maio de 1985, na Austrália [11] foram realizados dois testes de incêndio em estacionamento aberto, construído de estrutura em aço desprotegido. A estrutura utilizava os elementos mais leves que podiam ser utilizados em parques de estacionamentos. Os testes duraram cerca de 70 minutos, sendo que o primeiro teste contou com a combustão de 2 veículos e o segundo teste com a queima de 3 veículos. De maneira geral, o incêndio demorou cerca de 8 minutos para atingir o segundo veículo e 35 minutos para atingir o terceiro. Outra conclusão retirada destes ensaios foi a de que um incêndio em estacionamento aberto não leva ao colapso da estrutura do estacionamento, mesmo se esta for desprotegida. Concluíram também que dificilmente um incêndio que comece num veículo irá envolver mais do que dois veículos até a chegada dos bombeiros. Estes testes resultaram em uma temperatura máxima na viga de 340 °C [11, 12].

Em 1991, o centro de pesquisa VTT (*Technical Research Centre of Finland Ltd*) realizou os primeiros estudos sobre taxa de transferência de calor (HRR) dos automóveis [13, 14]. Mais recentemente, já no século XXI, o HRR dos veículos voltou a ser estudado pelo *Centre d'Études et Recherches des Charbonnages de France* (CERCHAR) [15, 9].

Em 1993, de acordo com a recomendação da convenção Europeia para construção em Aço (ECCS) [12], o tempo de propagação do fogo de um veículo para o outro deve ser assumido como sendo de 15 minutos.

Em 1995 e 1996, o centro de pesquisa CTICM (*Centre Technique Industriel De La Construction Metallique*) realizou 9 testes de incêndio em veículos. Dos 6 primeiros testes resultou a conclusão de que com o passar dos anos os automóveis obtiveram um

aumento do potencial energético [16] e dos 3 últimos testes resultou a curva de segurança de referência para o incêndio localizado de um veículo, realizada sobretudo com base no teste de número 7 que utilizou um veículo de classe 3 [9].

Em 1999, Schleich et al. [9] determinaram experimentalmente, através de seus testes, que um incêndio demora cerca de 12 minutos para se propagar de um veículo a outro, assim, um terceiro carro pode iniciar a combustão 24 minutos após o primeiro se incendiar.

Em 2000, no Japão [17, 18] foi realizado um teste de incêndio em larga escala em um estacionamento de 4 andares, construído com estrutura de aço desprotegido e lajes de concreto. Neste teste foi incendiando um veículo a partir do qual o fogo se alastrou para os demais, um a um. As temperaturas na viga próxima ao veículo incendiado ficaram próximas a 700 °C, a estrutura sofreu pouca deformação embora tenha atingido o regime plástico devido as altas temperaturas.

Estatísticas do projeto de pesquisa realizado em 2002 por Joyeux et al. [19] dizem que aproximadamente 98% dos incêndios são restritos a menos de 4 carros, 4 carros queimaram em apenas 2 casos dos estudados, enquanto 1 incêndio envolveu 5 carros e 2 incêndios envolveram 7 carros.

Em 2007 um estudo neozelandês [20] revelou que em, aproximadamente, 97% dos incêndios há apenas um carro envolvido.

Em 2010, o centro de pesquisa de construção (BRE) [21] desenvolveu um projeto para adquirir informações sobre a natureza dos incêndios envolvendo o design atual dos estacionamentos, culminando em alcançar futuras estratégias de segurança para as construções de estacionamentos. O estudo reportou 3096 incêndios durante 12 anos, resultando que 51% dos incêndios analisados começaram com a ignição de um veículo; e na maior parte destes casos, o incêndio não se espalhou para outros automóveis [21].

Em 2011, Collier [2] realizou simulações de incêndio envolvendo carros contemporâneos e sistemas de empilhamento, por meio da utilização de diversas modelagens de incêndio em estacionamentos (exposições paramétricas ao fogo e utilizando modelagem de diferenças finitas para os elementos das estruturas, modelo de zonas usando BRANZFIRE e simulação CFD usando FDS). Por meio dessas modelagens concluiu que o fogo pode se espalhar tanto verticalmente (sistema de empilhamento) como horizontalmente em veículos novos (maior potencial energético de queima). Concluíram ainda que utilizando material de proteção para os elementos estruturais irá reduzir o aumento de temperatura; ainda que, os sistemas de ventilação e extração de

gases possuam efeito limitado em incêndios em parques de estacionamento fechados, embora sejam necessários para retirar os gases de exaustão dos automóveis [2].

### **1.5- Testes de incêndio em veículos**

Testes de incêndios em automóveis foram estudados experimentalmente em diversos países do mundo [22]. Destes estudos vale a pena destacar:

Shipp e Spearpoint (1995) [14] realizaram dois testes calorimétricos em escala real com veículos de passageiros com o intuito de obter informações das consequências do incêndio de um automóvel em um trem de transporte no *Channel Tunnel (Eurotunnel)*, localizado no Estreito de Dover, sob o Canal da Mancha, que liga a França e a Inglaterra [22].

Schleich et al [9], Kruppa et al [19] pelos testes realizados na CTICM. Em 1995, foram realizados testes de incêndio em veículos pelo laboratório CTICM, França. Realizaram-se 10 testes de incêndio com a utilização de 18 carros no total, dos quais 3 testes foram realizados em um estacionamento real feito com estrutura de aço desprotegido e lajes de concreto. Para se conseguir mais informação sobre as características dos incêndios localizados dos veículos utilizados nos testes, o laboratório CTICM realizou mais 2 testes sobre o calorímetro de cone, cuja configuração pode ser observada nas: Figura 3 e Figura 4. O veículo testado foi da classe 3, um Peugeot 406 [19].

Nos testes com a utilização do calorímetro de cone foi possível determinar as concentrações de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $CO$ , bem como, as medições da taxa do fluxo de massa no tubo de exaustão, possibilitando calcular a taxa de liberação de calor (HRR) de um veículo em chamas, através da relação do consumo de oxigênio [19].

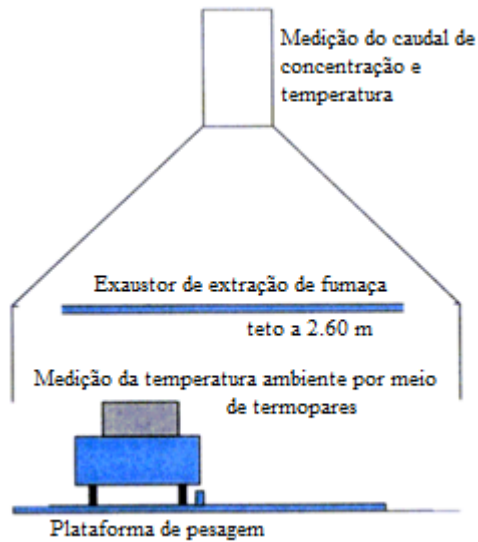


Figura 3 - Configuração do teste com a utilização de um calorímetro de cone [19].



Figura 4 - Teste com a utilização do calorímetro de cone em execução [19].

Inganson (2001) [23] e Shipp (2002) [24] realizaram testes com os mais diversos tipos de veículos para medição da taxa de transferência de calor (HRR) de cada veículo. As curvas HRR de Inganson foram realizadas para a condição de vento em um túnel [22].

Outros testes de incêndios em veículos foram também realizados por: Mangs e Keshi-Rahkonen (1994) [25], Steinert (2000) [26], Stroup et al (2001) [27].

### 1.6- Testes de incêndio em parques de estacionamento aberto

Em 1968, Butcher et al [7] realizaram testes de incêndio em uma estrutura especial construída de andaimes com um teto isolado 2,1 metros acima do chão. Os testes foram realizados com o intuito de mostrar como o fogo se desenvolve e se alastra num parque de estacionamento aberto. Nove carros foram utilizados, dispostos em uma matriz 3x3, com espaços paralelos entre eles variando de 0,75 a 1,20 m. O carro que ocupava a posição central foi incendiado, mas o fogo não se alastrou para nenhum dos veículos que ocupavam posições adjacentes. A temperatura máxima medida foi de 840 °C no ar e 275 °C na viga de aço. Nestes testes os danos sofridos na estrutura do estacionamento não foram críticos [7]. Na Figura 5 se encontra uma imagem feita de um dos testes realizados.



Figura 5 - Imagem do teste realizado por Butcher (1968) [22].

Em 1970 a companhia japonesa de aço (*Nippon Steel*) [8] realizou 5 testes de incêndio em um estacionamento com estrutura em aço, obtendo como máxima temperatura na viga em aço de 245 °C [22].

Na Pensilvânia (EUA), em 1973, Gewain [10] realizou um teste de incêndio em escala real em um estacionamento de vários andares, ver Figura 6, construído de vigas em aço desprotegidas e lajes de concreto. Foram utilizados 3 veículos lado a lado, sendo incendiado o veículo da posição central, obtendo como temperatura máxima na viga de 226 °C e no ar de 432 °C. Não foi verificado qualquer deslocamento e deformação nos elementos da estrutura após resfriamento e o incêndio não se propagou para nenhum dos veículos adjacentes nos 50 minutos de teste [22].



Figura 6 - Estacionamento de vários andares utilizado para o teste de Gewain (1973) [22].

Em 1985, Bennetts et al. [11] realizaram, na Austrália, dois testes em um estacionamento aberto de dois andares, conforme se representa na Figura 7, constituído de vigas em aço desprotegido e com cargas concentradas no primeiro piso. Para os testes

foram considerados 5 veículos [12]. Para o primeiro teste, o incêndio não se espalhou para nenhum veículo adjacente e a temperatura máxima medida para o aço foi de 285 °C. Para o segundo teste foram utilizados 3 veículos, com ignição no veículo central, sendo que o fogo se espalhou para os veículos vizinhos nos tempos 14 e 35 minutos após o início do incêndio; neste caso a máxima temperatura na viga em aço foi de 340 °C [22]. Os testes concluíram que dificilmente num incêndio de um parque de estacionamento mais de 2 carros estarão envolvidos, pois os bombeiros chegariam antes do fogo se propagar para outros veículos. Concluíram ainda que a segurança estrutural está sempre garantida, mesmo utilizando vigas desprotegidas [22].

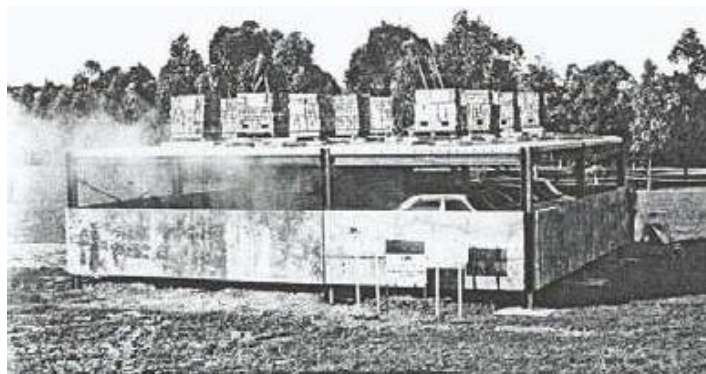


Figura 7 - Estacionamento aberto utilizado por Bennetts et al (1985) [22].

Em 1995, o CTICM realizou 3 testes de incêndio em veículos, estacionados num parque de estacionamento real. O edifício era feito com estrutura em aço desprotegido e laje de concreto. O primeiro teste foi um teste preliminar com a utilização de 3 carros estacionados lado a lado, com o veículo central incendiado. O segundo teste foi de demonstração, com 3 carros dispostos de maneira semelhante ao primeiro teste, com o veículo central incendiado, com a diferença de possuir maior ação do vento. O terceiro teste permitiu avaliar a propagação do incêndio, realizado com 2 veículos estacionados de frente para a traseira do outro. Na Figura 8 estão representados os cenários de incêndios utilizados para os testes 1, 2 e 3.

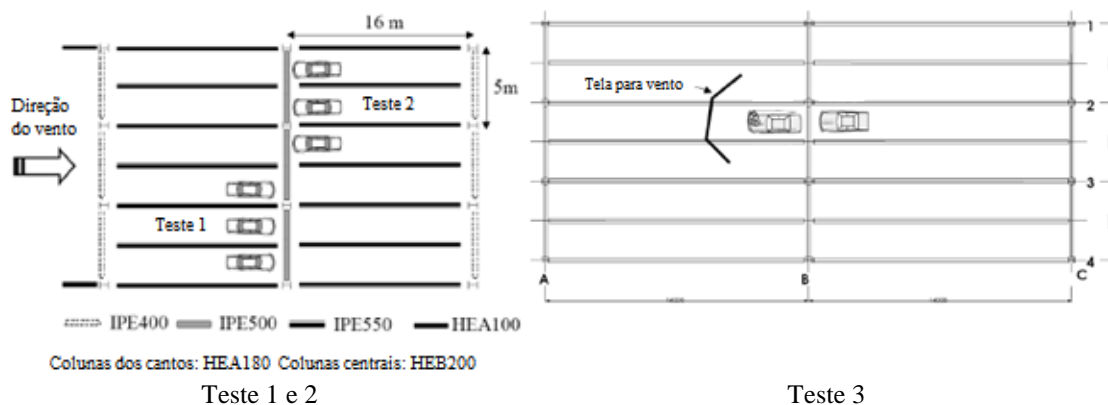


Figura 8 - Cenários de incêndio utilizados nos testes realizados pela CTICM [22].

Os resultados conseguidos pelos testes revelaram uma temperatura máxima abaixo do teto de 1000 °C; com uma temperatura máxima na viga em aço de 700 °C, com variação de temperatura de 200 °C na viga; e, uma temperatura na laje de concreto de 100 °C a uma profundidade de 70 mm de concreto. A propagação do incêndio (teste 3) só ocorreu após 56 minutos do início da ignição do primeiro carro, tempo mais que suficiente para a chegada dos bombeiros. O tempo de desenvolvimento do incêndio diminui com o aumento do vento, mas o efeito térmico é compensado com uma redução da ação térmica na carga da estrutura, devido a isso, as maiores temperaturas na estrutura ocorreram no teste de número 1 [22].

Na Tabela 1 apresenta-se um resumo da temperatura máxima observada nos elementos de viga dos testes de incêndio realizados em estacionamentos abertos descritos acima.

Tabela 1 - Teste de incêndio em vários países [adaptada] [22].

TESTES REALIZADOS	TEMPERATURA MÁXIMA NA VIGA
Reino Unido, 1968 [7]	275 °C
Japão, 1970 [12]	245 °C
Estados Unidos, 1973 [10]	226 °C
Austrália, 1985 [11]	340 °C
França, 1995 [19]	700 °C

Comparando os resultados descritos na Tabela 1, pode ser concluído que com o passar dos anos e conforme veículos mais novos passaram a ser utilizados nos testes, maiores foram os valores das temperaturas medidas para a viga em aço. É importante salientar também que o teste francês alcançou as maiores temperaturas, embora não tenha apresentado nenhum risco a estabilidade da estrutura. Sendo assim, um estacionamento

aberto com estrutura em aço desprotegido possui resistência suficiente para resistir aos efeitos de incêndios em automóveis [22].

### **1.7- Objetivo da tese**

O objetivo é comparar um modelo numérico (método dos volumes finitos) para determinar o comportamento térmico da estrutura e dos gases provocados pelo incêndio num parque de estacionamento aberto, usando o evento de um incêndio dum veículo. Este efeito deverá ser comparado com o mesmo tipo de evento, utilizando um modelo simplificado de cálculo da EN1991-1-2 [28] (agrupamento dos métodos de Heskestad e Hasemi) para determinar o comportamento térmico da estrutura. O mesmo evento será estudado por meio da utilização do programa Elefir-EN [29], com o intuito de realizar a comparação do comportamento da temperatura em função do tempo para o aço e para os gases quentes, localizados próximo ao elemento estrutural.

### **1.8- Motivação da tese**

Esta tese foi motivada devido ao número de incêndios que ocorrem em estacionamentos abertos e os problemas que estes incêndios causam a saúde humana, podendo causar perdas de vida. Outra motivação que vale a pena ser destacada é o pequeno número de estudos nesta área publicados no Brasil.

### **1.9- Apresentação da tese**

A tese apresenta 7 capítulos divididos segundo as informações que seguem:

O capítulo 1- INTRODUÇÃO, apresenta uma breve introdução sobre incêndios em estacionamentos abertos, tratando sobre alguns conceitos básicos para que haja o correto entendimento do objetivo proposto pela tese. Também apresenta um breve histórico sobre testes realizados em automóveis e em estacionamentos abertos.

O capítulo 2- INCÊNDIOS EM ESTACIONAMENTOS ABERTOS trata especificamente sobre incêndios em estacionamentos abertos, as principais causas, eventos históricos relevantes, requisitos de incêndio em diferentes países e estatísticas de incêndio para alguns países.

O capítulo 3- CENÁRIOS DE INCÊNDIO EM ESTACIONAMENTO ABERTO trata dos cenários de incêndios, ou seja, a estrutura do compartimento de incêndio utilizada na tese, a classificação e a taxa de liberação de calor dos veículos. São ainda apresentados os métodos de cálculo simplificado para incêndios localizados utilizados na tese, métodos de Heskestad e Hasemi.

No capítulo 4- ANÁLISE TÉRMICA - MÉTODO DO CÁLCULO SIMPLIFICADO apresenta-se o cálculo necessário para aplicação do método simplificado de cálculo para incêndios localizados. Neste capítulo se faz a utilização das formulações dos métodos de Heskestad e Hasemi discutidos no capítulo anterior, para assim, obter a temperatura máxima determinada em cada um dos tipos de viga e classes de veículos utilizados para os diferentes compartimentos de incêndio e posições radiais propostos.

O capítulo 5- ANÁLISE TÉRMICA – ELEFIR-EN trata da resolução dos diferentes cenários de incêndio por meio da utilização do programa Elefir-EN. Neste capítulo será feita uma explicação do programa utilizado, bem como, as informações utilizadas para a resolução dos cenários de incêndio analisados, culminando nos resultados encontrados para a temperatura na viga e no gás para cada um dos cenários de incêndio utilizados.

O capítulo 6- ANÁLISE TÉRMICA - MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO apresenta o método avançado de cálculo, utilizando o programa ANSYS Fluent. Neste capítulo apresentam-se as equações necessárias para a solução no domínio fluido e sólido, bem como, as condições de contorno que se devem utilizar. No final são apresentados os resultados obtidos para os cenários analisados. Neste mesmo capítulo é apresentada uma comparação para os três métodos de solução utilizados, cálculo simplificado, cálculo simplificado Elefir-EN e cálculo avançado (ANSYS Fluent).

No capítulo 7- CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS são apresentadas as conclusões com base na comparação de resultados apresentada no capítulo anterior. Por meio deste capítulo é possível inferir a precisão do método simplificado de cálculo e as suas limitações. Por fim o capítulo apresenta algumas sugestões de trabalhos futuros que possam a vir ser realizados servindo como complemento desta tese.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## **2- INCÊNDIOS EM ESTACIONAMENTOS ABERTOS**

Um parque de estacionamento deve possuir certas características geométricas, que variam de acordo com cada país, para que ele possa ser considerado aberto, como: paredes externas abertas, limitação para distância entre fachadas, limitação da área de cada pavimento, entre outros. Sendo assim, nestes estabelecimentos a fumaça quente tem de conseguir escapar facilmente e ser substituída por ar frio. Por conseguinte, a temperatura do ar tende a não se elevar excessivamente, evitando possíveis danos estruturais no local. As características necessárias para considerarmos um estacionamento aberto variam entre os países. Num parque de estacionamento aberto somente podem circular veículos de passageiros, que são definidos como veículos capazes de transportar no máximo 9 pessoas, segundo o código BOCA de 1987, dos EUA [12].

De maneira geral, um parque de estacionamento pode ser considerado aberto se em cada andar do estacionamento tiver áreas de ventilação dispostas em ao menos duas paredes opostas, igual a pelo menos 1/3 da área superficial total das paredes, correspondendo ao menos a 5% da área da laje de um andar do parque de estacionamento [12].

Estudos realizados por Joyeux et al. (2002) [19] mostraram que a maior parte dos incêndios em automóveis não ocorrem devido a uma ignição provocada pelo próprio automóvel, e sim devido à combustão de material inflamável, tal como papel, lixo ou folhas presentes no estacionamento. Dessa forma pode ser afirmado que, a maioria dos incêndios causados em parques de estacionamentos abertos, têm origens por fontes externas aos veículos e que, após algum tempo, o incêndio se propaga para os veículos [19].

### **2.1- Eventos históricos**

A seguir encontra-se um pequeno resumo de alguns incêndios em estacionamentos ocorridos na Holanda, Inglaterra e Suíça, durante o período de 2006 a 2018.

#### **2.1.1- Haarlem (Holanda)**

Ocorreu no dia 26 de outubro de 2010 em um estacionamento subterrâneo, na cidade de Haarlem. Neste incidente foram incendiados pelo menos 26 veículos. O parque

de estacionamento em questão não possuía sistemas ativos de proteção (*sprinklers*). Após a ocorrência deste incidente passou a ser obrigatório na Holanda a utilização de *sprinklers* em escolas, hospitais, parques de estacionamento e casas de repouso, para prevenir danos materiais e perda de vidas humanas. Passou a ser requisito de norma colocar sistema ativos do tipo *sprinklers* em parques de estacionamento subterrâneos [2]. Na figura abaixo é possível observar à esquerda os veículos queimados após o incêndio cessar e à direita os problemas gerados na laje do estacionamento.



Figura 9 - Incêndio num parque de estacionamento subterrâneo em Haarlem [30].

### 2.1.2- Aeroporto Stanstead (Reino Unido)

O incêndio ocorreu no dia 31 de agosto de 2010, no estacionamento do aeroporto londrino de Stanstead, na Inglaterra. No incidente 24 veículos foram destruídos pelo incêndio. A causa do acidente suspeita-se que foi uma falha elétrica ocorrida em um dos veículos que culminou na chama que se propagou para os demais veículos, devido aos fortes ventos que ocorriam no local naquele momento [2]. Na figura a seguir pode-se observar parte do parque de estacionamento após a extinção do incêndio.



Figura 10 - Incêndio no parque de estacionamento do aeroporto de Stanstead [31].

### 2.1.3- Gretzenbach (Suíça)

O incidente ocorreu em 2004, numa parte de um complexo de apartamentos em Gretzenbach, na Suíça. Neste incêndio 7 bombeiros suíços morreram devido ao colapso do teto do estacionamento subterrâneo que ocasionou uma cratera de 30 metros de comprimento e 3 metros de profundidade. Acredita-se que no momento do colapso um carro tenha vindo a se incendiar [32]. Na figura a seguir é possível ver, à esquerda, os veículos carbonizados após extinção do incêndio, e à direita, a cratera gerada pelo incêndio.



Figura 11 – Incêndio ocasionado em Gretzenbach num parque de estacionamento subterrâneo localizado num complexo de apartamentos [33].

### 2.1.4- Monica Wills House (Inglaterra)

Em 2006, aconteceu um incêndio no Condado de Bristol, Inglaterra, no edifício residencial Monica Wills House, no estacionamento semi-subterrâneo do edifício. Neste incidente 22 carros foram destruídos pelo fogo e houve uma fatalidade, devido à propagação do incêndio para um apartamento localizado por cima do estacionamento. O incêndio não se propagou mais devido ao fato de todo o edifício possuir o sistema de proteção ativo tipo *sprinklers*, com exceção do próprio parque de estacionamento. O incêndio provocou danos consideráveis na estrutura do teto do estacionamento [2]. Na figura que segue vê-se o exterior do edifício residencial Monica Wills House, à esquerda, e o parque de estacionamento após extinção do incêndio, à direita.



Figura 12 - Incêndio no parque de estacionamento do edifício Monica Wills House [34].

#### 2.1.4- Liverpool Echo Arena (Inglaterra)

O incêndio ocorreu num parque de estacionamento de vários andares em King's Dock, Liverpool próximo da Liverpool Echo Arena, no dia 1º de janeiro de 2018. Este incêndio envolveu a ignição de aproximadamente 1300 veículos, com as chamas atingindo temperaturas de 1000 °C [35]. Para o controle do incêndio foram utilizados 12 caminhões pipa, com tripulações da grande Manchester e assistência da Lancashire. O estacionamento não contava com o sistema de *sprinklers*, o que permitiu a propagação do incêndio. Segundo os bombeiros e relatos de algumas testemunhas, a origem do incêndio foi identificada no incêndio do motor de um veículo Land Rover, conforme pode ser observada em uma foto tirada por uma das pessoas que presenciou o início do incêndio, ver Figura 13. Após o início do incêndio, este propagou-se rapidamente do motor para os pneus do veículo, o que aumentou a liberação de fumaça do estacionamento [36]. Na Figura 14 pode-se observar a estrutura do estacionamento que sofreu sérios danos devido ao incêndio, na figura disposta à esquerda vemos danos na laje do estacionamento e na da direita podemos observar que a laje em determinado ponto não resistiu e desabou.



Figura 13 - Foto tirada do veículo que supostamente iniciou o incêndio na Liverpool Echo Arena [36].



Figura 14 – Danos estruturais ao estacionamento provocados pelo incêndio [35].

## 2.2- Requisitos de incêndio em diferentes países

Uma das justificativas da realização deste tipo de trabalho demonstrando o comportamento estrutural de um parque de estacionamento aberto sob ação de incêndio é o fato de que as normas para construção deste tipo de estabelecimento variam no mundo todo. Sendo assim, cada país possui suas próprias regras de proteção impostas através de regulamento de segurança contra incêndios em edifícios.

Na Tabela 2 podemos observar os requisitos para construção de estacionamentos abertos em 19 países europeus.

Tabela 2 - Requisitos de incêndio para estacionamentos abertos em diferentes países [adaptada] [12].

País	Limitações						Requisitos gerais ISO de resistência ao incêndio	Alternativas condicionais	
	Mínimo percentual de abertura (%)		Máximo					Aço desprotegido	Incêndio natural <sup>*4</sup>
	Total <sup>*1</sup>	Um lado <sup>*2</sup>	Distância entre faces opostas (m)	Número de andares	Altura da construção (m)	Área de chão por andar (m <sup>2</sup> )			
Alemanha	33	-	70	-	22	-	R0	/	/
Áustria	33	-	70	-	22	-	Acima de R90	Sim	Sim
Bélgica	-	-	-	-	-	-	R60 até R120 <sup>*3</sup>	Não <sup>*6</sup>	-
Dinamarca	5% da área do chão		24	-	-	-	R0 até R60	Sim	Sim
Espanha	-	-	-	-	-	-	R60 até R120	-	-
Estados Unidos	-	50	120	9	-	4700	Nenhum <sup>*5</sup>	-	-
Finlândia	30	-	-	8	-	9000	R60	Não	Sim
França	-	-	-	-	-	-	R30 até R90	Não <sup>*6</sup>	Não
Holanda	33	-	54	-	20	-	Nenhum <sup>*5</sup>	/	/
Hungria	-	-	-	-	-	-	R30 até R60 <sup>*3</sup>	Não	Não
Itália	-	60	-	-	-	-	Acima de R90	-	-
Luxemburgo	-	-	-	-	-	-	Nenhum <sup>*5</sup>	/	/
Noruega	33	-	-	6	-	5400	R10 até R60	Sim	-
Polónia	-	-	-	-	25	4000	R60	Não	-
Portugal	-	-	-	-	-	-	R60 até R180	-	Sim
Reino Unido	5% da área do chão		-	-	-	-	R15 até R120	Sim	Sim
Suécia	-	-	-	-	-	-	Acima de R90	Sim	Sim
Suíça	25	-	70	-	-	-	Nenhum <sup>*5</sup>	/	/

<sup>\*1</sup> Área total aberta / área total de paredes e fachadas em um andar do estacionamento.

<sup>\*2</sup> Área aberta de um lado / área de paredes deste lado.

<sup>\*3</sup> Requisitos gerais do Código Nacional de Construções.

<sup>\*4</sup> O uso de Incêndio Natural como uma alternativa à ISO-Fogo para provar a resistência do fogo.

<sup>\*5</sup> Não significa que não existe requisitos de incêndio e que a estrutura desprotegida é portanto permitida.

<sup>\*6</sup> É permitido aço nu se isso puder ser provado por testes ou estudos científicos

### **2.3- Estatísticas de incêndio em estacionamentos abertos**

Existem poucos estudos estatísticos sobre incêndios em parques de estacionamentos, considerando tanto estacionamentos abertos quanto estacionamentos fechados. A nota técnica nº 75 (DTP 16) da ECCS e o relatório final ECCS da pesquisa em estacionamentos fechados (DTP 13) demonstram uma visão geral dos incêndios em estacionamentos fechados, para os Estados Unidos, durante os anos 80. Além destes arquivos, as principais fontes de informação são as brigadas de incêndio, das quais se destaca a brigada de incêndio de Paris (BSPP) que realiza um relatório para cada incêndio atendido [19].

Considerando um incêndio num parque de estacionamento, existem diversas variáveis a serem consideradas no momento de relatar este incêndio, como: perigo do incêndio (grau de risco), pessoas feridas, tipo de construção, tempo de propagação, tempo de extinção, problemas na extinção do incêndio e tipo de combustível a queimar. O perigo do incêndio está associado ao número de carros que podem entrar em ignição, eventuais problemas elétricos e circulação da fumaça [19].

Através da análise dos relatos de incêndios é possível obter o tempo de extinção do incêndio, número de carros envolvidos, classificação dos carros envolvidos, lesões causadas a pessoas e o momento (dia e horário) de ocorrência do incêndio [19].

As estatísticas apresentadas foram baseadas em 78 intervenções reportadas pela BSPP, considerando incêndios em parques de estacionamentos abertos, dos anos 1995-1997 [19].

A análise das estatísticas mostrou que o número de veículos envolvidos em incêndios em um estacionamento aberto variou entre 0 e 3, de maneira, que foram queimados 55 carros de um total de 72 carros envolvidos. A Figura 15, exposta a seguir, mostra o número de veículos envolvidos nos incêndios analisados. Vale a pena destacar que 30% dos incêndios registrados não tiveram sua ignição provocada pelos veículos, mas sim em outras origens tais como: papel, lixo e outros materiais combustíveis. Por meio da análise da Figura 15, conclui-se que cerca de 80% dos incêndios analisados tiveram a ignição de apenas um veículo, enquanto os incêndios com 3 veículos foram apenas 10% dos casos [19].

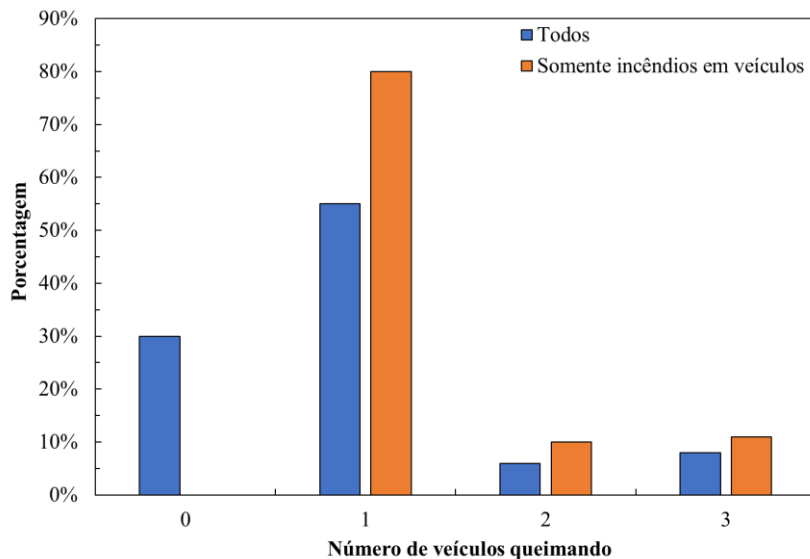


Figura 15 - Número de veículos envolvido nos incêndios em estacionamentos abertos [19].

A classificação dos veículos é dividida em 5 classes diferentes consoante a energia que cada veículo é capaz de libertar durante um incêndio, sendo a classe 1 caracterizada pelos veículos com menor poder energético de combustão e os veículos da classe 5, aqueles que apresentam maior poder energético de combustão. Esta classificação será tratada na seção 3.3- Classificação dos automóveis desta tese.

A categoria de veículos que mais sofreu foi a 1, sendo que as categorias 4 e 5 somaram juntas apenas 10% dos veículos incendiados (Figura 16). A grande maioria dos incêndios, cerca de 84%, foram extinguidos com menos de 30 minutos e todos os casos foram extinguidos antes de 1 hora, com 5,5% dos casos sendo extintos antes dos bombeiros chegarem ao local do incêndio (Figura 17). A correlação entre tempo de extinção e número de veículos envolvidos mostra que em casos com vários veículos envolvidos o tempo de extinção entre 30 e 60 minutos é geralmente suficiente para extinguir o incêndio. A análise estatística mostrou também que a maior parte, cerca de 73%, dos incêndios catalogados ocorreram durante a noite [19].

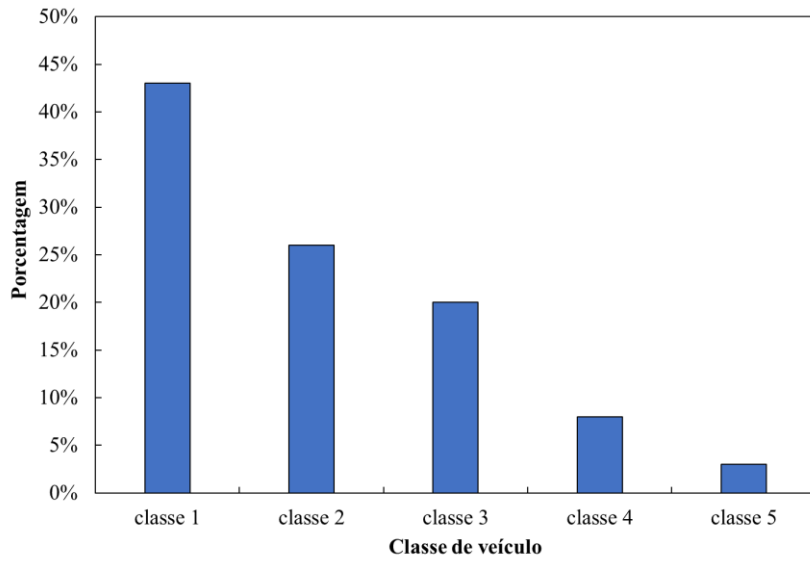


Figura 16 - Classificação dos veículos queimados [19].

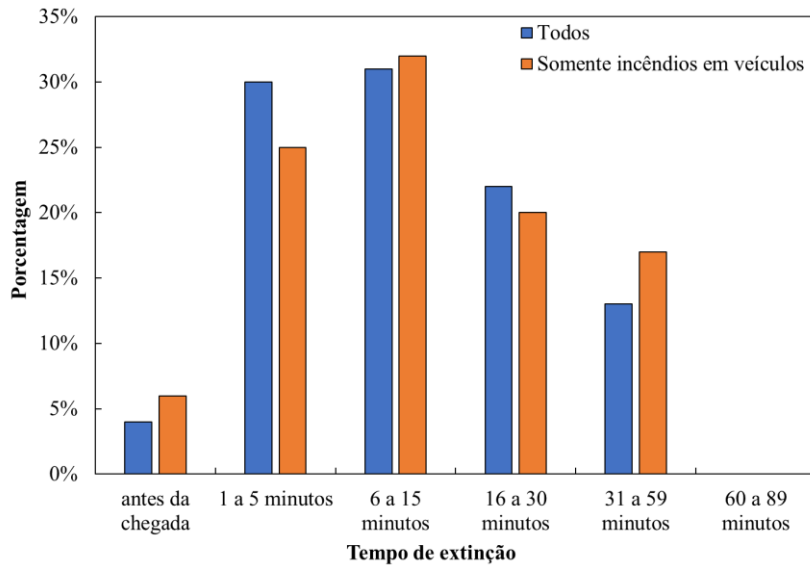


Figura 17 - Tempo de extinção dos incêndios [19].

### 3- CENÁRIOS DE INCÊNDIO EM ESTACIONAMENTO ABERTO

#### 3.1- Compartimento de incêndio

Um compartimento de incêndio é um espaço sem construção, estendido sobre um ou vários pisos, o qual é fechado por elementos de separação, de modo que a propagação do fogo seja prevenida durante o incêndio [28]. É neste compartimento que o incêndio irá se desenvolver [37].

Para a tese apresentada serão comparados dois tamanhos de compartimento de incêndio, sendo que a diferença entre eles se dará pela altura relativa entre duas lajes de concreto consecutivas.

##### 3.1.1- Compartimento utilizado 1

O estacionamento aberto analisado chamado de compartimento 1 possui comprimento de 10 metros e largura de 10 metros. É construído por vigas secundárias em aço desprotegidas e possui altura de 3 metros entre duas lajes consecutivas de concreto. As vigas distanciam de 10 metros entre si. Na figura abaixo é possível observarmos um desenho representativo do estacionamento em estudo.

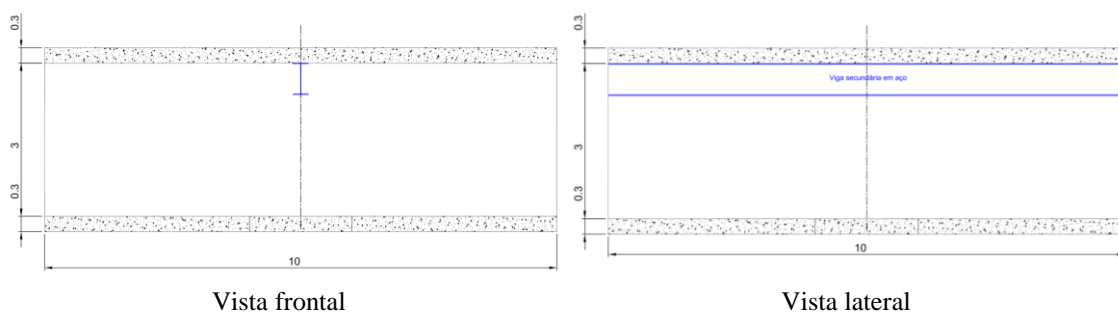


Figura 18 - Dimensões do compartimento de incêndio 1 utilizado (cotas em metros).

##### 3.1.2- Compartimento utilizado 2

O estacionamento aberto analisado chamado de compartimento 2 possui comprimento de 10 metros e largura de 10 metros. Também é construído por vigas em aço desprotegidas e possui altura de 5 metros entre duas lajes consecutivas de concreto.

As vigas secundárias distanciam de 10 metros entre si. Na Figura 19 é possível observar um desenho representativo do estacionamento em estudo.

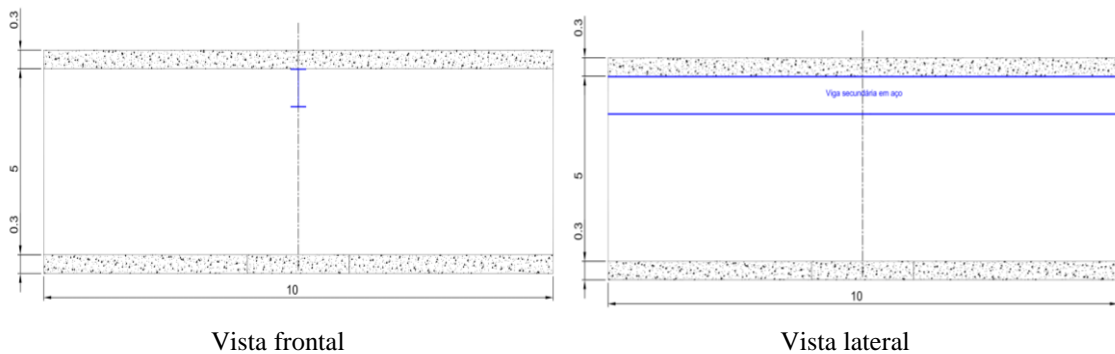


Figura 19 - Dimensões do compartimento de incêndio 2 utilizado (cotas em metros).

### 3.1.3- Fases do fogo em um compartimento

Incêndios naturais enclausurados são apresentados, muitas vezes, em termos de desenvolvimento de temperatura no compartimento de incêndio. Para isso, geralmente é conveniente dividir o incêndio em diferentes estágios. A Figura 20 apresenta uma variação da temperatura dos gases conforme o tempo de incêndio se prolonga, nela conseguimos também observar o estágio de crescimento do fogo para o caso em que não houver tentativa de controle do incêndio [38].

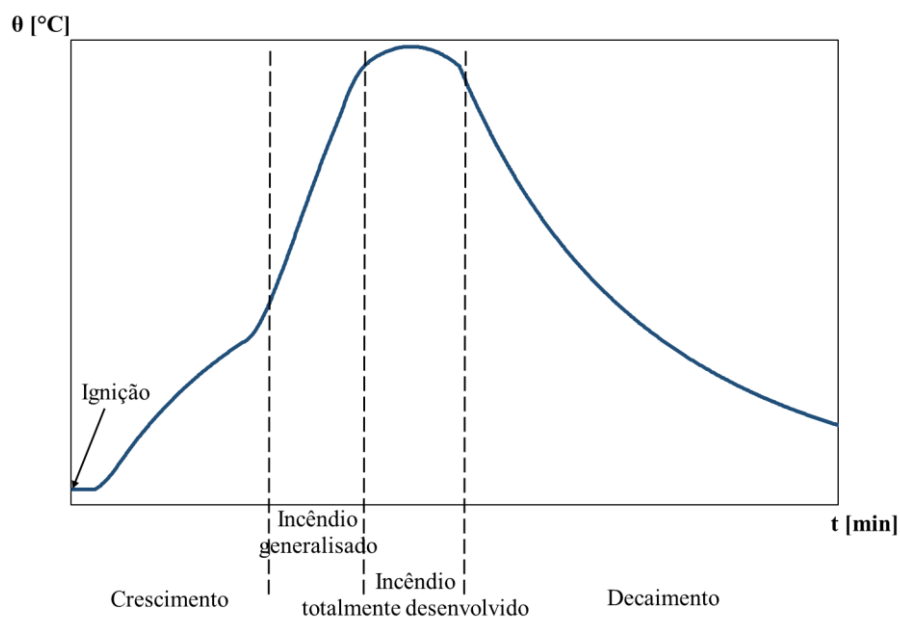


Figura 20 – Variação da temperatura com o tempo, destacando as fases do incêndio.

As fases de incêndio em um compartimento de incêndio, segundo Karlsson e Quintiere (2000) [38] estão destacadas na figura acima, sendo elas:

- Ignição: é o processo inicial que origina o fogo. Ela pode ocorrer tanto de maneira forçada (ex.: faísca) quanto espontaneamente (ex.: compressão de diesel).
- Crescimento: seguindo a fase da ignição, o fogo pode crescer rapidamente ou lentamente, dependendo do tipo de combustão, do combustível, da interação com o meio, e do acesso ao oxigênio. O fogo pode ser descrito em termos da taxa de energia liberada e da produção de gases de combustão [38].
- Incêndio generalizado (*Flashover*): é um termo que não possui uma definição padrão. Ele pode ser definido de diversas maneiras, por exemplo, em engenharia de segurança ele é utilizado para dividir em dois estágios o fogo de um compartimento de incêndio, *pré-flashover* e *pós-flashover*. A definição formal de *flashover*, dada pela ISO (*International Organization Standardization*) é que se trata de uma rápida transição para um estado de envolvimento total da superfície em um incêndio de material combustível dentro de um recinto [39]. Em 1968, Waterman [40] conduziu alguns experimentos que chegaram à conclusão de que o *flashover* ocorre quando temos um fluxo de calor no solo de aproximadamente  $20 \text{ kW/m}^2$ , atingindo temperaturas no teto do compartimento de aproximadamente  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  [41].
- Incêndio totalmente desenvolvido: esta é a fase em que se atingem as maiores temperaturas no compartimento de incêndio, sendo que a energia liberada no compartimento atinge seu maior valor e é muitas vezes limitada pela disponibilidade de oxigênio [38].
- Decaimento: à medida que o combustível é consumido, a taxa de liberação de energia diminui e, assim, a temperatura média do gás no compartimento diminui [38].

### **3.2- Cenários de incêndio mais significativos**

Cenários de incêndio são as condições em que o incêndio ocorre. Cinco cenários de incêndio já foram utilizados em testes de incêndios em estacionamentos, a seguir eles serão apresentados e descritos [42].

De acordo como relatório da ECCS (1993) [12], existem dois cenários de incêndios críticos para parques de estacionamentos abertos:

- Cenário 1: apenas um carro queimando no meio da viga secundária (máximo momento fletor). Considerou-se apenas um veículo queimando porque estatisticamente falando é improvável que dois veículos estejam a queimar exatamente no mesmo tempo estando indevidamente estacionados [12].
- Cenário 2: é o cenário mais perigoso para as colunas do estacionamento. Representa dois veículos estacionados corretamente queimando, considerando o tempo de ignição entre os carros de 15 minutos [12].

INERIS [43] adicionou mais 3 cenários de incêndios:

- Cenário 1 da ECCS com a diferença de considerar um veículo comercial ( $E = 19500 \text{ MJ}$ ) queimando no meio da viga [42].
- Cenário 3: envolve a queima de 7 veículos classe 3, com a possibilidade de um veículo comercial ocupar as posições 0 ou 1a, vide Figura 21 [42].
- Cenário 4: envolve 4 veículos classe 3 estacionados frente a frente, com a possibilidade de um veículo comercial ocupando as posições 0, 1a, 1b ou 2 [42]. De acordo com INERIS o tempo de propagação do incêndio de um veículo para o outro é de 12 minutos para todos os cenários [43].

A diminuição no tempo de propagação do incêndio de um veículo para o outro pode ser explicada pela evolução nos materiais que compõem os veículos [42].

Um outro cenário de incêndio foi considerado pela CTICM [19]:

- Cenário 5: três carros classe 3 estacionados lado a lado, pois segundo as estatísticas apresentadas por Joyeux et al (2002) [19] este cenário engloba cerca de 98,7% de todos os cenários de incêndio possíveis [42].

Na Figura 21 estão representados todos os 5 cenários de incêndio descritos acima.

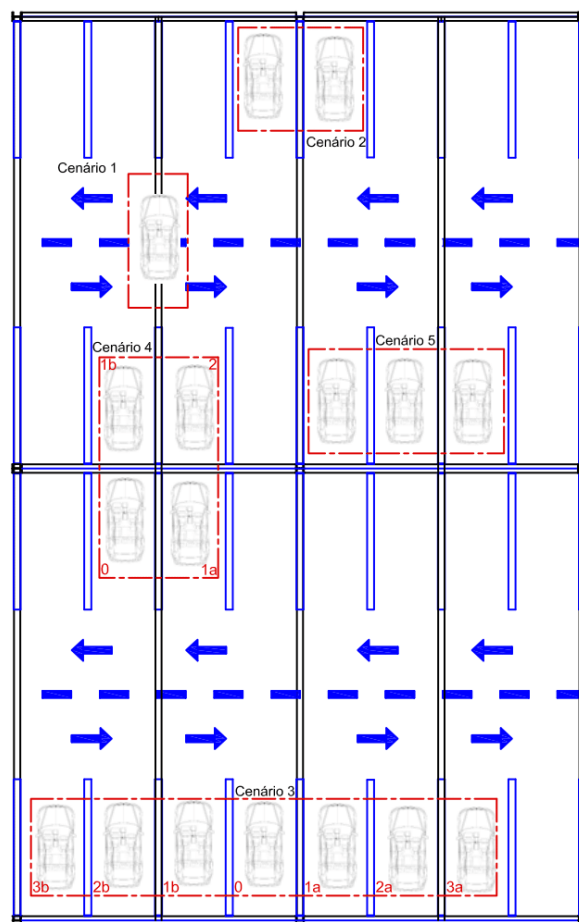


Figura 21 - Cenários de incêndio [42].

### 3.2.1- Cenários de incêndio analisados

Os cenários de incêndio aqui analisados serão semelhantes ao cenário 1 representado na Figura 21. Nesta tese os cenários variam de acordo com: tamanho do compartimento de incêndio, classe do veículo incendiado, seção transversal da viga e posição relativa do carro com relação ao elemento principal da estrutura; totalizando 240 cenários de incêndios analisados.

Os cenários de incêndio analisados dirão respeito ao incêndio localizado de um veículo posicionado por baixo de uma viga secundária. Esta posição foi escolhida pelo fato de ser a região com o máximo momento fletor da viga, sendo assim, é a região mais crítica do elemento estrutural analisado [12]. A distância entre a fonte do incêndio e o teto do estacionamento é assumida como sendo igual à 2,7 m para o compartimento 1 e 4,7 m para o compartimento 2. Na Figura 22 é possível analisarmos um dos cenários utilizados para ambos os compartimentos, sendo  $H_c$  no compartimento 1 igual à 3 metros e no compartimento 2 igual à 5 metros.

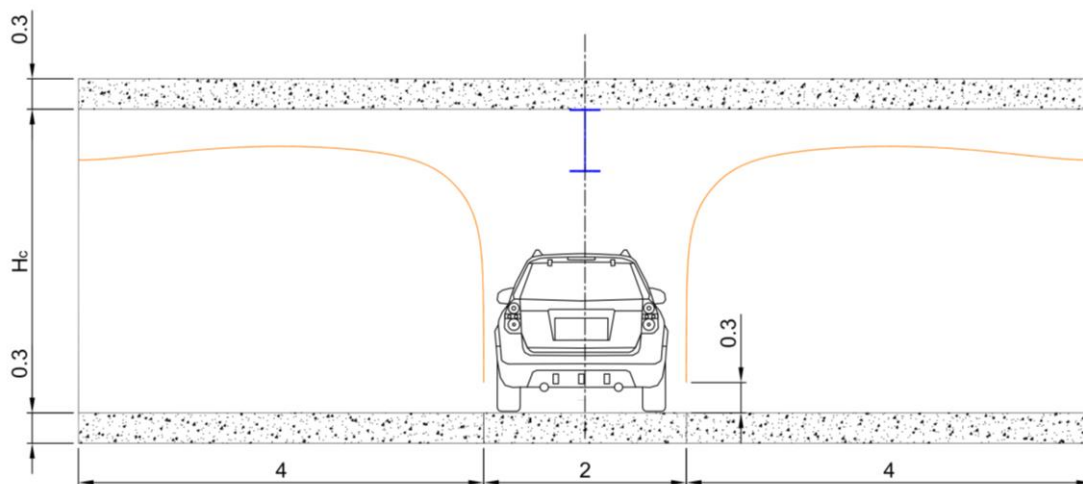


Figura 22 - Cenário de incêndio utilizado para ambos os compartimentos (cotas em metros).

Este cenário será analisado para as 5 diferentes classes de veículos existentes e para 5 perfis de vigas diferentes (diferentes valores de fatores de massividade). Também será realizado uma adaptação deste cenário considerando que o veículo esteja queimando no meio da viga secundária (0 metros), conforme demonstrado acima, e distante 1, 2, 3, 4 e 5 metros desta.

### 3.3- Classificação dos automóveis

Os automóveis fabricados em 1996 podem ser classificados em 5 categorias distintas [44, 19, 9]. A diferença entre as categorias está relacionada com a massa e a perda de massa dos carros, bem como a energia total liberada durante o incêndio de um automóvel [9]. Sendo assim, esta classificação leva em consideração o tamanho dos veículos, e não seu potencial, logo dentro das categorias existem muitos veículos que possuem energia potencial menor que os valores apresentados na Tabela 3, cujos valores de energia potencial dizem respeito a uma combustão completa considerando os tanques de combustíveis dos veículos completamente cheios [9].

Estudos anteriores do CTICM mostraram que, por exemplo um Renault 18 classificado na categoria 2 possui uma energia potencial de 5700 MJ, enquanto um Renault 5 da categoria 1 possui uma energia potencial de 3700 MJ, ambos valores abaixo dos valores apresentados na Tabela 3 [19].

Tabela 3 – Veículos de alguns fabricantes para as diferentes classes de veículos e a energia teórica de queima das classes [6] [adaptada].

<b>Marcas</b>	<b>Classe 1</b>	<b>Classe 2</b>	<b>Classe 3</b>	<b>Classe 4</b>	<b>Classe 5</b>
Pegeout	106	306	406	605	806
Renault	Twingo-Clio	Mégane	Laguna	Safrane	Espace
Citroën	Saxo	ZX	Xantia	XM	Evasion
Ford	Fiesta	Escort	Mondeo	Scorpio	Galaxy
Opel	Corsa	Astra	Vectra	Omega	Frontera
Fiat	Punto	Bravo	Tempra	Croma	Ulysse
Volkswagen	Polo	Golf	Passat	-	Sharan
Energia teórica [MJ]	6000	7500	9500	12000	

### 3.4- Taxa de liberação de calor de automóveis

A taxa de liberação de calor (HRR - *Heat Release Rate*) dos automóveis varia de acordo com a classificação destes. Quanto maior a classe do veículo mais calor ele libera durante um incêndio localizado.

Os dados de taxa de liberação de calor são obtidos por meios experimentais, mais precisamente por meio de testes em veículos com a utilização de um calorímetro de cone [19]. Automóveis são queimados em ambiente controlado, simulando um cenário de incêndio, onde é capaz de retirar todos os dados: perda de massa, fluxo de calor e temperatura dos gases sobre e dentro do veículo, necessários para a obtenção do HRR em função do tempo de incêndio [9].

Para que se chegasse nas curvas de incêndio de veículos que conhecemos atualmente, foram realizados 10 testes de incêndio em automóveis com calorímetro de cone. Estes testes foram realizados pelo CTICM dentre os anos de 1995 e 1996 [19]. Para a realização dos testes foram utilizados automóveis das classes 1, 2 e 3.

Nos 6 primeiros testes realizados, o CTICM utilizou veículos dos anos 80 e mostrou que havia um aumento no potencial calorífico dos automóveis com o passar dos anos. Para os testes número 7 e 8 foram utilizados veículos novos (fabricados em 1995), sendo o veículo do teste 7 da classe 3 (Laguna) e o veículo do teste 8 da classe 1. Para comparar os resultados foi realizado um último teste, de número 9, queimando dois veículos semelhantes aos utilizados nos testes 7 e 8 [9, 19].

A conclusão retirada dos três últimos testes foi a de que para relacionar o teste 9 aos testes 7 e 8 era preciso que houvesse uma correção nas curvas obtidas por meio dos

testes 7 e 8, sendo assim, foi deduzida uma curva de referência para incêndio onde apenas um automóvel queima, para esta curva utilizou-se o teste 7 (carro da classe 3) como modelo [9]. A curva de referência foi definida por meio do tempo e da taxa de transferência de calor destacados na Tabela 4, correspondentes a um veículo da classe 3. Na Figura 23 é possível observar a curva de referência sobre o resultado do teste 7 do CTICM.

Tabela 4 - Pontos utilizados na curva de referência para incêndio de um automóvel [9] [adaptada].

Tempo [min]	HRR [MW]
0	0
4	1.4
16	1.4
24	5.5
25	8.3
27	4.5
38	1
70	0

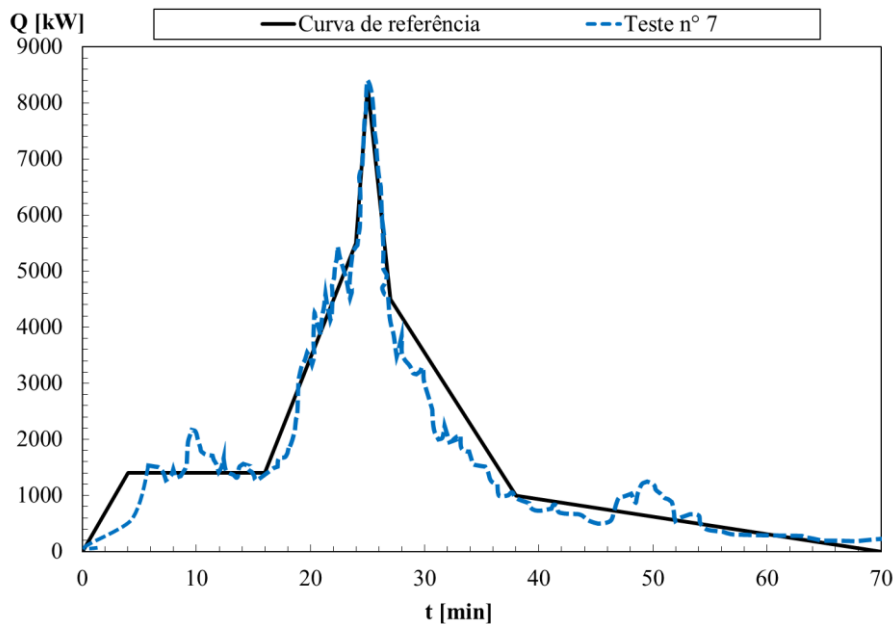


Figura 23 - Curva de referência e os valores reais obtidos no teste de número 7 [9].

Para que seja encontrada a curva de referência para as demais classes de veículos basta relacionarmos os valores da Tabela 4 com a energia teórica de cada uma das classes de automóveis presentes na Tabela 3.

Na Figura 24 pode-se observar a curva característica de liberação de calor de um veículo em chamas em função do tempo de queima para todas as classes de veículos. Os dados utilizados para gerar o gráfico são os apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação dos automóveis segundo potencial de queima.

Tempo [min]	Classes dos veículos			
	Classe 1 [kW]	Classe 2 [kW]	Classe 3 [kW]	Classe 4/5 [kW]
0	0	0	0	0
4	884	1105	1400	1768
16	884	1105	1400	1768
24	3474	4342	5500	6947
25	5242	6553	8300	10484
27	2842	3553	4500	5684
38	632	789	1000	1263
70	0	0	0	0

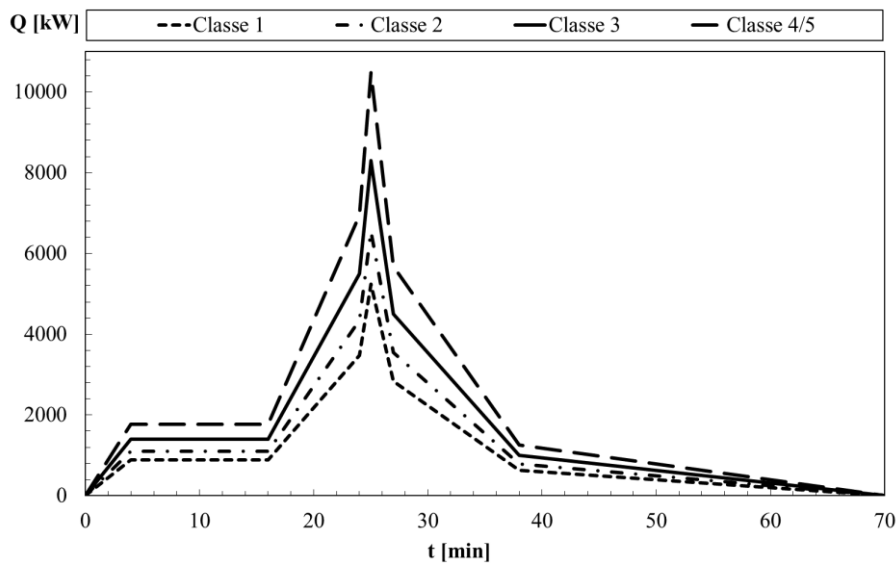


Figura 24 - Curvas HRR para as diversas classes de automóveis

### 3.5- Incêndios localizados

Definem-se incêndios localizados como sendo aqueles incêndios em que o espalhamento do fogo é improvável de ocorrer. Nesses incêndios temos de levar em consideração a altura da chama e se ela toca ou não o teto do estacionamento, pois para ambas as situações devemos utilizar diferentes modelos de cálculo [28].

Durante um incêndio localizado apenas uma parte do compartimento está em chamas, por isso diz-se que temos um modelo com duas zonas, ou seja, os gases produzidos pela combustão se encontram numa camada logo abaixo do teto criando uma interface bem definida entre a camada quente (superior) e a camada fria que se encontra logo abaixo [37].

### 3.6.1- Modelo de Heskestad

As equações utilizadas no modelo Heskestad estão previstas na norma europeia Eurocódigo 1 (EN1991-1-2) [28], podendo ser utilizadas quando as chamas do incêndio do veículo não atingem o teto do compartimento (parque de estacionamento).

O comprimento da chama em um incêndio localizado é dado por:

$$L_f = -1,02 * D + 0,0148 * Q^{\frac{2}{5}} \quad (9)$$

Quando a chama não atinge o teto ( $H > L_f$ ) a temperatura na pluma, ao longo eixo vertical da chama, é dada por:

$$\theta(z) = 20 + 0,25 * Q_c^{2/3} * (z - z_0)^{-5/3} \leq 900 \quad (10)$$

$$z_0 = -1,02 * D + 0,00524 * Q^{2/5} \quad (11)$$

Onde  $D$  representa o diâmetro do fogo [m], variando neste caso até atingir o seu valor máximo de 2 m,  $Q$  é a taxa de transferência de calor que varia de acordo com a classe do veículo em estudo e do tempo de incêndio decorrido, conforme demonstra a Tabela 5,  $Q_c$  é a porção convectiva da taxa de transferência de calor  $Q$  que é dada por  $Q_c = 0,8 * Q$ ,  $z$  é altura ao longo do eixo da chama,  $H$  é a distância entre a fonte de incêndio e o teto e  $z_0$  é a origem virtual do incêndio, dada pela equação 11. Na Figura 25 podemos observar as distâncias citadas acima e utilizadas nas equações 9, 10 e 11.

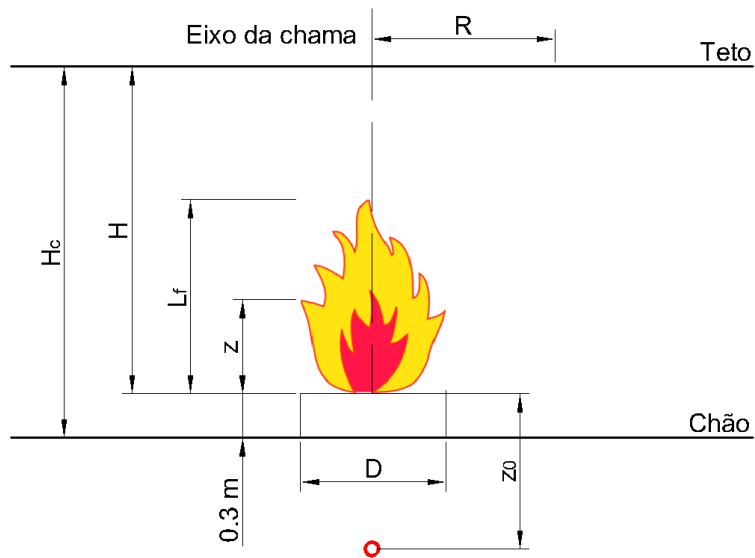


Figura 25 - Modelo de incêndio localizado com as chamas sem tocar o teto.

### 3.6.2- Modelo de Hasemi

O modelo de Hasemi é utilizado caso a chama do incêndio atinja o teto do compartimento (parque de estacionamento) ( $L_f \geq H$ ), conforme pode ser observado na Figura 26. Sendo assim, com este método é possível calcular os efeitos de um incêndio localizado acima da chama nas posições radiais desta.

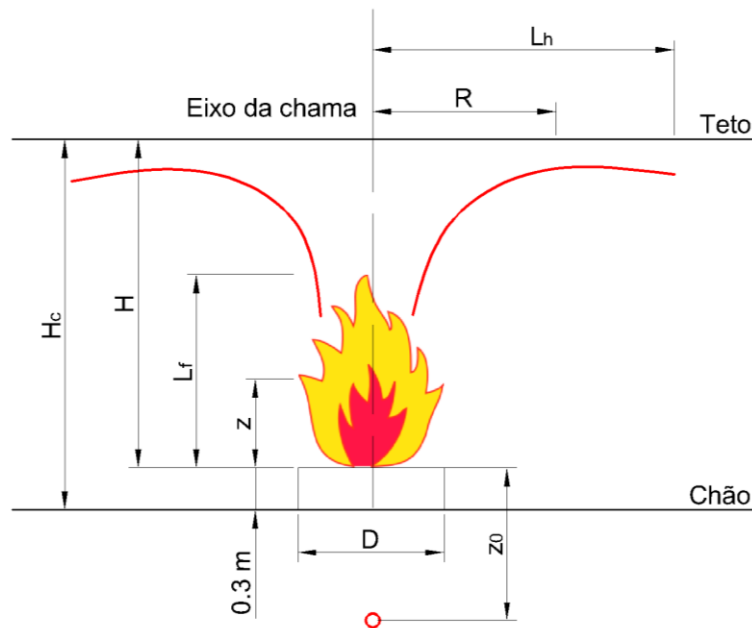


Figura 26 - Modelo de incêndio localizado com as chamas tocando o teto.

Sendo assim, o fluxo de calor ( $\dot{h}$ ) será calculado levando em consideração o parâmetro adimensional  $y$ , dado pela equação 13.

$$\text{Se } y \leq 0,30: \quad \dot{h} = 100000 \quad (12a)$$

$$\text{Se } 0,30 < y < 1,0: \quad \dot{h} = 136300 - 1210000 * y \quad (12b)$$

$$\text{Se } y \geq 1,0: \quad \dot{h} = 15000 * y^{-3,7} \quad (12c)$$

$$y = \frac{R + H + z_0}{L_h + H + z_0} \quad (13)$$

Sendo que  $R$  é a distância relativa horizontal do eixo da chama até o ponto em que estamos interessados em calcular o fluxo de calor;  $H$  é a distância da fonte do incêndio até o teto;  $L_h$  é o comprimento horizontal da chama, dado pela equação 14; e  $z_0$  é a posição vertical da fonte virtual do fogo, conforme o grupo de equações 15.

$$L_h = (2,9 * H * Q_H^{*0,33}) - H \quad (14)$$

$$\text{Quando } Q_D^* < 1,0: \quad z_0 = 2,4 * D * (Q_D^{*2/5} - Q_D^{*2/3}) \quad (15a)$$

$$\text{Quando } Q_D^* \geq 1,0: \quad z_0 = 2,4 * D * (1,0 - Q_D^{*2/5}) \quad (15b)$$

Sendo  $Q_H^*$  e  $Q_D^*$  taxas de transferência de calor não dimensionais, dadas pelas equações 16 e 17.

$$Q_H^* = \frac{Q}{1,11 * 10^6 * H^{2,5}} \quad (16)$$

$$Q_D^* = \frac{Q}{1,11 * 10^6 * D^{2,5}} \quad (17)$$

Para determinar o efeito do incêndio localizado junto de um elemento da estrutura é necessário transformar o fluxo de calor ( $\dot{h}$ ) num valor de temperatura dos gases da envolvente. Este procedimento obriga que se efetue o equilíbrio térmico junto do elemento estrutural em causa. Para que se estabeleça o equilíbrio térmico, em cada

instante, e para que seja possível determinar a temperatura dos gases, assume-se que a temperatura destes gases ( $\theta_{gás}$ ) que circundam o elemento iguala-se a temperatura de um elemento imaginário ( $\theta_{img}$ ). Para que se verifiquem estas condições, o elemento imaginário deverá possuir um fator de massividade muito elevado. Nestas condições, o fluxo de calor que entra no elemento imaginário ( $\dot{h}$ ) deverá ser compensado pelas perdas de fluxo de calor que saem do elemento imaginário, através dos modos de transferência de calor por convecção e radiação, ver Figura 27.

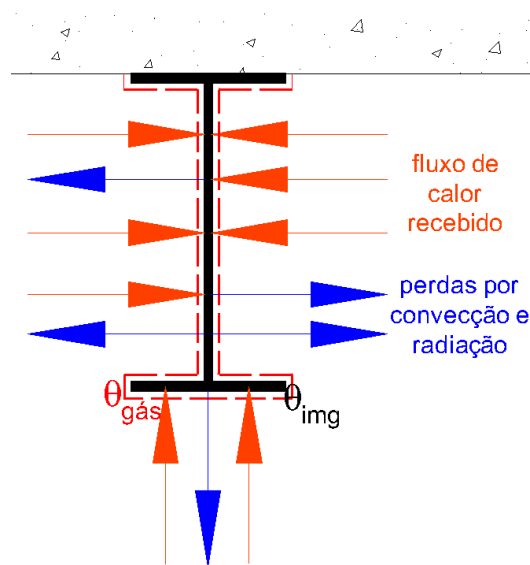


Figura 27 - Ilustração do equilíbrio térmico existente entre o gás e o elemento imaginário.

Uma importante ferramenta que faremos uso para que consigamos encontrar a temperatura do gás circundante a viga metálica durante o incêndio é o método de Newton Raphson, que é utilizado quando desejamos encontrar soluções para um problema de equações não lineares. Nestes casos precisamos iterar nosso conjunto de equações, geralmente são realizadas no máximo 5 iterações, para que consigamos convergir para a resposta mais provável, que será, neste estudo, a temperatura do gás circundante do elemento da estrutura (viga). Na Figura 28 podemos observar a representação gráfica do método de Newton Raphson e abaixo segue a formulação característica deste método.

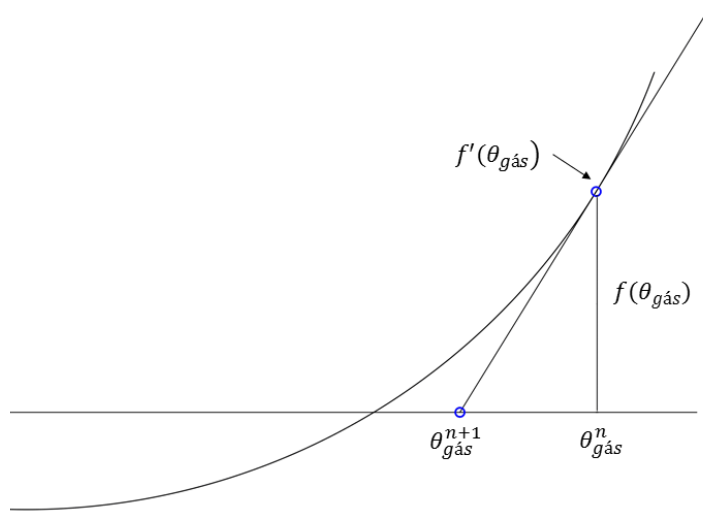


Figura 28 – Representação do método de Newton Raphson.

Através da aplicação do método de Newton Raphson é possível obter a temperatura nas proximidades da viga em aço que se encontra sobre o fogo por meio da utilização das equações 18 e 19 representadas a seguir.

$$\theta_{gás}^{n+1} = \theta_{gás}^n - \frac{f(\theta_{gás})}{f'(\theta_{gás})} \quad (18)$$

Do Eurocódigo 1 sabe-se que o fluxo de calor líquido recebido pela área da superfície exposta ao fogo que esteja no nível do teto [28], no nosso estudo a viga em aço, é dado por:

$$\dot{h}_{liq} = \dot{h} - \alpha_c * (\theta_{viga} - 20) - \phi * \epsilon_m * \epsilon_f * \sigma * [(\theta_{viga} + 273)^4 - (20 + 273)^4] \quad (19)$$

Dessa forma, conseguimos reescrever a equação 19 considerando que o material possui uma elevada condutividade e o perfil possui um grande fator de massividade ou secção. Por meio destas considerações, a temperatura da viga em aço (elemento imaginário) será igual a temperatura do gás ( $\theta_{viga} = \theta_{gás}$ ), estabelecendo um equilíbrio térmico entre o fluxo de calor recebido e o fluxo de calor cedido do material para a camada fria [45], assumindo que o fluxo de calor líquido será igual a zero ( $\dot{h}_{liq} = 0$ ).

$$f(\theta_{gás}) = 0 \Leftrightarrow \dot{h} - \alpha_c * (\theta_{gás} - 20) - \phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma * [(\theta_{gás} + 273)^4 - (20 + 273)^4] = 0 \quad (20)$$

Será necessário resolver a equação de 4ª ordem (equação 20) e determinar a sua derivada (equação 21).

$$f'(\theta_{gás}) = -\alpha_c - [\phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma * 4 * (\theta_{gás} + 273)^3] \quad (21)$$

Como a equação 20 é uma equação não linear, será necessário utilizar o método de Newton Raphson. Para a realização deste método devemos aplicar a equação 18, utilizando uma temperatura do gás ( $\theta_{gás}$ ) por tentativa, para se obter um novo valor que irá convergir, no máximo, até a quinta iteração. Para este processo foi utilizada a equação 20 para definir  $f(\theta_{gás})$  e a equação 21 para definir a função derivada  $f'(\theta_{gás})$ .

Na Tabela 6 pode-se observar um exemplo de como as iterações serão realizadas. No caso exemplificado está identificado a temperatura encontrada para o gás para um veículo classe 3, no tempo de 25 minutos de incêndio. No exemplo apresentado foi considerada uma tentativa de temperatura de 750 °C e após 3 iterações a temperatura se estabilizou em 858,82 °C que é a temperatura que será utilizada na sequência.

Tabela 6 - Iterações realizadas para encontrar a temperatura do gás ao entorno da viga com a utilização do Método de Newton Raphson para o tempo de 25 minutos considerando um veículo classe 3.

<b>Iterações</b>	<b><math>\theta_{gás}</math></b>	<b><math>f(\theta_{gás})</math></b>	<b><math>f'(\theta_{gás})</math></b>	<b><math>\theta_{gás\_novo}</math></b>
1	750.00	25478.62	-205.04	874.26
2	874.26	-4170.34	-274.83	859.09
3	859.09	-71.56	-265.44	858.82
4	858.82	-0.02	-265.27	858.82
5	858.82	0.00	-265.27	858.82

Após a obtenção da temperatura do gás ( $\theta_{gás}$ ) deverão ser utilizadas as formulações presentes no Eurocódigo 1 (EN 1991-1-2) [28] para encontrar o fluxo de calor líquido cedido para a superfície exposta ao fogo ( $\dot{h}_{liq}$ ). Deverão ser utilizadas as equações 1, 6 e 7, presentes na seção 1.3 desta tese, para determinação do fluxo de calor líquido.

$$\dot{h}_{liq} = \dot{h}_{liq,c} + \dot{h}_{liq,r} \quad (22)$$

$$\dot{h}_{liq,c} = \alpha_c * (\theta_g - \theta_m) \quad (23)$$

$$\dot{h}_{liq,r} = \phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma * [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (24)$$

Sendo que:  $\dot{h}_{liq}$  – fluxo de calor líquido total na superfície exposta ao fogo,  $\dot{h}_{liq,c}$  – fluxo de calor líquido convectivo na superfície exposta ao fogo,  $\dot{h}_{liq,r}$  – fluxo de calor líquido radiativo na superfície exposta ao fogo,  $\alpha_c$  – coeficiente de transferência de calor por convecção ( $= 35 \text{ W} * \text{m}^{-2} * \text{K}^{-1}$ ),  $\theta_g$  – temperatura do gás na vizinhança do elemento exposto ao fogo ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\phi$  – fator de forma ( $= 1,0$ ),  $\varepsilon_m$  – emissividade na superfície do elemento exposto ao fogo ( $= 0,7$ ),  $\varepsilon_f$  – emissividade do fogo ( $= 1,0$ ),  $\sigma$  – constante de Stefan Boltzmann ( $= 5,67 * 10^{-8} \text{ W} * \text{m}^{-2} * \text{K}^{-4}$ ),  $\theta_m$  – temperatura na superfície do elemento exposto ao fogo ( $^{\circ}\text{C}$ ) [28].

Com o fluxo de calor líquido calculado ( $\dot{h}_{liq}$ ) é possível utilizar a equação 31 para determinar o incremento da temperatura do elemento desprotegido, prevista no Eurocódigo 3 (EN 1993-1-2) [46], com o qual conseguiremos calcular a evolução da temperatura sofrida pelo perfil em estudo e que será apresentado no capítulo seguinte.

### 3.6.3- Área do incêndio

Segundo Franssen e Vila Real (2016) [29] o aumento da área de um incêndio possui relação direta com o aumento da taxa de transferência de calor. No momento correspondente ao valor máximo da liberação de calor, o valor da área deve manter-se constante com a taxa de calor máxima para a referida classe de veículo analisada. Esta relação pode ser conferida na equação 25.

$$A = A_{m\acute{a}x} * \frac{Q}{Q_{m\acute{a}x}} \quad (25)$$

Sendo que:  $A$  – área do incêndio para o instante de tempo analisado,  $A_{m\acute{a}x}$  – área máxima do incêndio, cujo valor é de  $3,14 \text{ m}^2$  [12],  $Q$  – taxa de transferência de calor no

instante de tempo analisado,  $Q_{m\acute{a}x}$  – taxa de transfer\ecencia de calor m\acute{a}xima, que depender\ea da classe de ve\icula analisada.

Sendo assim por uma rela\c\ao simples \e poss\ivel determinar a varia\c\ao do di\eametro de inc\ecndio ( $D$ ) ao longo do tempo, vide equa\c\ao 26.

$$D = 2 * \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (26)$$

Na Figura 29 pode-se observar os di\eametros de inc\ecndio utilizados para todas as classes de ve\iculos estudadas.

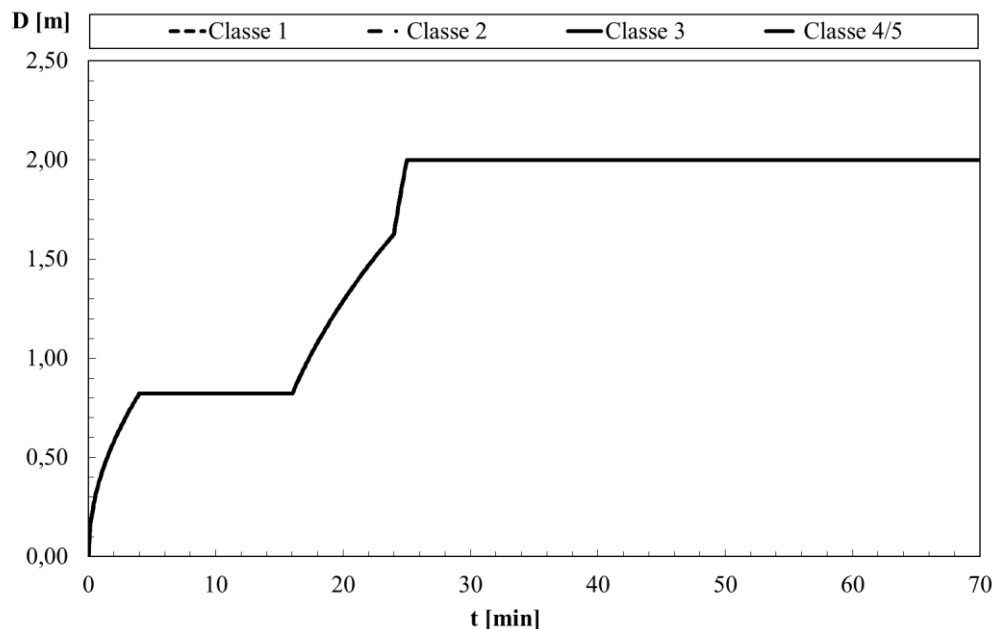


Figura 29 - Di\eametro do inc\ecndio variando com o tempo de inc\ecndio.

Por meio da an\alise da Figura 29 pode-se inferir que o di\eametro de inc\ecndio ser\ea o mesmo para toda e qualquer classe de ve\iculo, isso se explica pelo fato de que a taxa de transfer\ecencia de calor dos autom\oveis se baseia na curva de refer\ecncia para engenharia de seguran\ca de inc\ecndios que tem por base a classe de ve\iculos 3 [9], conforme foi explicado na se\c\ao 3.4- Taxa de libera\c\ao de calor de autom\oveis desta tese.

Analisando a Figura 29 se deduz tamb\em que a partir do momento em que o inc\ecndio atingir o seu di\eametro m\acute{a}ximo de 2 m, este se manter\ea constante at\e o t\ermino do inc\ecndio em 70 minutos. Este dado est\ea de acordo com o proposto pelo programa Elefir-EN [29] e explica-se pelo fato do inc\ecndio iniciar de um foco, aumentando sua \e

gradualmente e a partir do momento que o diâmetro atinge o valor máximo de  $2\text{ m}$  este mantém-se constante até que o incêndio se cesse.

Na Figura 30 pode-se analisar o diâmetro máximo considerando o incêndio de um automóvel que é de  $2\text{ m}$  [12].

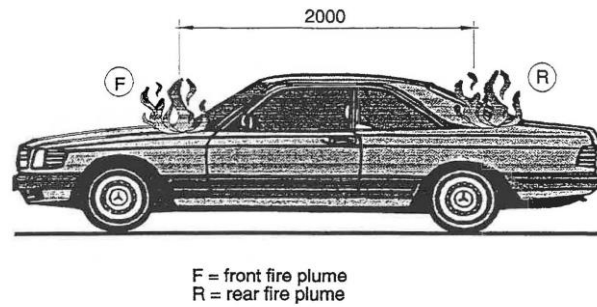


Figura 30 - Diâmetro máximo de um incêndio de um veículo [12].

#### 4- ANÁLISE TÉRMICA - MÉTODO DO CÁLCULO SIMPLIFICADO

Para a realização dos cálculos necessários para encontrar a temperatura na viga secundária, o primeiro passo é calcular o comprimento da chama ( $L_f$ ) e comparar com a altura útil do compartimento. Quando este valor é menor que a altura livre entre o foco do fogo e o teto do parque de estacionamento deve ser utilizado o método de Heskestad e quando o comprimento da chama for maior que a altura livre entre o foco do incêndio e o teto do parque de estacionamento deve ser utilizado o método de Hasemi. Na Figura 31 podemos observar o comprimento da chama com o evoluir do tempo de incêndio, considerando a combustão de veículos das diferentes classes.

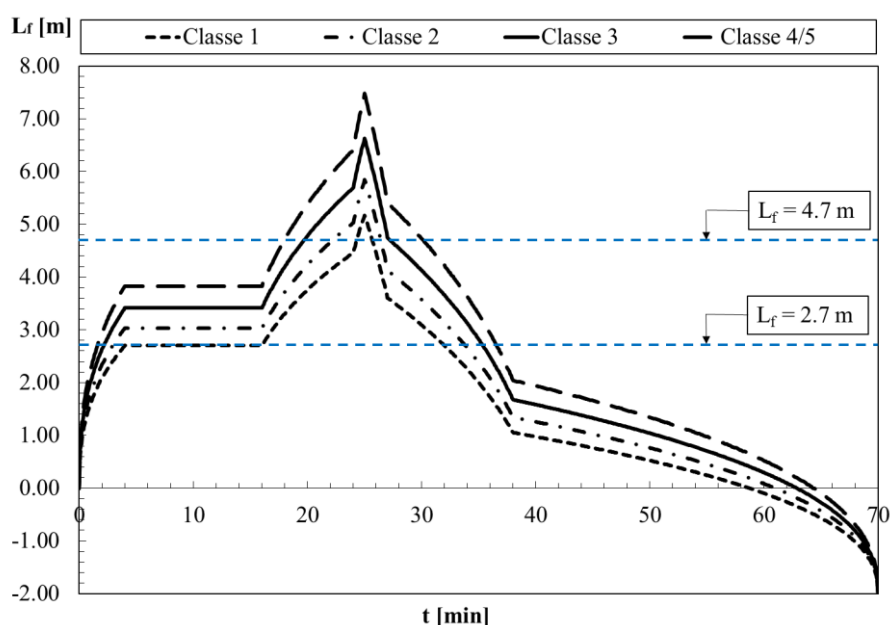


Figura 31 - Altura da chama com relação ao tempo de incêndio.

Por meio da análise da Figura 31 podemos inferir que para os instantes de tempo em que o comprimento da chama estiver acima da linha  $L_f = 2,7$  m, deve ser utilizado o método de Hasemi e para o caso em que o comprimento da chama está abaixo da linha  $L_f = 2,7$  m deve ser utilizado o método de Heskestad, para o compartimento de incêndio 1. Enquanto para o compartimento de incêndio 2 deverá ser utilizado o método de Hasemi quando o comprimento da chama for superior ou igual a  $4,7$  m ( $L_f \geq 4,7$  m), e o método de Heskestad quando o comprimento da chama for inferior a  $4,7$  m ( $L_f < 4,7$  m), conforme pode também ser observado na Figura 31.

Na Tabela 7 e na Tabela 8 encontram-se identificados os instantes de tempo nos quais cada um dos métodos (Heskestad e Hasemi) serão utilizados para cada uma das classes de veículos, sendo que a Tabela 7 diz respeito ao compartimento 1, enquanto a Tabela 8 diz respeito ao compartimento 2.

Tabela 7 - Períodos de utilização dos métodos de Heskestad e Hasemi para as diferentes classes de veículos considerando o compartimento de incêndio 1.

Classes de veículos	Métodos (tempo em minutos)		
	Heskestad	Hasemi	Heskestad
Classe 1	$0.00 \leq t < 4.00$	$4.00 \leq t \leq 32.00$	$32.00 < t \leq 70.00$
Classe 2	$0.00 \leq t < 3.00$	$3.00 \leq t \leq 33.83$	$33.83 < t \leq 70.00$
Classe 3	$0.00 \leq t < 2.17$	$2.17 \leq t \leq 35.33$	$35.33 < t \leq 70.00$
Classe 4/5	$0.00 \leq t < 1.67$	$1.67 \leq t \leq 36.50$	$36.50 < t \leq 70.00$

Tabela 8 - Períodos de utilização dos métodos de Heskestad e Hasemi para as diferentes classes de veículos considerando o compartimento de incêndio 2.

Classes de veículos	Métodos (tempo em minutos)		
	Heskestad	Hasemi	Heskestad
Classe 1	$0.00 \leq t < 24.33$	$24.33 \leq t \leq 25.67$	$25.67 < t \leq 70.00$
Classe 2	$0.00 \leq t < 22.25$	$22.25 \leq t \leq 26.42$	$26.42 < t \leq 70.00$
Classe 3	$0.00 \leq t < 19.75$	$19.75 \leq t \leq 27.17$	$27.17 < t \leq 70.00$
Classe 4/5	$0.00 \leq t < 18.00$	$18.00 \leq t \leq 30.08$	$30.08 < t \leq 70.00$

Depois de identificados os tempos para aplicação de cada um dos métodos utilizados, será necessário conhecer as propriedades termofísicas dos materiais expostos ao incêndio localizado, no caso, aço estrutural, concreto e ar. Estas propriedades dependem da temperatura, e permitem a determinação da evolução da temperatura em cada um dos elementos da estrutura. No caso particular, apenas está disponível um método de análise simplificado para os elementos em aço, por se assumir o modelo da capacitância térmica para este tipo de material, de acordo com Eurocódigo 3 (EN 1993-1-2) [46].

#### 4.1- Propriedades termofísicas dos materiais

As propriedades termofísicas dos materiais que devem ser utilizadas são: calor específico ( $c$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ) e densidade ( $\rho$ ).

O calor específico pode ser definido como sendo a quantidade de calor necessário para aumentar em 1 °C (ou 1 K) a temperatura de 1 g do material. A condutividade térmica é definida como sendo a habilidade de um material transportar energia térmica de uma região de alta temperatura para uma região de baixa temperatura [45].

#### 4.1.1- Aço estrutural

Para o aço estrutural (aço carbono) o calor específico ( $c_a$ ) pode ser determinado conforme exposto no conjunto de equações abaixo, retiradas da EN 1993-1-2 [46].

$$\text{Para } 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 600\text{ }^{\circ}\text{C}: \quad c_a = 425 + 7,73 * 10^{-1} * \theta_a - 1,69 * 10^{-3} * \theta_a^2 + 2,22 * 10^{-6} * \theta_a^3 \left[ \frac{J}{kg * K} \right] \quad (27a)$$

$$\text{Para } 600\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735\text{ }^{\circ}\text{C}: \quad c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \left[ \frac{J}{kg * K} \right] \quad (27b)$$

$$\text{Para } 735\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900\text{ }^{\circ}\text{C}: \quad c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \left[ \frac{J}{kg * K} \right] \quad (27c)$$

$$\text{Para } 900\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200\text{ }^{\circ}\text{C}: \quad c_a = 650 \left[ \frac{J}{kg * K} \right] \quad (27d)$$

A Figura 32 representa a variação do calor específico com a temperatura variando entre 20°C e 1200°C.

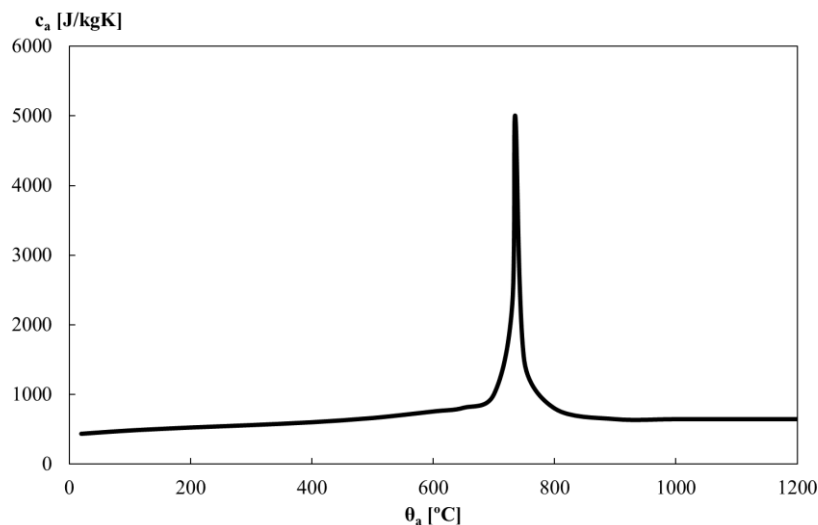


Figura 32 – Calor específico do aço carbono em função da temperatura.

A condutividade térmica do aço carbono ( $\lambda_a$ ) pode ser determinada conforme exposto no conjunto de equações abaixo, retiradas da EN 1993-1-2 [46].

$$\text{Para } 20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800\text{ }^\circ\text{C}: \quad \lambda_a = 54 - 3,33 * 10^{-2} * \theta_a \left[ \frac{W}{m * K} \right] \quad (28a)$$

$$\text{Para } 800\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1200\text{ }^\circ\text{C}: \quad \lambda_a = 27,3 \left[ \frac{W}{m * K} \right] \quad (28b)$$

Sendo que  $\theta_a$  representa a temperatura do aço, dada em  $^\circ\text{C}$ . Na Figura 33 se pode observar a variação da condutividade térmica com o aumento da temperatura.

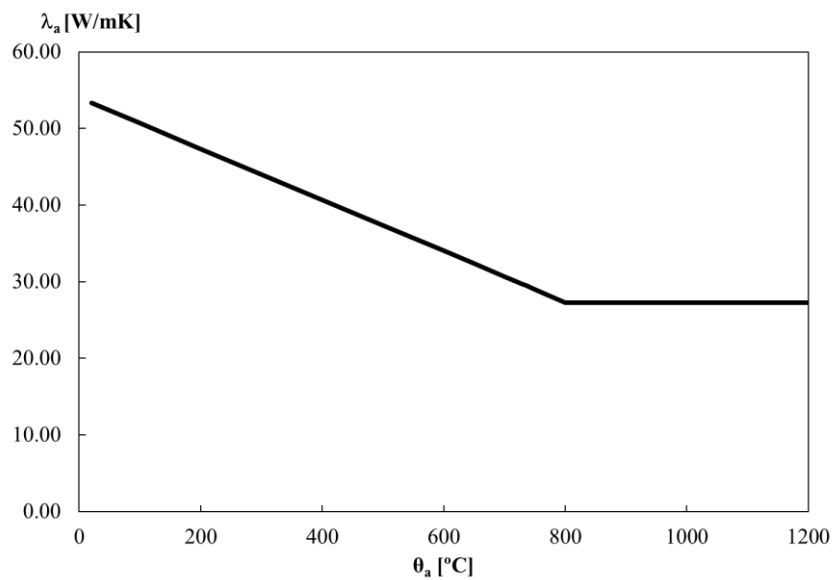


Figura 33 – Condutividade térmica do aço carbono em função da temperatura.

A densidade do aço carbono utilizada nesta tese será considerada constante e igual a  $\rho_a = 7850\text{ kg/m}^3$ , mesmo quando houver mudança na temperatura [46]. Na Figura 34 podemos observar o comportamento constante da densidade do aço carbono empregado.

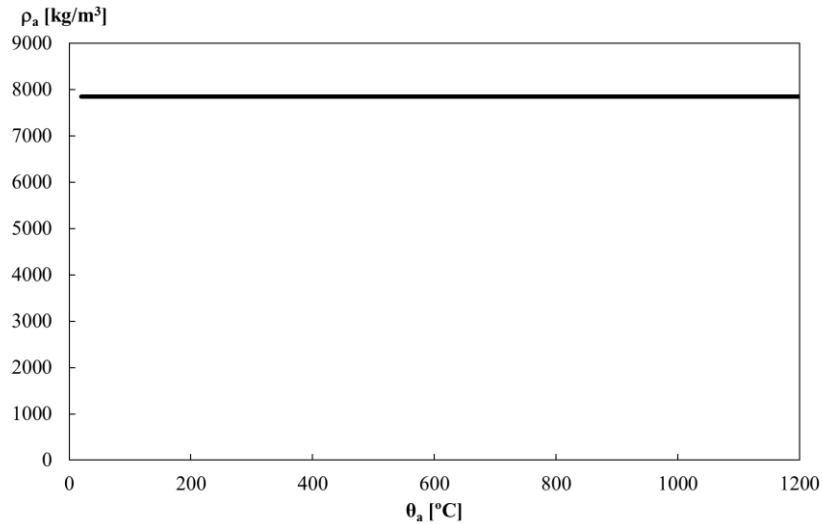


Figura 34 – Densidade do aço carbono em função da temperatura.

#### 4.1.2- Concreto

Considerando concreto seco, ou seja, com 0% de umidade ( $u = 0\%$ ), o calor específico ( $c_c$ ) pode ser determinado conforme exposto no conjunto de equações abaixo, retiradas da EN 1992-1-2 [47].

$$\text{Para } 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}: \quad c_c = 900 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} \right] \quad (29a)$$

$$\text{Para } 100\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}: \quad c_c = 900 + (\theta_c - 100) \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} \right] \quad (29b)$$

$$\text{Para } 200\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 400\text{ }^{\circ}\text{C}: \quad c_c = 1000 + \frac{(\theta_c - 200)}{2} \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} \right] \quad (29c)$$

$$\text{Para } 400\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 1200\text{ }^{\circ}\text{C}: \quad c_c = 1100 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} \right] \quad (29d)$$

A Figura 35 representa a variação do calor específico com a temperatura variando entre 20 °C e 1200 °C, com um grau de umidade de 3% em peso.

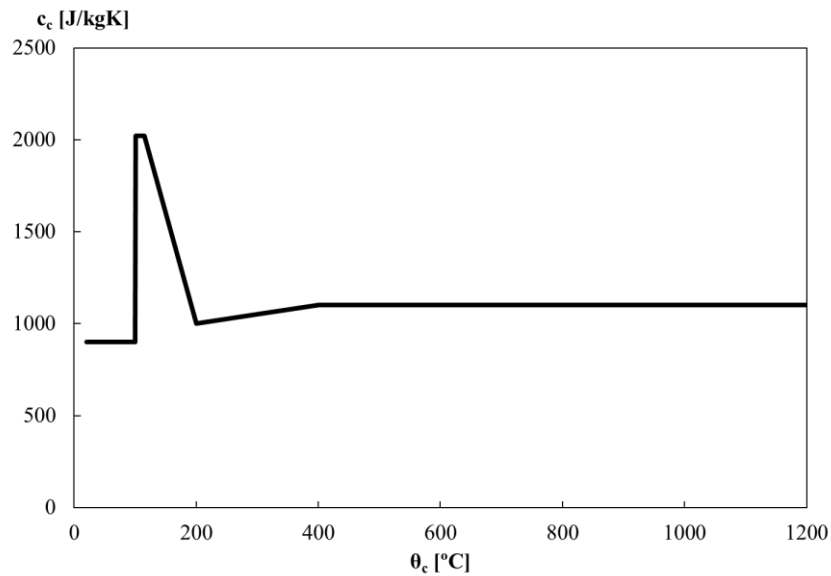


Figura 35 – Calor específico do concreto em função da temperatura.

A condutividade térmica do concreto ( $\lambda_c$ ) pode ser determinada entre valores limites superiores e inferiores, conforme exposto no conjunto de equações abaixo, retiradas da EN 1992-1-2 [47].

O valor superior de condutividade térmica do concreto será dado pela equação 30, enquanto o valor inferior de condutividade térmica do concreto será dado pela equação 31.

$$\text{Para } 20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}: \quad \lambda_c = 2 - 0,2451 * \frac{\theta_c}{100} + 0,0107 \quad (30)$$

$$* \left( \frac{\theta_c}{100} \right)^2 \left[ \frac{W}{m * K} \right]$$

$$\text{Para } 20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}: \quad \lambda_c = 1,36 - 0,136 * \frac{\theta_c}{100} + 0,0057 \quad (31)$$

$$* \left( \frac{\theta_c}{100} \right)^2 \left[ \frac{W}{m * K} \right]$$

A Figura 36 apresenta a variação da condutividade térmica do concreto com o aumento da temperatura, nela foi considerada a condutividade térmica superior.

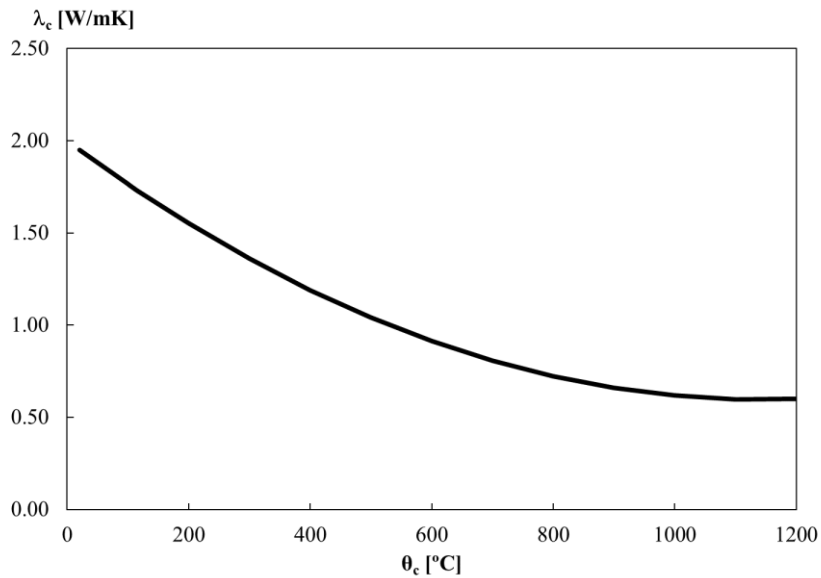


Figura 36 – Condutividade térmica do concreto em função da temperatura.

A densidade do concreto ( $\rho_c$ ) varia de acordo com a temperatura à que ele está exposto, isso ocorre devido à perda de água sofrida pelo concreto com a elevação da temperatura. A densidade pode ser determinada pelo conjunto de equações destacadas abaixo. Na Figura 37 podemos observar o comportamento da densidade do concreto em função da temperatura.

$$\text{Para } 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 115\text{ }^{\circ}\text{C}: \quad \rho_c = \rho_c(20^{\circ}\text{C}) \quad (32a)$$

$$\text{Para } 115\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}: \quad \rho_c = \rho_c(20^{\circ}\text{C}) * \left[ 1 - 0,02 * \frac{\theta_c - 115}{85} \right] \quad (32b)$$

$$\text{Para } 200\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 400\text{ }^{\circ}\text{C}: \quad \rho_c = \rho_c(20^{\circ}\text{C}) * \left[ 0,98 - 0,03 * \frac{\theta_c - 200}{200} \right] \quad (32c)$$

$$\text{Para } 400\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 1200\text{ }^{\circ}\text{C}: \quad \rho_c = \rho_c(20^{\circ}\text{C}) * \left[ 0,95 - 0,07 * \frac{\theta_c - 400}{800} \right] \quad (32d)$$

Sendo que  $\theta_c$  representa a temperatura do concreto, dada em  $^{\circ}\text{C}$ .

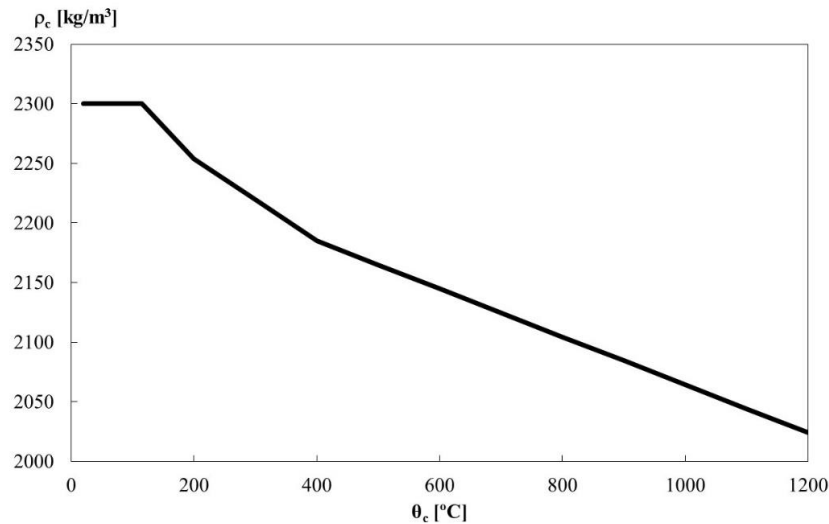


Figura 37 - Densidade do concreto em função da temperatura.

### 4.1.3- Ar

As propriedades termofísicas do ar podem ser retiradas de diversos livros de transferência de calor ou termodinâmica, como é o caso do Incropera (2008) [6], onde os autores retiraram as informações das seguintes fontes: Vargaftik (1975) [48], ASHRAE (1981) [49] e Eckert (1972) [50], sendo a primeira um conjunto de tabelas com as propriedades dos materiais, a segunda um *handbook* de fundamentos e o último um livro de transferência de calor e massa.

Nas figuras abaixo pode-se observar as propriedades de calor específico, condutividade térmica e densidade do ar variando conforme a temperatura.

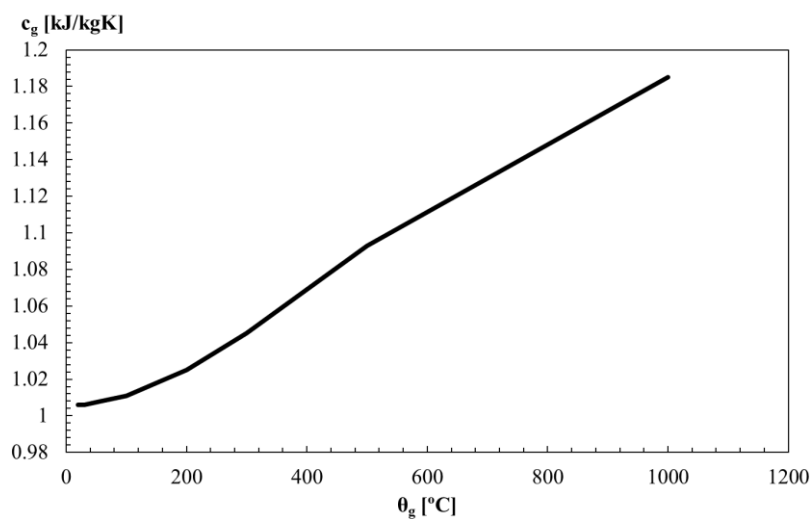


Figura 38 - Calor específico do ar em função da temperatura.

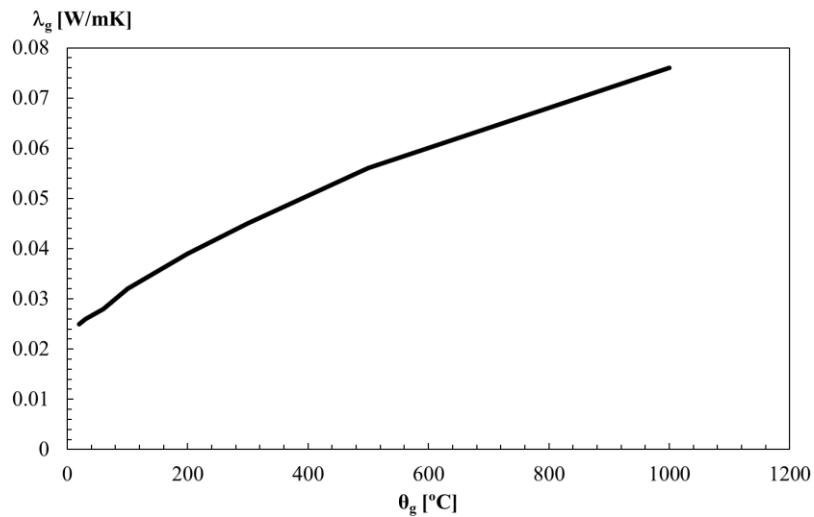


Figura 39 - Condutividade térmica do ar em função da temperatura.

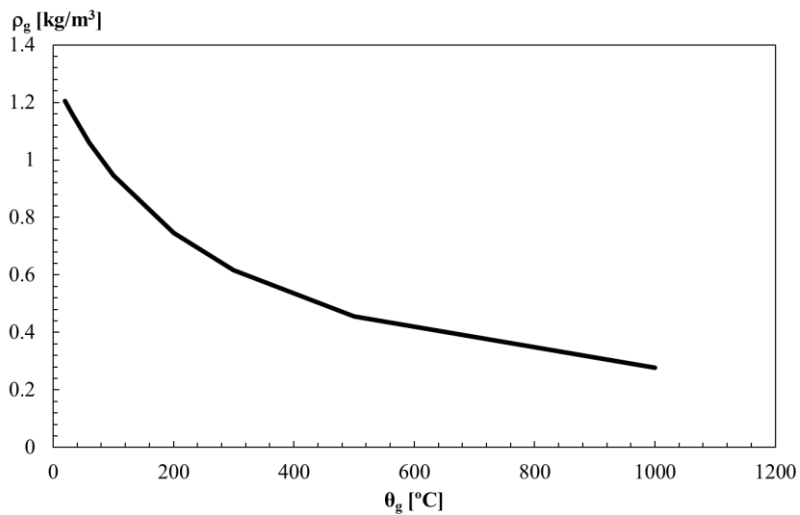


Figura 40 - Densidade do ar em função da temperatura.

#### 4.2- Cálculo da temperatura

Nesta seção será apresentado o cálculo da temperatura na viga secundária, levando em consideração os métodos simplificados de cálculo que foram apresentados na seção 3.5- Incêndios localizados. Para isso deverá ser considerada a classe do veículo em combustão, a distância relativa  $R$  entre o veículo e a linha do eixo vertical do fogo, o fator de seção do perfil escolhido para a viga e as dimensões do compartimento onde se desenvolve o incêndio localizado.

#### 4.2.1- Posição relativa do veículo

Para determinar a evolução da temperatura na viga secundária do parque de estacionamento aberto, será necessário considerar diferentes cenários, correspondendo a diferentes posições relativas que o veículo incendiado pode ocupar em relação ao eixo vertical do fogo. Essas diferentes posições serão identificadas pelo parâmetro:  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Vide Figura 41.

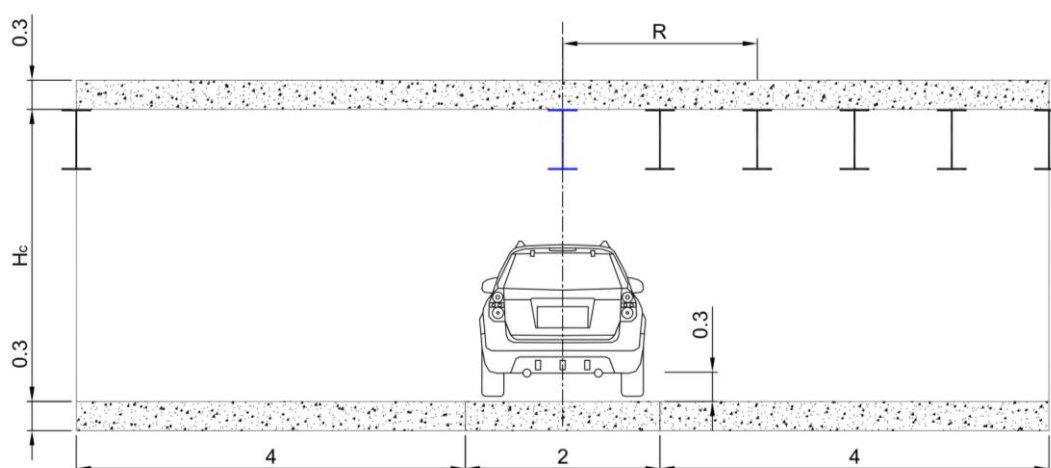


Figura 41 – Posições relativas do veículo com relação a viga secundária.

#### 4.2.2- Seção transversal da viga

Para este estudo foram utilizadas diferentes secções transversais de vigas, diferentes classes de veículos, diferentes posições relativas dos veículos dentro do parque de estacionamento e duas dimensões de compartimentos diferentes.

As vigas serão escolhidas com a maior variação possível do fator de secção ( $A_m/V$ ). Este fator varia em função do quociente da superfície do material exposta ao fogo em relação ao volume do elemento da viga. Neste trabalho, o fator de secção irá variar entre 80 e 150. Estes perfis foram escolhidos por possuírem dimensões normalmente utilizadas na estrutura de parques de estacionamentos abertos. Na Tabela 9 encontram-se as vigas escolhidas, bem como suas dimensões principais e o seu fator de secção. A Figura 42 apresenta a secção transversal de uma viga em I contendo suas dimensões principais.

Tabela 9 – Vigas escolhidas e suas dimensões principais.

Viga	$A_m/V$ [m <sup>-1</sup> ]	$[A_m/V]_b$ [m <sup>-1</sup> ]	h [mm]	b [mm]	$t_f$ [mm]	$t_w$ [mm]
IPE450	143	110	450	190	14.6	9.4
IPE500	134	104	500	200	16	10.2
IPE600	115	91	600	220	19	12
HE600A	89	65	590	300	25	13
HE650A	87	65	640	300	26	13.5

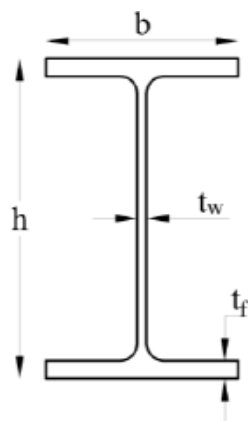


Figura 42 – Secção transversal de uma viga em I com suas dimensões principais destacadas.

#### 4.2.3- Desenvolvimento da temperatura na viga

Com o objetivo de calcular o efeito térmico em parte dos elementos mais importantes da estrutura de um parque de estacionamento, foi considerado o cenário de um incêndio localizado num compartimento que apresenta vigas secundárias expostas em aço (desprotegidas), nas quais se apoia a laje de concreto.

De acordo com o Eurocódigo 3 [46], o incremento de temperatura do aço pode ser determinado em função de algumas hipóteses. A norma europeia permite que se considere uma distribuição uniforme de temperatura na secção transversal, considerando que o aumento da energia sensível seja igual ao valor da energia que entra pela superfície exposta. O aumento da temperatura ( $\Delta\theta_{a,t}$ ), considerando um membro de aço desprotegido, durante um intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) pode ser determinado pela equação 33. O incremento de tempo deverá ser inferior ou igual a 5 s.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} * \frac{A_m}{c_a * \rho_a} * \dot{h}_{liq} * \Delta t \quad (33)$$

Sendo que:  $k_{sh}$  é o fator de correção para o efeito sombra, determinado pelas equações 34,  $\frac{A_m}{V}$  é o fator de secção para um membro de aço desprotegido [ $m^{-1}$ ],  $A_m$  é a área superficial do membro por unidade de comprimento [ $m^2/m$ ],  $V$  é o volume do membro por unidade de comprimento [ $m^3/m$ ],  $c_a$  é o calor específico do aço,  $\dot{h}_{liq}$  é o fluxo líquido de calor por unidade de área [ $W/m^2$ ],  $\rho_a$  é a densidade do aço [ $kg/m^3$ ].

Como se considera o fator de forma unitário na transferência de calor por radiação, será necessário compensar este efeito para o caso de secções côncavas. Para secção em I deve ser aplicada a equação 34a, enquanto que para demais secções a equação 34b.

$$k_{sh} = 0,9 * \left[ \frac{A_m}{V} \right]_b / \left[ \frac{A_m}{V} \right] \quad (34a)$$

$$k_{sh} = \left[ \frac{A_m}{V} \right]_b / \left[ \frac{A_m}{V} \right] \quad (34b)$$

Sendo  $\left[ \frac{A_m}{V} \right]_b$  o valor do fator de secção da caixa que envolve o perfil [46].

A seguir estão destacados os gráficos obtidos com relação à variação da temperatura do gás (ao redor do elemento estrutural utilizado) e à temperatura do aço.

Serão apresentados os gráficos correspondentes aos veículos da classe 3, pois segundo INERIS – *Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques* [51] um cenário de incêndio considerando veículos classe 3 é suficiente para avaliar a estabilidade estrutural de um estacionamento sob ação do fogo [42]. Os perfis escolhidos para serem apresentados serão o IPE500 e o IPE600.

Os gráficos para as restantes classes de veículos (classes 1, 2 e 4/5), considerando os perfis IPE450, IPE500, IPE600 HE600A e HE650A, para ambos compartimentos de incêndio, estão disponíveis no Anexo A. No mesmo anexo estão ainda os gráficos para a classe de veículo 3, considerando os perfis IPE450, HE600A e HE650A.

#### 4.2.4- Desenvolvimento da temperatura na viga de aço IPE500

Na Figura 43 e na Figura 44 podem-se observar os resultados obtidos para a temperatura da viga em aço com perfil IPE500 considerando a posição radial  $R = 0$  e todas as classes de veículos. Representa-se também a temperatura do gás próximo do elemento de viga para os mesmos cenários analisados. A Figura 43 representa o estudo

do compartimento de incêndio 1 e a Figura 44 o estudo do compartimento de incêndio 2. A mudança de método de análise durante o processo incremental implica descontinuidades no valor da temperatura dos gases, mas a temperatura no elemento de viga é sempre contínua. O valor máximo da temperatura no aço é sempre determinado depois de se atingir o valor de temperatura máxima dos gases ( $t = 25 \text{ min}$ ).

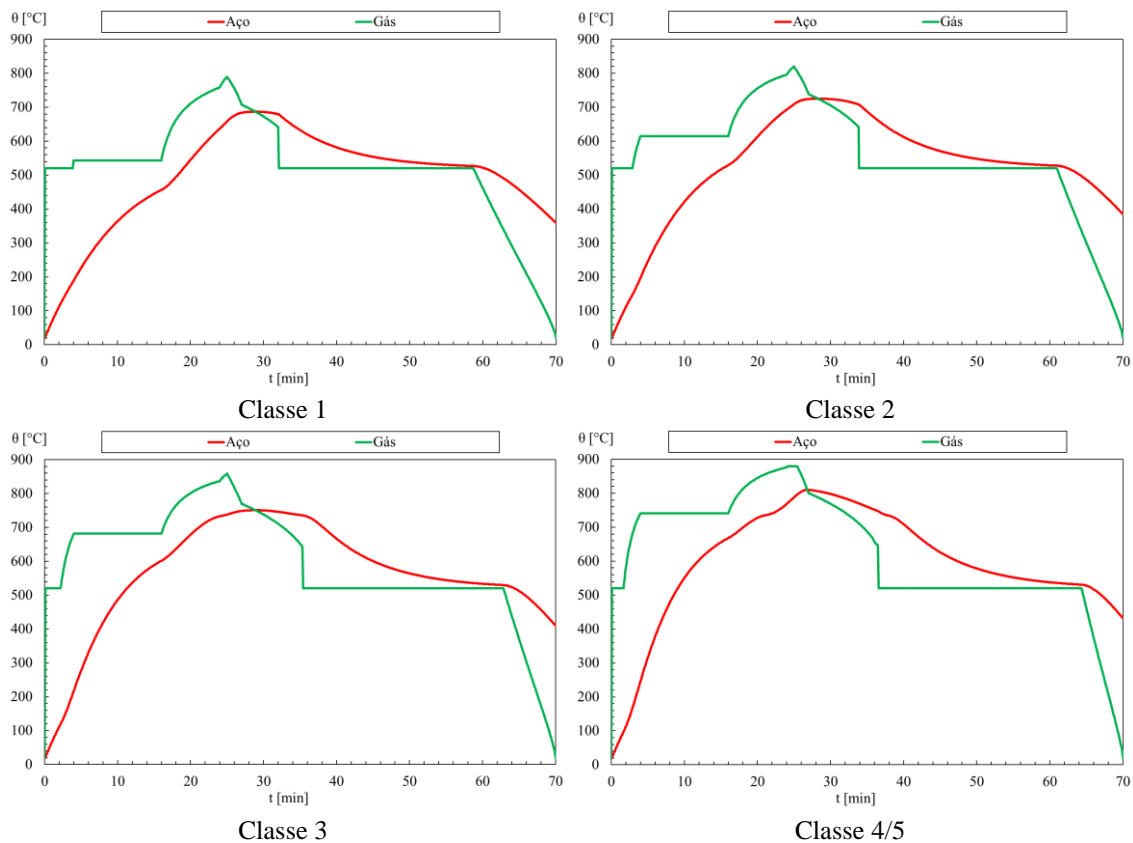


Figura 43 - Temperatura dos gases e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 1, R=0).

A temperatura do gás e do elemento de viga do compartimento 2 é menor do que os mesmos valores determinados para o compartimento 1, considerando o evento de incêndio localizado (mesma classe de veículo).

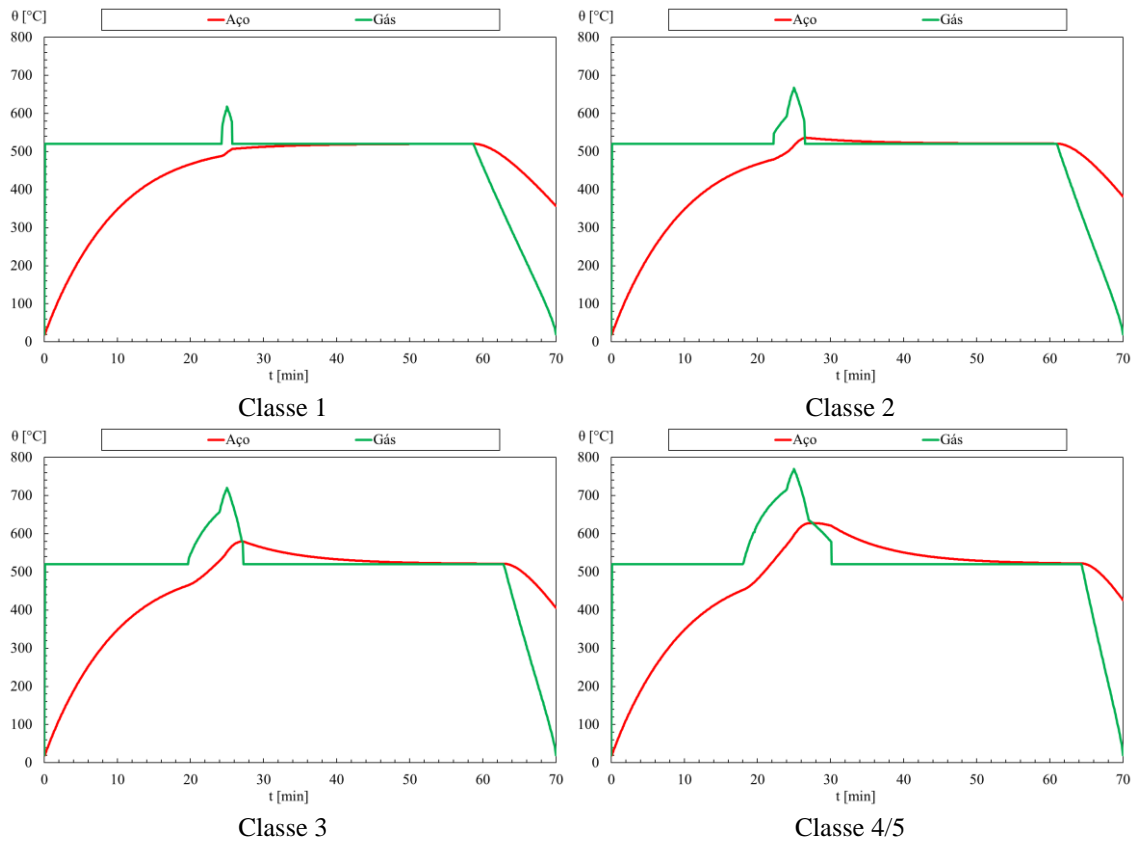


Figura 44 - Temperatura dos gases e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 2, R=0).

Na Figura 45 podem-se observar os resultados da evolução da temperatura, encontrados para a viga com perfil IPE500, considerando um incêndio localizado de um veículo da classe 3 para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m, considerando o compartimento de incêndio 1, com uma altura de  $H = 3$  m.

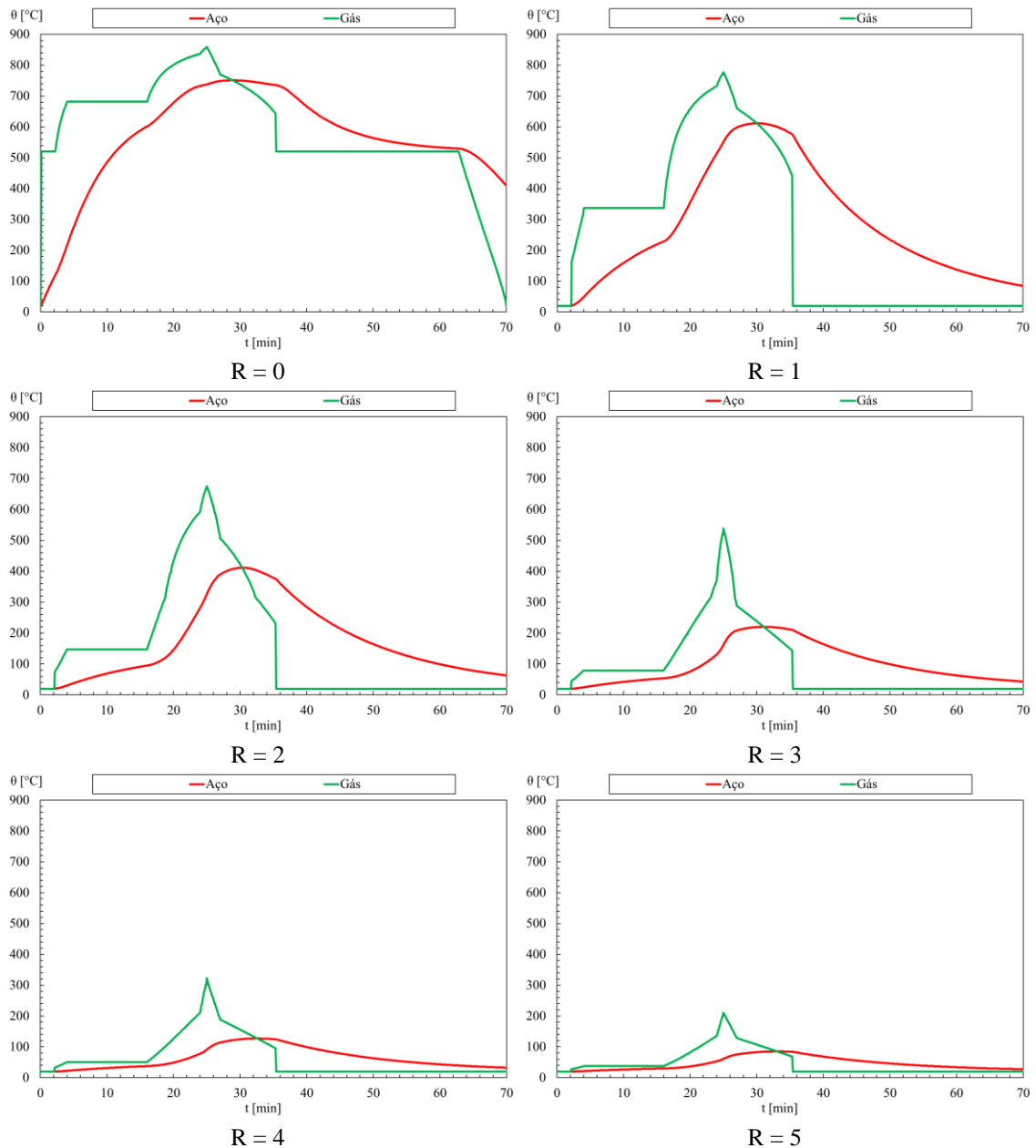


Figura 45 - Temperatura dos gases da viga em aço (compartimento 1).

Na Figura 46 podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE500, considerando um incêndio localizado de um veículo da classe 3 para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m, considerando o compartimento de incêndio 2, com  $H = 5$  m.

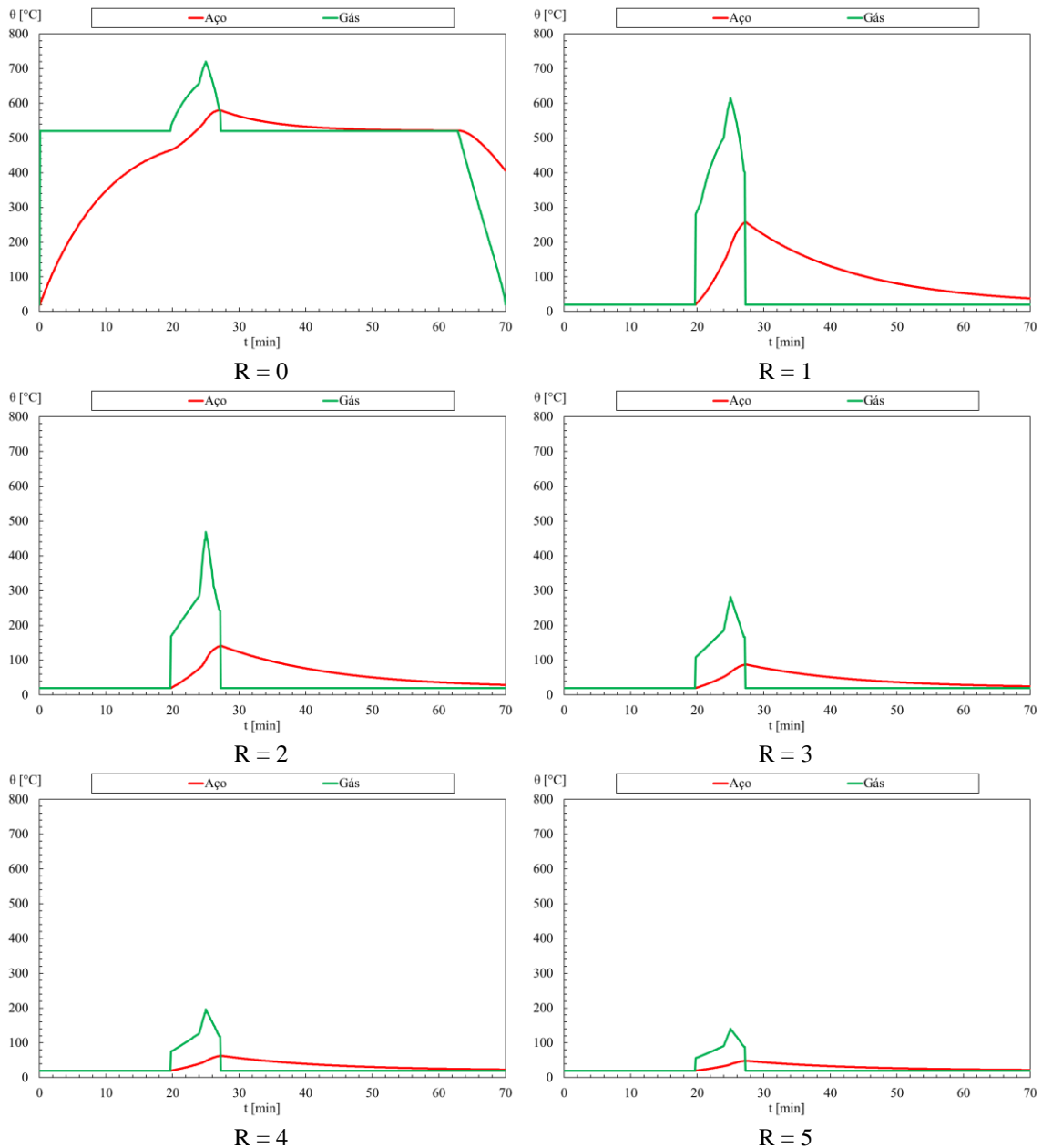


Figura 46 - Temperatura dos gases e da viga em aço (compartimento 2).

#### 4.2.5- Desenvolvimento da temperatura na viga de aço IPE600

Na Figura 47 e na Figura 48 podem-se observar os resultados obtidos para a evolução da temperatura da viga em aço com perfil IPE600, considerando a posição radial  $R = 0$  e para incêndios localizados de todas as classes de veículos. Também é representada a evolução da temperatura do gás próximo a viga para os mesmos eventos analisados. A Figura 47 representa o efeito no compartimento de incêndio 1 e a Figura 48 representa o efeito no compartimento de incêndio 2.

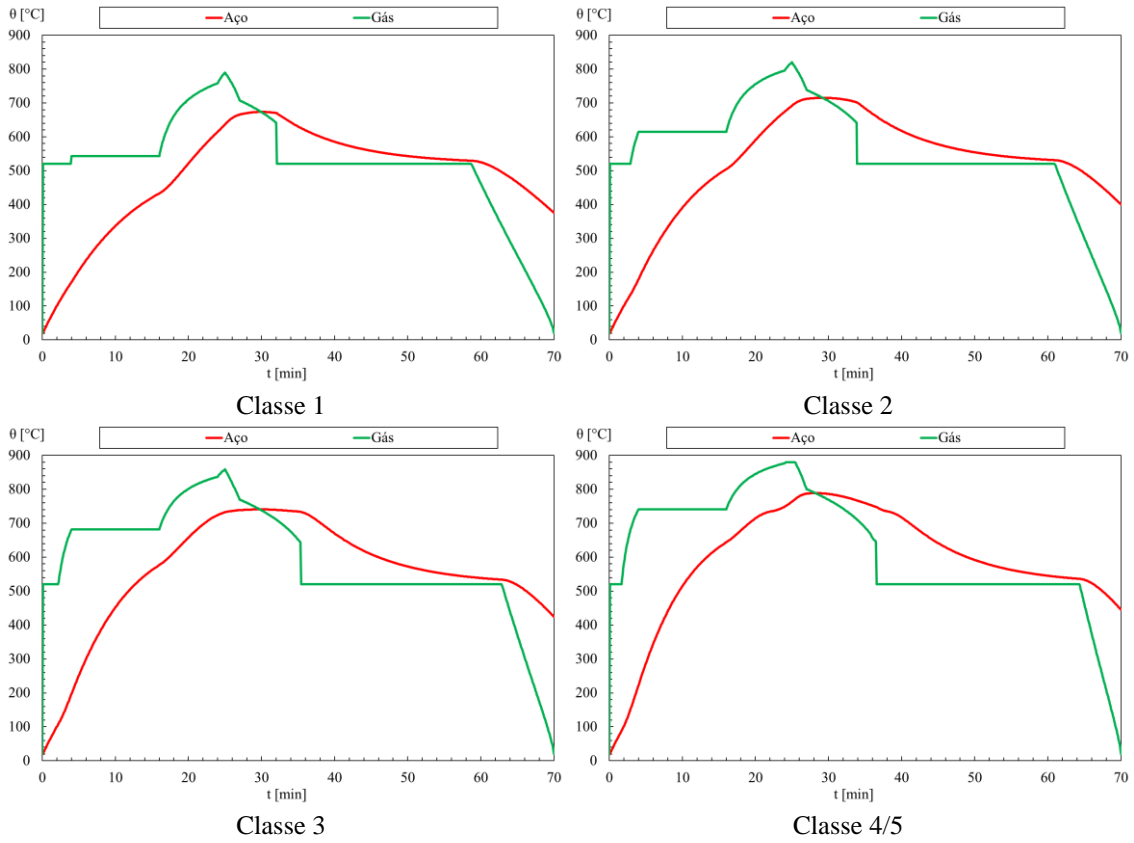


Figura 47 - Temperatura dos gases e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 1, R=0).

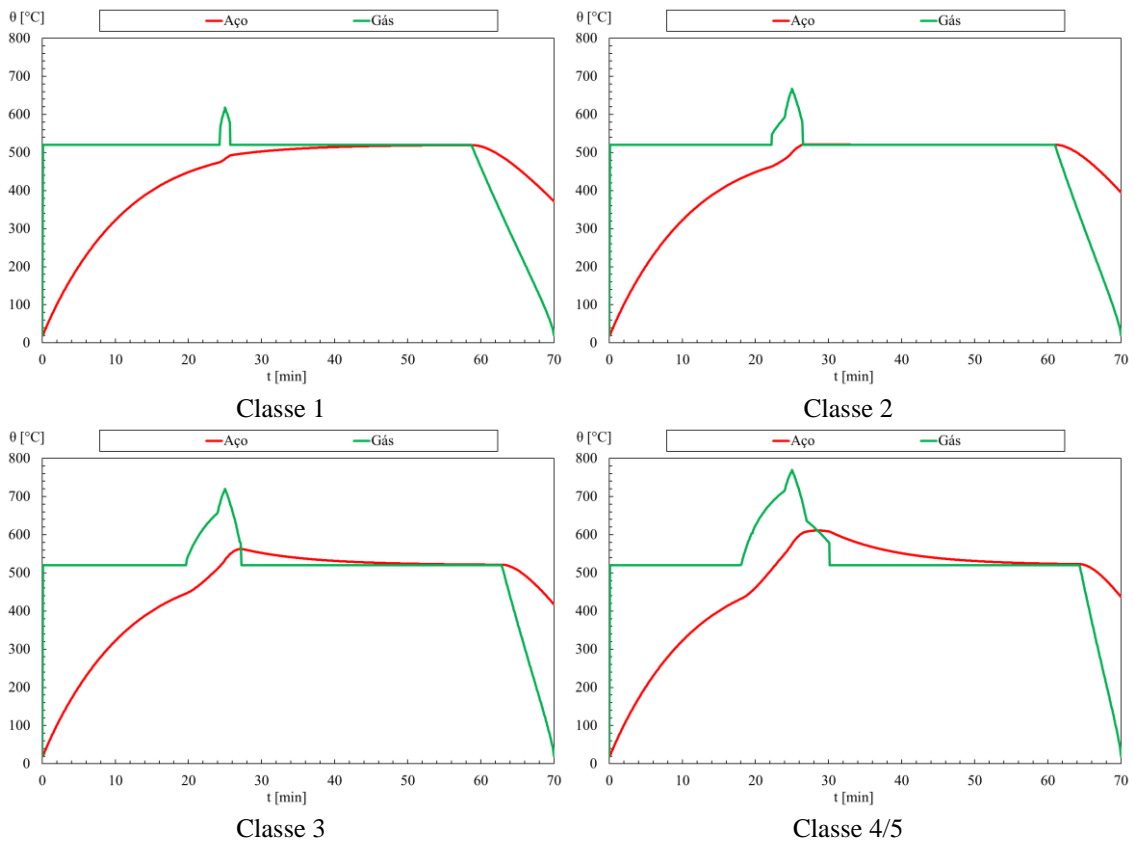


Figura 48 - Temperatura dos gases e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 2, R=0).

Na Figura 49 podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE600, considerando um incêndio de um veículo da classe 3 para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m, considerando o compartimento de incêndio 1, com  $H = 3$  m.

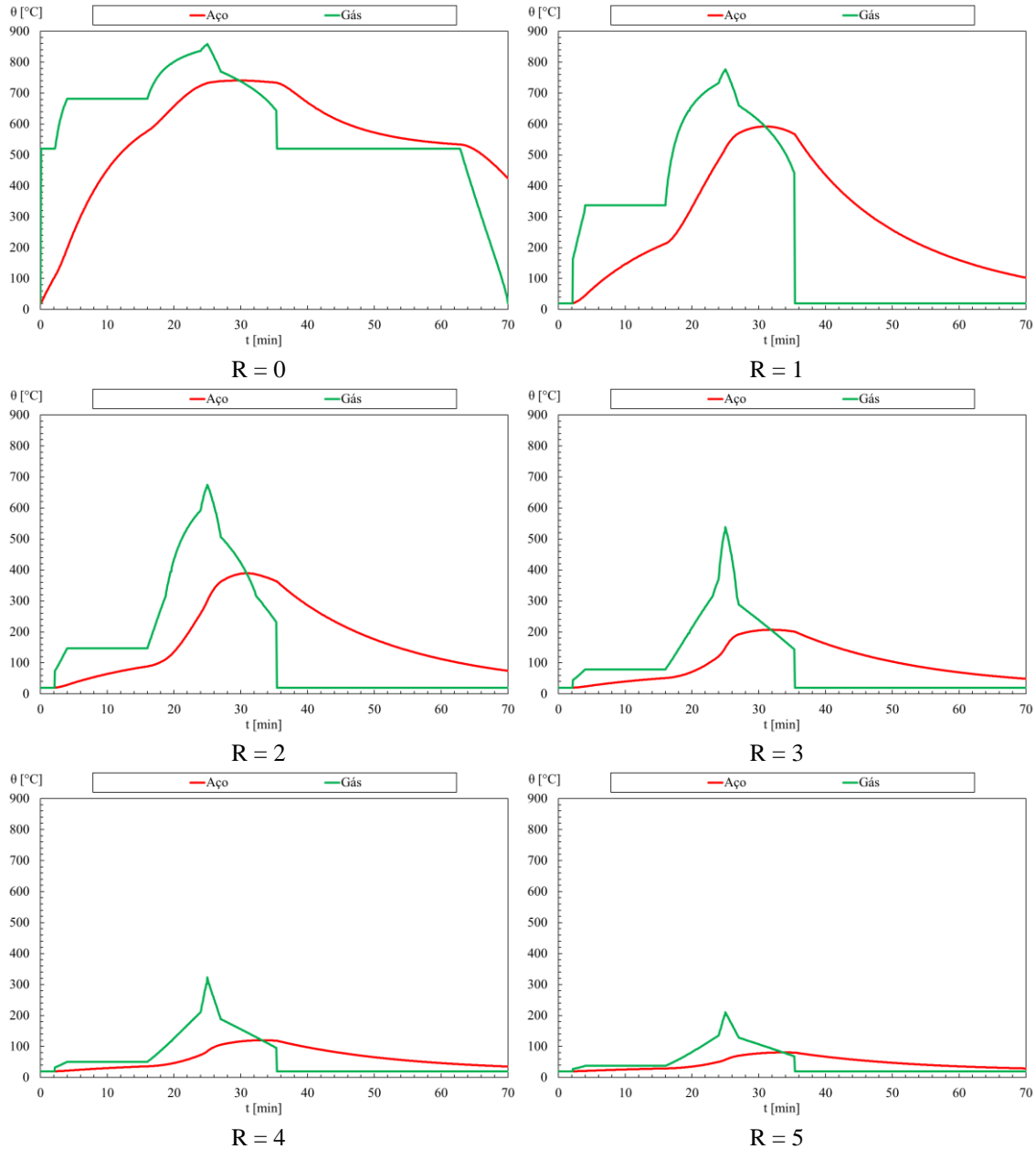


Figura 49 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço (compartimento 1).

Na Figura 50 podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE600, considerando o incêndio localizado de um veículo de classe 3 para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m, considerando o compartimento de incêndio 2, com  $H = 5$  m.

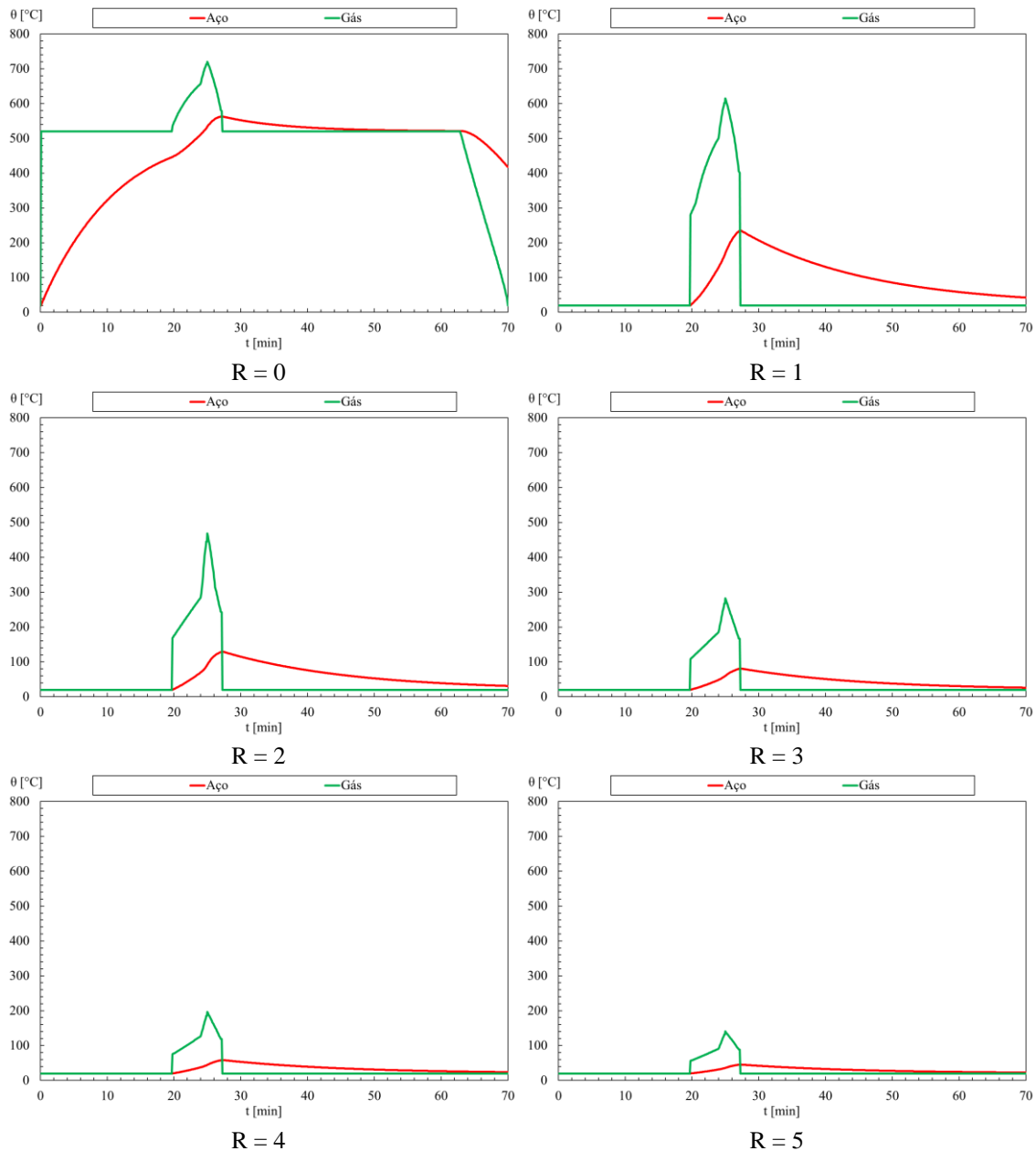


Figura 50 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço (compartimento 2).

#### 4.2.6- Discussão dos resultados obtidos pelo cálculo simplificado

Por meio da análise da Figura 43, Figura 44, Figura 47 e Figura 48 é possível constatar que à medida que aumentamos a quantidade de energia libertada para o compartimento de incêndio, a temperatura do ar e do elemento estrutural em aço utilizado aumenta, conforme esperado.

Pela análise dos resultados da Figura 45, Figura 46, Figura 49 e Figura 50, é possível verificar que a evolução da temperatura dos gases de incêndio possui patamares com valores constantes, correspondentes à temperatura de 520,31 °C. Este fato pode ser

explicado pela utilização do método de solução (Heskestad), equação 10, que resulta num valor constante, conforme equação 35.

$$\theta(z) = 20 + 0,25 * (0,8 * Q)^{2/3} * \left[ (-1,02 * D + 0,0148 * Q^{2/5}) - \right. \quad (35a)$$

$$\left. (-1,02 * D + 0,00524 * Q^{2/5}) \right]^{-5/3} \leq 900$$

$$\theta(z) = 20 + 0,25 * (0,8 * Q)^{2/3} * \left[ 0,00956 * Q^{2/5} \right]^{-5/3} \leq 900 \quad (35b)$$

$$\theta(z) = 20 + 0,25 * (0,8 * Q)^{2/3} * 0,00956^{-5/3} * Q^{-2/3} \leq 900 \quad (35c)$$

$$\theta(z) = 520,31^{\circ}\text{C} \leq 900 \quad (35d)$$

A temperatura do gás não é sempre constante pois quando  $L_f \leq 0$  é assumido o valor da coordenada  $z = 0$ , sendo assim a equação 10 pode ser reescrita conforme equação abaixo.

$$\theta(z) = 20 + 0,25 * Q_c^{2/3} * (-z_0)^{-5/3} \leq 900 \quad (36)$$

Analisando a equação 36 concluímos que ela não é uma equação constante, pois conforme variamos  $Q_c$  e  $z_0$ , o valor da temperatura do gás irá variar também.

Os patamares de temperatura do gás entre os instantes 4 e 16 minutos, presentes nos resultados para o compartimento de incêndio 1 (Figura 43, Figura 45, Figura 47 e Figura 49), dizem respeito ao método de Hasemi, pelo fato de a área do incêndio ser constante neste intervalo, pois como discutido anteriormente na seção 3.6.3- Área do incêndio, a área do incêndio varia ponderadamente de uma relação da taxa de transferência de calor no momento pela taxa de transferência de calor máxima, e como podemos observar na Figura 24 a taxa de transferência de calor permanece constante no intervalo de tempo citado acima. Este comportamento não é observado nos resultados para o compartimento 2 devido ao fato do incêndio tocar o teto somente aos 19 minutos, utilizando até este ponto o método de Heskestad, enquanto no compartimento 1 a chama atinge o teto e, portanto, passa a utilizar o método de Hasemi, já aos 2 minutos para o evento considerado.

A grande variação de temperatura que ocorre para  $R = 1,2,3,4,5$  m deve-se a mudança de método utilizado, ou seja, deve-se a mudança do método de Heskestad para o método de Hasemi e vice-versa. Para os cenários de incêndio em que  $R = 1,2,3,4,5$  m,

a temperatura dos gases próximo a viga antes da chama encostar no teto é considerada  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  que é a temperatura ambiente, após a chama deixar de tocar o teto, a temperatura volta a ser de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , motivo este que dá origem as grandes variações de temperatura dos gases para os instantes de tempo em que ocorrem as mudanças de método. Os tempos de mudança de método estão apresentados nas: Tabela 7 e Tabela 8.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## **5- ANÁLISE TÉRMICA – ELEFIR-EN**

### **5.1- Apresentação do programa Elefir-EN**

O programa Elefir-EN avalia a resistência ao fogo de membros em aço carbono e aço inoxidável, de acordo com o exposto nos Eurocódigos 1 e 3, sendo que neste caso, os resultados de aplicação do método simplificado são diferentes dos apresentados na seção 4- ANÁLISE TÉRMICA - MÉTODO DO CÁLCULO SIMPLIFICADO. O programa utiliza um método próprio que escolhe entre a resolução do evento localizado, utilizando o método de Heskestad para aqueles incêndios em que a chama nunca toca o teto e o método de Hasemi para aqueles incêndios em que a chama simplesmente toca o teto, independente o tempo de permanência do cenário nestas condições. Os cálculos podem ser realizados no domínio do tempo, da resistência e da temperatura. As dimensões das secções dos elementos utilizados para vigas podem ser escolhidas diretamente no programa: HD, HE, HL, HP, IPN, IPE, L, UB, UC, W, CHS, SHS, RHS, sendo possível também definir outros perfis não normalizados, apresentando as dimensões características do mesmo e seu formato (I, U, H, O, entre outros). O utilizador do programa pode ainda escolher o tipo de exposição do elemento estrutural: três ou quatro lados do elemento expostos à ação do fogo. Existe também a possibilidade de considerar a proteção para o perfil: contorno invólucro ou caixa invólucro; estando disponíveis no programa as propriedades térmicas dos materiais de proteção (lã de rocha, fibra de vidro, gesso), contando também com a opção de poderem ser adicionados novos materiais pelo utilizador. Estão disponíveis diferentes curvas de aquecimento: curva ISO, curva de incêndio externo, curva de incêndio com hidrocarbonetos, incêndio localizado, curvas paramétricas de incêndio e a possibilidade de introduzir uma curva definida pelo usuário. Após os cálculos, o programa apresenta como resultado as temperaturas máximas do compartimento e do perfil em aço, e o tempo necessário para atingir estes valores, bem como um gráfico representando a evolução da temperatura do compartimento e do perfil em função do tempo de incêndio analisado. Além desses resultados, é possível que o programa crie um relatório da simulação, apresentando todos os dados utilizados. Na Figura 51 está representada a tela inicial do programa Elefir-EN.



Figura 51 - Tela de abertura do programa Elefir-EN.

## 5.2- Condições utilizadas no programa Elefir-EN

Tendo em consideração os cenários de incêndio analisados, os cálculos foram desenvolvidos no domínio do tempo, usando todas as secções transversais de viga em estudo na tese, ver Tabela 9, considerando a opção de três lados expostos ao fogo, sem qualquer proteção. As curvas de incêndio utilizadas seguem as curvas da taxa de liberação de calor (HRR) para cada evento de incêndio (classe de veículo), conforme destacado na Figura 24, considerando um diâmetro máximo de 2 m. Para os cenários em estudo, como a chama toca o teto em todos eles, o programa utilizou para a resolução o método de Hasemi, durante todo o período de incêndio, independente de quando e por quanto tempo a chama se encontra nestas condições.

## 5.3- Resultados apresentados com a utilização do programa Elefir-EN

### 5.3.1- Viga em aço com perfil IPE500

Na Figura 52 e na Figura 53 encontram-se os resultados obtidos para a temperatura da viga em aço com perfil IPE500 considerando a posição radial  $R = 0$  e para todas as classes de veículos. Representa-se também a temperatura do gás próximo a viga para os mesmos cenários analisados. A Figura 52 representa os resultados para o compartimento de incêndio 1 e a Figura 53 representa os resultados para o compartimento de incêndio 2.

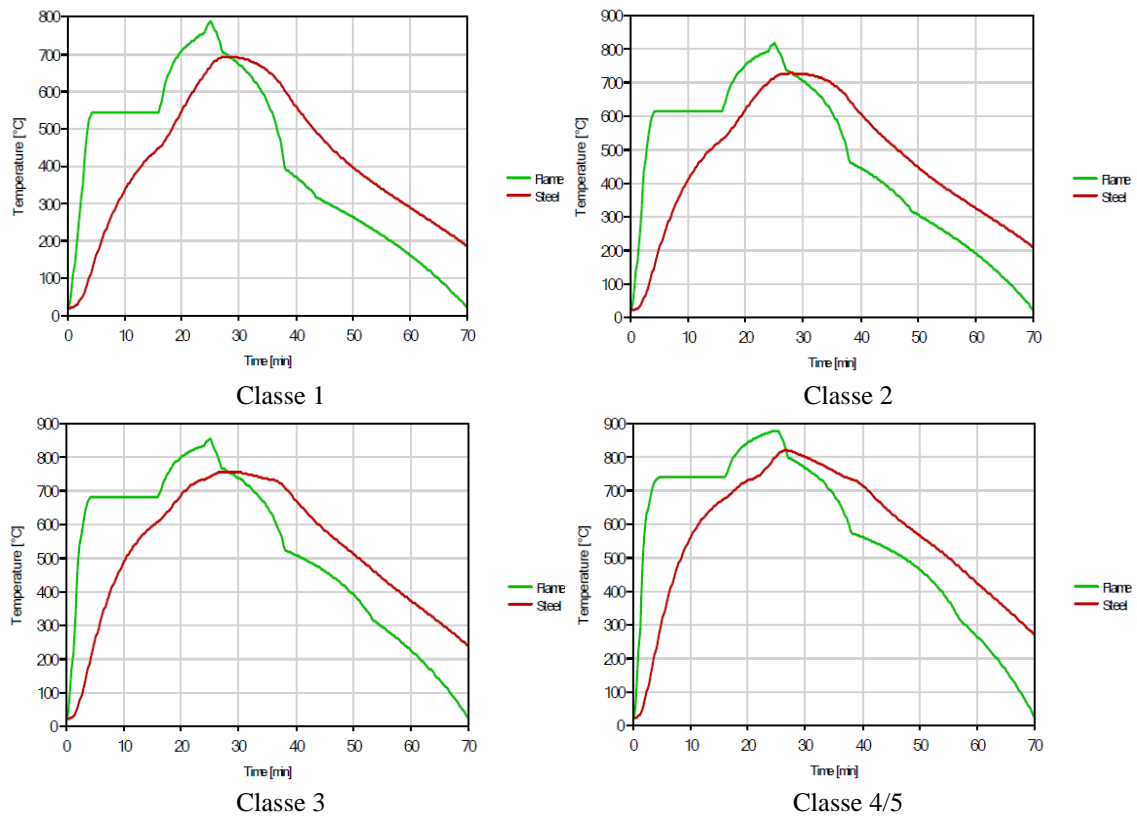


Figura 52 - Temperatura da chama e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 1, R=0).

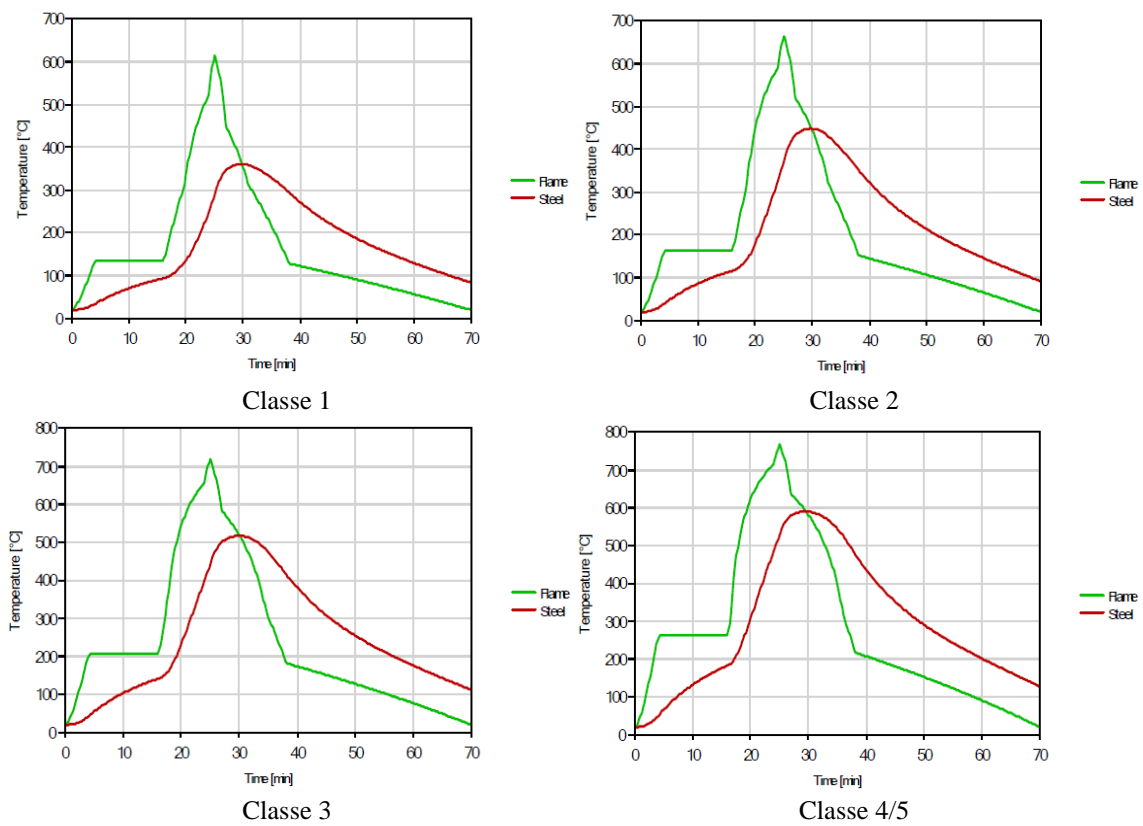


Figura 53 - Temperatura da chama e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 2, R=0).

Na Figura 54 e na Figura 55 estão apresentados os resultados obtidos para a temperatura da viga em aço com o perfil IPE500, considerando todas as posição radiais analisadas ( $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m) para um incêndio da classe 3 de veículo, tendo em consideração que esta é a classe com maior representatividade [42]. Representa-se também a temperatura do gás próximo da viga para os mesmos cenários analisados. A Figura 54 representa os resultados para o compartimento de incêndio 1 e a Figura 55 representa os resultados o compartimento de incêndio 2.

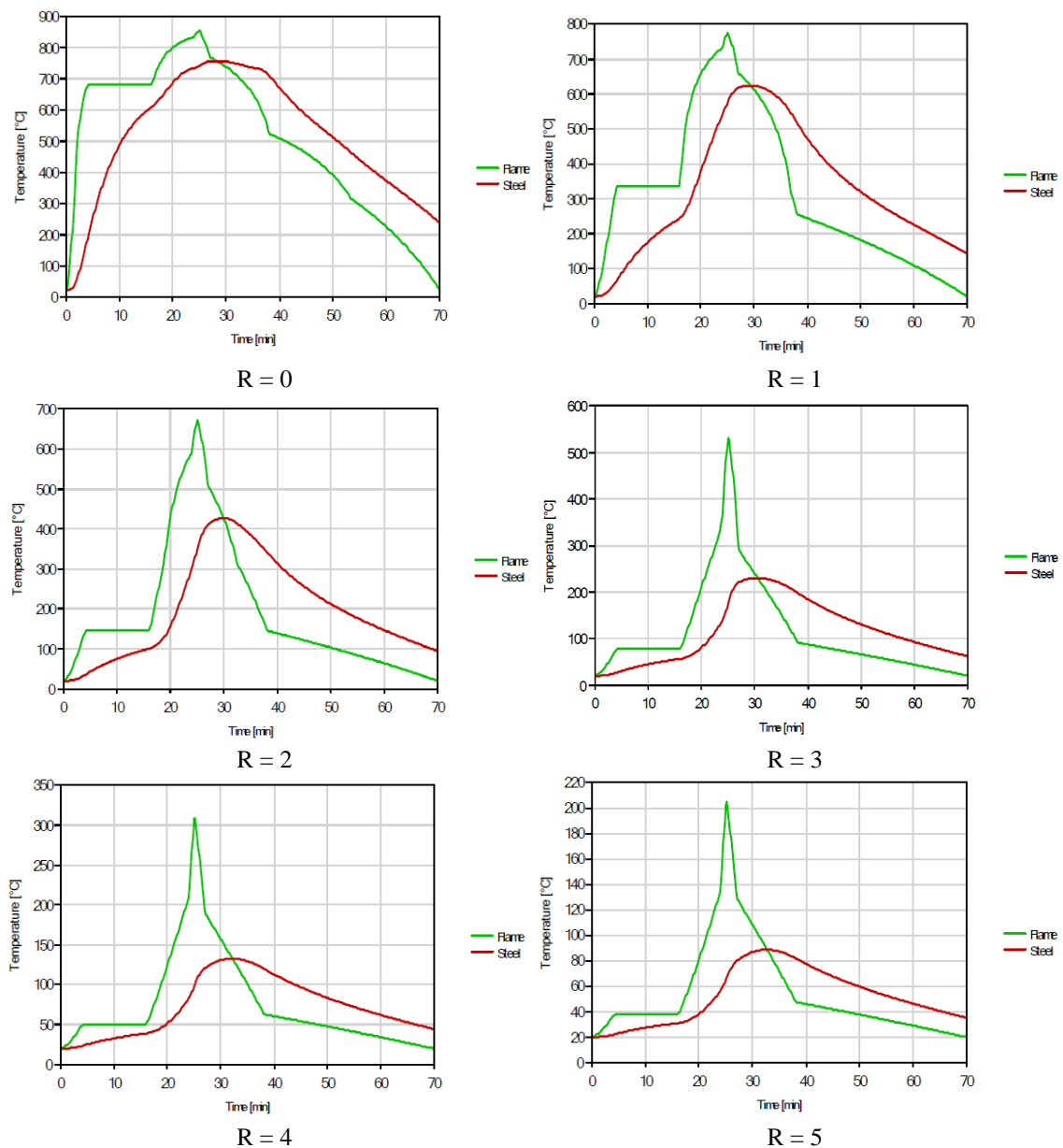


Figura 54 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço (compartimento 1).

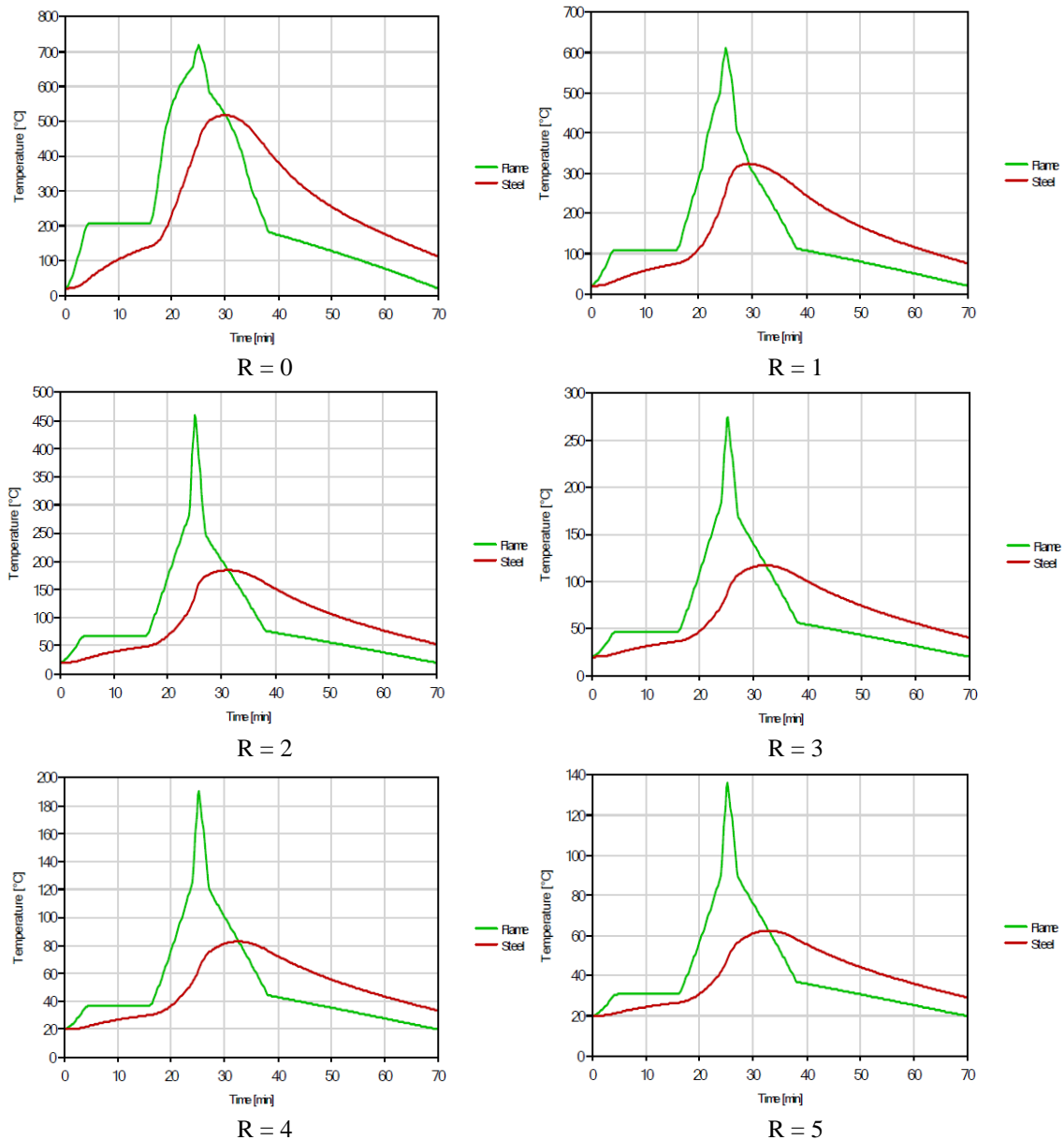


Figura 55 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço (compartimento 2).

Os resultados obtidos pelo programa diferem dos resultados obtidos pela utilização mista dos dois métodos de cálculo apresentados nesta tese, no entanto os valores máximos de ambas as temperaturas (gases e aço) são muito próximas.

### 5.3.2- Viga em aço com perfil IPE600

Na Figura 56 e na Figura 57 podem-se observar os resultados obtidos para a temperatura da viga em aço com perfil IPE600 considerando o cenário de incêndio para a posição radial  $R = 0$  e para todas as classes de veículos. Apresenta-se também a temperatura do gás próximo da viga para os mesmos cenários analisados.

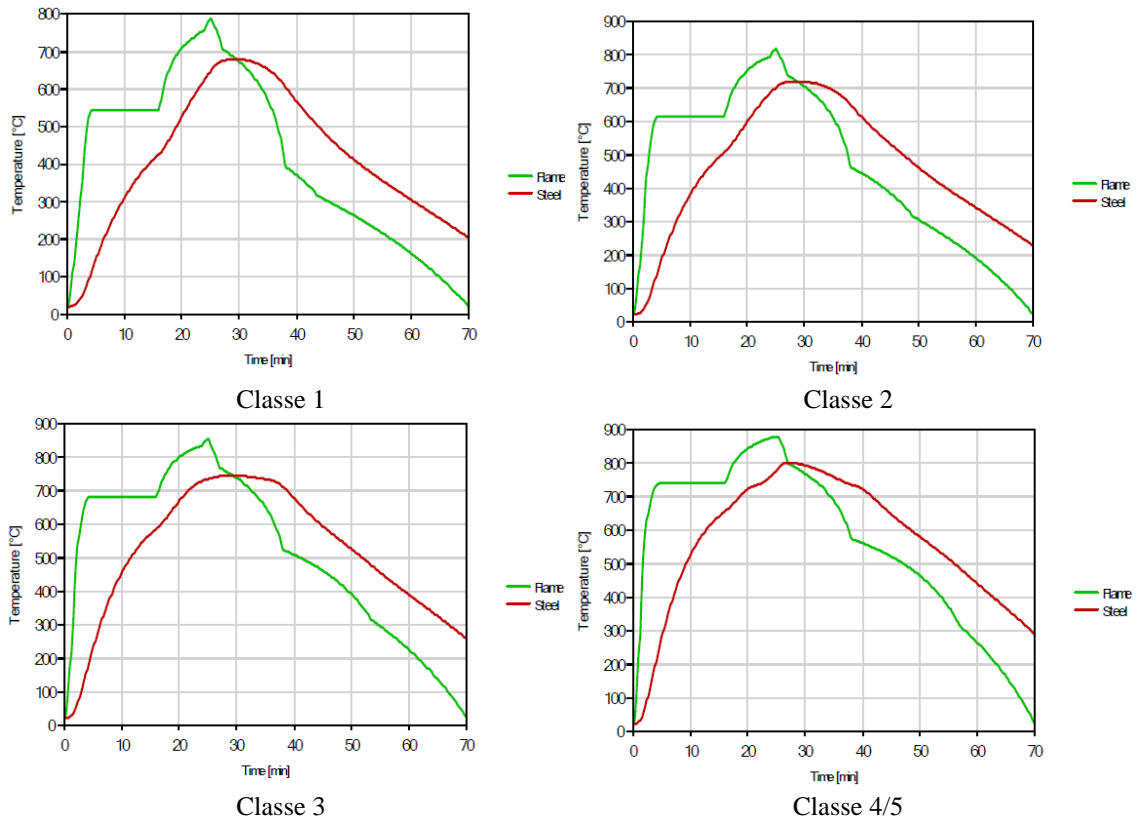


Figura 56 - Temperatura da chama e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 1, R=0).

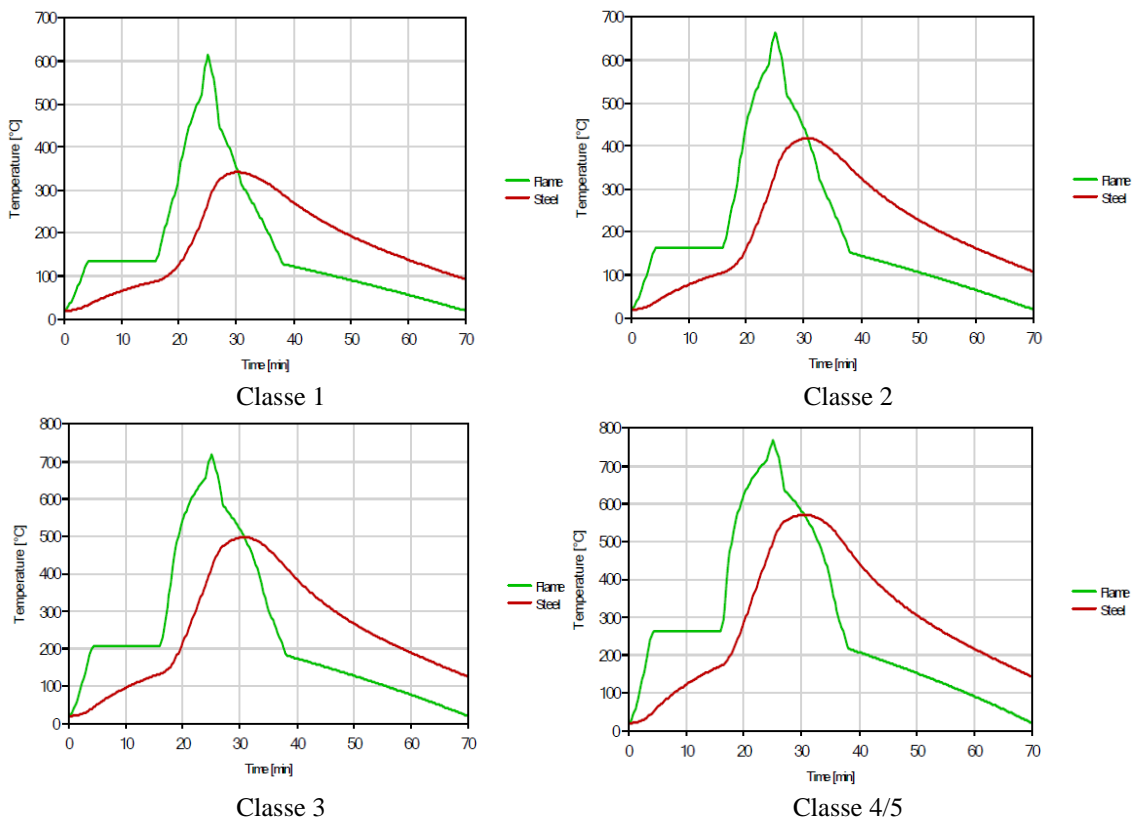


Figura 57 - Temperatura da chama e do aço para todas as classes de veículos (compartimento 2, R=0).

Na Figura 58 e na Figura 59 estão apresentados os resultados obtidos para a temperatura da viga em aço com o perfil IPE600, considerando todas as posição radiais analisadas ( $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m) e para o evento de incêndio localizado de um veículo de classe 3, assumindo que esta classe de veículo apresenta maior representatividade na estatística dos incêndios [42]. Apresenta-se também a temperatura do gás próximo da viga para os mesmos cenários analisados. Sendo que a Figura 58 representa os resultados para o compartimento de incêndio 1 e a Figura 59 representa os resultados para o compartimento de incêndio 2.

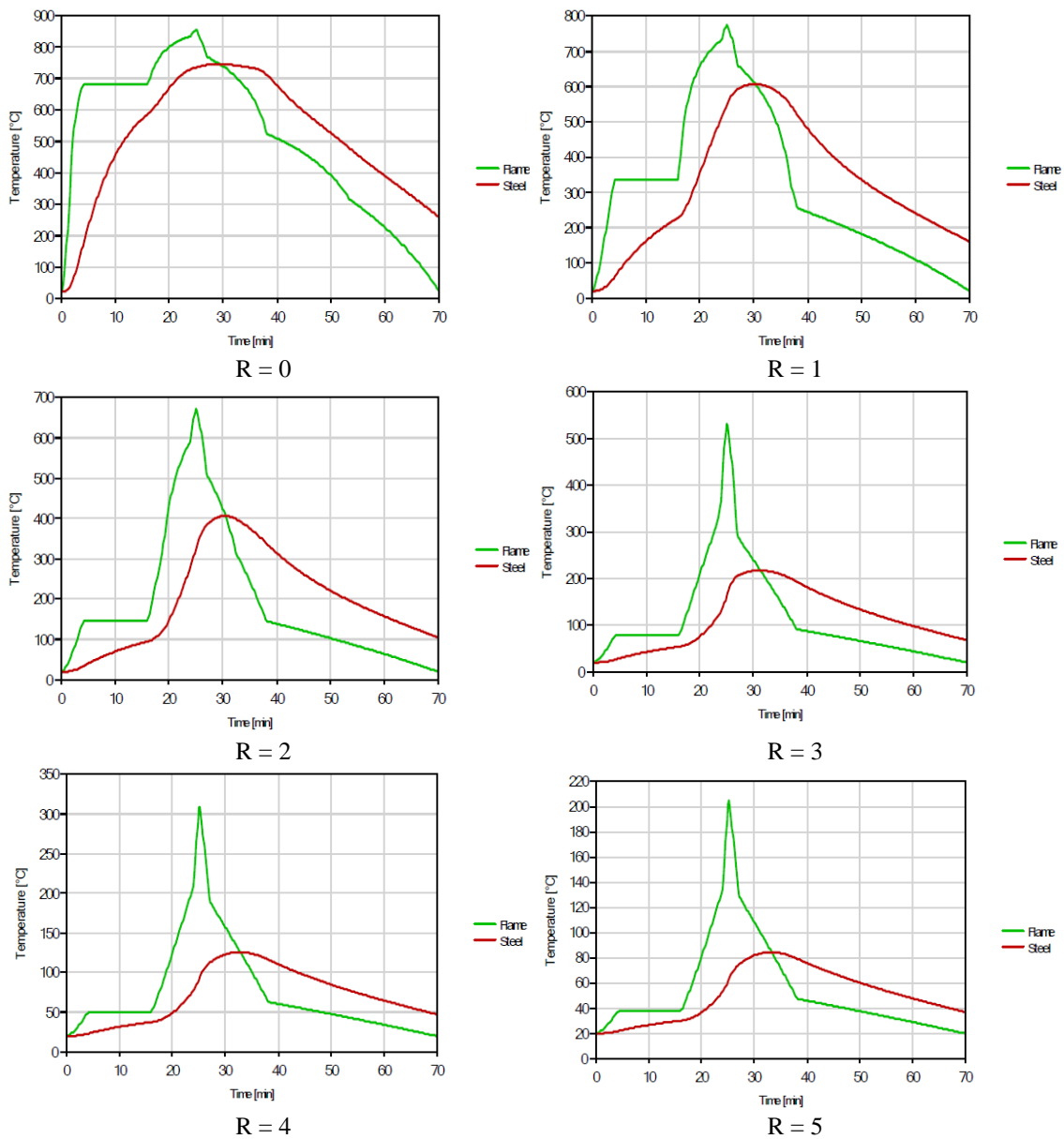


Figura 58 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço (compartimento 1).

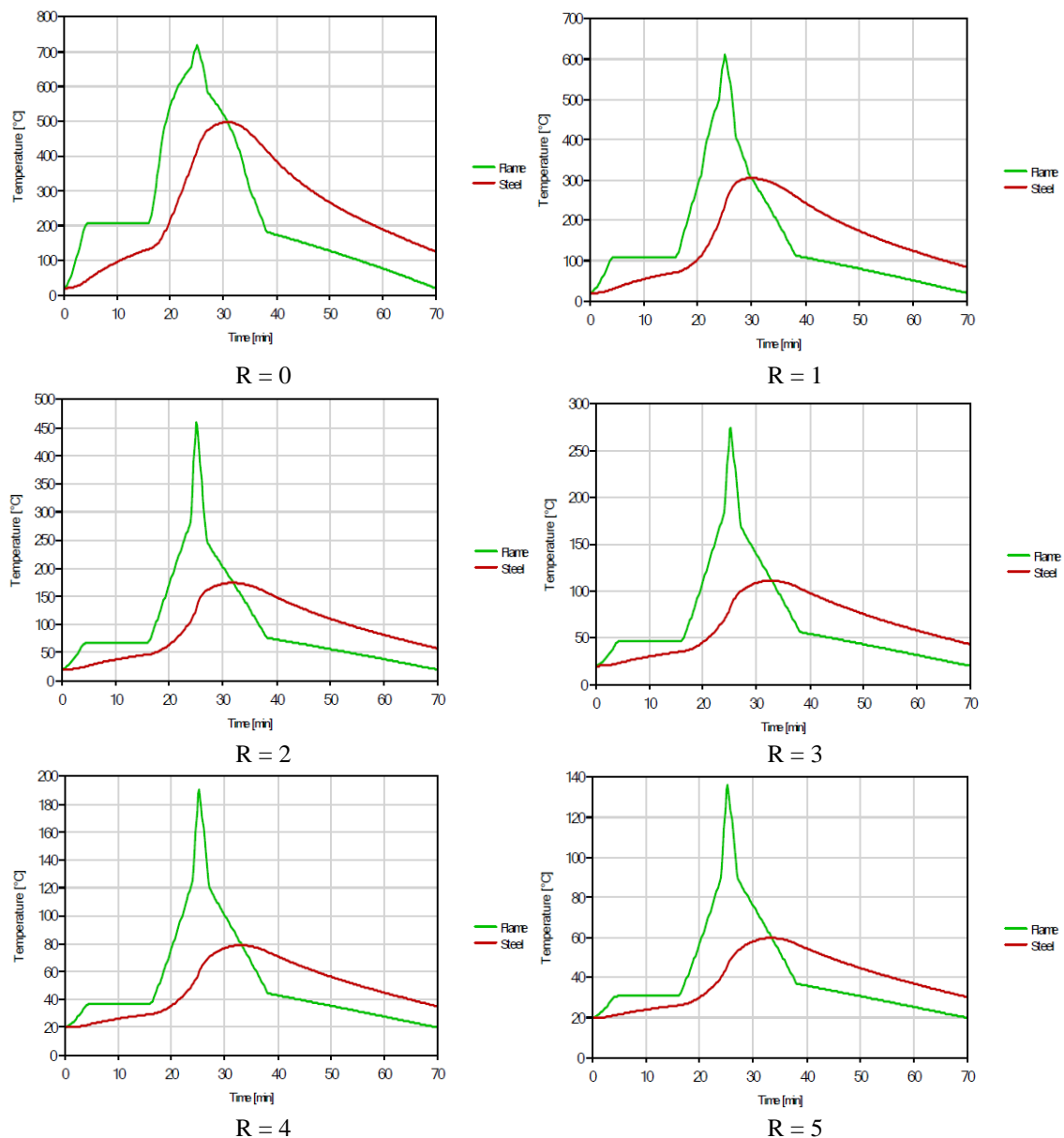


Figura 59 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço (compartimento 2).

### 5.3.3- Discussão dos resultados obtidos através do programa Elefir-EN

Por meio da análise da Figura 52, Figura 53, Figura 56 e Figura 57 é possível observar que conforme se aumenta a classe de veículo, maior deverá ser a temperatura no elemento estrutural e nos gases próximos a este elemento. Este é o comportamento esperado, tendo em vista que quanto maior a classe do veículo incendiado maior será sua energia potencial de combustão, ou seja, maior será a liberação de calor durante o incêndio.

Na Figura 54 e Figura 55 fica evidente de que quanto maior for a distância relativa entre o foco de incêndio e o teto do estacionamento, menor será a temperatura atingida pela viga considerando a mesma posição radial  $R$ . Este comportamento também era esperado, tendo em vista que, quanto maior for a altura do estacionamento maior será o espaço para a chama se propagar até atingir o teto, demorando mais tempo para atingi-lo, culminando em menores temperaturas no aço e nos gases próximo ao elemento estrutural. Um comportamento análogo pode ser observado entre a Figura 58 e a Figura 59.

Os resultados apresentados pelo programa Elefir-EN se diferem dos resultados apresentados por meio da utilização das formulações mistas (métodos de Heskestad e Hasemi), porque o programa, conforme destacado anteriormente, somente utilizou o método de Hasemi para todos os eventos de incêndio analisados, por isso as curvas de temperatura para o gás são sempre contínuas, não apresentando patamares de temperatura devido ao método de Heskestad que neste caso não foi utilizado, e não apresentando variações bruscas na temperatura do gás devido a mudanças de método, pois somente um método foi utilizado pelo programa.

Os únicos patamares de temperatura para o gás observados dizem respeito ao intervalo de tempo entre 4 e 16 minutos, período que apresenta taxa de liberação de calor constante, gerando uma área de incêndio constante, culminando em temperaturas constantes.

Os resultados para os demais cenários de incêndio analisados, podem ser observados no Anexo B.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## 6- ANÁLISE TÉRMICA - MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO

Para a resolução por meio do método avançado de cálculo foi utilizado o programa ANSYS, utilizando o aplicativo Workbench, por meio do sistema de análise dinâmica computacional (Fluent). ANSYS, Inc. é a empresa que desenvolve programas de simulação para utilização nas mais diversas áreas da engenharia. Em 2006, o programa Fluent passou a fazer parte do pacote oferecido pela ANSYS, Inc., devido ao fato da companhia Fluent, Inc. ter sido adquirida pela ANSYS, Inc.

ANSYS Fluent é um programa de dinâmica de fluídos computacional (CFD – *computational fluid dynamics*). Este programa apresenta inúmeros recursos de modelagem física necessários para modelar o comportamento dos gases, turbulência, transferência de calor para as regiões sólidas, para as mais diversas aplicações industriais, como é o caso da modelagem de incêndios em parques de estacionamento abertos. Nesta tese, o programa será utilizado para modelagem do incêndio de um veículo que se encontra dentro de um parque de estacionamento aberto. Após a resolução do modelo será possível determinar as temperaturas dos gases próximos da viga e a temperatura no elemento de viga (região sólida do modelo).

Como o programa está integrado na aplicação ANSYS, através do aplicativo ANSYS Workbench, é possível criar a geometria, a malha de volumes finitos e obter a solução em ambas as regiões (fluido e sólido).

A simulação de incêndios no ANSYS Fluent pode ser feita de duas maneiras distintas: utilizando o modelo adiabático de combustão não pré-misturada ou um modelo simplificado utilizando uma fonte de calor. Os resultados utilizando o modelo de combustão para a simulação de incêndio em um compartimento, geram resultados muito superiores aos esperados, pois este modelo foi desenvolvido para simulação de combustão em motores e não para incêndio que ocorrem de maneira não esperada em ambientes aleatórios. Sendo assim, foi utilizado o modelo alternativo, utilizando uma fonte de calor disposta nas aberturas do modelo, definidas como um perfil de velocidade e temperatura de entrada. Optou-se por este modelo de desenvolvimento tendo em consideração o trabalho de investigação de realizado por Viall e Wiegand [52].

## 6.1- Equações a serem resolvidas pelos modelos

Para a modelagem de um incêndio em um parque de estacionamento aberto é preciso levar em consideração 3 tipos de equações de equilíbrio, sendo elas: equações de conservação de massa, equações de conservação de momento e equações de conservação de energia. Além destes modelos de equações de equilíbrio, devemos também levar em consideração: modelo das equações de energia, modelo de radiação P-1 e modelo de escoamento turbulento k-épsilon. Para isso é preciso selecionar inicialmente o tipo de solver que será realizado, neste caso do tipo baseado na pressão com comportamento transiente e aceleração da gravidade igual a  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Após isso devemos selecionar os modelos de resolução: equações de energia, escoamento turbulento k-épsilon e radiação P1, pois as equações de conservação de massa e conservação de momento já estão pré-carregadas no programa, não precisando ser selecionadas pelo utilizador.

A equação de conservação de massa deve ser satisfeita para todo sistema fechado, tendo em vista que massa não se cria e nem se destrói. A equação que governa a conservação de massa é conhecida como equação da continuidade [53]. A equação 37 diz respeito a equação da continuidade.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (37)$$

Sendo:  $\rho$  a densidade,  $t$  o tempo,  $\nabla$  um operador definido como  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k$ , e  $\vec{V}$  um vetor velocidade ( $V_x i + V_y j + V_z k$ ).

A equação 37 pode ser expandida, se tornando a equação 38.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho V_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho V_z}{\partial z} = 0 \quad (38)$$

As equações de conservação de momento para qualquer fluido Newtoniano são descritas por meio de um conjunto tridimensional de equações chamadas de equações de Navier-Stokes, conforme pode ser visualizado no conjunto de equações 39. Estas equações expressam que a força total gerada pelo momento transferido em cada direção deve ser balanceada pela taxa de mudança do momento em cada direção [53].

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_x)}{\partial z} \\ = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) + T_x \end{aligned} \quad (39a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_y}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_y)}{\partial z} \\ = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + R_y + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) + T_y \end{aligned} \quad (39b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_z}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_z)}{\partial z} \\ = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) + T_z \end{aligned} \quad (39c)$$

Sendo que:  $g_{x,y,z}$  são componentes da aceleração da gravidade,  $\mu_e$  é a viscosidade do fluido,  $R_{x,y,z}$  são resistências distribuídas, e  $T_{x,y,z}$  são as perdas de viscosidade.

Os termos  $R_{x,y,z}$  podem ser inseridos pelo usuário diretamente no ANSYS, representado uma fonte de energia devido a uma reação química ou uma fonte de massa devido a condensação. Caso o usuário não insira nenhum valor neste termo ele é desconsiderado pelo programa ANSYS. E os termos  $T_{x,y,z}$  devem ser eliminados no caso de fluidos incompressíveis.

O modelo da equação de energia é usado para contabilizar a transferência de calor realizada no processo do incêndio, ele é retirado do enunciado da primeira lei da termodinâmica. A energia não pode ser criada ou consumida por um sistema, apenas pode ser transferida ou armazenada por ele. A equação 40 diz respeito a equação de energia resolvida pelo ANSYS Fluent, onde  $k_{eff}$  é a condutividade efetiva;  $\vec{j}_j$  é o fluxo de difusão de espécies  $j$ ;  $T$  é a temperatura;  $E$  é a energia calculada por:  $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$ , sendo  $h$  a entalpia;  $p$  a pressão;  $\rho$  a densidade;  $v$  a velocidade; os três primeiros termos do lado direito da equação 40 dizem respeito a energia transferida devido a condução, difusão de

espécies e dissipação viscosa, respectivamente;  $S_h$  inclui as fontes de calor volumétricas definidas previamente pelo utilizador [54].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (40)$$

O modelo de escoamento turbulento k-épsilon utilizado resolve duas equações, sendo que este modelo leva em consideração fluidos turbulentos, transferência de calor e de massa. As equações 41 e 42 são resolvidas pelo ANSYS Fluent considerando o modelo turbulento k-épsilon, sendo  $k$  a energia cinética de turbulência e  $\varepsilon$  a taxa de dissipação [54].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (42)$$

Nestas equações  $G_k$  representa a geração de energia cinética turbulenta devido ao gradiente médio de velocidade,  $G_b$  é a geração de energia cinética turbulenta devido a flutuabilidade,  $Y_m$  representa a contribuição da dilatação flutuante na turbulência compressível para a taxa de dissipação global;  $u_i$  representa a velocidade;  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$  são constantes;  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  correspondem aos números de Prandtl turbulento para  $k$  e  $\varepsilon$ , respectivamente; e, finalmente,  $S_k$  e  $S_\varepsilon$  são fontes térmicas definidas pelo utilizador [54].

O modelo de radiação P-1 é o mais simples dentro os modelos de radiação P-N e também o mais simples dentre os modelos necessários para a simulação de incêndio utilizada. Ele modela a radiação do corpo cinzento por meio da obtenção do fluxo de radiação ( $q_r$ ), seguindo a equação 43, sendo  $a$  o coeficiente de absorção,  $\sigma_s$  o coeficiente de dispersão,  $G$  a radiação incidente e  $C$  o coeficiente de função de fase linear-anisotrópica [54]. Este modelo, por se tratar de um modelo simples, é facilmente resolvido pelo ANSYS Fluent, pelo que não aumenta o tempo de simulação significativamente [52].

$$q_r = -\frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (43)$$

Dessa maneira, tendo em consideração as equações que a simulação deverá resolver, é necessário definir critérios de convergência para as variáveis que serão iteradas durante o processo de resolução. Na Tabela 10 estão apresentados os critérios de convergência da solução nos modelos utilizados e os valores limites considerados para cada um deles, sendo assim para cada instante de tempo as equações são iteradas até os parâmetros de cálculo atingirem o valor limite ou um número de iteração máximo definido pelo usuário, nesta tese, utilizou-se um valor máximo de 70 iterações para os instantes de tempo em que os valores limites não fossem alcançados.

Tabela 10 - Valores limites dos parâmetros iterados.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor limite</b>
Continuidade	0.001
Velocidade-x	0.001
Velocidade-y	0.001
Energia	1.00E-06
k	0.001
ε	0.001
p1	1.00E-06

## 6.2- Modelo utilizado

Foi utilizado um modelo 2D representando uma secção reta de um parque de estacionamento com 10 metros de largura, considerando o cenário de incêndio constituído por um evento localizado no centro, com altura de 3 metros para o caso do compartimento C1 e com altura de 5 metros para o caso do compartimento C2. As lajes são assumidas de concreto e possuem espessura de 0,3 m. A fonte localizada de incêndio assume a posição vertical 0,3 m em relação à cota do pavimento. As dimensões dos elementos de suporte (vigas) variam de acordo com a secção utilizada, ver Tabela 9. Na Figura 60 está representado o modelo físico 2D que se aproxima de casos reais e o modelo utilizado no programa ANSYS.

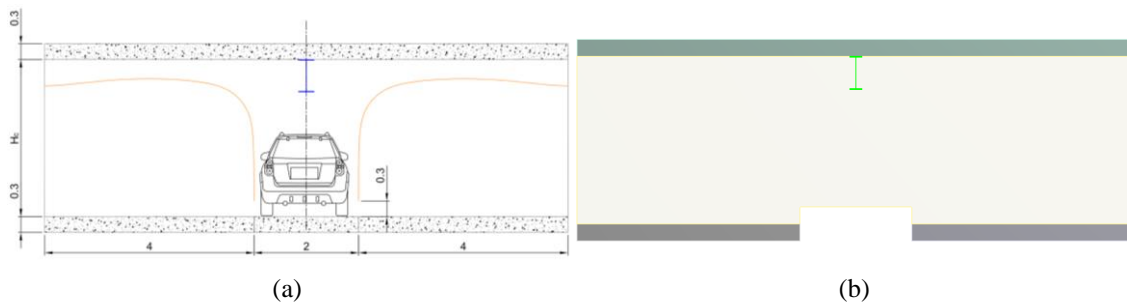


Figura 60 - Modelo 2D utilizado: (a) modelo idealizado; (b) modelo ANSYS.

### 6.2.1- Condições de contorno do programa ANSYS Fluent

Para que seja possível resolver a simulação por meio do programa ANSYS Fluent é preciso identificar algumas condições de contorno para os compartimentos utilizados.

Nesta tese foram consideradas as seguintes condições: paredes de concreto isoladas, ou seja, fluxo de calor nulo na superfície externa das paredes; pressão de saída (OUTLET) igual a pressão atmosférica, com temperatura inicial igual a  $300\text{ K}$  ( $\cong 27\text{ }^\circ\text{C}$ ), com emissividade igual a 1, conforme recomendação do Eurocódigo 1 [28]; velocidade de entrada (INLET) de acordo com os resultados extraídos do programa CFAST para velocidade e temperatura do incêndio. Foram ainda consideradas as seguintes condições: parede de ar estacionária e isolada com fluxo de calor nulo, para simular o contato entre o compartimento e a parte inferior do veículo, ver Figura 61.

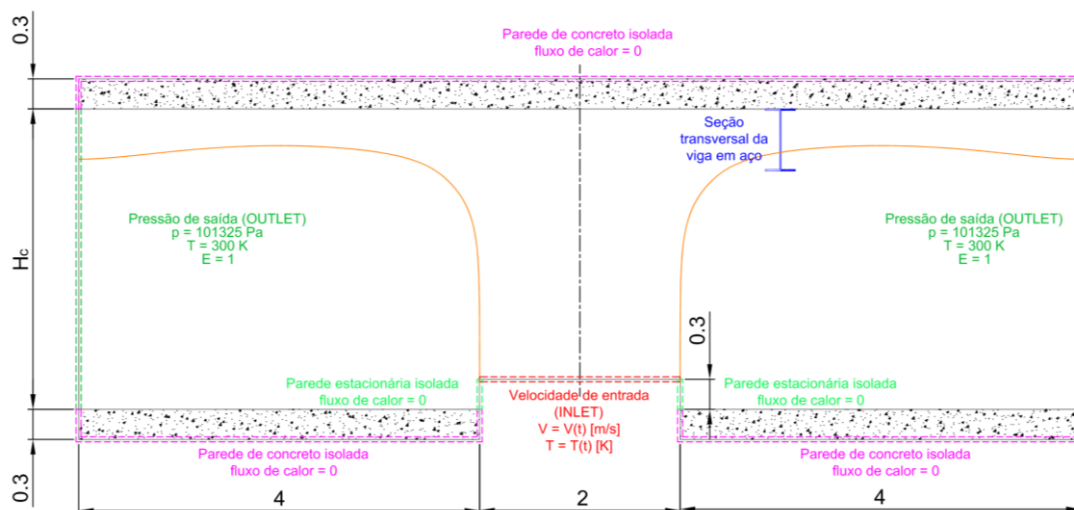


Figura 61 - Condições de contorno utilizadas no programa para ambos os compartimentos (cotas em metros).

### 6.2.2- Incêndio localizado do veículo classe 3

Os dados que geram o incêndio na simulação são as funções de velocidade e temperatura do incêndio localizado para os instantes de tempo considerados. Essas equações foram construídas a partir dos resultados do programa CFAST.

Por meio da utilização do programa CFAST foi definida a criação de um sensor e um alvo na posição de 0,3 m acima do pavimento, para determinação da função velocidade e da função temperatura da chama, baseado na informação da taxa de liberação de calor do veículo em combustão. Na Figura 62 está representado o resultado encontrado no programa para o feito correspondente à combustão de veículo de classe 3. a aplicar para ambos os compartimentos de incêndio analisados.

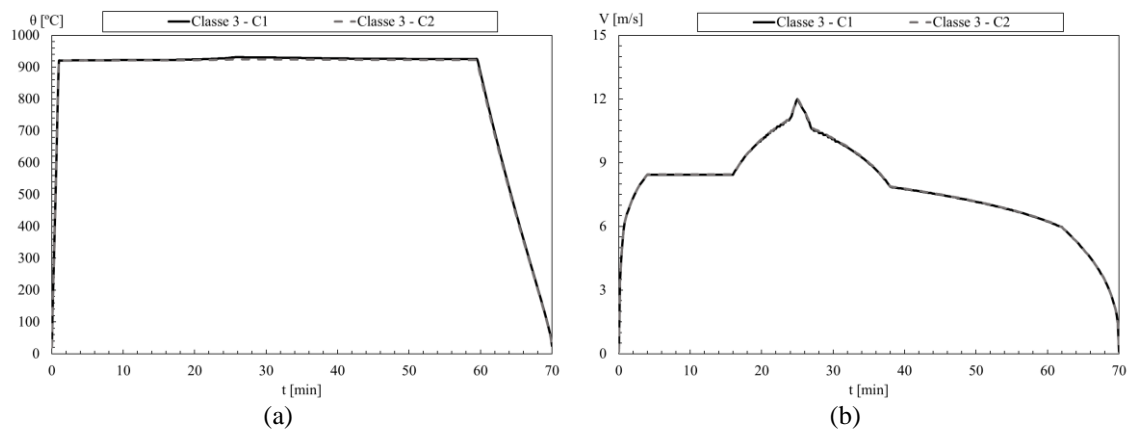


Figura 62 - (a) Temperatura do incêndio; (b) Velocidade do incêndio.

Para a utilização dos dados apresentados na Figura 62 é preciso criar equações tanto para a velocidade como para a temperatura, aproximando a variação das curvas obtidas como segmentos de retas para cada intervalo de tempo. Estas equações são apresentadas no Anexo C.

Com a utilização das equações dispostas no Anexo C foi possível criar um arquivo em linguagem C para ser lido pelo programa ANSYS Fluent para definição da condição de contorno de entrada (INLET), designados por  $V_{\text{class3}}$  e por  $T_{\text{class3}}$ .

### 6.2.3- Teste de convergência da solução

Para a definição da malha para a resolução da simulação foi previamente simulado um cenário de incêndio: perfil de viga IPE500, com posição relativa  $R = 0$  e os

compartimentos C1 e C2, considerando os seguintes parâmetros de solução: incremento de tempo de 60 s, número de incrementos de tempo de 70, número de iterações máximas de 70 por cada incremento de tempo, considerando as condições de contorno e os modelos de resolução destacados acima. Para o teste de convergência foram realizadas 4 simulações para cada um dos compartimentos de incêndio, onde cada simulação utilizou uma malha distinta com comportamento *hard* para todo o compartimento de incêndio, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Simulações realizadas para o teste de convergência.

<b>Simulação</b>	<b>Compartimento de incêndio</b>	<b>Malha [m]</b>
1	C1	0.02
2	C1	0.05
3	C1	0.07
4	C1	0.1
5	C2	0.02
6	C2	0.05
7	C2	0.07
8	C2	0.1

Para o teste de convergência da solução foi escolhida a temperatura em três pontos situados no eixo de simetria vertical do perfil, ver Figura 63, fez-se destes pontos a média aritmética para obter o comportamento da temperatura no perfil em função do tempo. O resultado foi obtido para as 4 malhas escolhidas, conforme é apresentado na Figura 64. Os valores máximos encontrados para a temperatura na viga, correspondentes a instantes de tempo superiores a 30 minutos de incêndio, estão apresentados na Tabela 12.

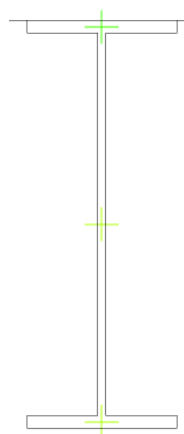


Figura 63 - Pontos analisados para o teste de convergência.

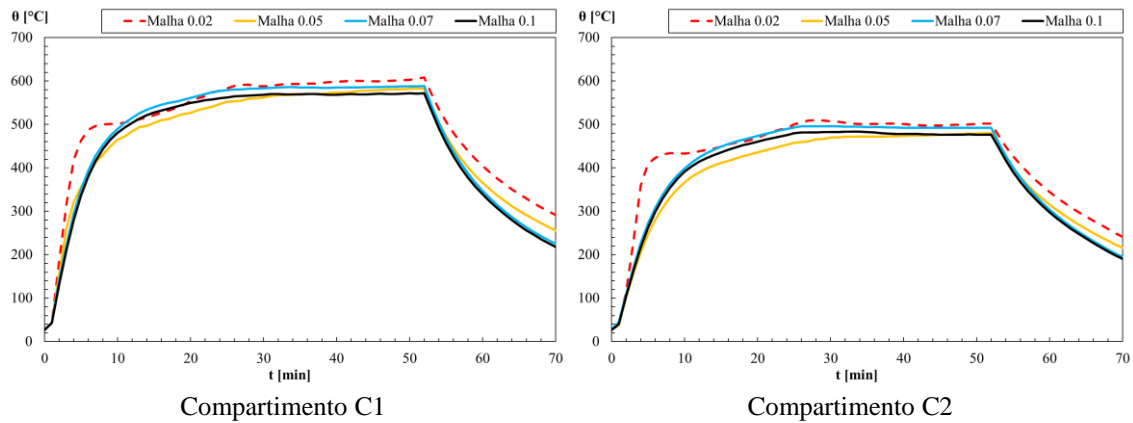


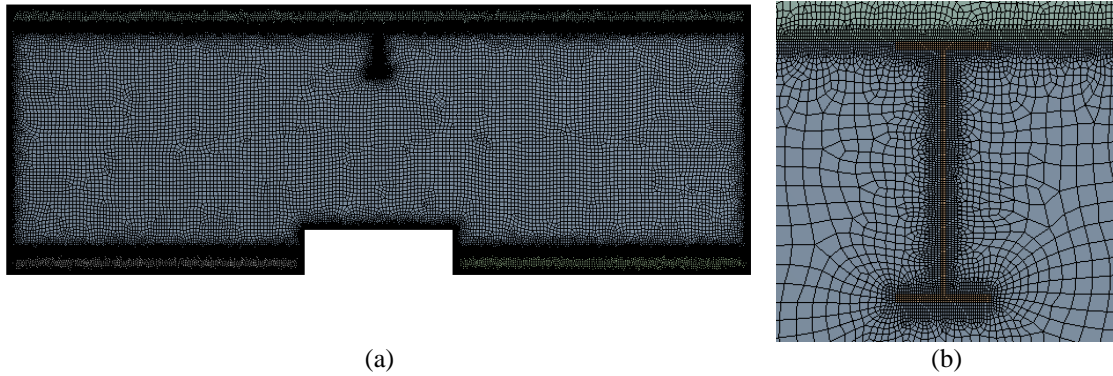
Figura 64 - Resultado para o teste de convergência.

Tabela 12 - Temperaturas máximas no aço para C1 e C2 no teste de convergência.

Malha [m]	Temperatura máxima no aço [°C]			
	C1	Erro	C2	Erro
0.02	607.90	0%	509.96	0%
0.05	582.59	4%	480.14	6%
0.07	588.52	3%	495.78	3%
0.1	571.53	6%	483.34	5%

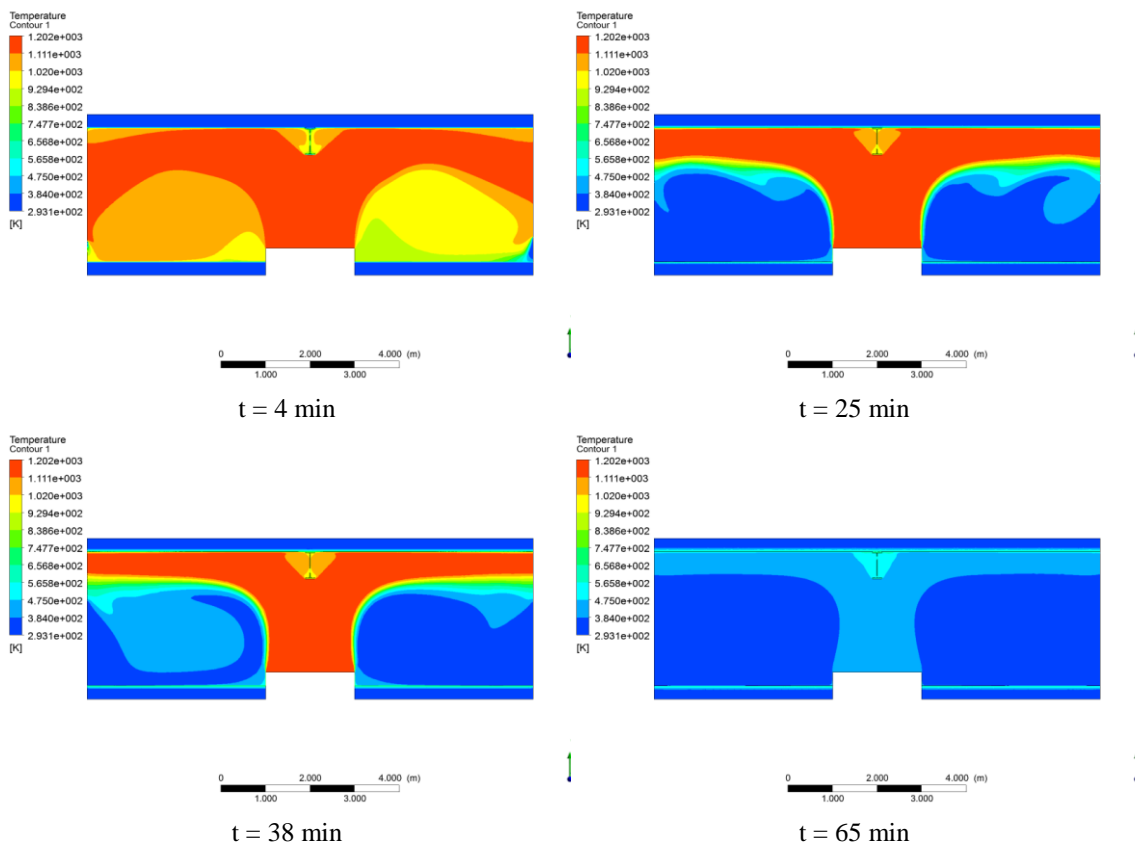
Analisando o comportamento gráfico obtido e os erros apresentados com relação a malha mais refinada pode-se concluir que o valor máximo encontrado para a temperatura do aço e o comportamento dessa temperatura em função do tempo de incêndio mudou pouco com a modificação do tamanho das malhas. Tendo em consideração os resultados e o tempo de simulação em computador, optou-se por utilizar uma malha com dimensão de célula igual a  $0,05\text{ m}$ , pois observando a Figura 64 percebemos que esta malha é a que mais se aproxima da malha mais refinada ( $0,02\text{ m}$ ) nos instantes finais de incêndio, período que corresponde ao resfriamento do perfil em aço.

Com o intuito de melhorar a qualidade dos resultados para as simulações seguintes foram utilizadas a geração da malha com os seguintes atributos:  $0,0051\text{ m}$  com comportamento *hard* nas linhas limites das regiões (*edges*) e  $0,05\text{ m}$  com comportamento *soft* nas áreas das regiões da geometria (fluido e sólido). Na Figura 65 está destacada a malha utilizada para todos os cenários de incêndio analisados, sendo possível observar o resultado do efeito do comportamento *hard* e *soft* no processo de geração. A malha foi importada automaticamente para o ANSYS Fluent, onde foram estabelecidas as equações a serem resolvidas, bem como as condições iniciais e de contorno utilizadas.



(a) (b)  
 Figura 65 - Malha utilizada para as simulações: (a) geometria completa; (b) ampliação no refinamento utilizado nos limites com ênfase para o elemento de viga.

Após a simulação, por meio da aplicação CDF-post foi possível obter os campos de temperatura e velocidade para tempos escolhidos, durante o desenvolvimento do incêndio. A seguir encontram-se campos de temperatura durante o incêndio para o perfil IPE600, considerando  $R = 0$ ,  $R = 2$  m e  $R = 5$  m para o compartimento C1. O campo de velocidade para o perfil IPE600, considerando as mesmas posições radiais e o compartimento C1 são apresentados no Anexo C, juntamente com os campos de temperatura e velocidade para os mesmos cenários de incêndios considerando o compartimento C2.



t = 4 min t = 25 min  
 t = 38 min t = 65 min  
 Figura 66 – Campo de temperatura considerando  $R=0$ , compartimento 1.

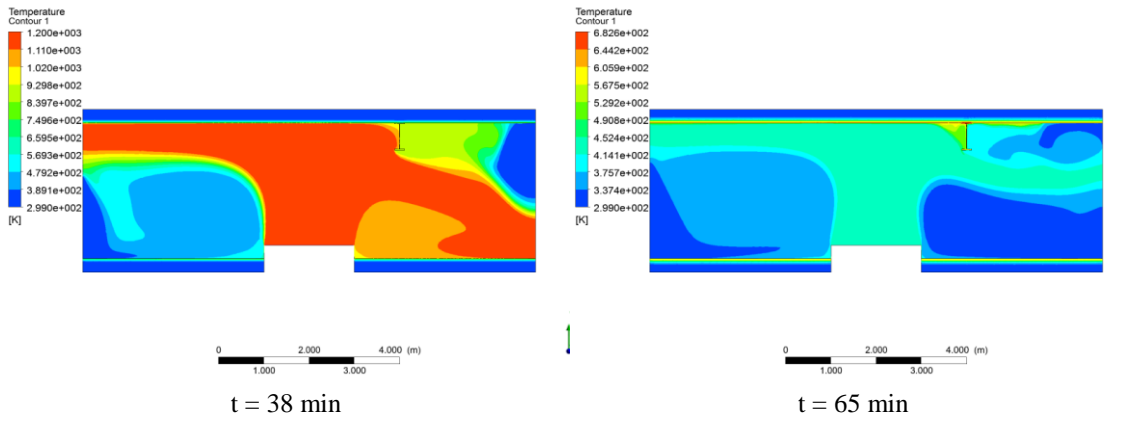
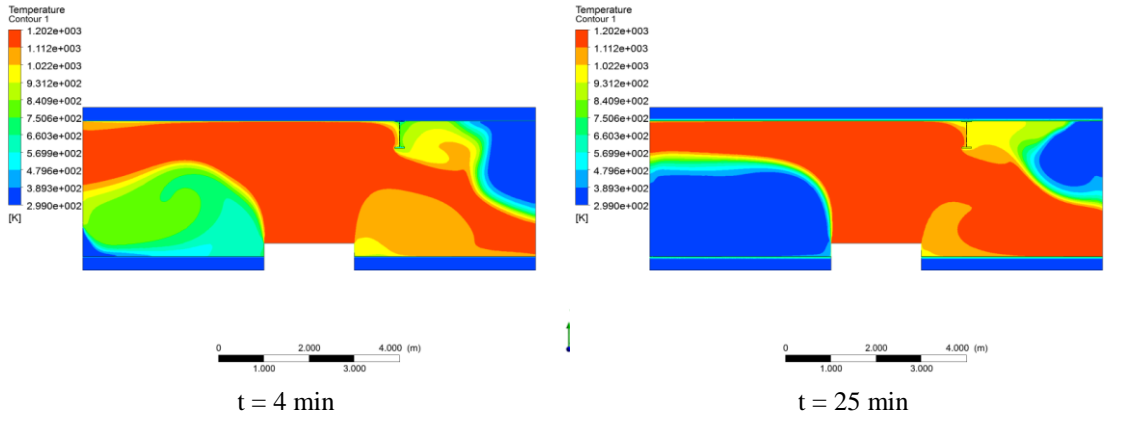


Figura 67 - Campo de temperatura considerando R=2, compartimento 1.

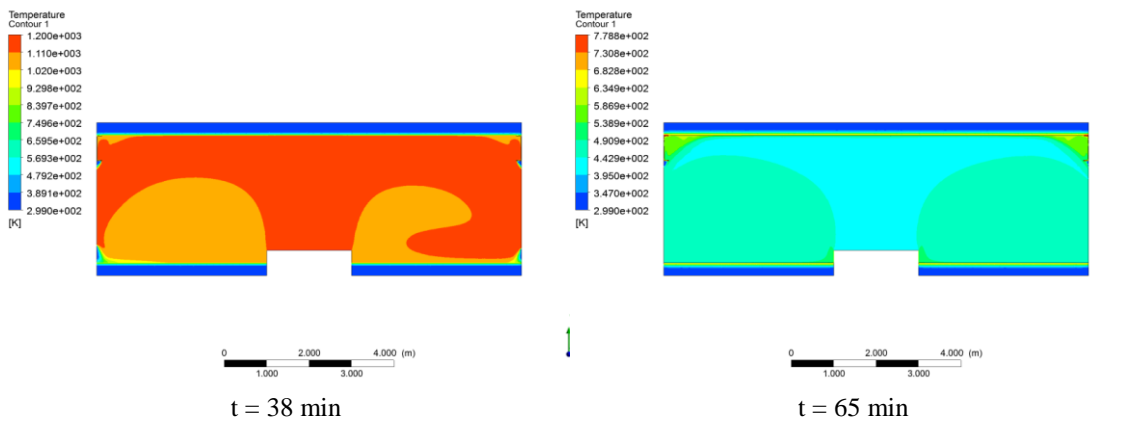
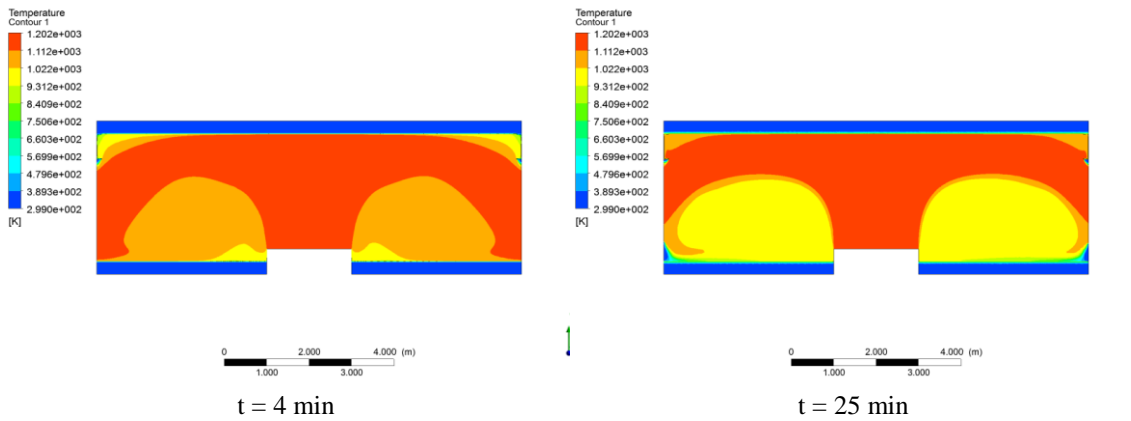


Figura 68 - Campo de temperatura considerando R=5, compartimento.

Para pós processamento dos resultados foi utilizada a aplicação CFD-post. Foram utilizados 7 pontos na viga para determinação da temperatura na viga para o caso dos cenários de incêndio correspondente às posições radiais  $R = 0, 1, 2, 3, 4$  m e 10 pontos para a posição radial  $R = 5$  m. Foi utilizada a média aritmética para determinação da temperatura no perfil. Para determinação da temperatura do gás (ar) foi considerado 1 ponto afastado de 100 mm do perfil, para os cenários de incêndio correspondentes às posições  $R = 0, 1, 2, 3, 4$  m e 2 pontos afastados da mesma distância para o caso do cenário de incêndio de  $R = 5$  m. A escolha destes pontos pode ser justificada pelo fato de serem as regiões com maior temperatura próximo do elemento em aço, ver Figura 69.

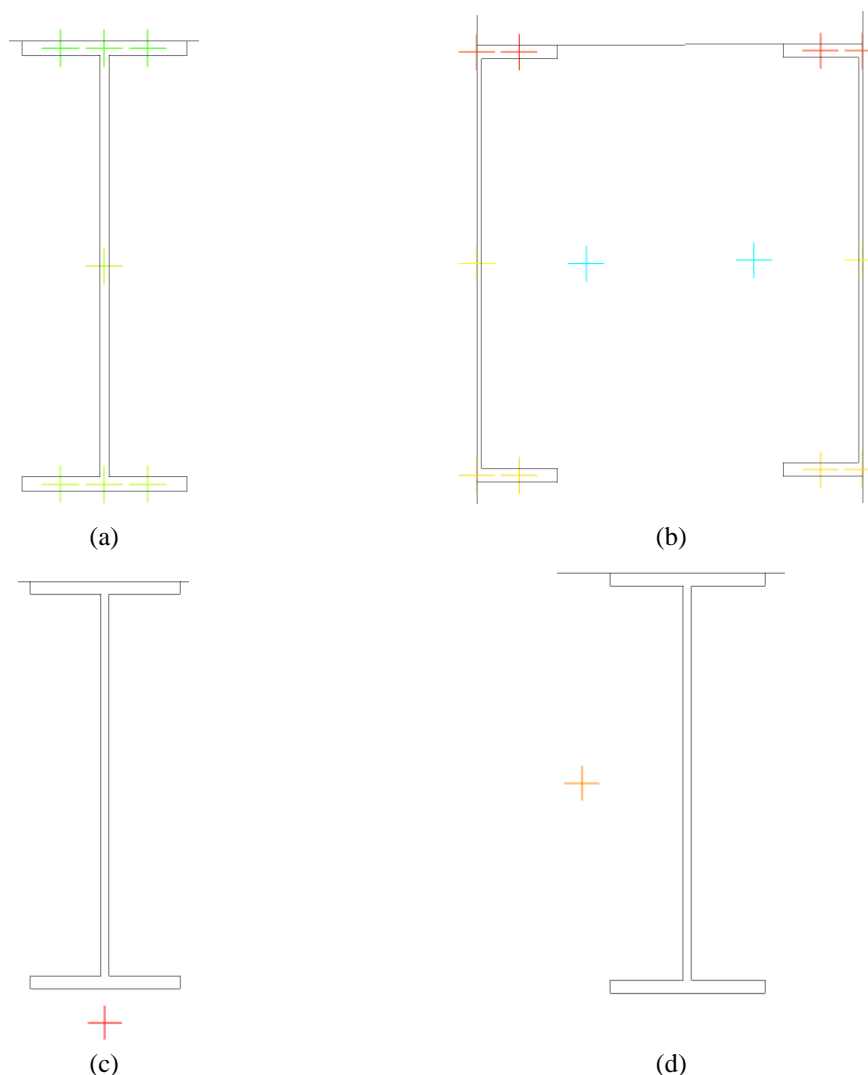


Figura 69 - Posições escolhidas para determinação da temperatura da viga e para determinação da temperatura dos gases: (a) viga em aço  $R \neq 5$ ; (b) viga em aço e gás para  $R = 5$ . (c) gás para  $R = 0$ ; (d) gás para  $R = 1, 2, 3, 4$ .

## 6.2.4- Temperatura no perfil da viga em aço IPE500

Na Figura 70 é possível observar o comportamento para temperatura do aço e dos gases próximos do elemento de viga com perfil IPE500 considerando o compartimento 1 e na Figura 71 considerando o compartimento 2.

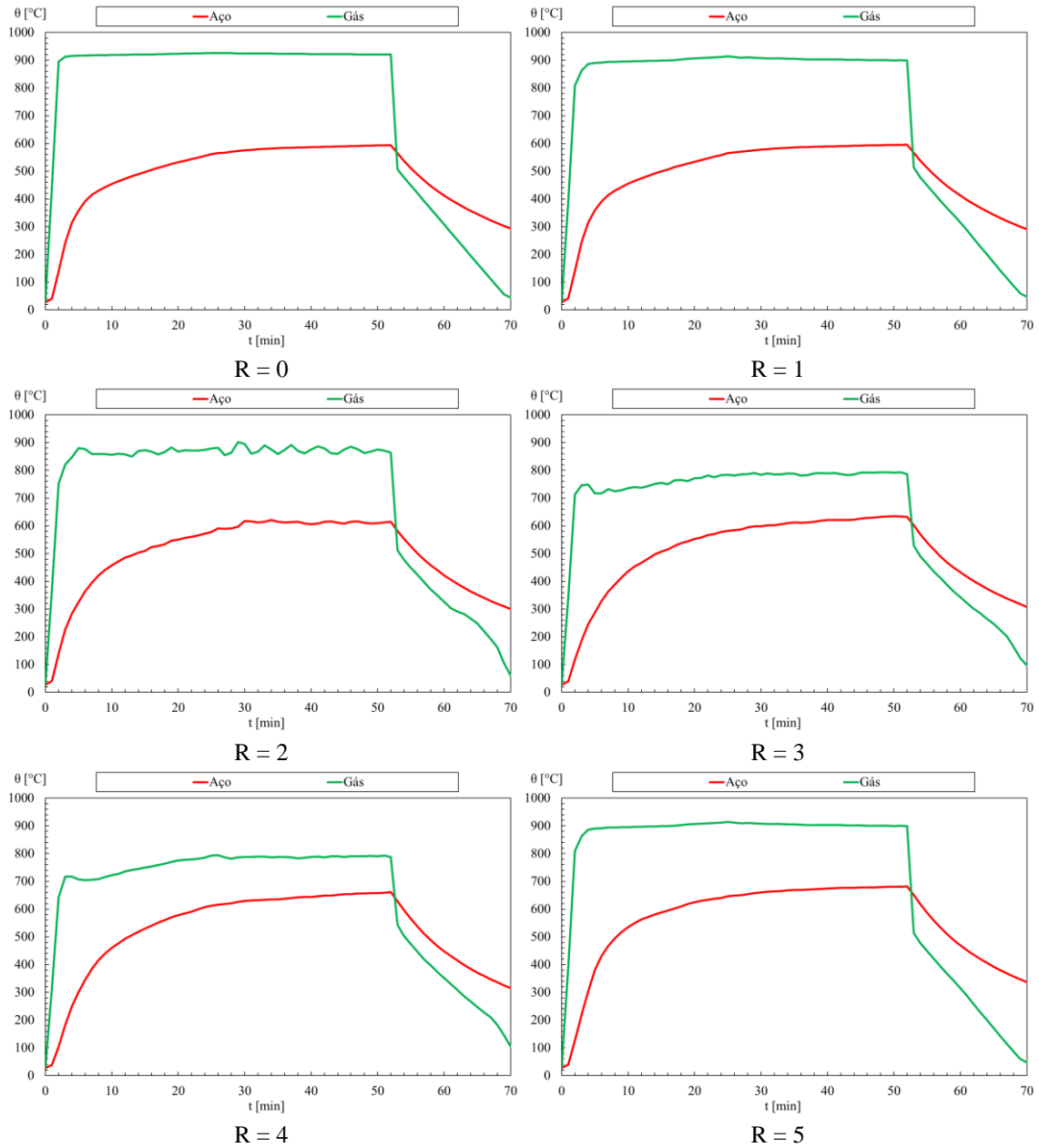


Figura 70 - Evolução da temperatura para o aço e para os gases obtidas por meio da simulação CFD.

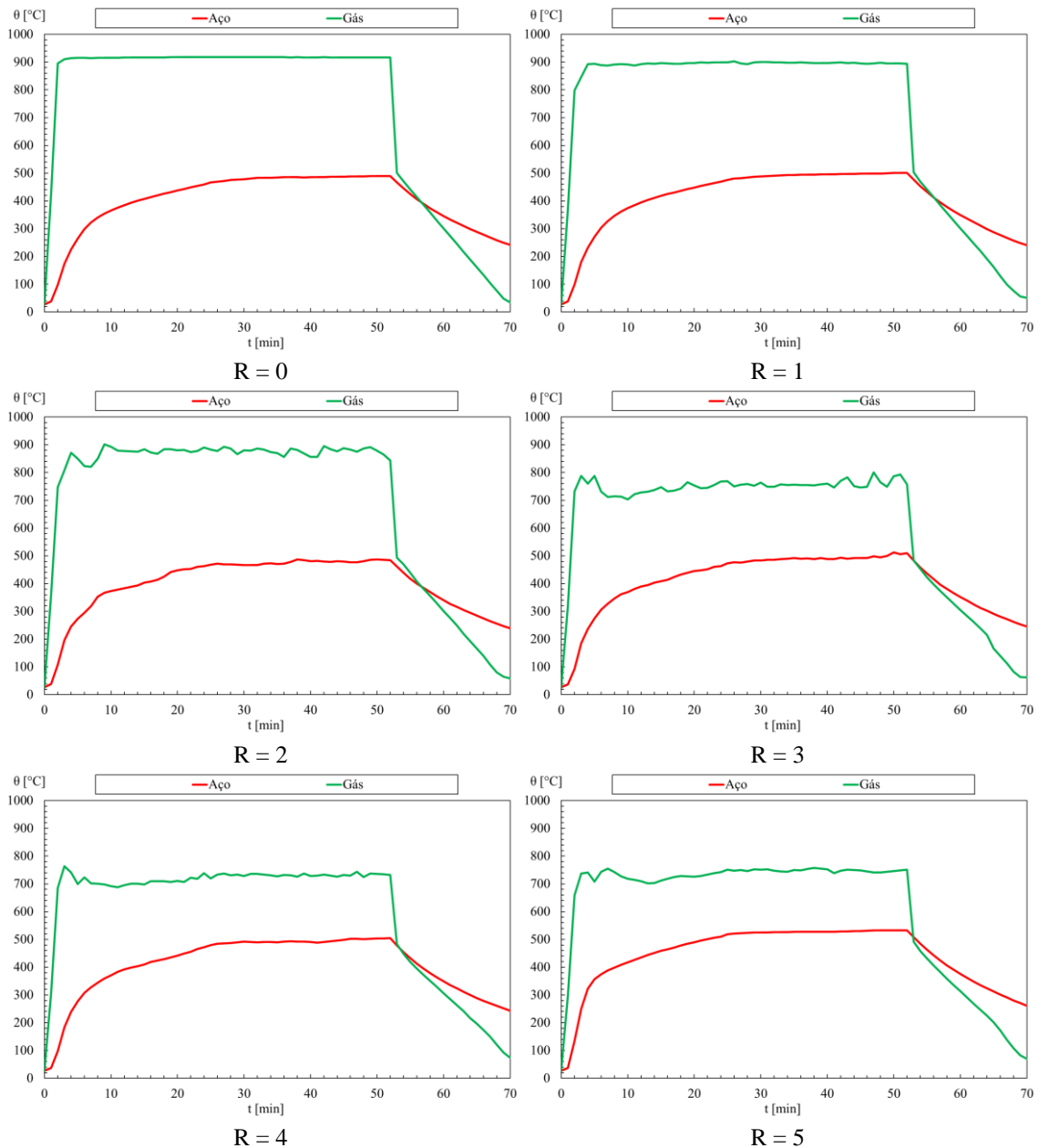


Figura 71 - Evolução da temperatura para o aço e para os gases, obtidas por meio da simulação CFD.

### 6.2.5- Temperatura no perfil da viga em aço IPE600

Na Figura 72 é possível observarmos o comportamento para temperatura do aço e do ar para a viga com perfil IPE600 considerando o compartimento de incêndio 1 e na Figura 73 está representado o resultado do comportamento do aço e do ar para o compartimento 2.

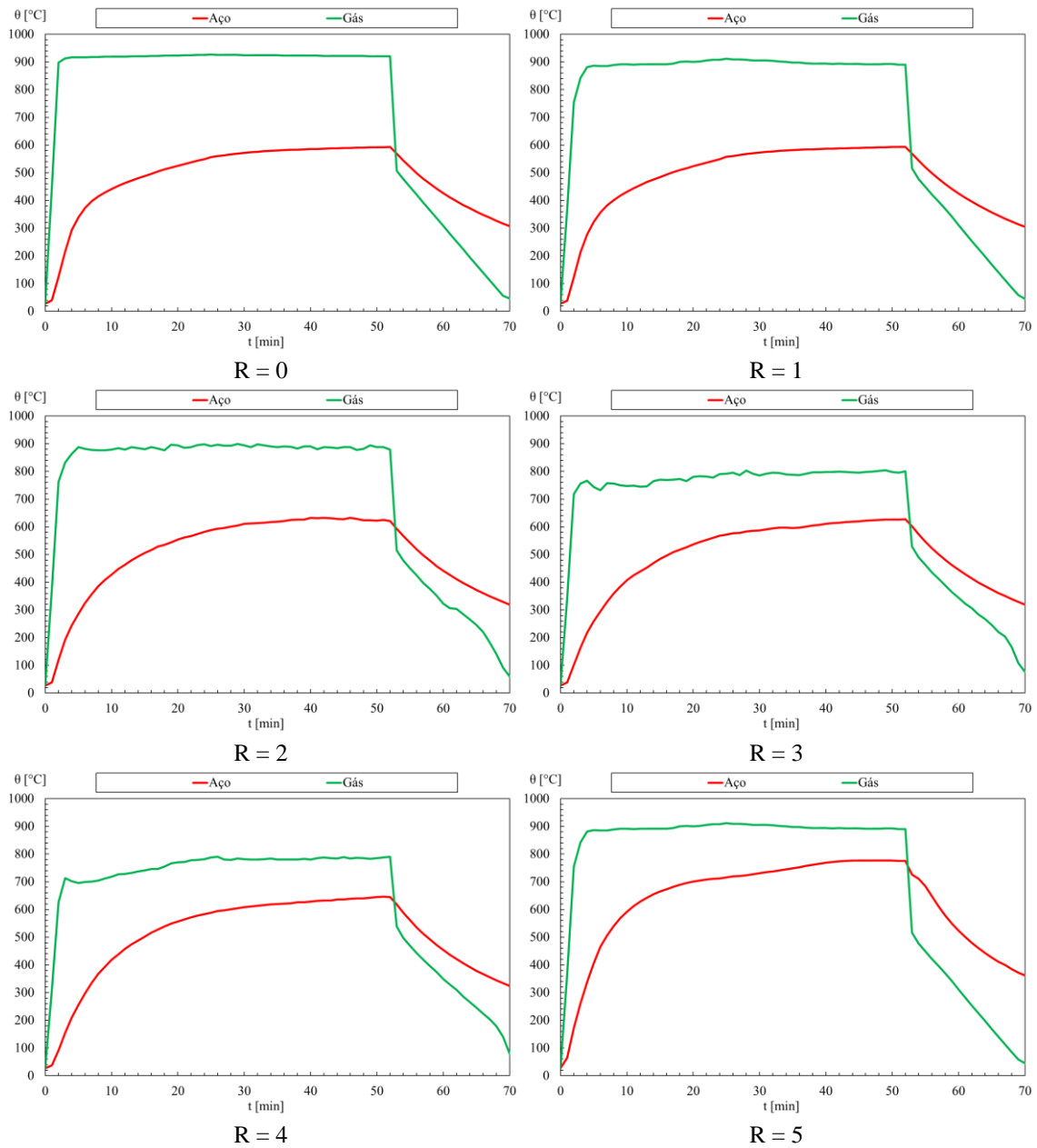


Figura 72 - Temperaturas para o aço e o ar obtidas por meio da simulação CFD, compartimento 1.

A temperatura do elemento de viga aumenta ligeiramente com a posição relativa  $R = 5$  m. Este aumento pode estar relacionado com o efeito das condições de contorno e com as restrições ao escoamento de jato criado na camada quente.

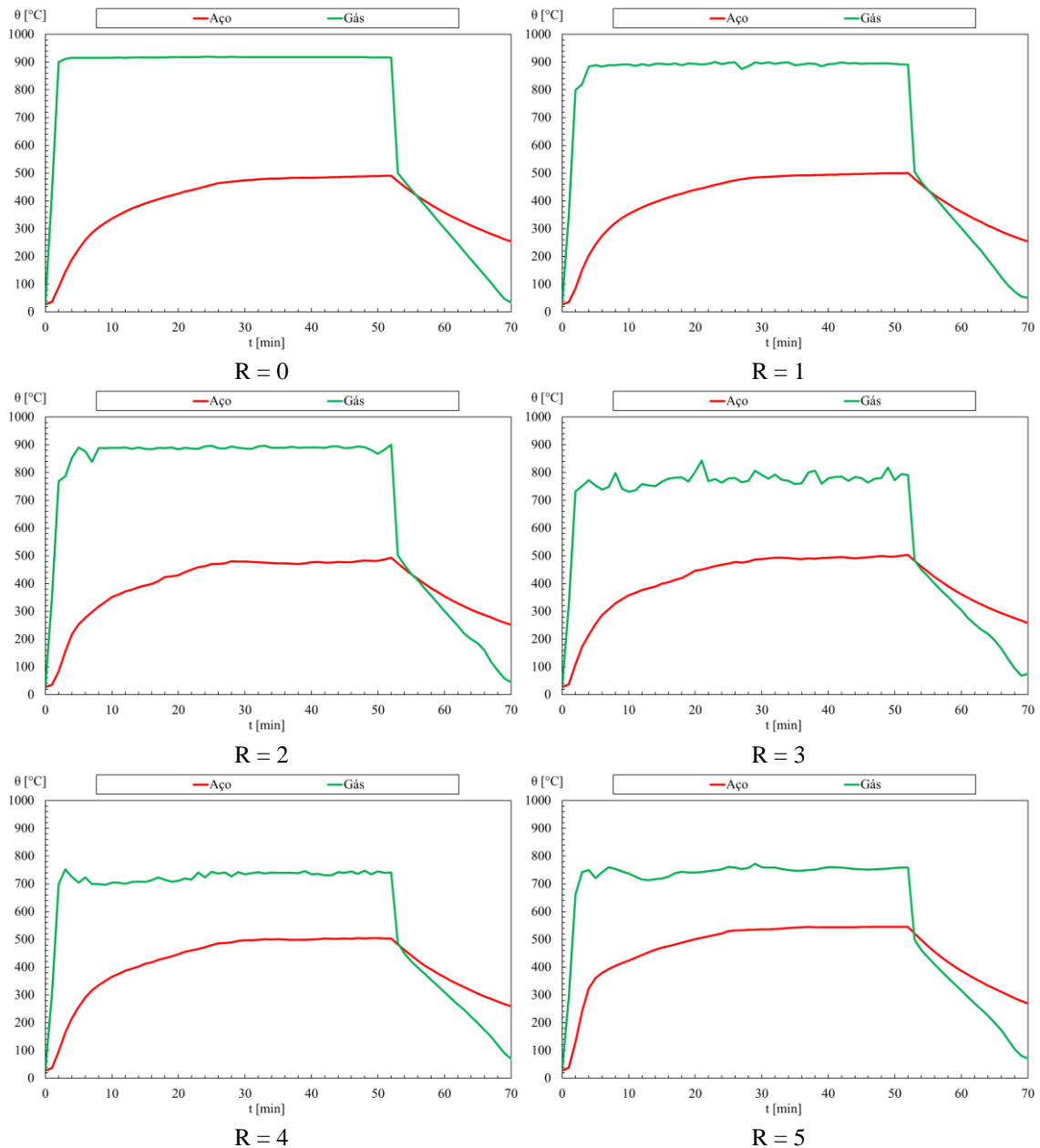


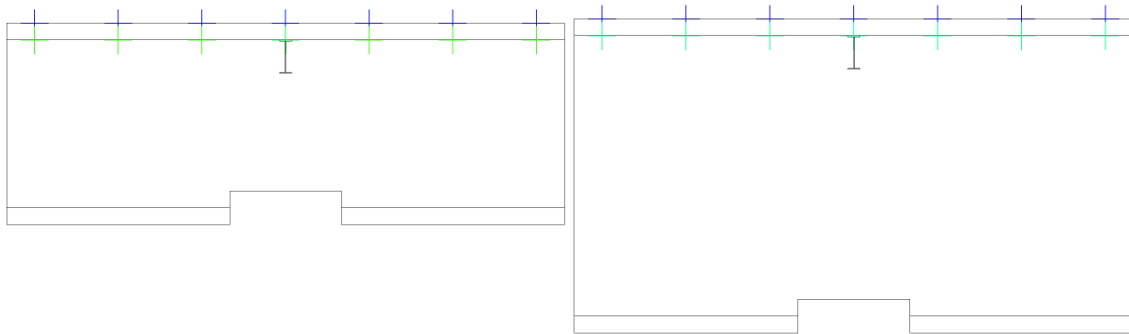
Figura 73 - Temperaturas para o aço e o ar obtidas por meio da simulação CFD, compartimento 2.

Os resultados para os demais cenários de incêndio analisados podem ser consultados no Anexo C.

### 6.2.6- Temperatura no concreto

A temperatura foi determinada nas duas faces da laje de concreto, face superior e face inferior, ver Figura 74. Foi ainda determinado o valor médio dentre todos os pontos e dentre todas posições radiais R. Na Figura 75 representa-se a evolução da temperatura

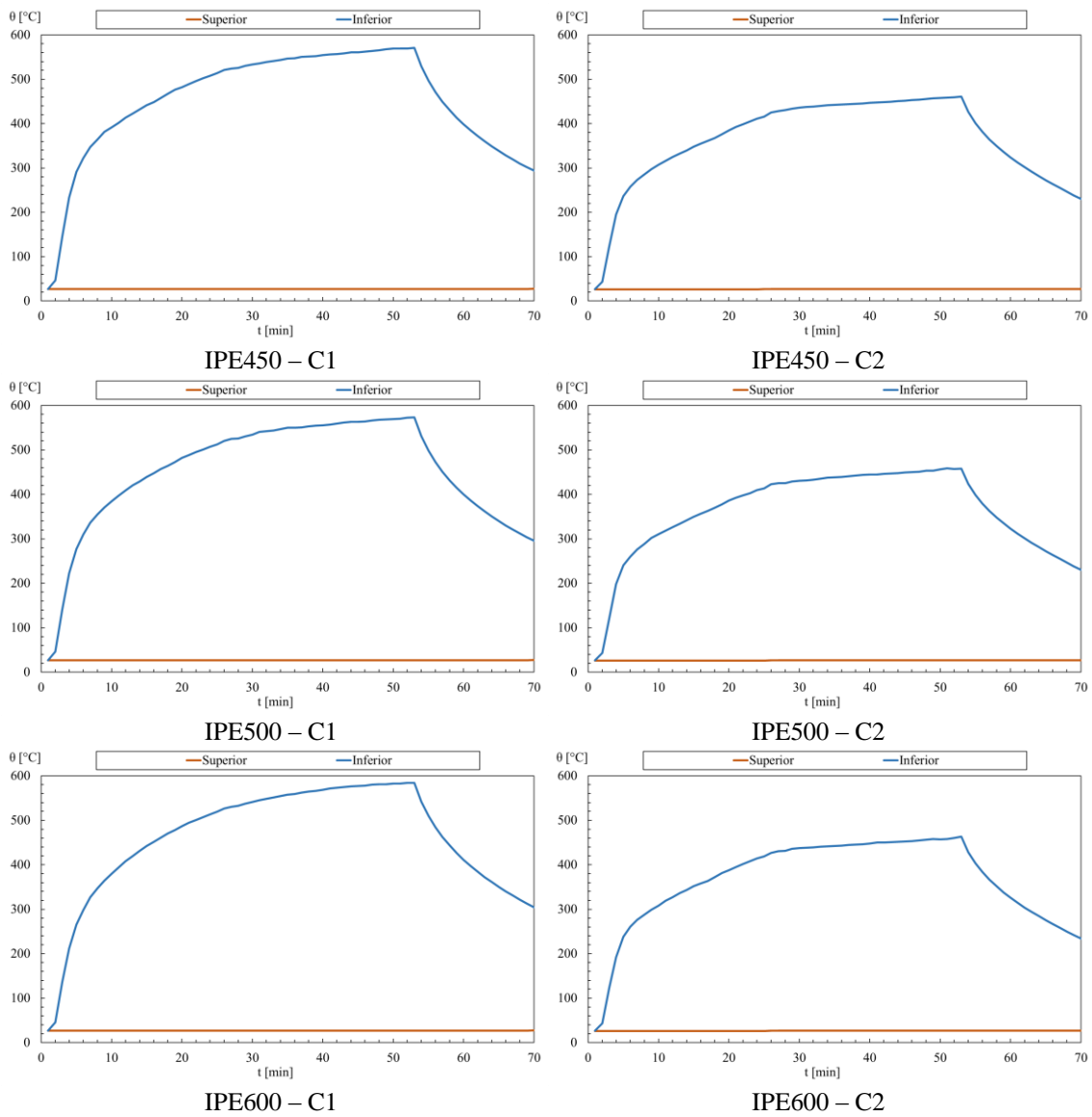
do concreto em função do tempo para cada um dos perfis de viga analisados e para os dois tipos de compartimentos, C1 e C2.



Pontos de análise – Compartimento C1

Pontos de análise – Compartimento C2

Figura 74 - Posições superiores e inferiores em estudo no concreto.



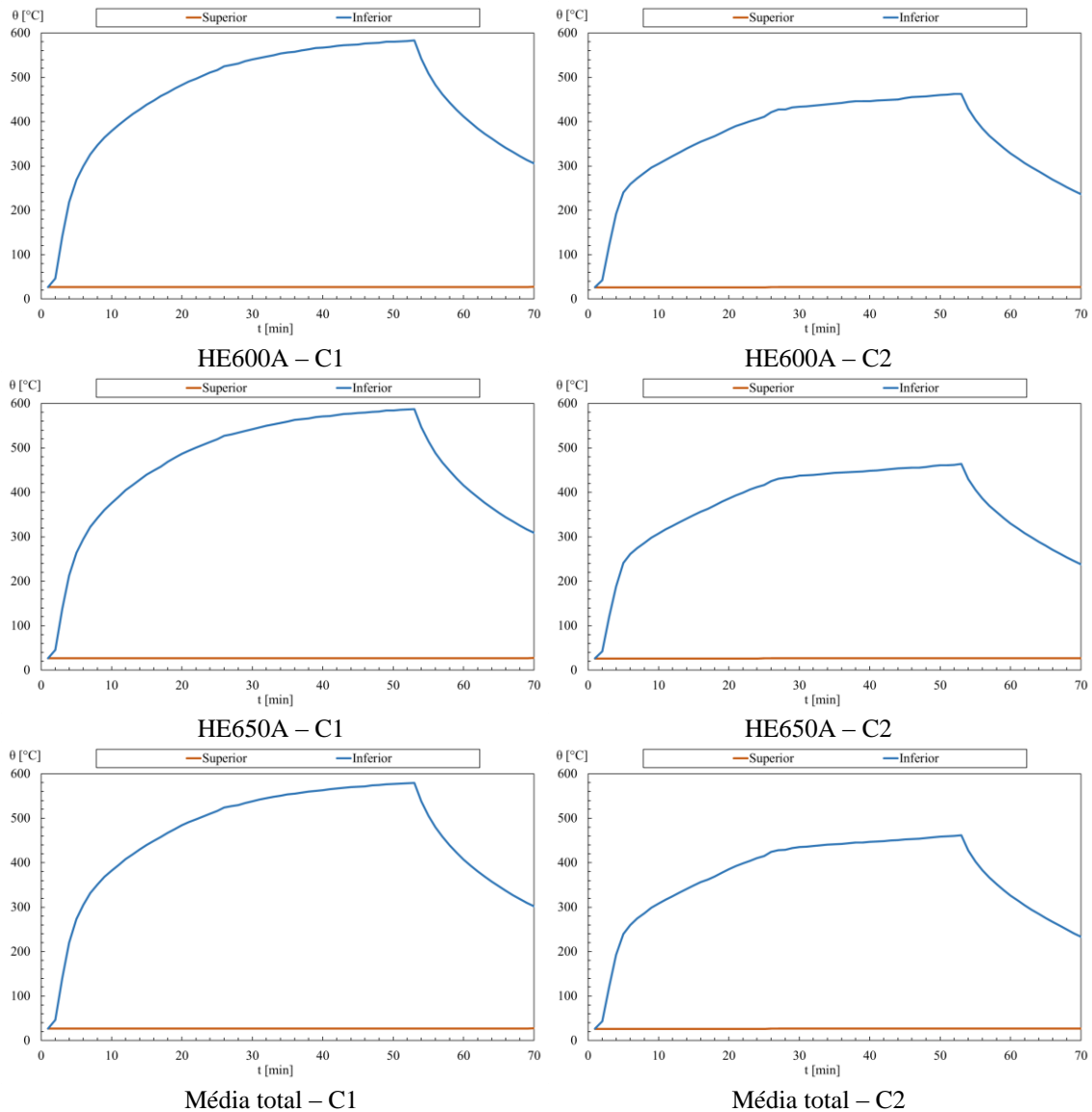


Figura 75 - Temperatura do concreto para os pontos superiores e inferiores (cenários considerando todas as posições radiais).

A temperatura média do concreto diminui com o aumento da altura do compartimento e o perfil tem pouca influência no resultado. A temperatura no lado não exposto não atinge os valores limites para definição do critério de isolamento, uma vez que o incêndio é localizado e os gases quentes acabam por sair do compartimento (aberto).

### 6.2.7- Discussão dos resultados obtidos no ANSYS

Por meio da análise das: Figura 70, Figura 71, Figura 72 e Figura 73 podemos concluir que a evolução da temperatura dos gases na proximidade do perfil não apresenta nenhum patamar constante, como observado com utilização dos métodos simplificados. Outra observação pertinente, relacionada com o método de solução avançada, é que a

temperatura da viga em aço não diminui com o aumento da posição relativa. Esta diferença pode estar relacionada com a acumulação de gases quentes na camada superior e com a restrição a este escoamento.

Por meio da análise da Figura 75 é possível notar que a temperatura do concreto na interface gás-concreto é bastante superior à temperatura encontrada na face não exposta da laje, que seria a temperatura sentida no piso superior ao parque de estacionamento.

Nota-se também que a temperatura inferior do concreto para o compartimento de incêndio mais alto é menor, como já era esperado, e que a temperatura do lado não exposto é praticamente a mesma para ambos os compartimentos. Este fato pode ser justificado pela baixa condutividade térmica do concreto e pelo valor do fluxo de calor gerado pelos eventos de incêndio a considerar, ver Figura 36.

Com relação a temperatura do concreto podemos também afirmar que o seu comportamento será independente do perfil de viga utilizado no parque de estacionamento, tendo em vista que o automóvel a entrar em combustão é o mesmo para todos os casos analisados e os pontos de análise (Figura 74) também são os mesmos para todos os cenários de incêndio estudados.

Os pontos de análise inferiores dizem respeito a face exposta ao fogo, enquanto os pontos de análise superior se tratam da face não exposta ao fogo. Ambos os conjuntos de pontos, superior e inferior, foram utilizados para medição da temperatura média durante o incêndio, sendo os dados coletados de 1 em 1 minuto, respeitando o tempo de medição descrito na norma EN 1363-1 [55].

As medições mais importantes são as realizadas na face do concreto não exposta ao fogo [55], dessa forma percebe-se que a temperatura nesta face permaneceu aproximadamente constante, variando menos de  $1^{\circ}\text{C}$  durante todo o incêndio (70 minutos). Sendo assim, pode-se concluir que o incêndio de um veículo classe 3 não iria afetar o andar superior de um estacionamento aberto semelhante ao analisado.

### **6.3- Comparação de resultados**

Na Figura 76 é apresentada uma comparação realizada para o valor da temperatura máxima desenvolvida no perfil em aço durante um incêndio localizado, considerando o cenário de incêndio  $R = 0$ , para os dois métodos simplificados de cálculo utilizados (método híbrido e Elefir-EN). Esta comparação foi efetuada para todos os perfis

de viga analisados e para as duas dimensões de compartimento consideradas, em função do fator de secção ( $SF - section factor$ ). Vale a pena referir que os resultados encontrados para os perfis HE600A ( $SF = 89$ ) e HE650A ( $SF = 87$ ) foram aproximadamente os mesmos, tendo em conta a semelhança dimensional dos dois perfis, por isso abaixo está representado apenas o resultado para um dos perfis.

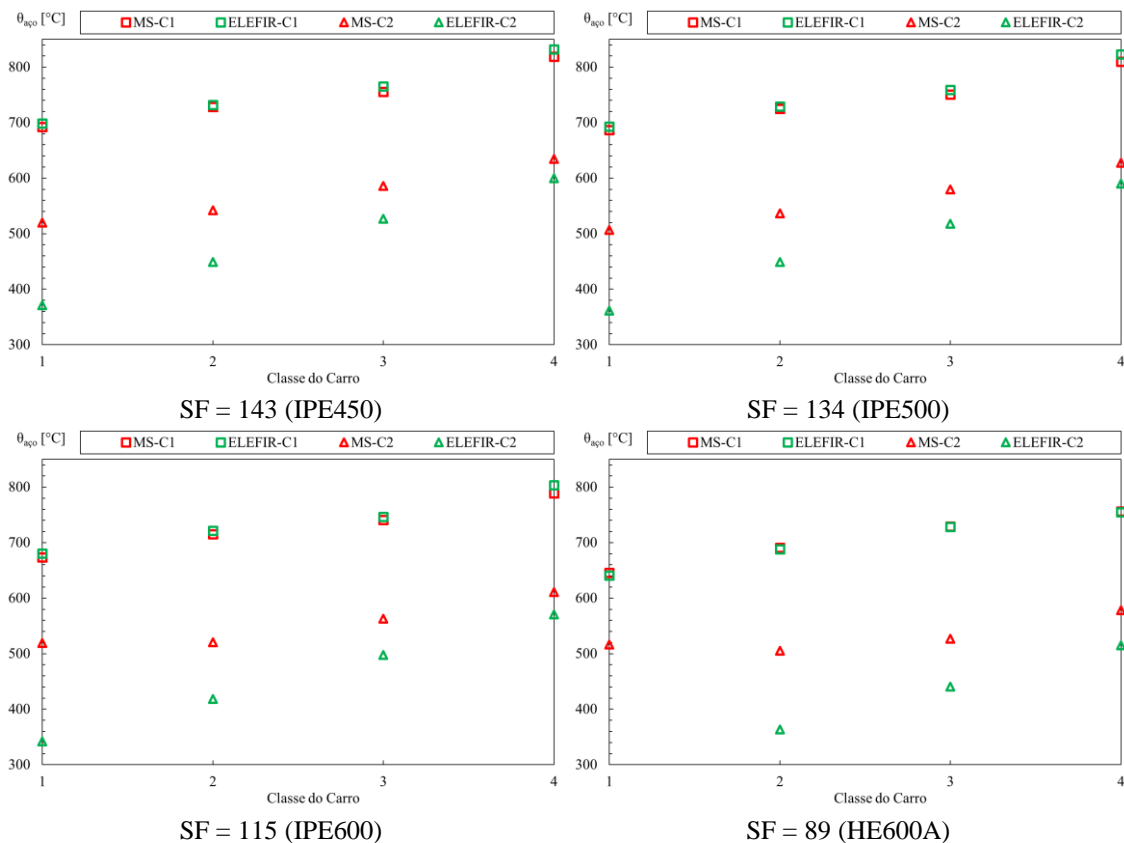


Figura 76 - Máxima temperatura para o aço: método do cálculo simplificado (MS) e Elefir-EN para ambos os compartimentos C1 e C2.

Analisando a figura acima pode-se concluir que o resultado para ambos os métodos analisados é bastante semelhante para o compartimento 1, já para o compartimento 2 verifica-se uma diferença significativa. Esta diferença pode ser justificada pelo fato do programa Elefir-EN ter utilizado durante todo o período de simulação o método de Hasemi, enquanto no método do cálculo simplificado desenvolvido nesta tese, uma solução híbrida (métodos de Heskestad e Hasemi) foi usada. A maior diferença ficou evidenciada no compartimento 2, por este compartimento ser mais alto e pelo fato da chama demorar mais tempo para tocar o teto. Desta forma, o método híbrido utilizou os modelos de Heskestad durante mais tempo de simulação, enquanto que para a simulação do compartimento 1 o método de Hasemi foi utilizado

durante maior período de simulação. Para ambos os casos a temperatura do aço aumentou com o incremento da carga térmica do incêndio (classe do veículo).

Na Figura 77 está representada a variação da temperatura máxima dos gases, para todos os métodos de análise e para todas as classes de veículos estudadas, considerando o cenário de incêndio para a posição radial  $R = 0$ . A máxima temperatura aumenta com o incremento da carga térmica do incêndio, sendo maior para o compartimento 1, revelando assim o efeito da altura do compartimento. Os resultados do método avançado de cálculo foram determinados para todos os perfis de viga, para ambos os compartimentos C1 e C2 e apenas um evento de incêndio (veículo classe 3). A temperatura dos gases não depende do perfil de viga em estudo quando se utilizam os métodos simplificados, mas quando se utiliza o método avançado de cálculo verifica-se que a temperatura do gás varia em todas as simulações. Por esta razão, foi calculado o valor médio dos resultados de todas as simulações (ver resultados ANSYS C1 e ANSYS C2 da Figura 77).

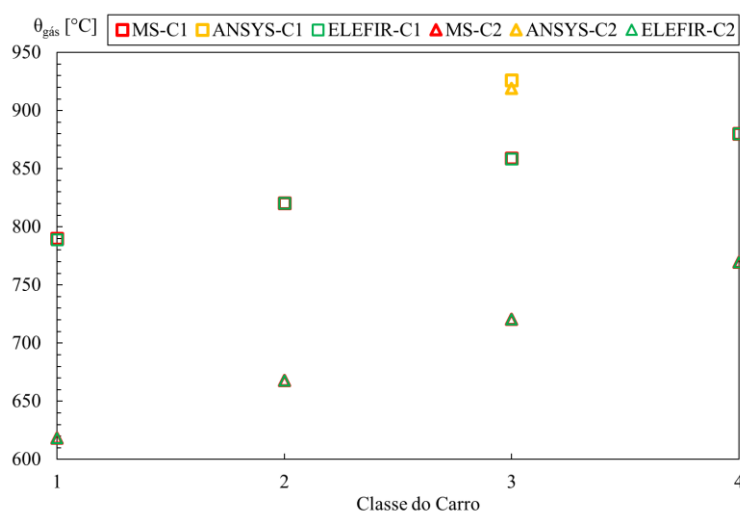


Figura 77 - Máxima temperatura do gás, de acordo com a classe de veículo e posição relativa da viga  $R=0$ , para ambos os compartimentos C1 e C2: MS – método simplificado de cálculo.

Por meio da análise da Figura 77 confirma-se o bom ajuste existente entre o método simplificado de cálculo desenvolvido e o programa Elefir-EN. Os resultados obtidos pelo método avançado (ANSYS Fluent) são superiores aos resultados dos restantes métodos. A diferença é inferior a 10% para o caso do compartimento C1 e de 27% para o caso do compartimento C2.

A Figura 78 apresenta os resultados da temperatura máxima para o gás, tendo em consideração ambos os compartimentos de incêndio (C1 e C2) e todas as posições radiais

analisadas pelos métodos simplificados. A temperatura máxima do gás é atingida no instante de tempo 25 minutos, pois é neste momento que se verifica a maior quantidade de calor liberado pelo incêndio localizado. A temperatura máxima encontrada para o gás sofre um decréscimo com o aumento da posição relativa entre o eixo do fogo e a o centro da viga.

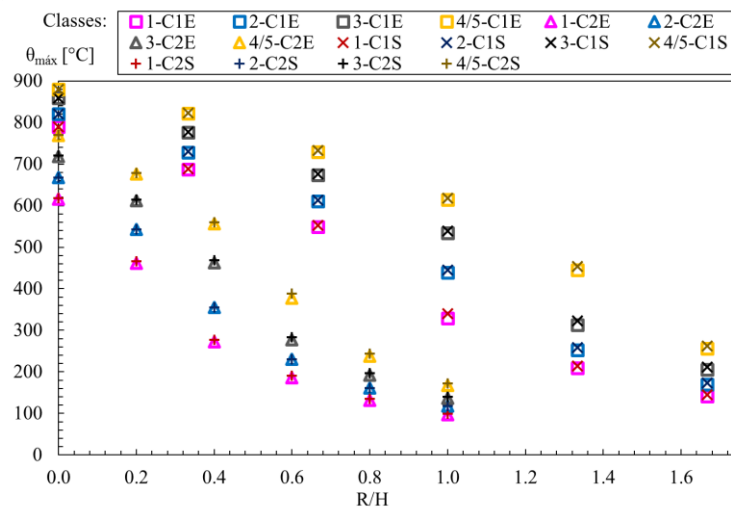


Figura 78 – Máxima temperatura do gás, de acordo com a classe de veículo e a posição relativa da viga, para ambos os compartimentos C1 e C2.  $X - C_i Y$ , sendo: X o tipo de evento (classe de veículo), i o número do compartimento e Y o tipo de método utilizado que pode ser: S – método simplificado de cálculo, E – Elefir-EN.

A Figura 79 representa a temperatura máxima determinada para diferentes tipos de vigas de aço, considerando os dois compartimentos de incêndio, considerando todas as posições radiais e todos os perfis de viga estudados. A temperatura do aço sofre um decréscimo à medida que a posição relativa radial entre o eixo da chama e o centro da viga aumenta. Para o compartimento C1 os valores encontrados para o método de cálculo simplificado e Elefir-EN são bastante semelhantes, já para o compartimento C2 os resultados possuem uma diferença maior. Isso ocorre pela mesma razão da Figura 76, ou seja, pelo fato de no compartimento C2 o método do cálculo simplificado fazer uso durante um maior período do método de Heskestad, enquanto o programa Elefir-EN utiliza para todos os instantes o método de Hasemi.

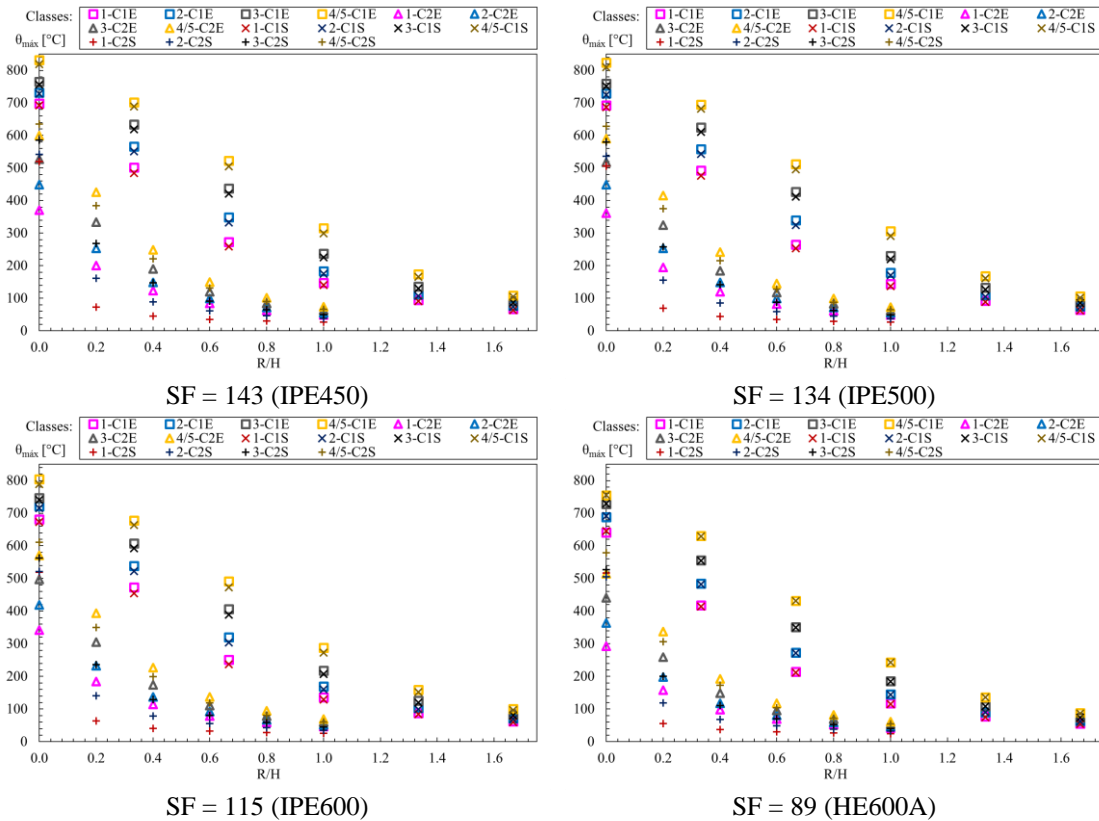


Figura 79 - Máxima temperatura do aço, de acordo com a classe de veículo e a posição relativa da viga, para ambos os compartimentos C1 e C2.  $X - C_i Y$ , sendo:  $X$  o tipo de evento (classe do veículo),  $i$  o número do compartimento e  $Y$  o tipo de método utilizado que pode ser: S – método simplificado de cálculo, E – Elefir-EN.

A Figura 80 representa os resultados para a temperatura máxima na viga em aço, levando em consideração um incêndio provocado por um veículo classe 3 considerando todos os perfis de viga analisados. A comparação apresenta os resultados obtidos com os três métodos estudados: método do cálculo simplificado, Elefir-EN e, por fim, método da simulação CFD.

A Figura 80 mostra que para as posições radiais em que a viga se encontra próxima ao eixo da chama, os resultados para os três métodos se assemelham bastante. Conforme a posição relativa  $R$  aumenta, os resultados obtidos pelo método avançado divergem bastante dos resultados obtidos pelos métodos simplificados, pois enquanto estes tendem a diminuir aqueles tendem a aumentar devido ao confinamento de gases quentes próximos a viga em aço. Este efeito de confinamento parece ser significativo na evolução da temperatura máxima. A temperatura máxima diminui com o aumento da altura do compartimento, conforme esperado e para todos os métodos de solução.

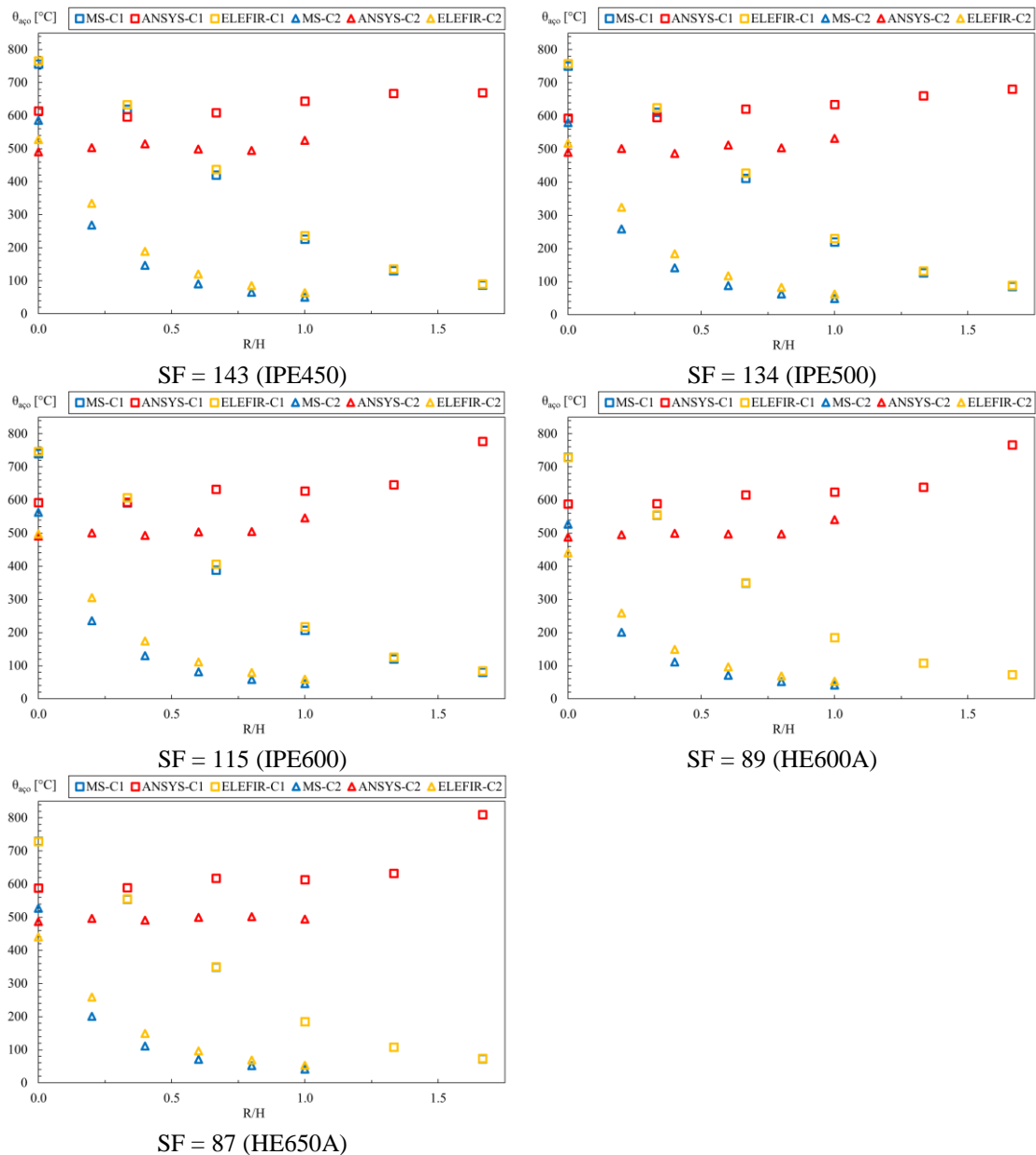


Figura 80 – Temperatura máxima na viga em aço, considerando o incêndio de um veículo classe 3 para ambos compartimentos C1 e C2. Métodos de solução: – método simplificado de cálculo (MS e Elefir-EN), método avançado de cálculo (ANSYS).

Para o compartimento C1 os métodos simplificados apresentam resultados muito semelhantes. Conforme se aumenta a altura do compartimento, os resultados começam a divergir, devido aos métodos de cálculo aplicados em cada método. Ambos os métodos simplificados diferem bastante do método avançado realizado com a ajuda do programa ANSYS Fluent, pois assumem que não existe confinamento de gases quentes na camada de gases quentes, o que não é exatamente o que acontece quando se utiliza este tipo de geometria.

A Figura 81 apresenta os resultados da temperatura máxima, divididos por método de solução, para todos os perfis de viga em aço, mas apenas para o evento de incêndio de

um veículo classe 3, considerando todas as posições relativas radiais e para ambos compartimentos de incêndio (C1 e C2). Para os métodos simplificados quanto maior for o fator de secção do perfil, maior será a temperatura máxima que o perfil alcança, de modo que os maiores fatores de secção são dos perfis com as menores dimensões. Já para o método avançado de cálculo, utilizando o programa ANSYS Fluent, os maiores valores das temperaturas máximas são determinados para os perfis com maiores fatores de secção. Quando se aumenta a distância relativa do perfil em relação ao fogo, os perfis com menores fatores de secção passam a alcançar as maiores temperaturas, pois estes perfis são os que possuem as maiores dimensões, sendo assim, são eles que conseguem confinar a maior quantidade de gases quentes, ocasionando um acréscimo na temperatura do aço.

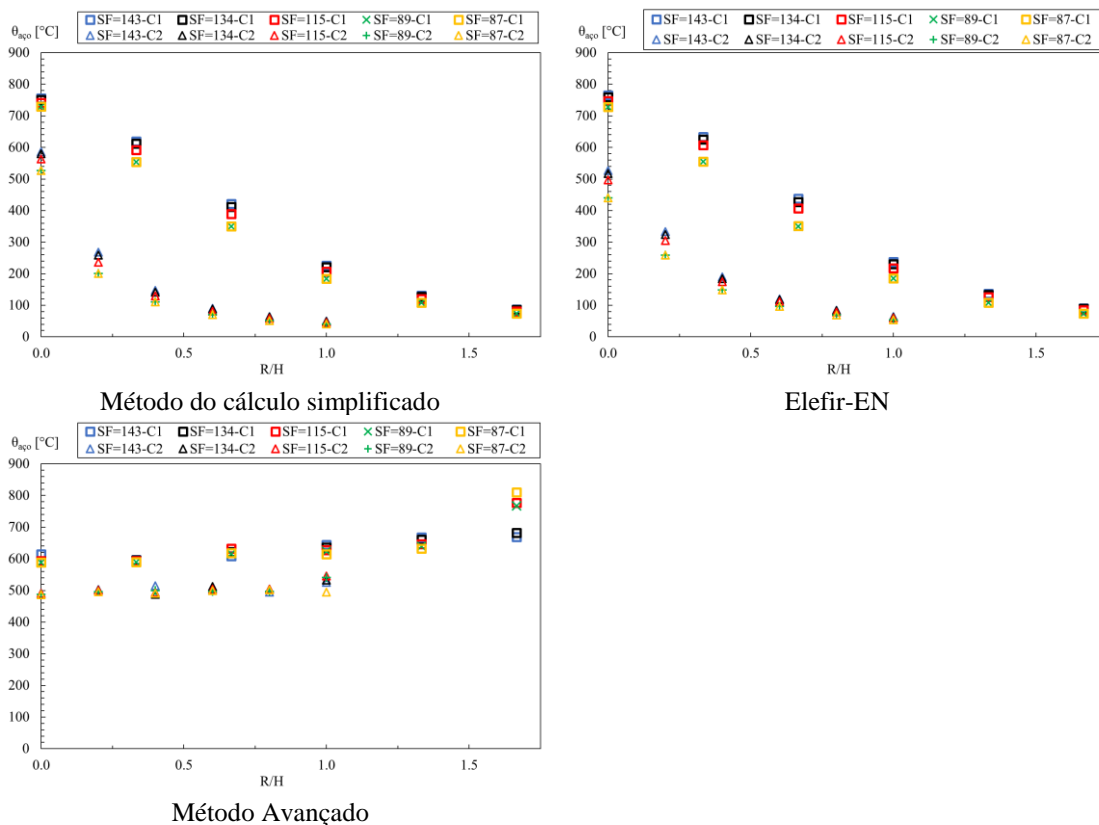


Figura 81 - Máxima temperatura para o aço para os três métodos de resolução, considerando a queima de um veículo da classe 3, todos os perfis de viga empregados e ambos os compartimentos C1 e C2.

O confinamento dos gases quentes próximo ao elemento estrutural justifica as maiores temperaturas no aço. Este fato pode ser observado na Figura 67 e na Figura 68 em comparação com a Figura 66 para o caso do perfil IPE600 para o compartimento de incêndio C1, e nas: Figura 157, Figura 158 e Figura 159 para o compartimento 2. A camada dos gases quente se mostra bastante visível nas figuras para o instante de tempo de 65 minutos para os casos de  $R = 2$  m e  $R = 5$  m. Este efeito foi identificado para todos

os perfis de viga, ficando mais evidente nos perfis com maiores dimensões como é o caso do IPE600. A temperatura para o caso de  $R = 0$  é praticamente simétrica, para ambos os compartimentos, mas para as demais posições relativas é completamente assimétrica, justificando as maiores temperaturas encontradas para as posições relativas  $R = 1,2,3,4,5$  m.

Na Tabela 13 e Tabela 14 estão representados os valores das temperatura máximas determinadas nos perfis em aço, encontrados para cada um dos métodos de resolução, considerando a combustão de um veículo de classe 3, posição radial  $R = 0$  e ambos os compartimentos de incêndio. Na Tabela 15 estão representadas, as temperaturas máximas determinadas para os gases, para os mesmos cenários de incêndio. Por meio das tabelas confirma-se a boa aproximação existente entre os métodos de resolução, utilizados para caracterizar o cenário correspondente à posição radial  $R = 0$ .

Tabela 13 - Temperaturas máximas encontradas para a viga em aço: veículo classe 3, R=0 e C1.

Perfil	SF [m <sup>-1</sup> ]	Métodos de resolução [°C]:		
		SM	Elefir-EN	ANSYS
IPE450	143	755.90	765.50	614.69
IPE500	134	750.77	758.70	593.43
IPE600	115	740.73	746.80	592.76
HE600A	89	729.48	728.20	588.60
HE650A	87	729.48	728.30	588.10

Tabela 14 - Temperaturas máximas encontradas para a viga em aço: veículo classe 3, R=0 e C2.

Perfil	SF [m <sup>-1</sup> ]	Métodos de resolução [°C]:		
		SM	Elefir-EN	ANSYS
IPE450	143	585.99	527.20	490.31
IPE500	134	579.64	517.60	490.14
IPE600	115	562.95	497.60	491.28
HE600A	89	527.17	440.40	487.57
HE650A	87	527.17	440.50	486.84

Tabela 15 - Temperaturas máximas encontradas para o gás: veículo classe 3, R=0 para C1 e C2.

Compartimento de incêndio	Métodos de resolução [°C]:		
	SM	Elefir-EN	ANSYS
C1	858.82	858.70	926.30
C2	720.68	718.30	919.31

## 7- CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a tese foram realizadas sessenta simulações com a utilização do programa ANSYS, todas com o objetivo de analisar o efeito do incêndio localizado de um veículo no valor da temperatura do gás e na temperatura do elemento em aço da estrutura, usando para isso a combustão de um veículo classe 3. Para os métodos simplificados foram estudados duzentos e quarenta cenários de incêndio diferentes, variando entre si de acordo com: a classe do veículo em combustão, o perfil de viga utilizado, a posição radial da viga com relação ao fogo e a altura do compartimento de incêndio.

Os métodos simplificados de cálculo não levaram em consideração o confinamento de gás quente próximo do elemento de viga em aço, o que justifica a diferença dos resultados encontrados para o método avançado de cálculo, apresentando temperaturas maiores para o perfil. De acordo com o método resolvido eram esperados diferentes resultados.

Os resultados obtidos por meio dos métodos simplificados, considerando a combinação dos métodos de Heskestad e Hasemi (método simplificado de cálculo) e a utilização individual do método de Hasemi (Elefir-EN), coincidem bastante bem para os cenários do compartimento C1, mas diferem bastante para os cenários do compartimento C2, que possui maior altura. Esta diferença pode ser justificada pelo maior ou menor período em que se utilizam os dois métodos.

A simulação de dinâmica de fluidos e de sólidos permitiu ainda determinar a evolução da temperatura ao nível do solo e do teto. Este método permitiu ainda verificar que os critérios de resistência ao fogo (I) da laje nunca foram atingidos, para todos os cenários de incêndio estudados, pois o incêndio localizado elevaria a temperatura do chão do lado não exposto em apenas 1 °C.

Sendo assim, conclui-se que os métodos simplificados utilizados possuem uma boa aproximação quando o incêndio localizado se encontra exatamente abaixo do elemento em aço da estrutura, mas à medida que se aumenta a distância relativa horizontal entre a viga e a chama, estes métodos não são os mais indicados para a resolução do problema, pois podem calcular temperaturas menores que as esperadas a realmente ocorrer em um incêndio real.

Considerando os trabalhos realizados por esta tese e os possíveis complementos para a mesma, a seguir serão apresentadas algumas sugestões de trabalhos a serem realizados:

- Estudar o efeito que a temperatura máxima encontrada pode ocasionar na estrutura do estacionamento sob o ponto de vista de resistência mecânica;
- Realizar ensaios experimentais a fim de validar os resultados encontrados na tese para temperatura máxima na viga e no gás circundante a viga, bem como, realizar a confirmação da importância em considerar o confinamento de gases quentes próximo a viga;
- Realizar os mesmos passos considerando compartimentos de incêndio maiores, tanto em altura como em largura, assim como, considerar mais veículos queimando ao mesmo tempo e diferentes condições dentro do estacionamento, por exemplo, o vento;
- Realizar um estudo considerando as vigas do estacionamento protegidas e comparar os resultados com o das vigas desprotegidas utilizadas nesta tese;
- Realizar simulações de incêndio em outros programas de volumes finitos que considerem um incêndio difuso mais semelhante ao incêndio real dum veículo;
- Realizar uma simulação em 3D no ANSYS Fluent para que seja possível uma melhor conclusão acerca do confinamento de gases quentes próximo ao perfil metálico;
- Propor um modelo numérico que aproxime os resultados calculados daqueles encontrados pelo ANSYS Fluent, assumindo o efeito do confinamento de gases quentes próximo a viga em aço.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Yuguang Li, “Assessment of Vehicle Fire in New Zealand Parking Buildings,” Fire Engineering Research Report 04/2, Christchurch, New Zealand, May 2004.
- [2] P. C. R. Collier, “Car Parks - Fires Involving Modern Cars and Stacking Systems,” 2011.
- [3] The University of Waikato., ““SCI” - Science Learning Hub,” 2007-2009. [Online]. Available: <https://www.sciencelearn.org.nz/images/831-the-fire-triangle>. [Acesso em 09 November 2017].
- [4] Filipe Sacchetti Freitas Vilar, *Segurança Contra Incêndios em Parques de Estacionamento Cobertos*, Porto, 2010.
- [5] Julio Cesar G. Silva, Alexandre Landesmann, Fernando Luiz B. Ribeiro, “Fire-thermomechanica linterface model for performance-based analysis of structures exposed to fire,” *Fire Safety Journal*, vol. 83, pp. 66-78, July 2016.
- [6] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 6ª ed., Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: LTC, 2008, p. 643.
- [7] E. G. Buncher, G. J. Langdon-Thomas, G. K. Bedford, *Fire and Car-Park Buildings*, Fire note; no. 10 ed., London, H.M.S.O: Joint Fire Research Organization, 1968, p. 24.
- [8] Nippon Steel, “Fire Test with Steel Framed Parking Building,” 16mm film, 1970.
- [9] Jean-Baptiste Schleich, Louis-Guy Cajot, M. Pierre, Marc Brasseur, Jean-Marc Franssen, Joël Kruppa, Daniel Joyeux, Leen Twilt, J. Van Oerle, Gartzte Aurtenetxe, “Development of Design Rules for Steel Structure Subjected to Natural Fires in Closed Car Parks,” European Comission, Luxembourg, 2002.
- [10] R. G. Gewain, *Fire experience and fire tests in automobile parking structures*, Fire Journal, July 1973, pp. 50-54.
- [11] I. D. Bennetts, D. J. Proe, R. R. Lewis, I. R. Thomas, “Fire and Unprotected Steel in Closed Car Parks,” BHP Melbourne Research Laboratories, Melbourne, August 1987.
- [12] ECCS, *Fire Safety in Open Car Parks*, 1ª ed., Brussels, 1993.

- [13] J. Mangs, P. Loikkanen, "Average rate of heat release curve deduced from car fire tests," Espoo, Finland, 1992.
- [14] M. Shipp, M. Spearpoint, "Measurements of the severity of fires involving private motor vehicles," Building Research Establishment, Bucknalls Lane, Garston, Watford WD2 7JR, UK, 27 March 1995.
- [15] Daniel Joyeux, "Car fire test: study of car fire impact and car fire propagation," May 1995.
- [16] Daniel Joyeux, "Study of theoretical calorific potential of cars: comparison," 1995.
- [17] T. Hirashima, Y. Wang, H. Uesugi, T. Kitano, T. Ave, "Large Scale Fire Tests of a 4-Story Type Car Park - Part 2," *FIRE SAFETY SCIENCE - PROCEEDINGS OF THE SEVENTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM*, pp. 655 - 666, 2003.
- [18] Takayuki Kitano, Osami Sugawa, Hideaki Masuda, Takeo Ave, Hideki Uesugi, "Large Scale Fire Test of 4-Story Type Car Park - Part 1," *FIRE SAFETY SCIENCE - PROCEEDINGS OF THE SEVENTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM*, pp. 527 - 538, 2003.
- [19] Daniel Joyeux, Joël Kruppa, Louis-Guy Cajot, Jean-Baptiste Schleich, Peter Van de Leur, Leen Twilt, "Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings," European Commission, Belgium, 2002.
- [20] Yuguang Li, M. J. Spearpoint, "Analysis of vehicle fire statistics in New Zealand parking buildings," *Fire Technology*, Vol. 43, No. 2, 2007.
- [21] BRE, "Fire Spread in Car Parks," Building Research Establishment, Eland House Bressenden Place London, United Kingdom, 2010.
- [22] Jean-Pierre Jaspert, Jean-François Démonceau, Fang Cheng, Bassam Izzuddin, Ahmed Elghazouli, David Nethercost, Bin Zhao, Dhionis Dhima, Frédéric Gens, Vincent de Ville, Aldina Santiago, Luis Da Silva, Renata Obiala, "Robustness of car parks against localised fire: Deliverable I: Definition of the problem and selection of the," Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, January 2009.
- [23] H. Inganson., "An Overview of Vehicle Fires in Tunnels," SP Swedish National Testing and Research Institute, Boras, Sweden, 2001.
- [24] M. Shipp, "Vehicle Fires and Fire Safety in Tunnels," *Tunnel Management International*, vol. 5, 2002.

- [25] J. Mangs, O. Keski-Rahkonen, “Characterisation of the Fire Behaviour of a Burning Passenger Car. Part I: Car fire experiments,” *Fire Safety Journal*, vol. 23, pp. 17-35, 1994.
- [26] C. Steinert, “Experimental Investigation of Burning and Fire Jumping Behaviour of Automobiles,” *VFDB Journal*, vol. 4, pp. 163-172, 2000.
- [27] D. W. Stroup, L. DeLauter, J. Lee, G. Roadarmel, “Passenger Minivan Fire Test,” National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, M.D. USA, 2001.
- [28] CEN, *EN 1991-1-2 - Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*, Brussels, Brussels, 2002.
- [29] J. M. Franssen, P. Vila Real, “The Computer Program "ELEFIR-EN", in Fire-Design fo Steel Structure: Eurocode 1-1-2; General Actions - Actions on Structures Exposed to Dire / Eurocode 3: Design of Steel Structures,” Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2016.
- [30] Adviesbureau Ir., J.G. Hageman B.V., “Advisering op het gebied van constructies voor gebouwen en civiele werken,” [Online]. Available: <http://adviesbureau-hageman.nl/activiteiten/brandschade.html>. [Acesso em 06 junho 2018].
- [31] Daily Mail Report, “Mail Online,” 31 agosto 2010. [Online]. Available: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-1307422/Stansted-Airport-20-families-cars-gutted-car-park-blaze.html#ixzz1IWI6Mg7I>. [Acesso em 06 junho 2018].
- [32] Firehouse, “Firehouse,” 27 Novembro 2004. [Online]. Available: <https://www.firehouse.com/lodds/news/10514192/seven-swiss-firefighters-die-in-collapsed-parking-garage>. [Acesso em 06 junho 2018].
- [33] RTS INFO, “RTS,” 14 dezembro 2010. [Online]. Available: <http://www.rts.ch/info/suisse/2796979-drame-de-gretzenbach-le-verdict-tombe.html>. [Acesso em 08 junho 2018].
- [34] bafsa, “bafsa - Information File - Sprinklers in Car Parks,” outubro 2010. [Online]. Available: <https://www.bafsa.org.uk/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2018/01/CAR-PARKS.pdf>. [Acesso em 06 junho 2018].
- [35] BBC News, “BBC News,” 02 Janeiro 2018. [Online]. Available: <http://www.bbc.com/news/uk-england-merseyside-42542556>. [Acesso em 19 Fevereiro 2018].

- [36] BBC News, “BBC News,” BBC, 01 Janeiro 2018. [Online]. Available: <http://www.bbc.com/news/uk-england-merseyside-42533830>. [Acesso em 19 Fevereiro 2018].
- [37] O. Vassart, B. Zhao, L. G. Cajot, F. Robert, U. Meyer, A. Frangi, Eurocodes: Background & Applications, B. N. L. S. S. D. A. P. M. Poljanšek, Ed., Brussels: Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014, p. 238.
- [38] Björn Karlsson, James G. Quintiere, Enclosure Fire Dynamics, CRC Press, 2000.
- [39] International Organization for Standardization (ISO), *Fire safety engineering - Requirements governing algebraic formulae - Part 6: Flashover related phenomena*, 2016.
- [40] T. E. Waterman, “Room Flashover - Criteria and Synthesis,” *Fire technology*, vol. 4, n° 25, pp. pp. 25-31, 1968.
- [41] Alexandra Byström, “Compartment Fire Temperature: calculations and measurements,” Division of Structural and Fire Engineering, Luleå ,Sweden, Março de 2017.
- [42] C. Harenza, A. Santiago, L. Simões da Silva, “Design of Steel and Composite open car parks under fire,” *Advanced Steel Construction*, vol. 9, n° 4, pp. 321-339, 2013.
- [43] C. Fraud, B. Zhao, D. Joyeux, J. Kruppa, “Guide Pour la Vérification du Comportement au Feu de Parcs de Stationnement Large Mentventilés en Superstructure Métallique,” CTICM, 2004.
- [44] Commission for Environmental Cooperation, CEC Agreement, 2001.
- [45] Habbar Ghania, *Fire Analisis of an Open Car Park Building Structure*, Bragança, 2017.
- [46] CEN, *EN 1993-1-2 - Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*, Brussels, Brussels, 2005.
- [47] CEN, *EN 1992-1-2 - Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*, Brussels, Brussels, 2004.
- [48] N. B. Vargaftik, *Tables of Thermophysical Properties of Liquids and Gases*, 2nd ed., New York: Hemisphere Publishing, 1975.
- [49] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, *ASHRAE Handbook of Fundamentals*, New York: ASHRAE, 1981.

- [50] E. R. G. Eckert, R. M. Drake, Analysis of Heat and Mass Transfer, New York: McGraw-Hill, 1972.
- [51] C. Cwiklinski, "Parcs de Stationnement en Superstructure Large Mentventilés – Avis d'expertsur les scénariosd 'incendie'," Rapport final, 2001.
- [52] Robert Viall, Karl Wiegand, "Fire Modeling in Fluent," 2008.
- [53] Nathaniel Michel Knop, "Thermal Analisis of a Fireplace using ANSYS," Iowa State University - Digital Repository, 2009.
- [54] ANSYS, Inc., "Fluent User's Guide - ANSYS 18.2," 2017.
- [55] CEN, Fire resistance tests - Part 1: General Requirements, Brussels: CEN - European Committee for Standardization, 2012, p. 52.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## **ANEXO A: RESULTADOS PARA O MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO**

### **1- Veículo Classe 1**

#### **1.1- Perfil IPE450**

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE450, considerando a classe 1 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 82 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 83 para o compartimento 2.

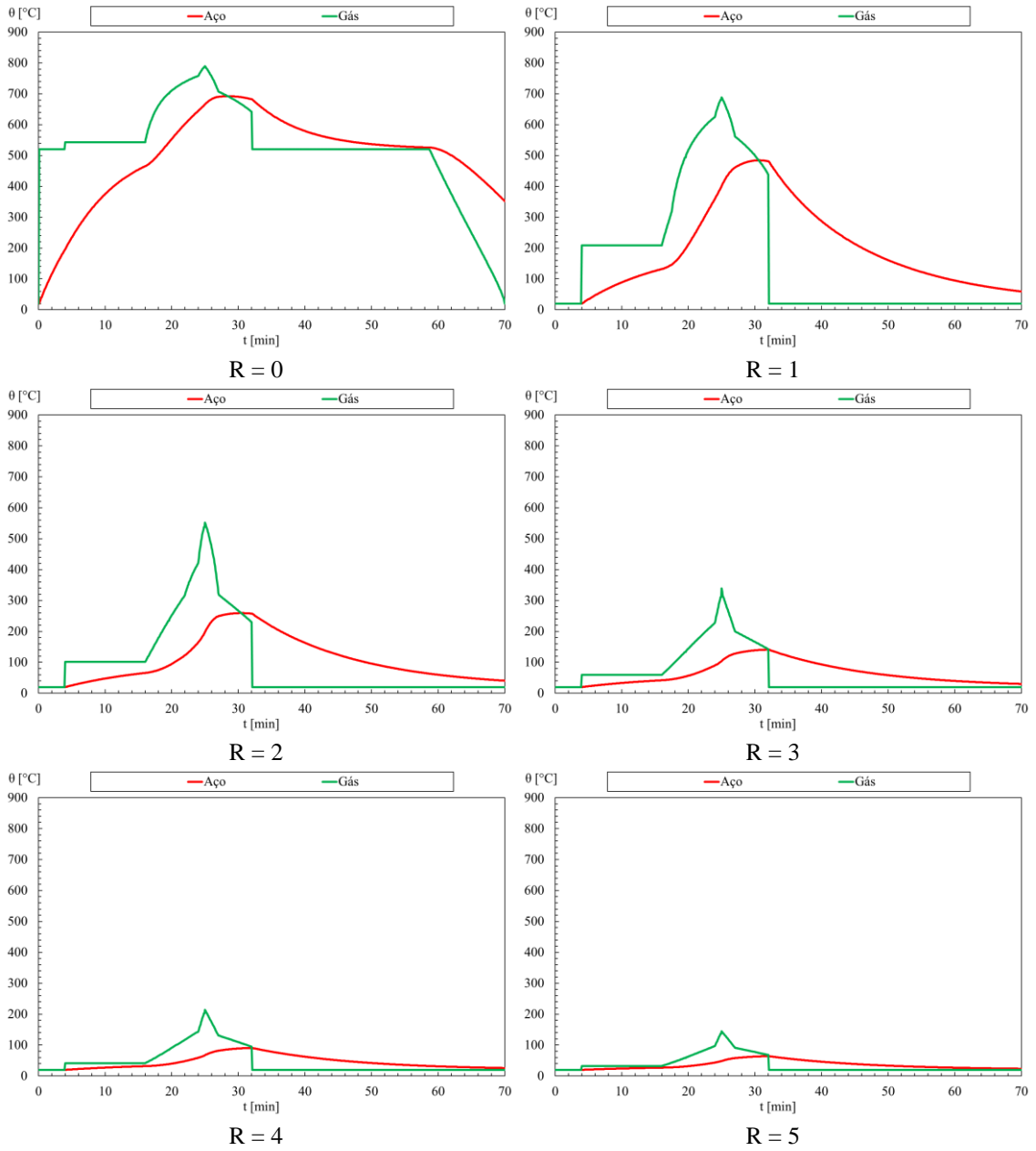


Figura 82 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

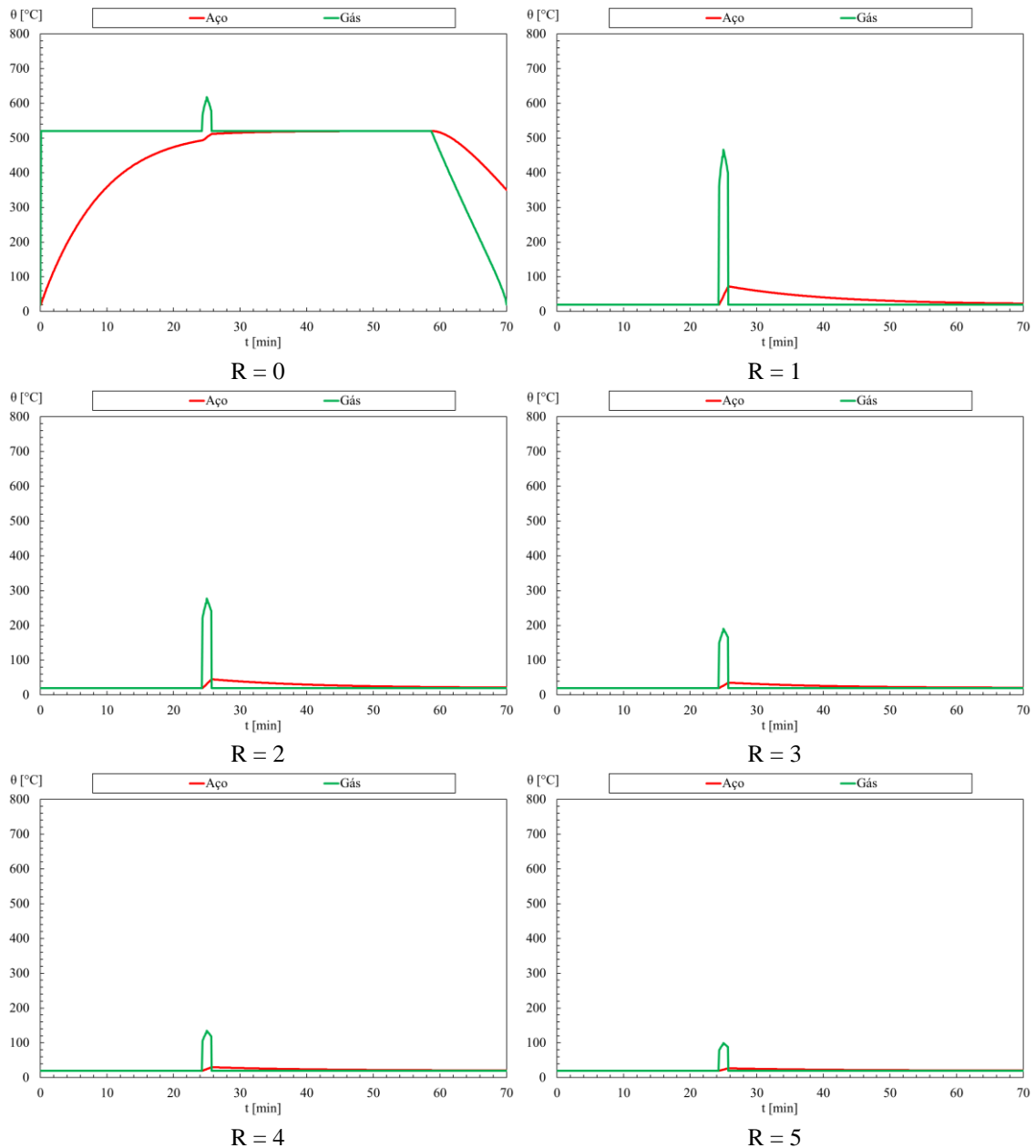


Figura 83 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

## 1.2- Perfil IPE500

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE500, considerando a classe 1 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 84 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 85 para o compartimento 2.

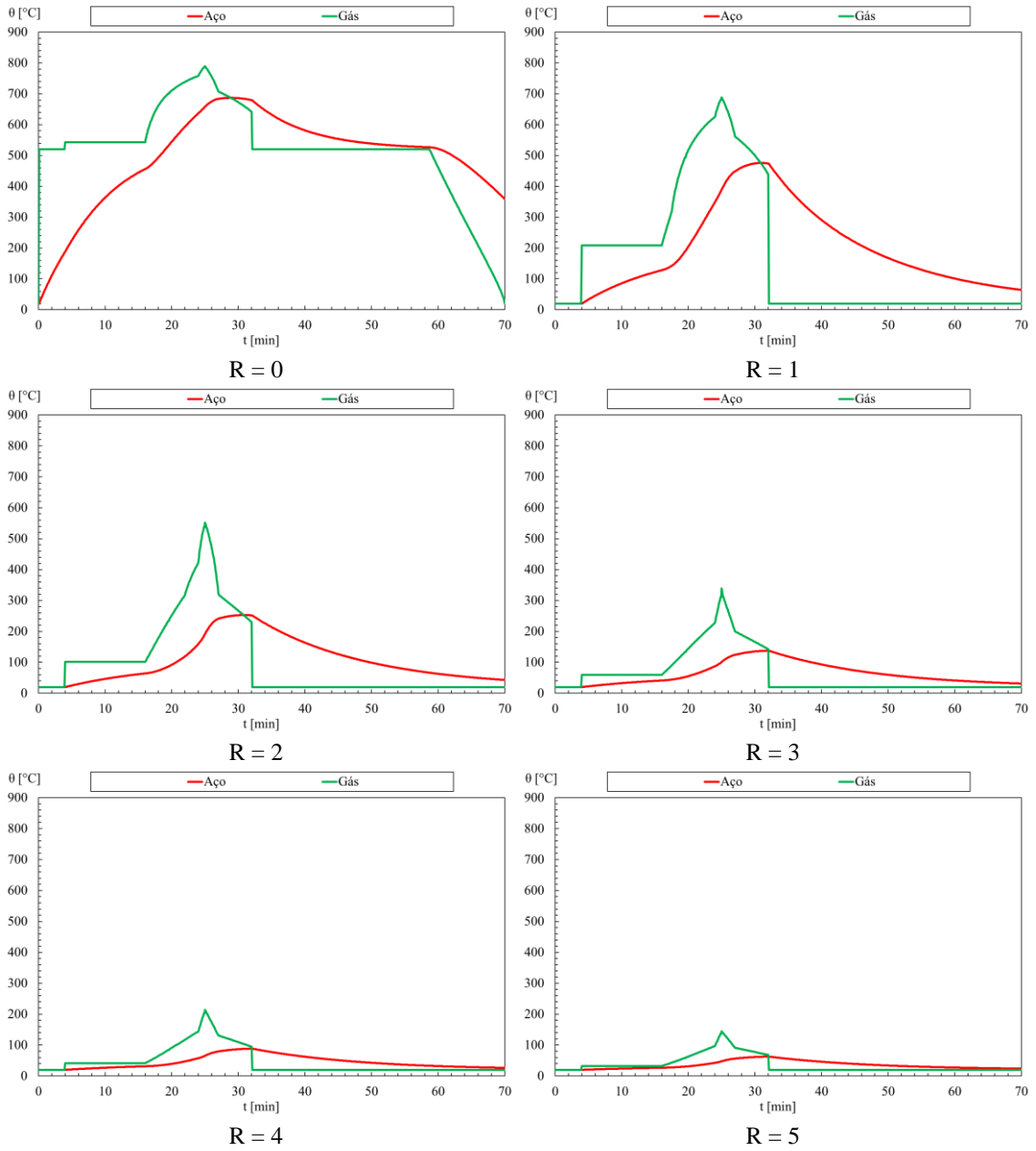


Figura 84 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

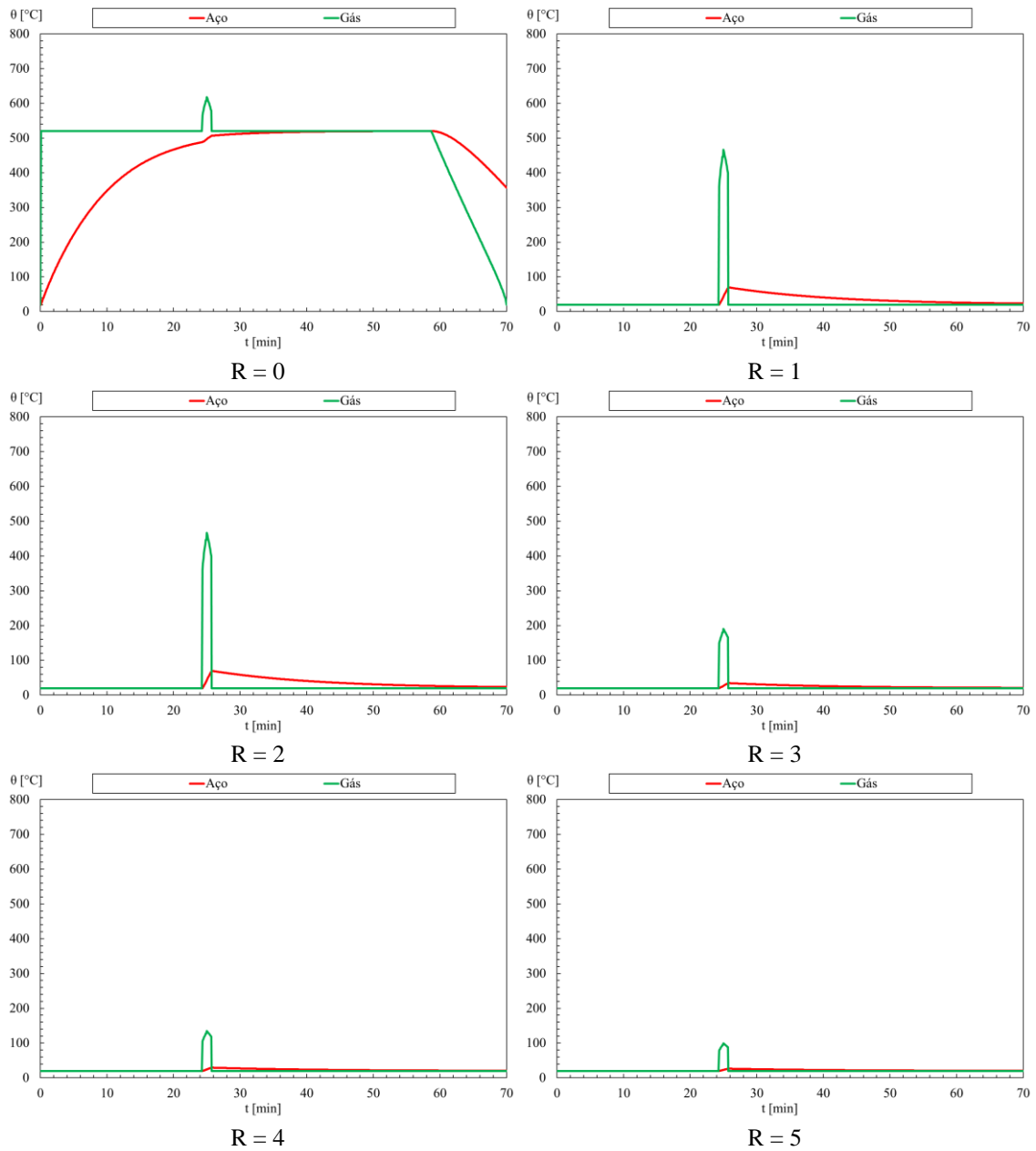


Figura 85 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 1.3- Perfil IPE600

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE600, considerando a classe 1 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 86 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 87 para o compartimento 2.

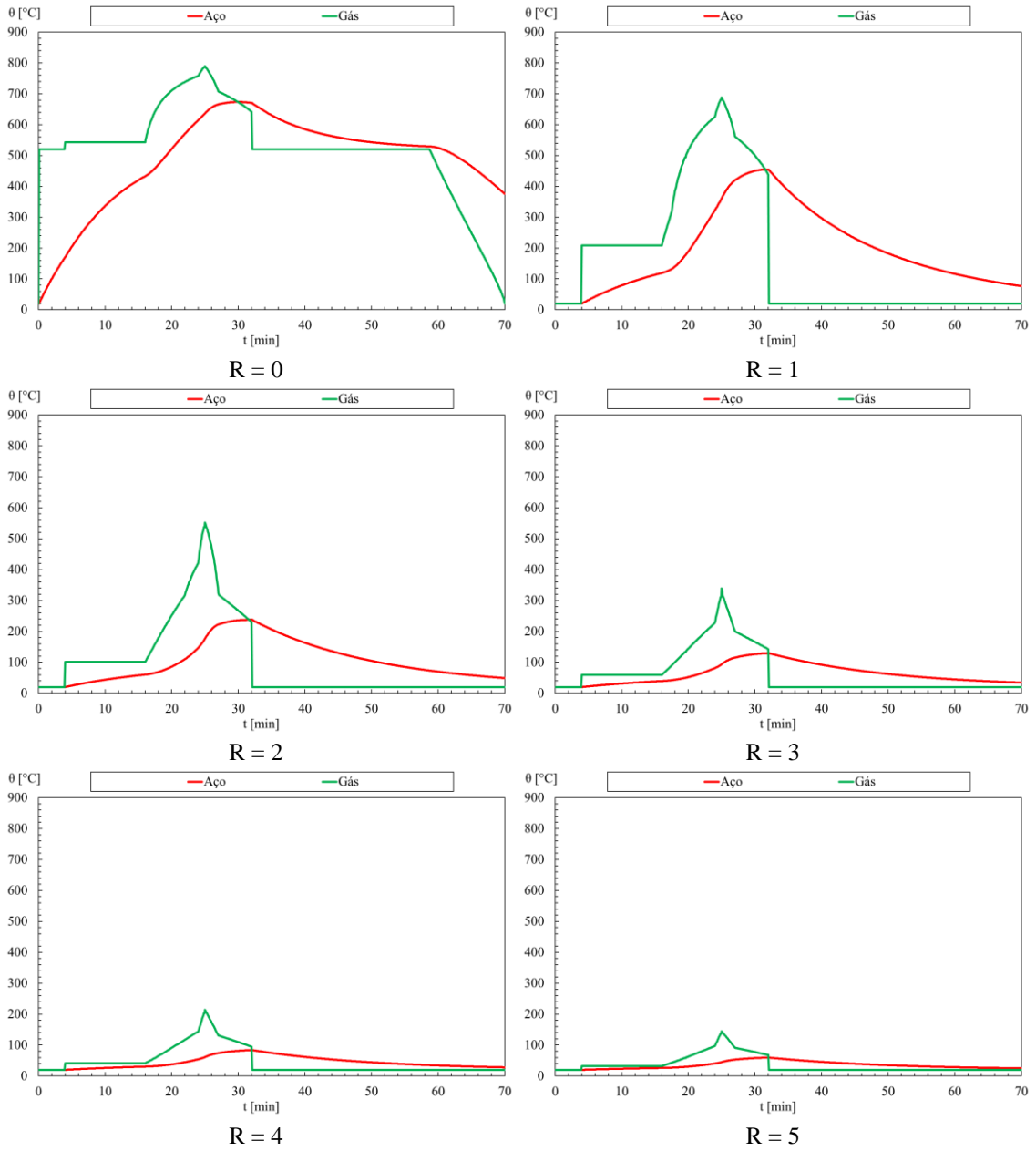


Figura 86 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

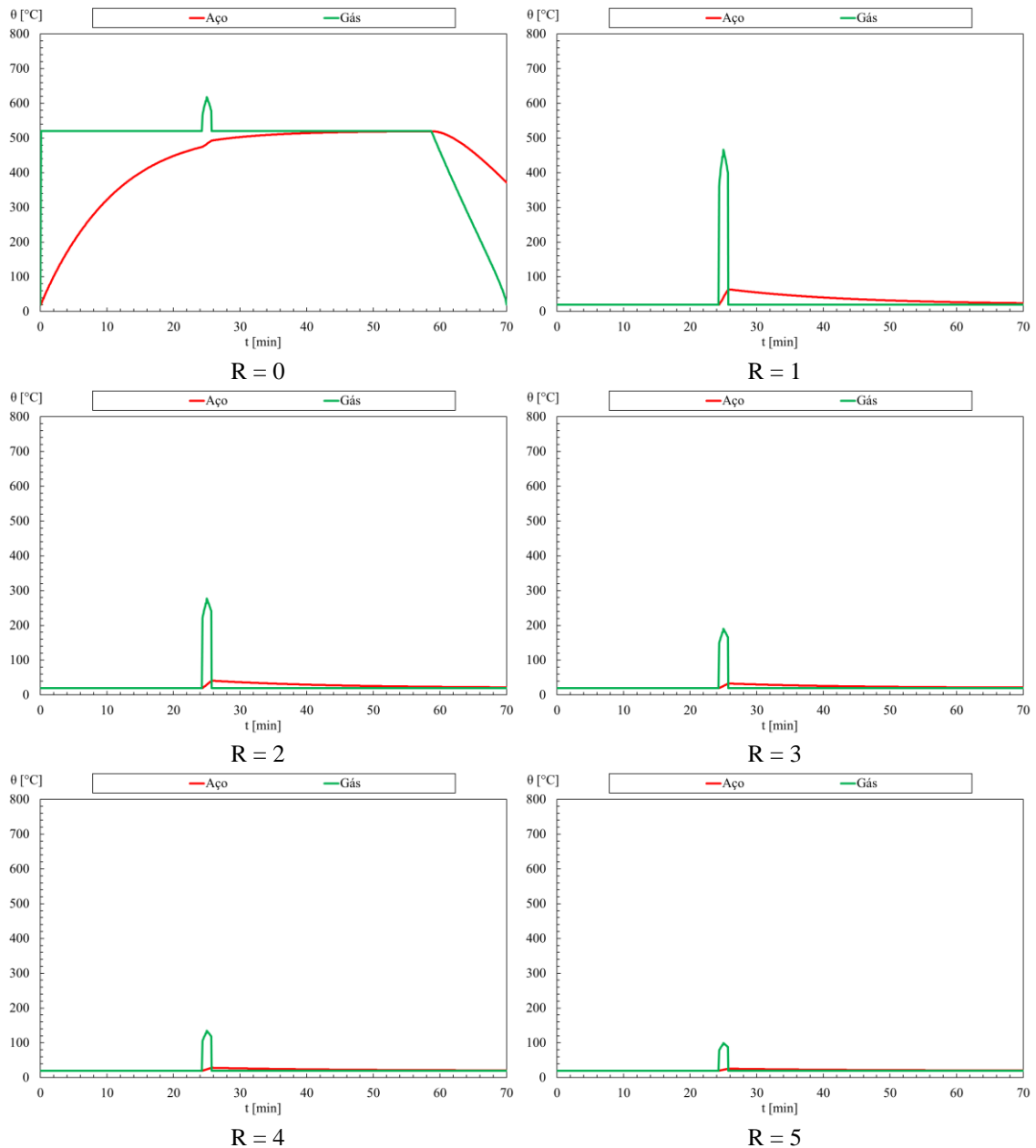


Figura 87 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

#### 1.4- Perfil HE600A

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE600A, considerando a classe 1 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 88 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 89 para o compartimento 2.

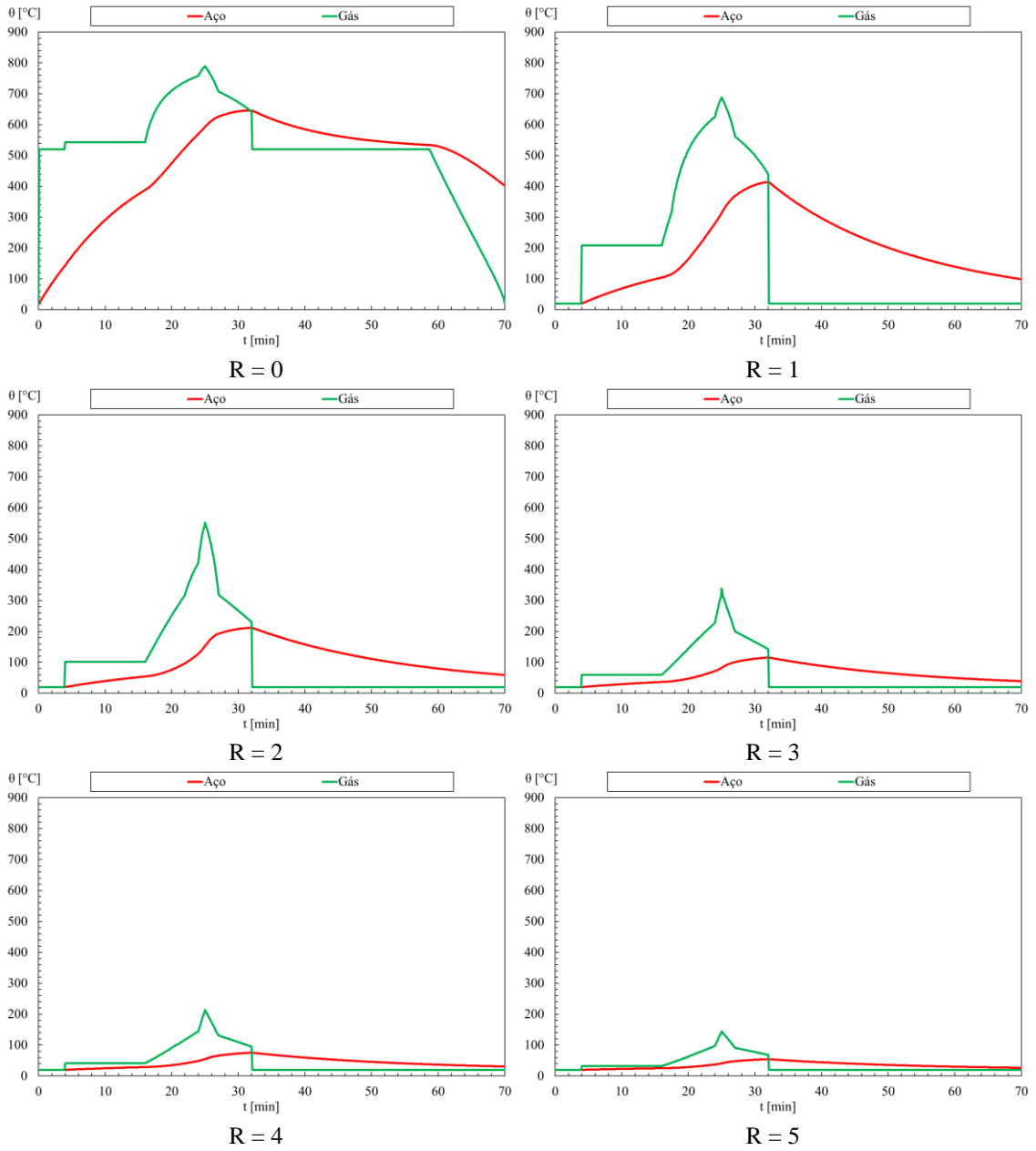


Figura 88 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

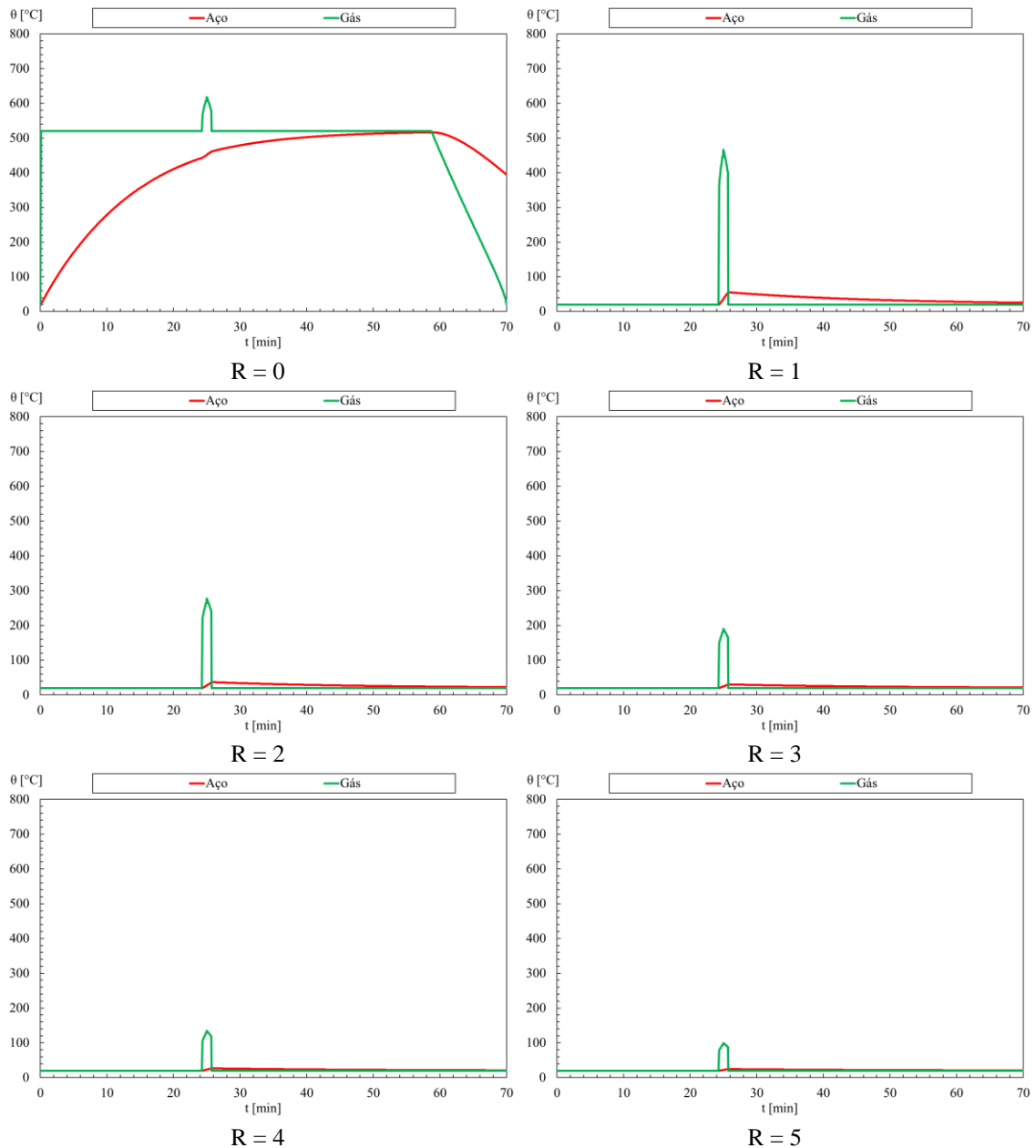


Figura 89 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 1.5- Perfil HE650A

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE650A, considerando a classe 1 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 90 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 91 para o compartimento 2.

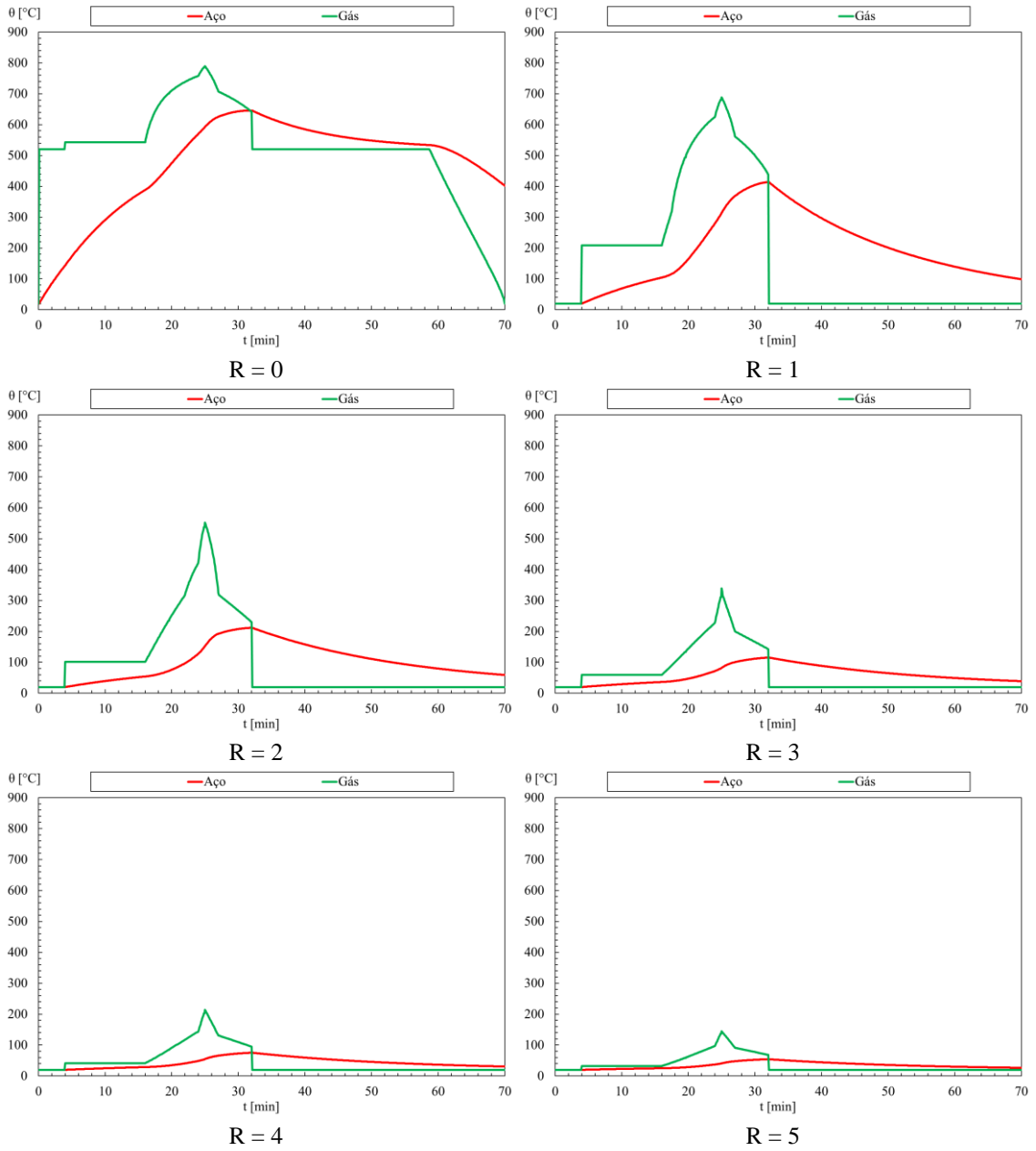


Figura 90 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

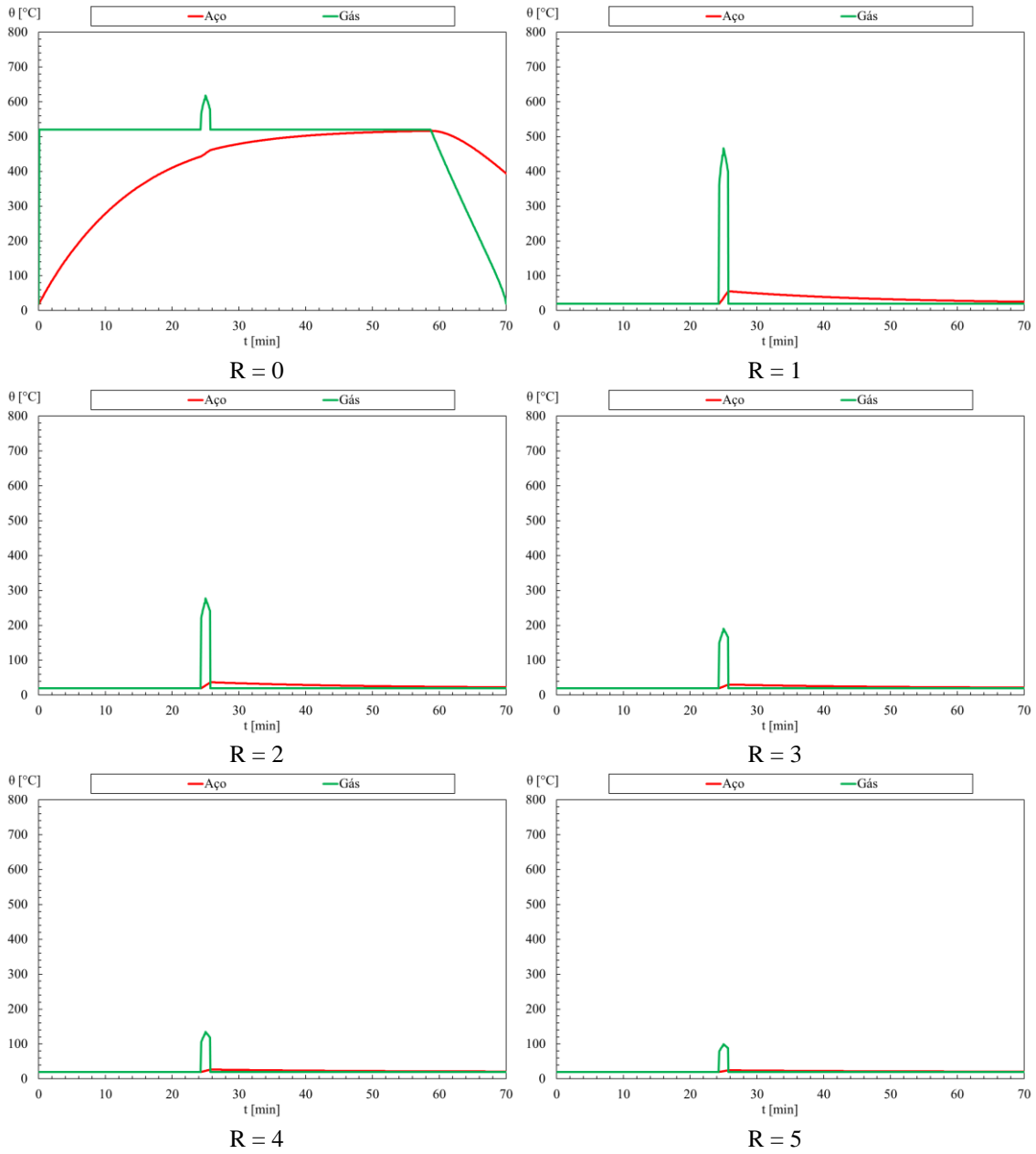


Figura 91 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

## **2- Veículo Classe 2**

### **2.1- Perfil IPE450**

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE450, considerando a classe 2 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 92 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 93 para o compartimento de incêndio 2.

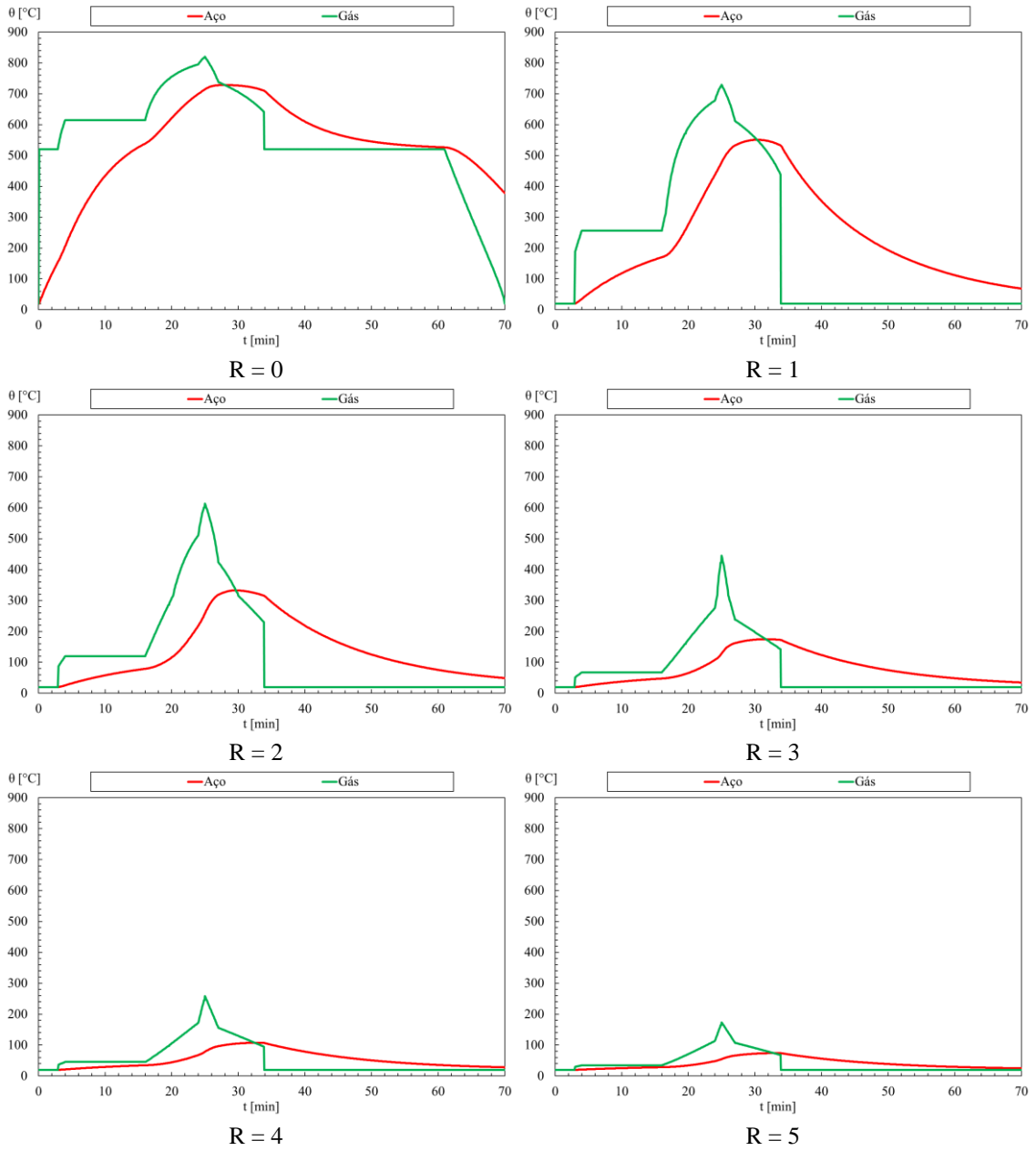


Figura 92 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

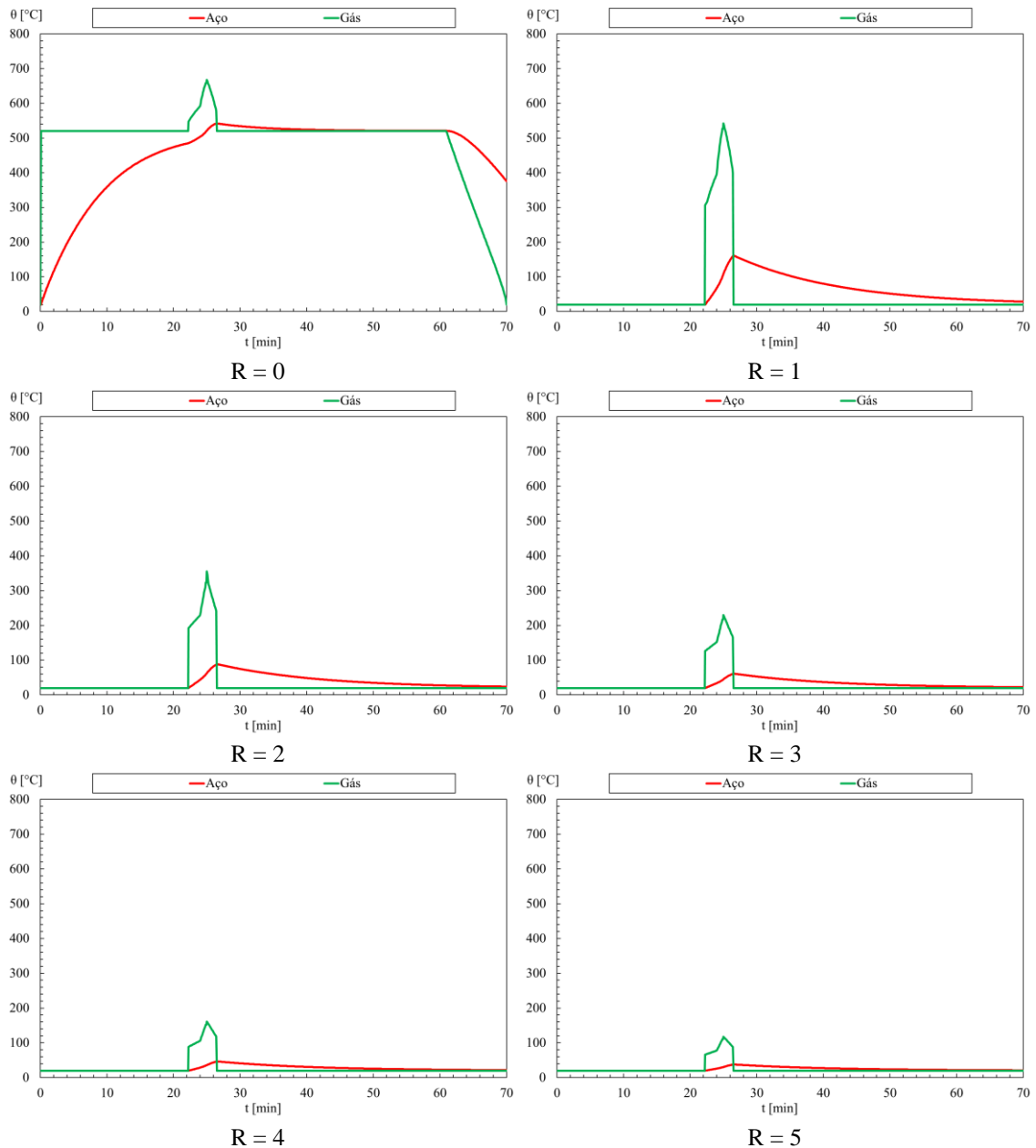


Figura 93 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

## 2.2- Perfil IPE500

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE500, considerando a classe 2 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 94 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 95 para o compartimento de incêndio 2.

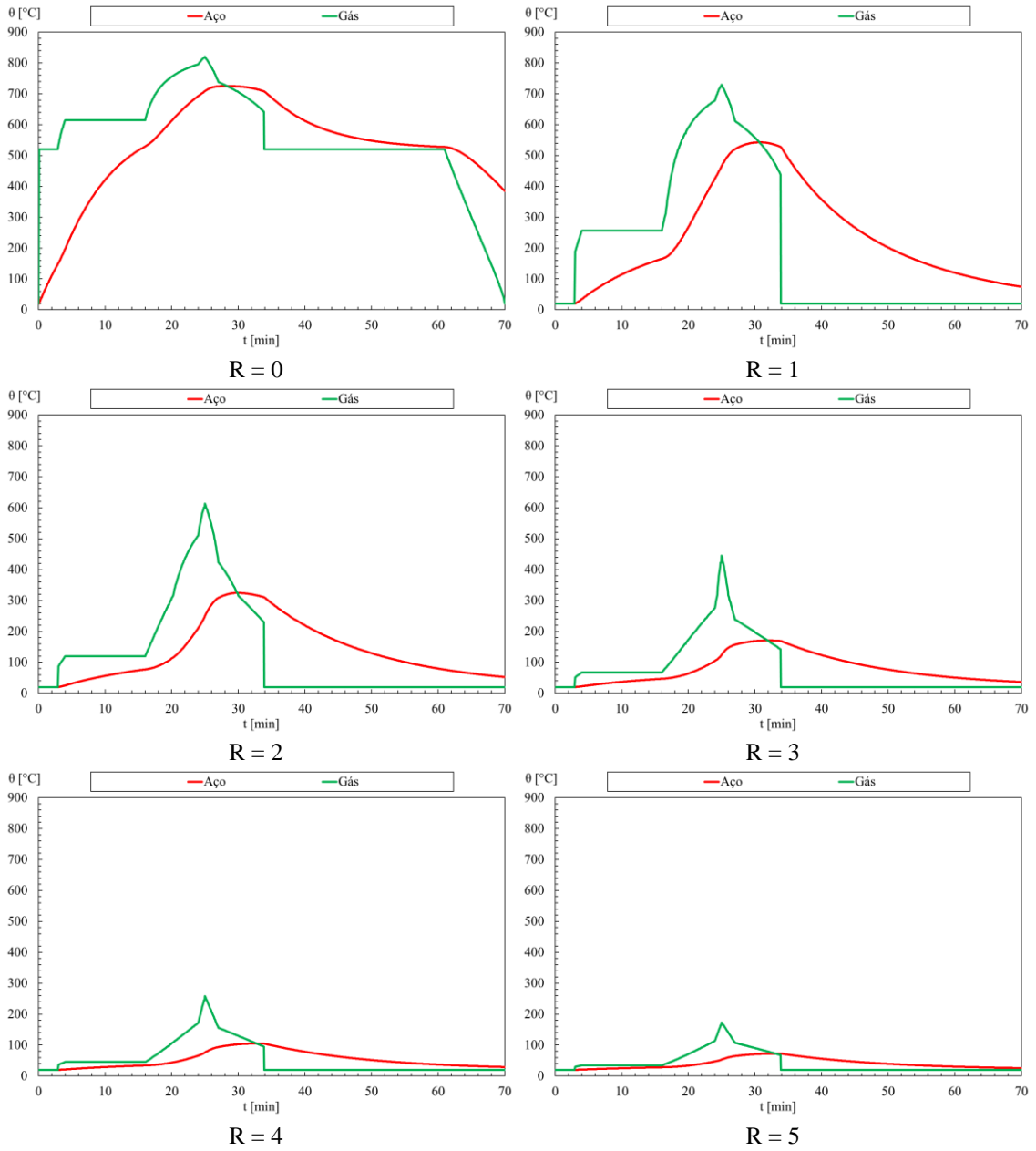


Figura 94 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

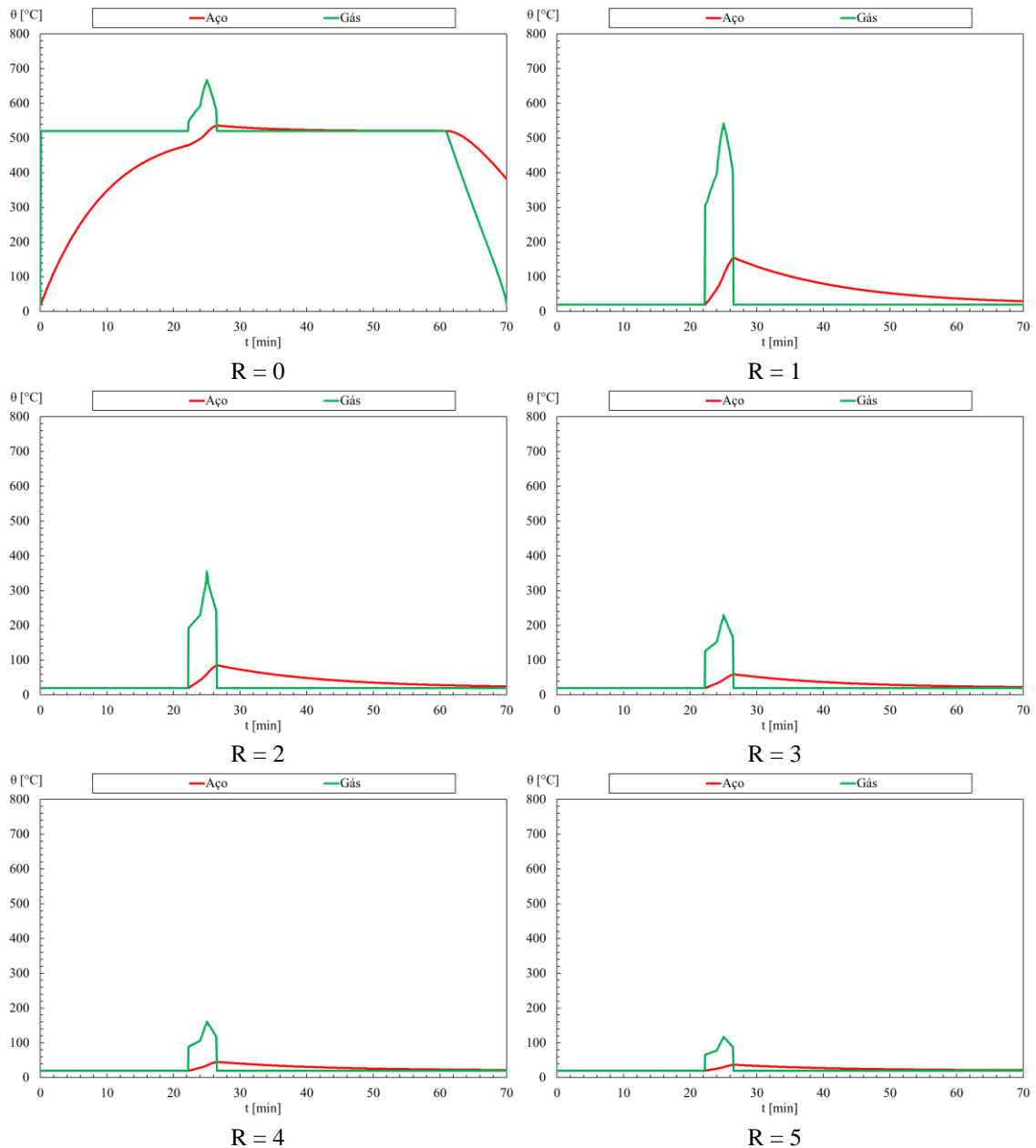


Figura 95 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 2.3- Perfil IPE600

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE600, considerando a classe 2 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 96 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 97 para o compartimento de incêndio 2.

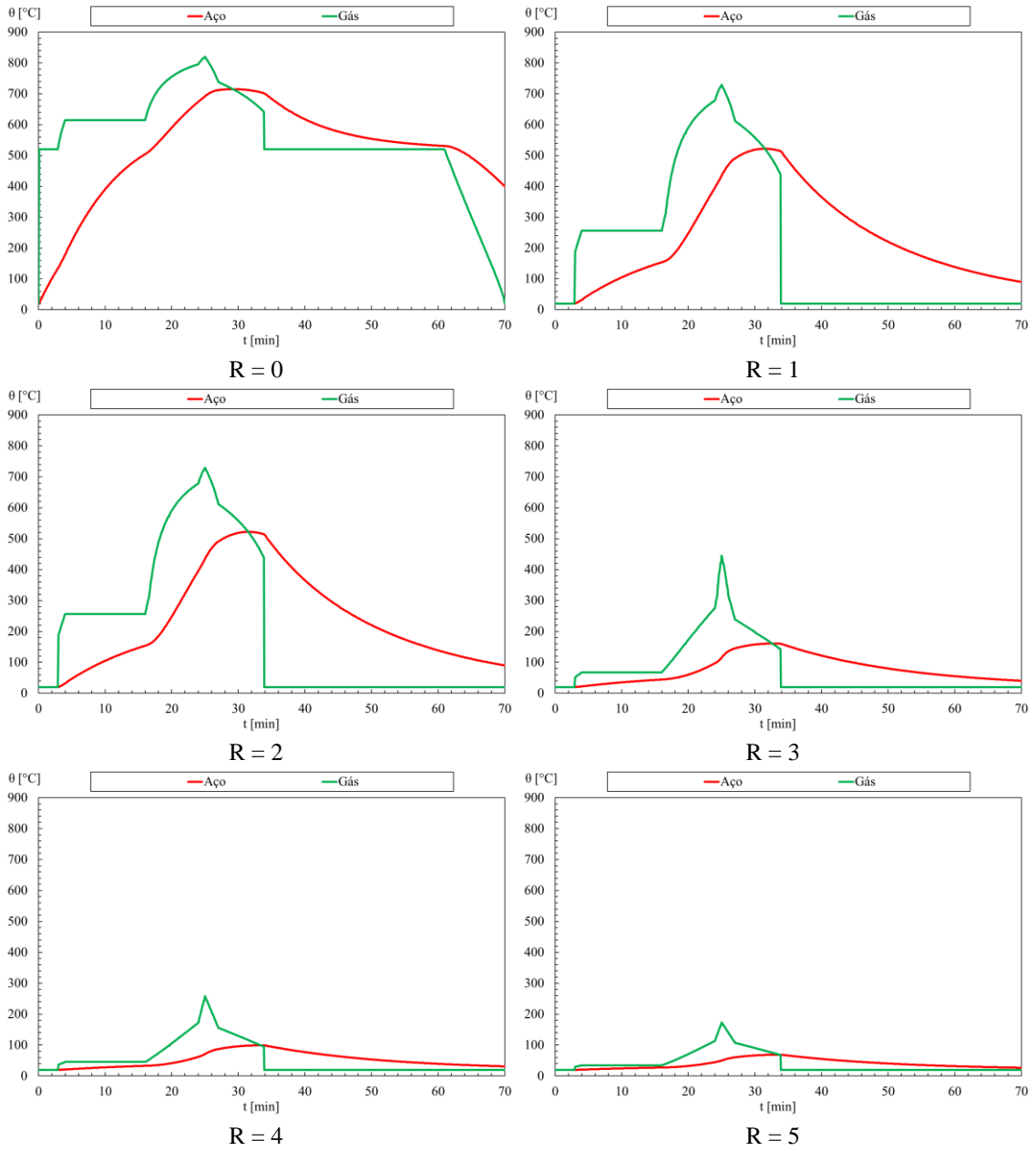


Figura 96 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

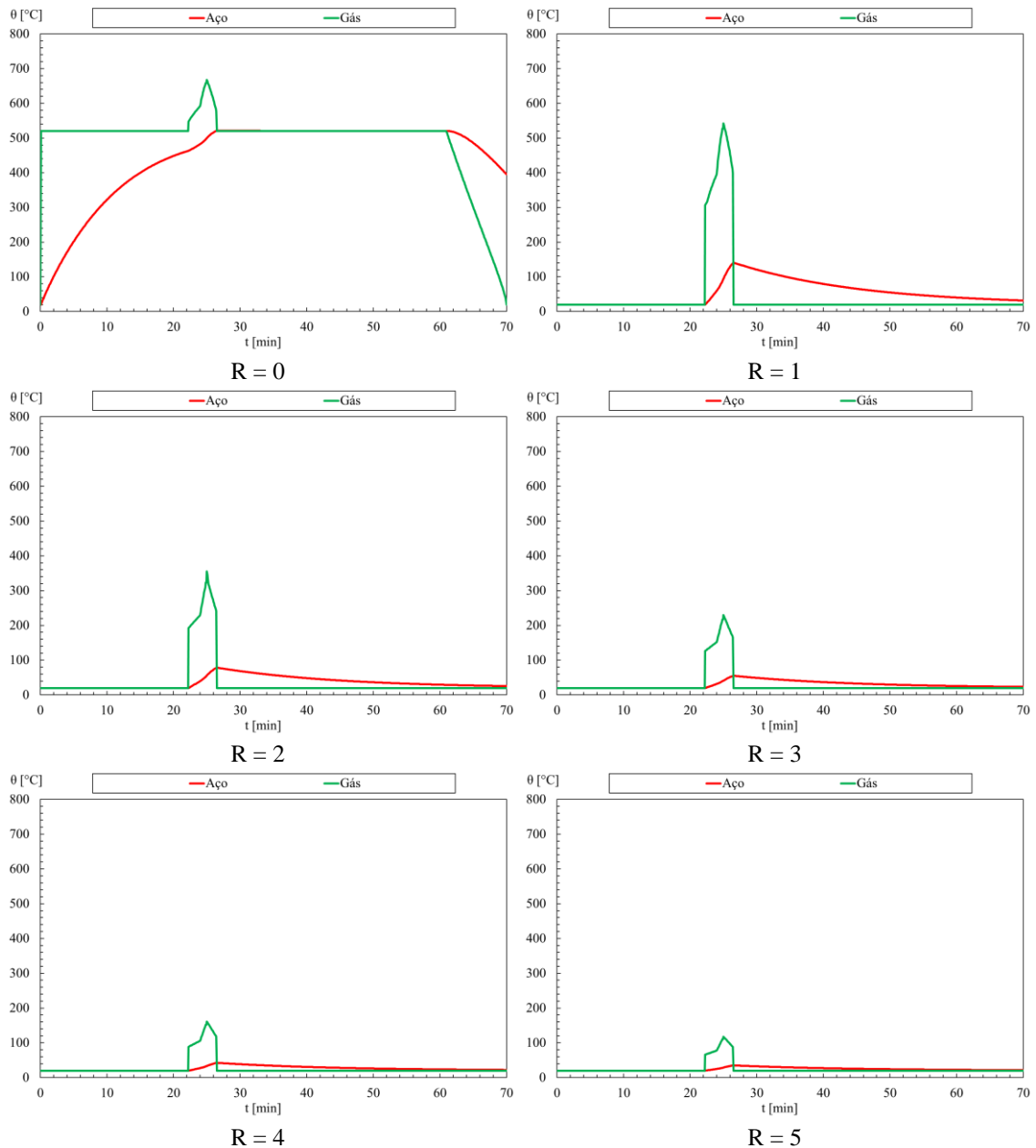


Figura 97 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

## 2.4- Perfil HE600A

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE600A, considerando a classe 2 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 98 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 99 para o compartimento de incêndio 2.

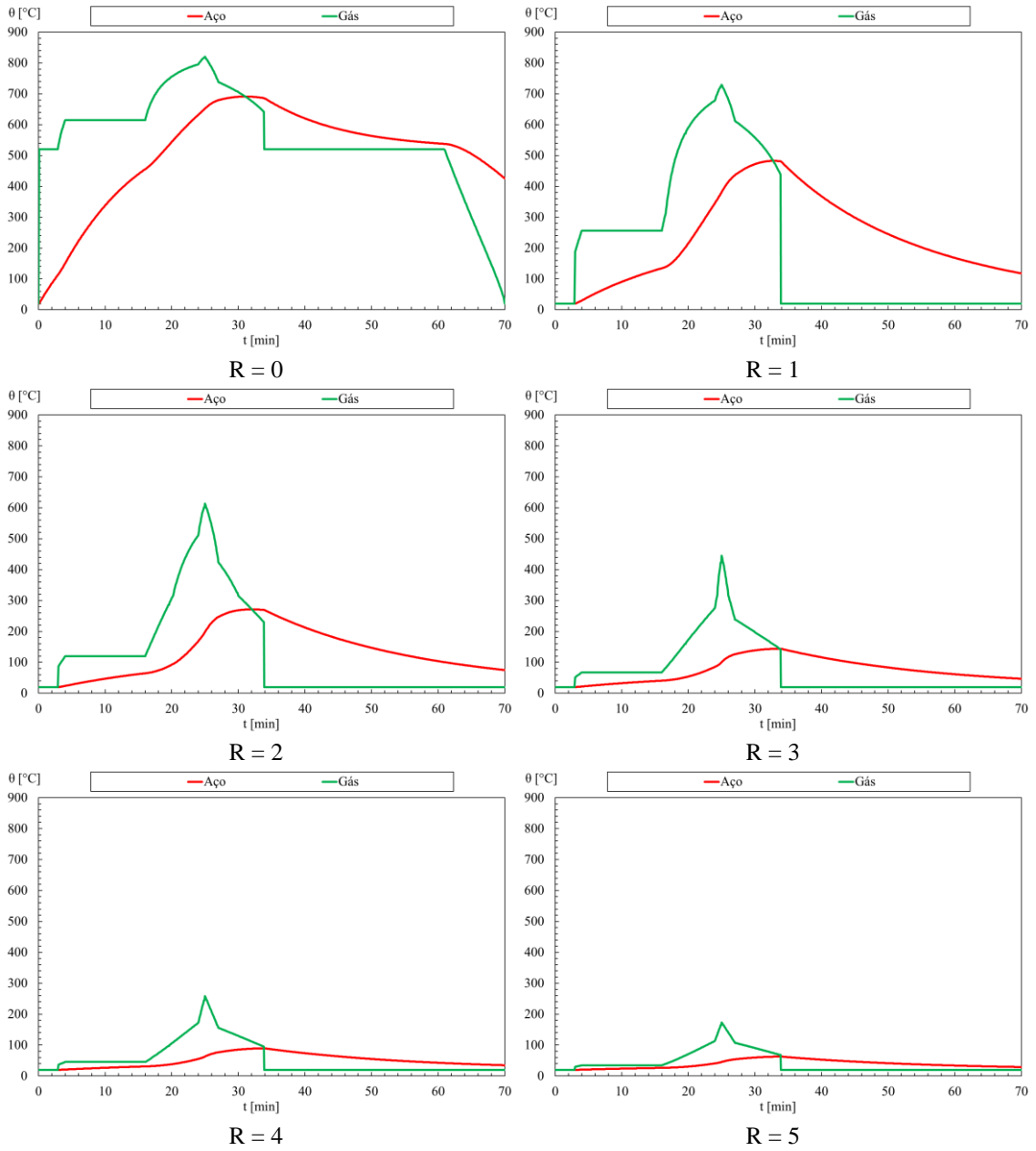


Figura 98 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

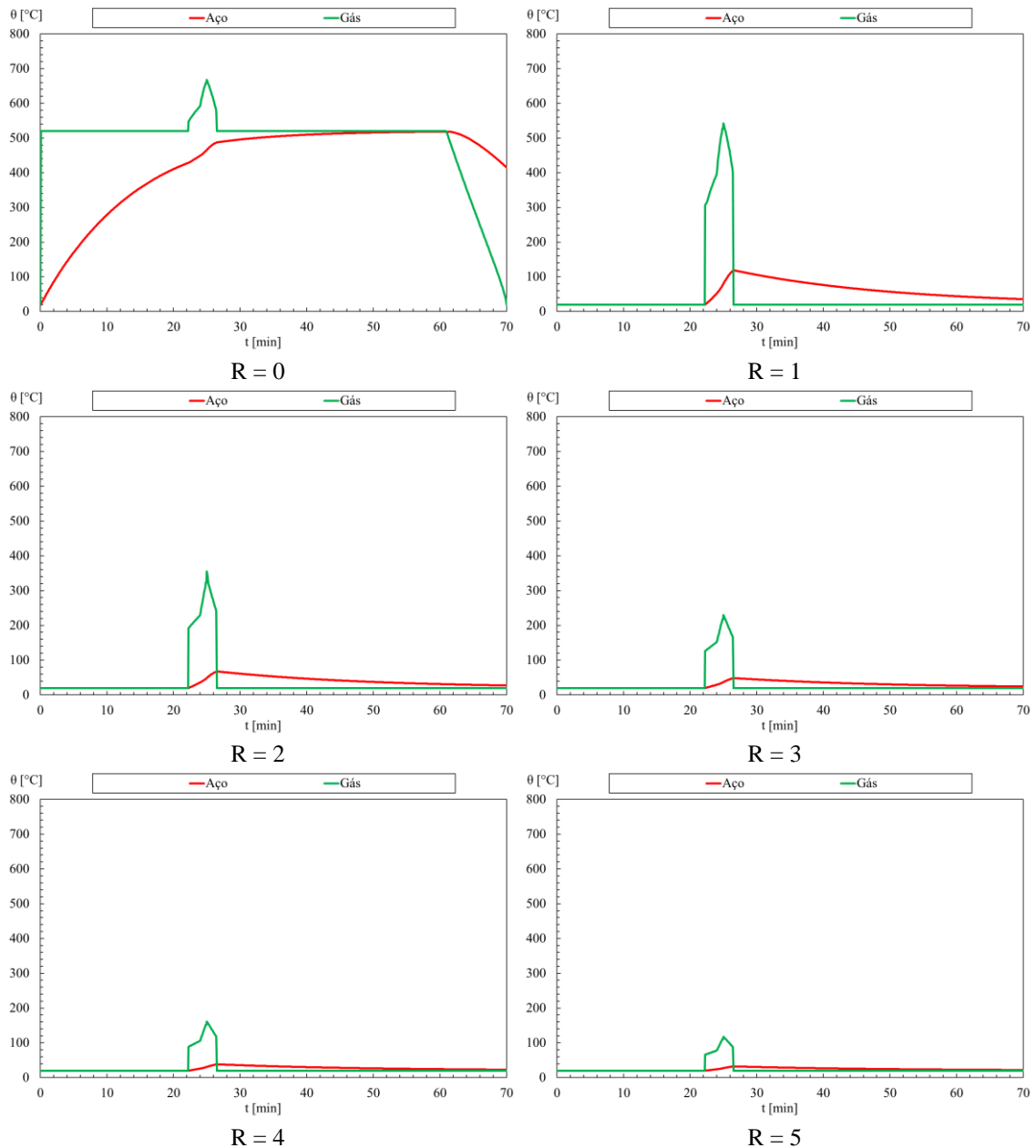


Figura 99 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

## 2.5- Perfil HE650A

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE650A, considerando a classe 2 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 100 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 101 para o compartimento de incêndio 2.

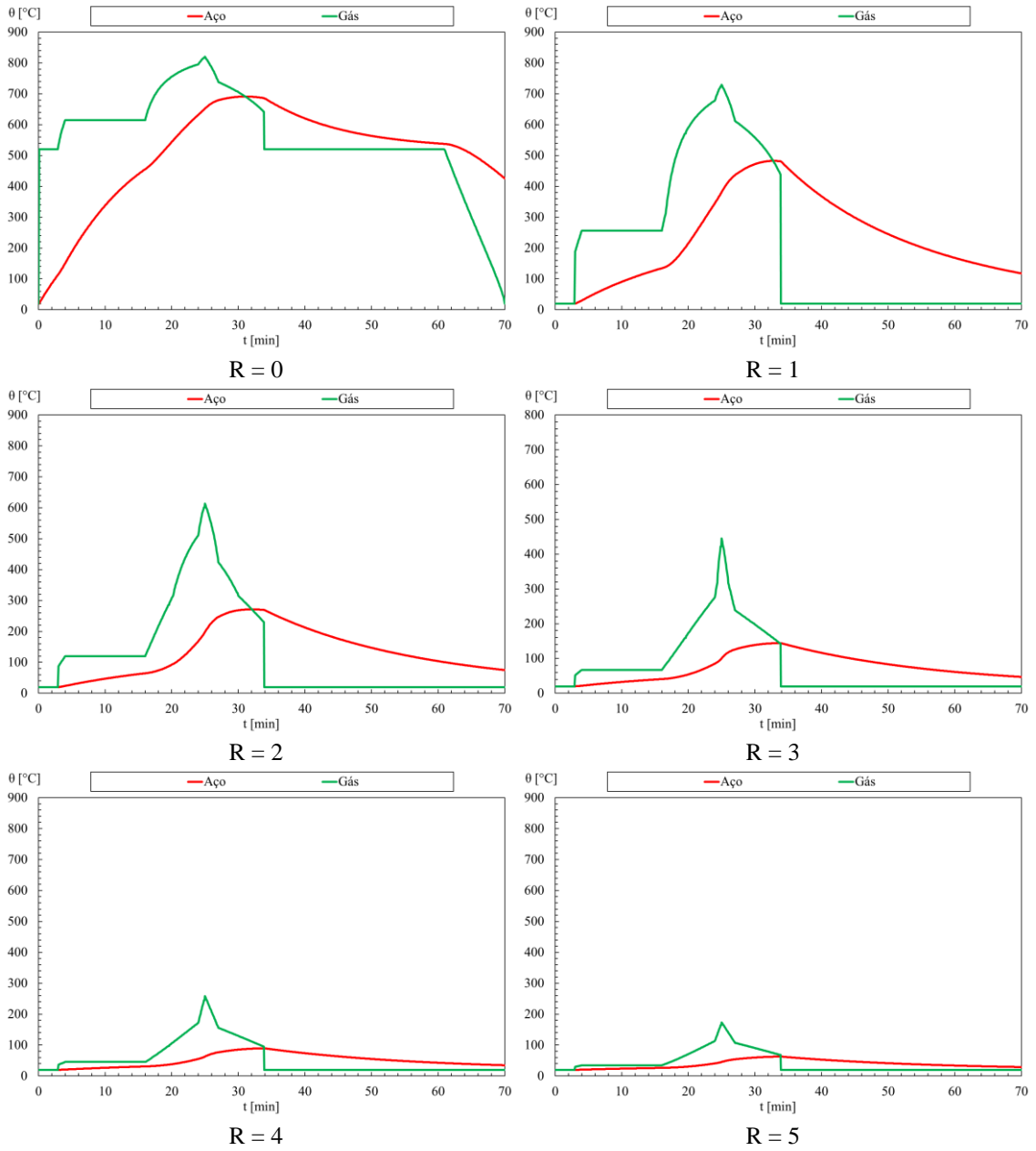


Figura 100 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

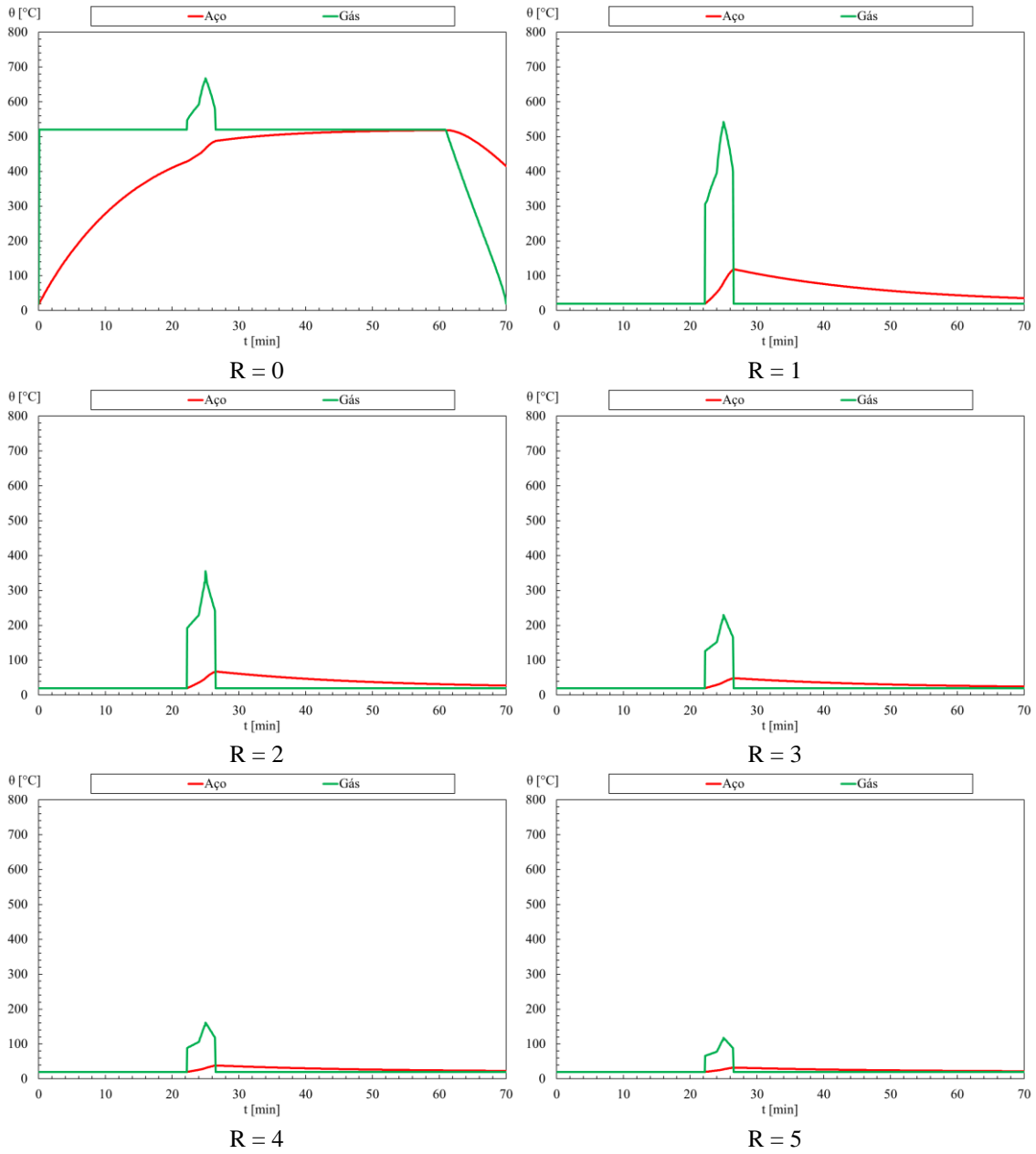


Figura 101 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### **3- Veículo Classe 3**

#### **3.1- Perfil IPE450**

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE450, considerando a classe 3 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 102 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 103 para o compartimento de incêndio 2.

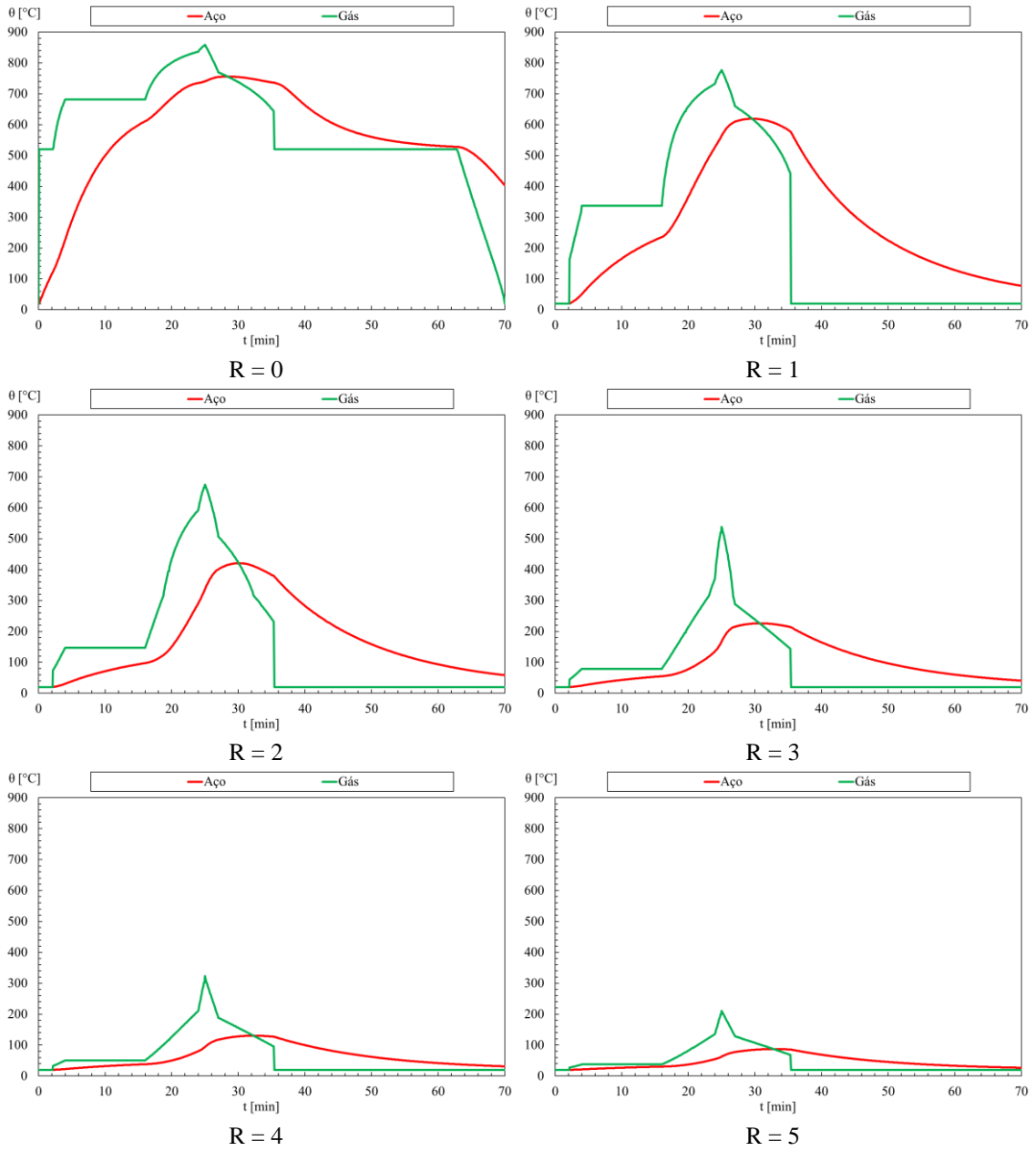


Figura 102 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

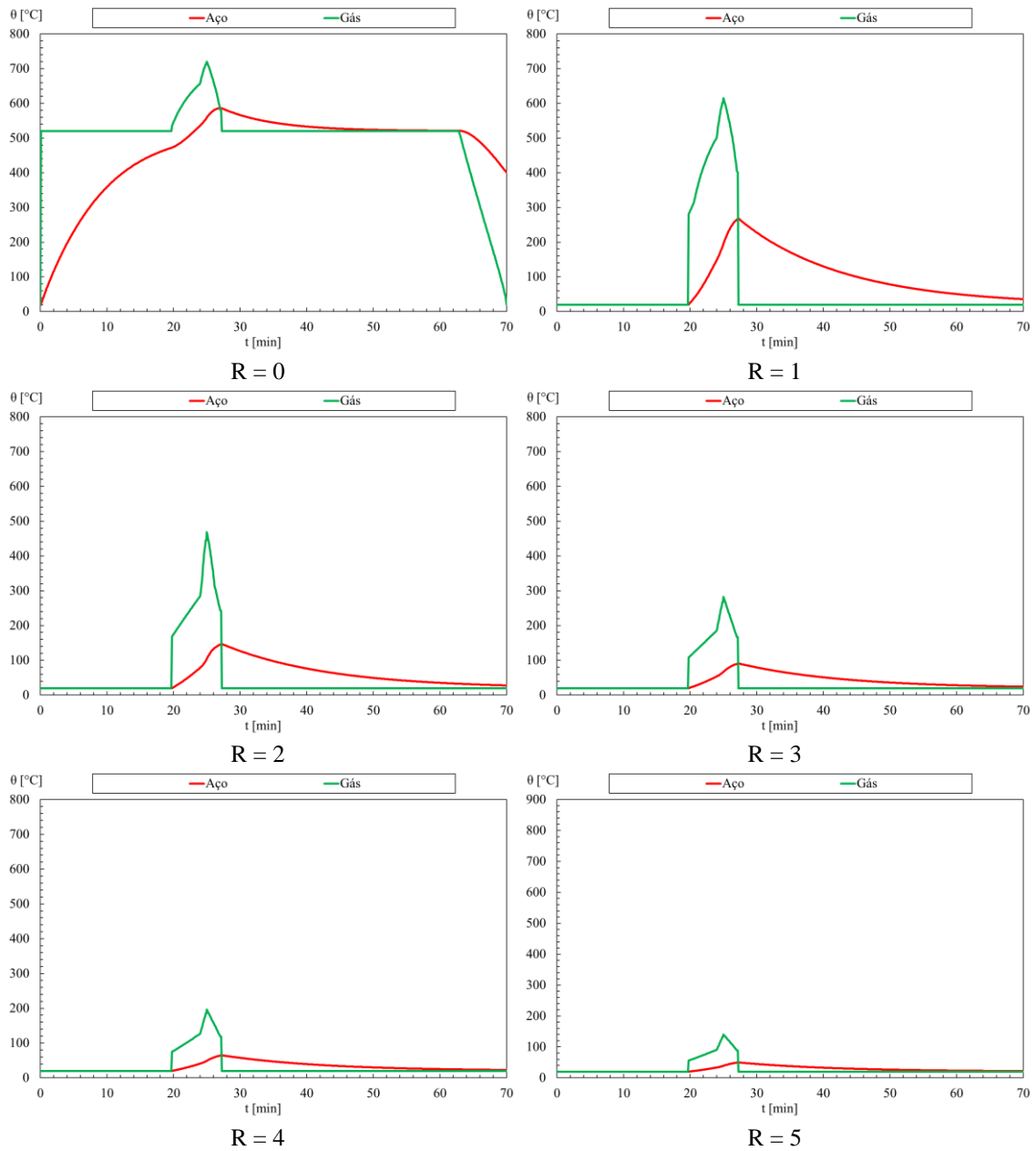


Figura 103 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 3.2- Perfil HE600A

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE600A, considerando a classe 3 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 104 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 105 para o compartimento de incêndio 2.

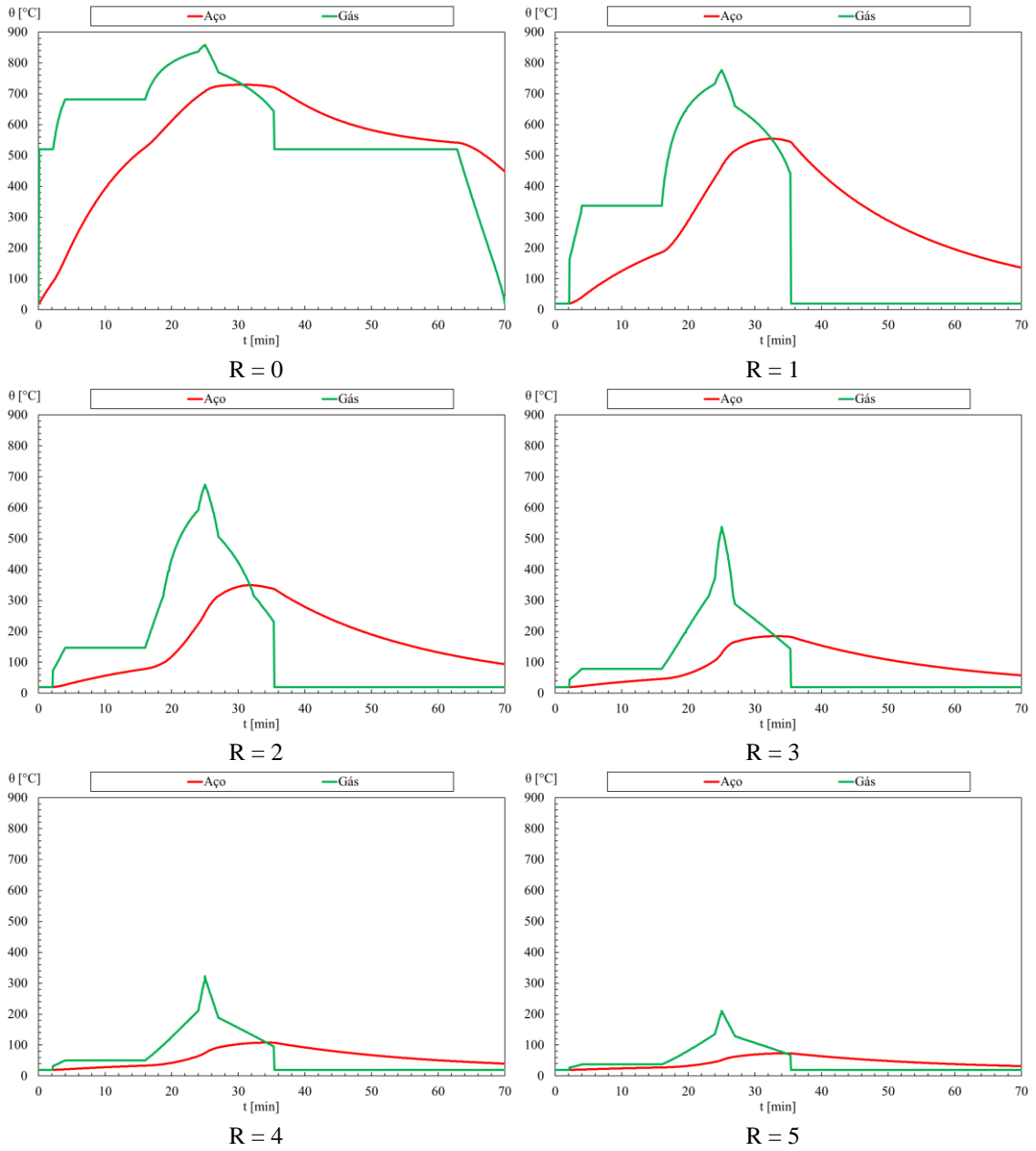


Figura 104 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

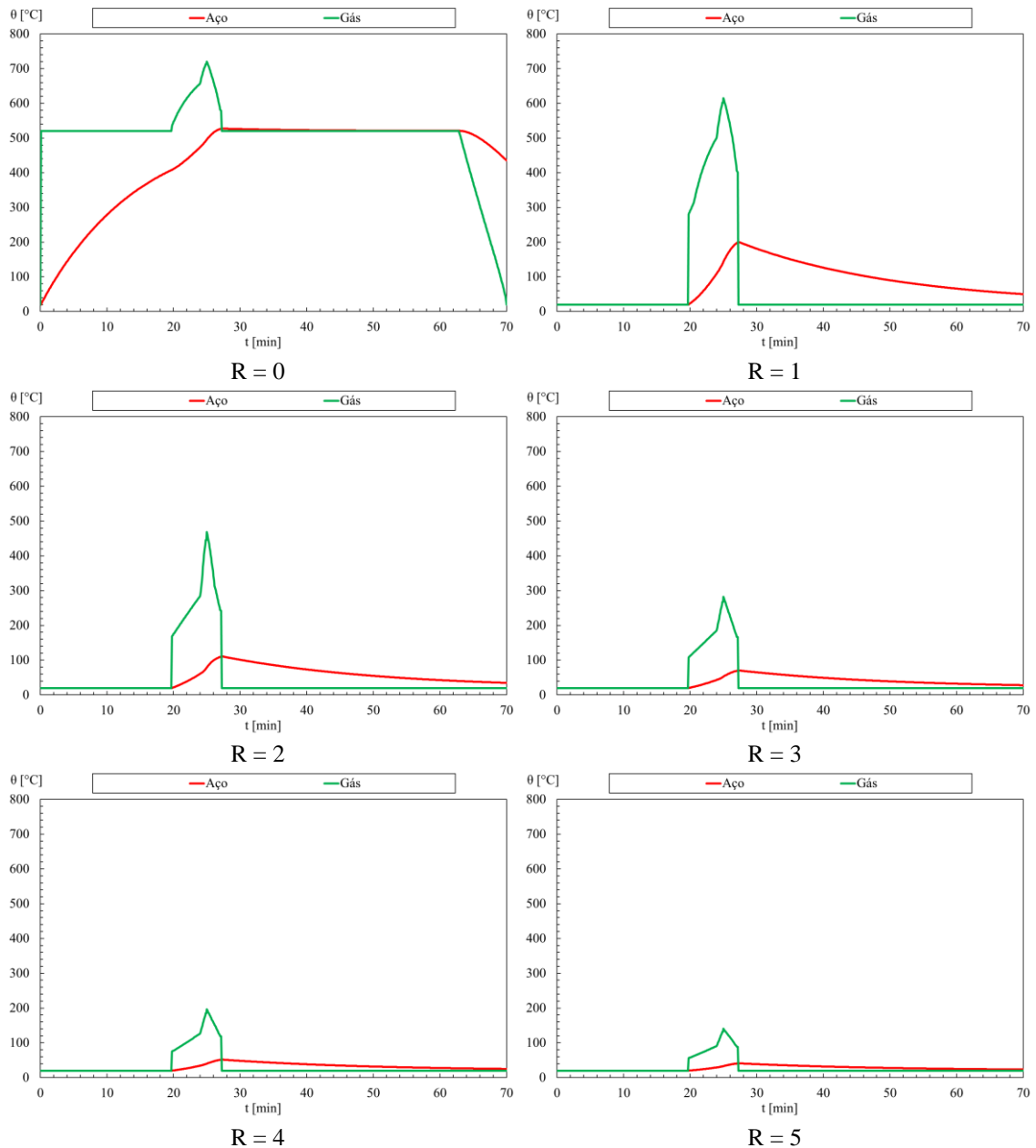


Figura 105 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 3.3- Perfil HE650A

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE650A, considerando a classe 3 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 106 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 107 para o compartimento de incêndio 2.

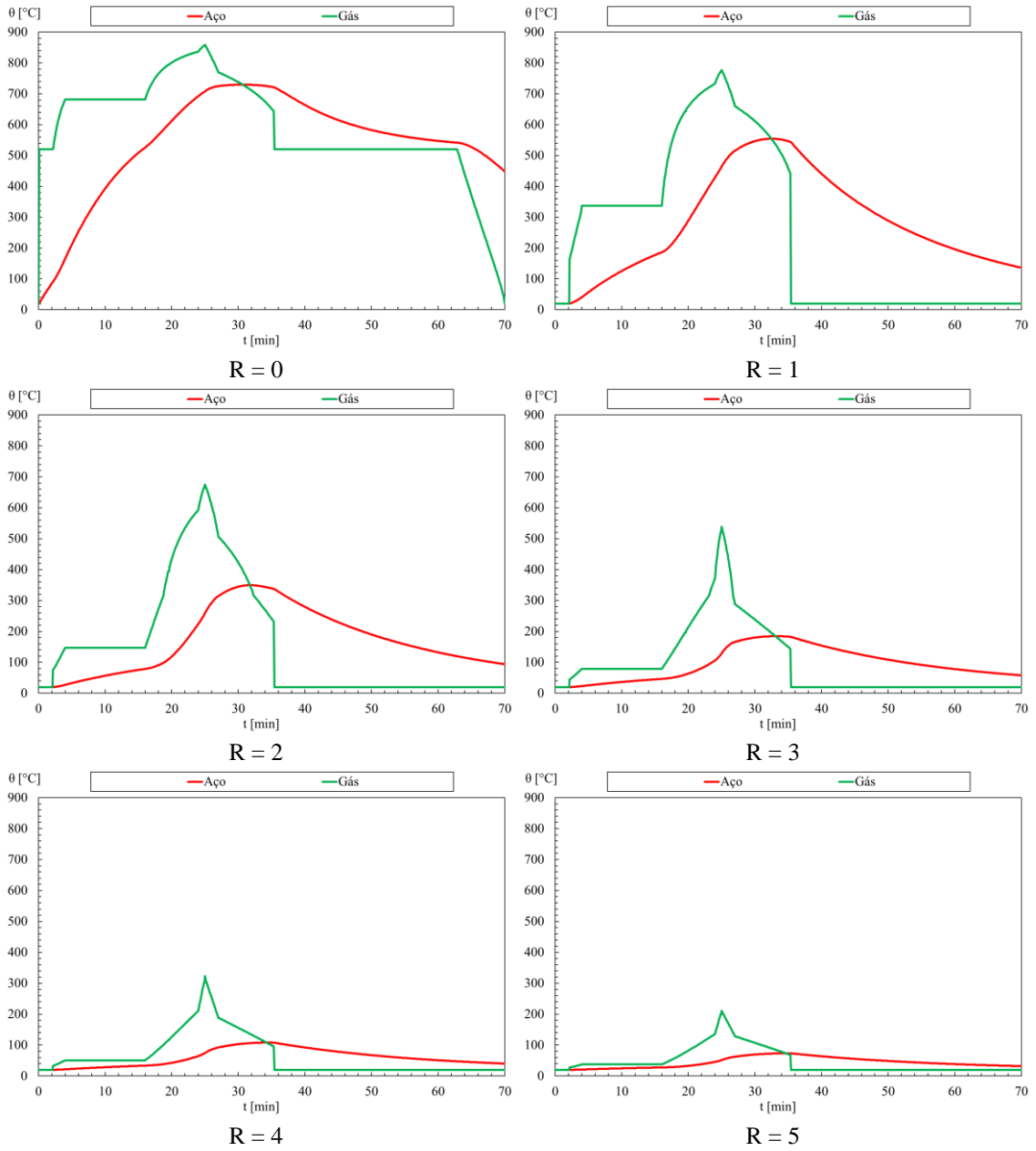


Figura 106 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

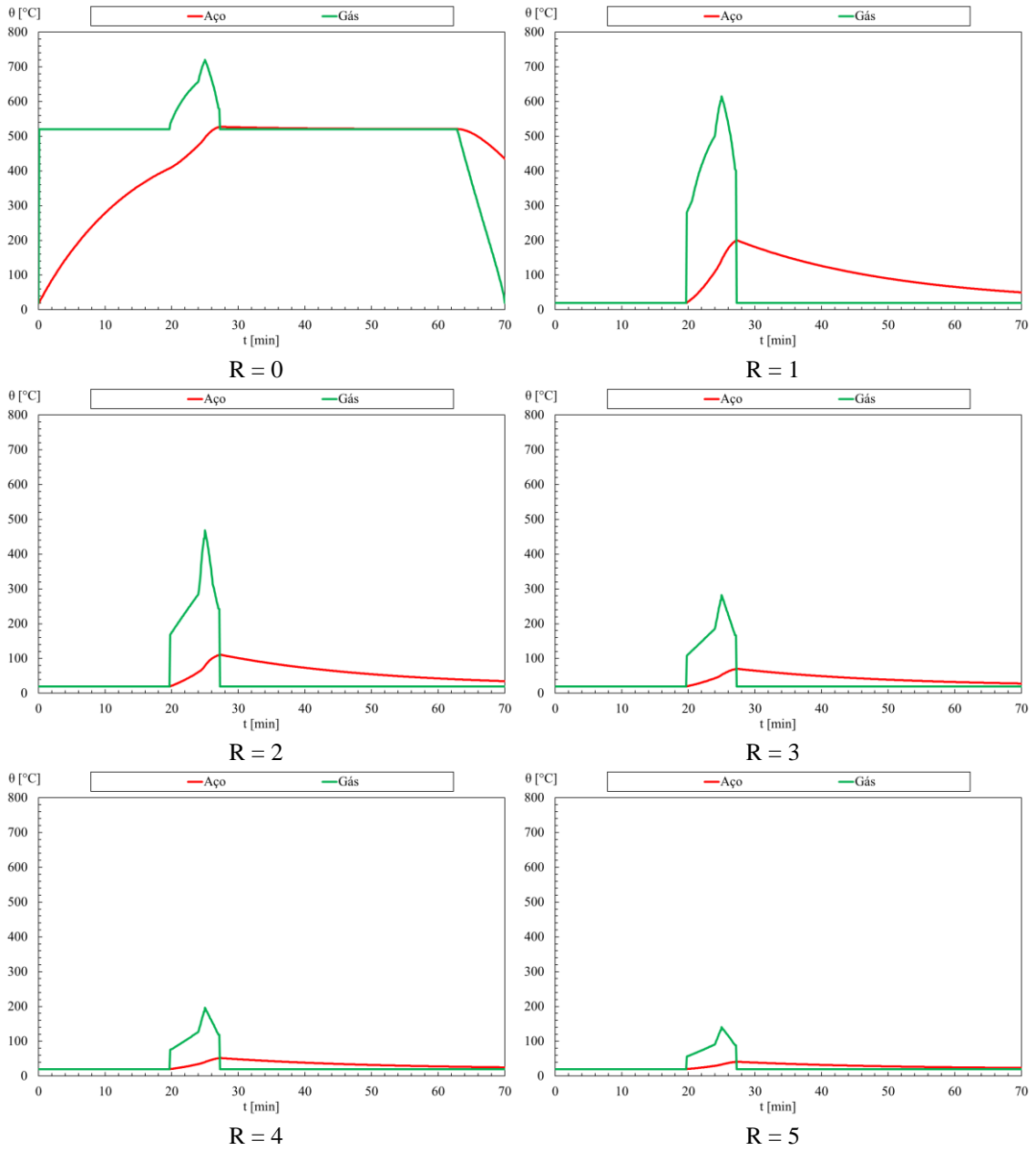


Figura 107 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

## **4- Veículo Classe 4/5**

### **4.1- Perfil IPE450**

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE450, considerando a classe 4/5 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 108 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 109 para o compartimento de incêndio 2.

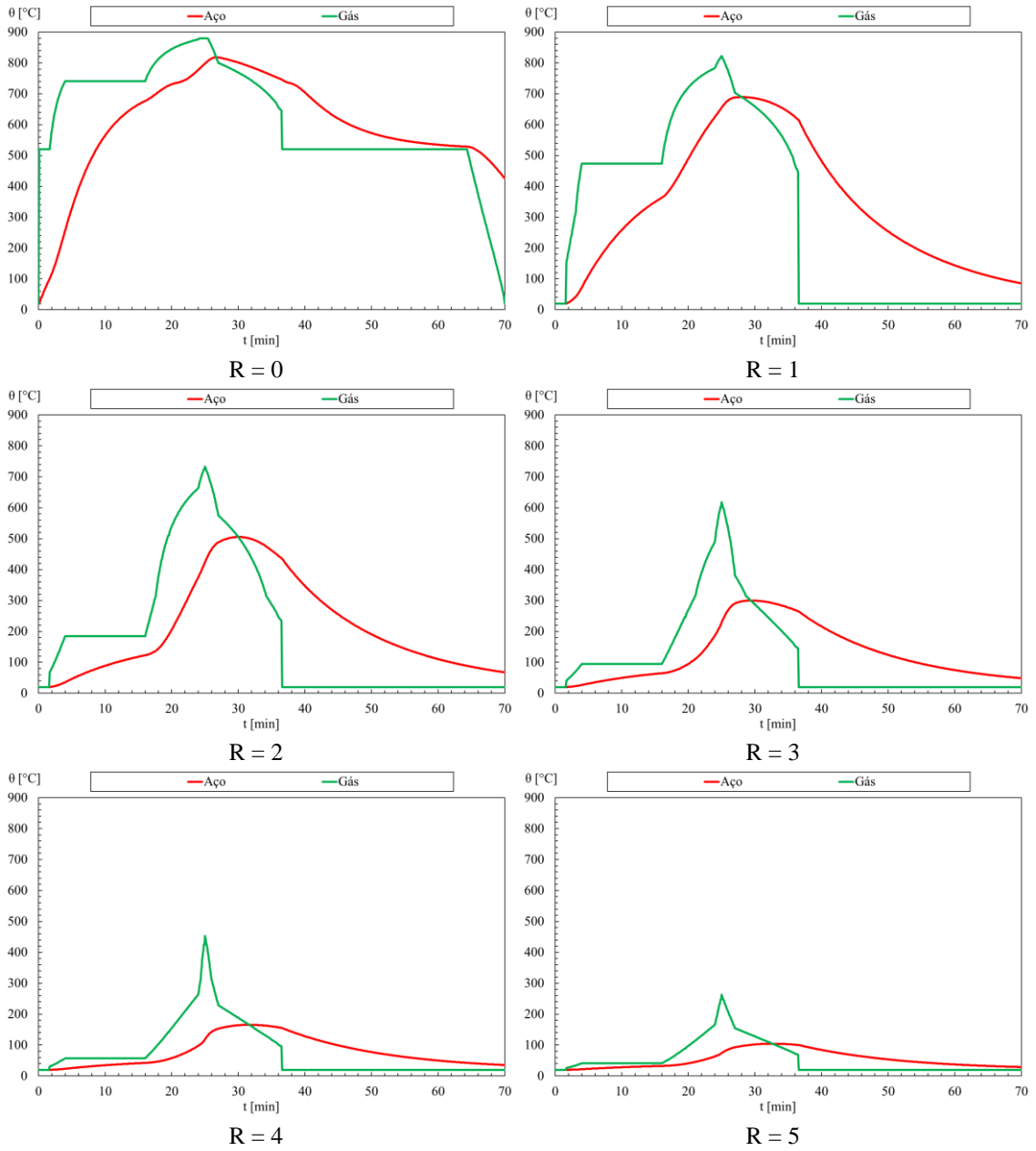


Figura 108 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

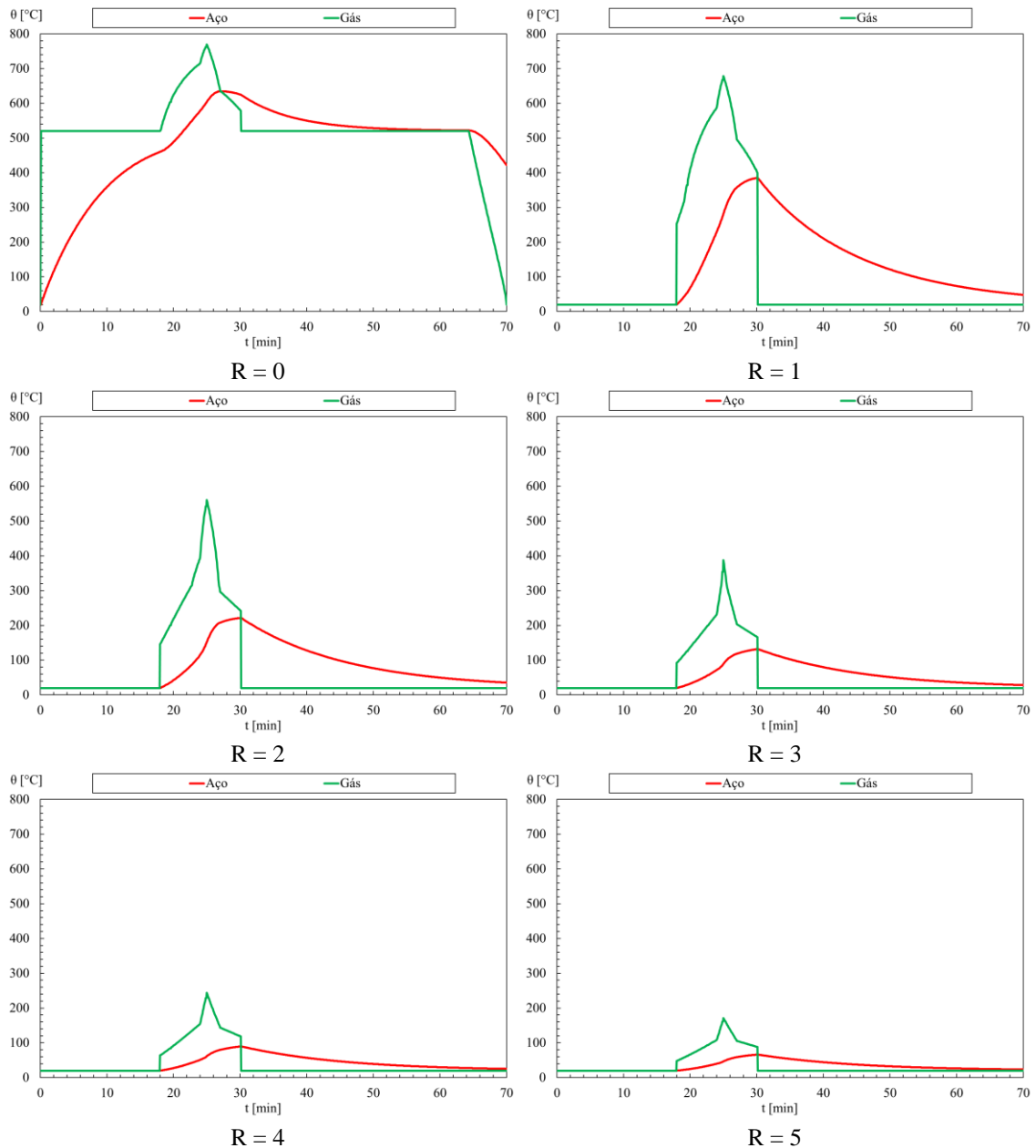


Figura 109 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

#### 4.2- Perfil IPE500

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE500, considerando a classe 4/5 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 110 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 111 para o compartimento de incêndio 2.

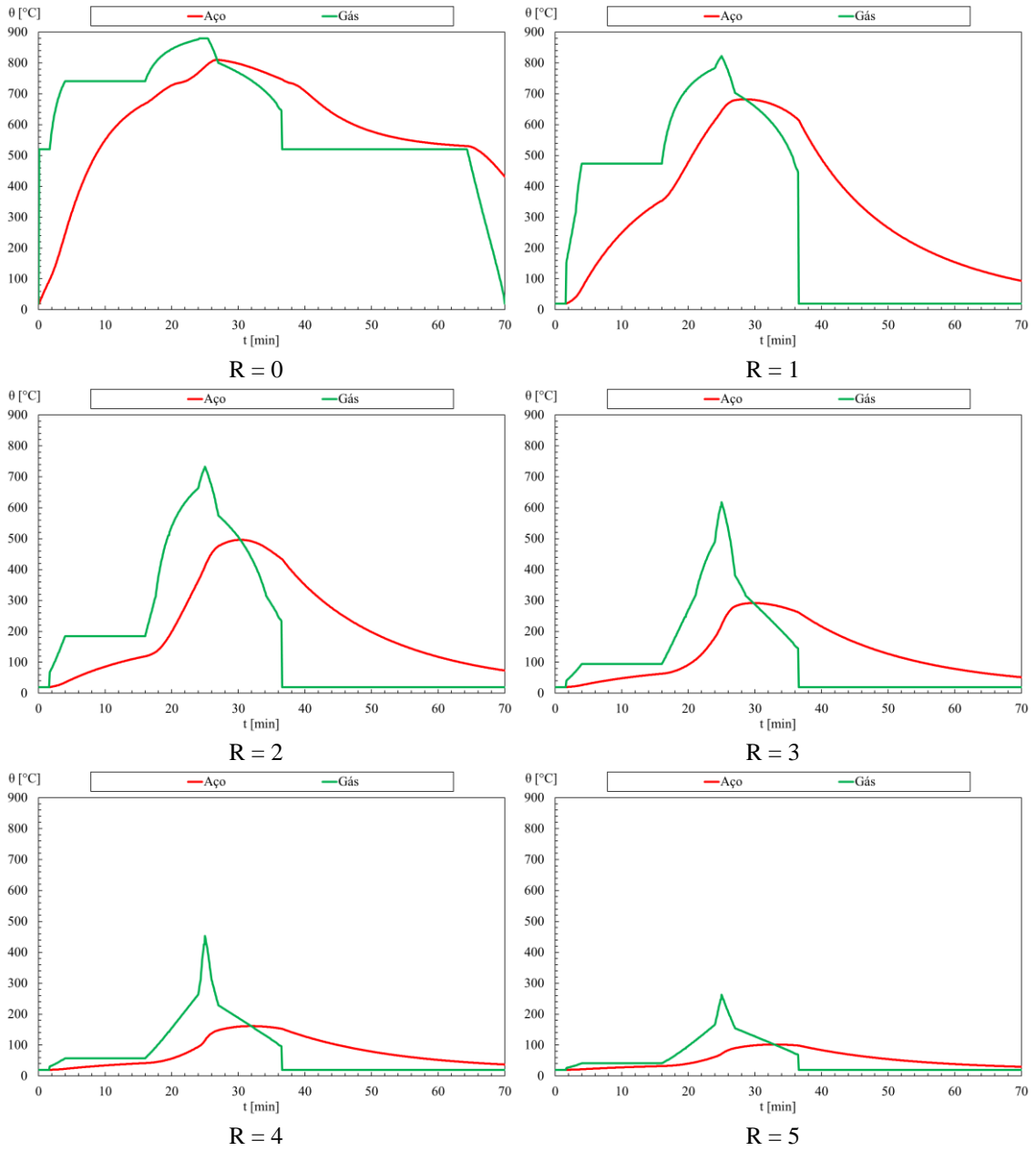


Figura 110 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

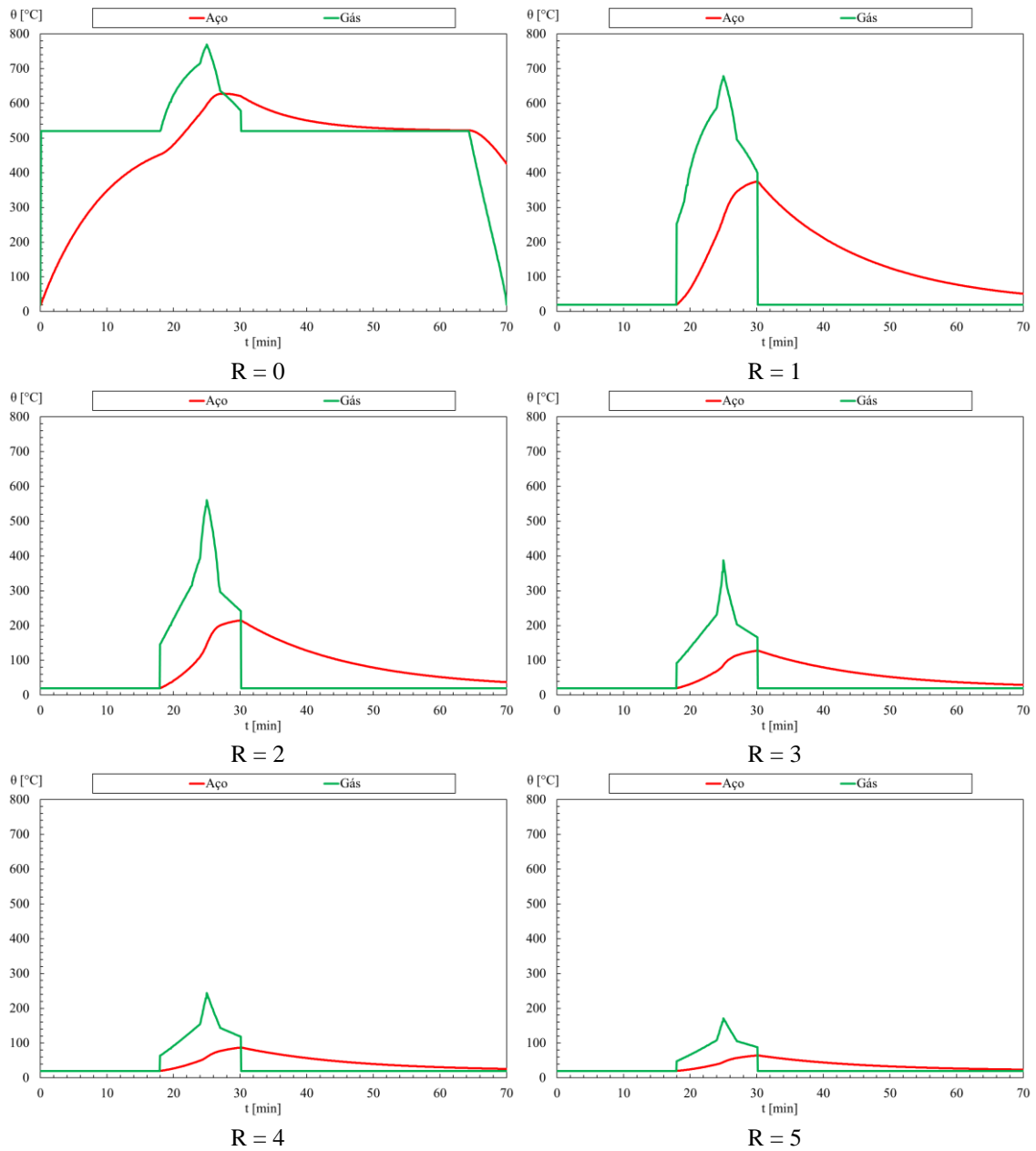


Figura 111 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 4.3- Perfil IPE600

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE600, considerando a classe 4/5 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 112 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 113 para o compartimento de incêndio 2.

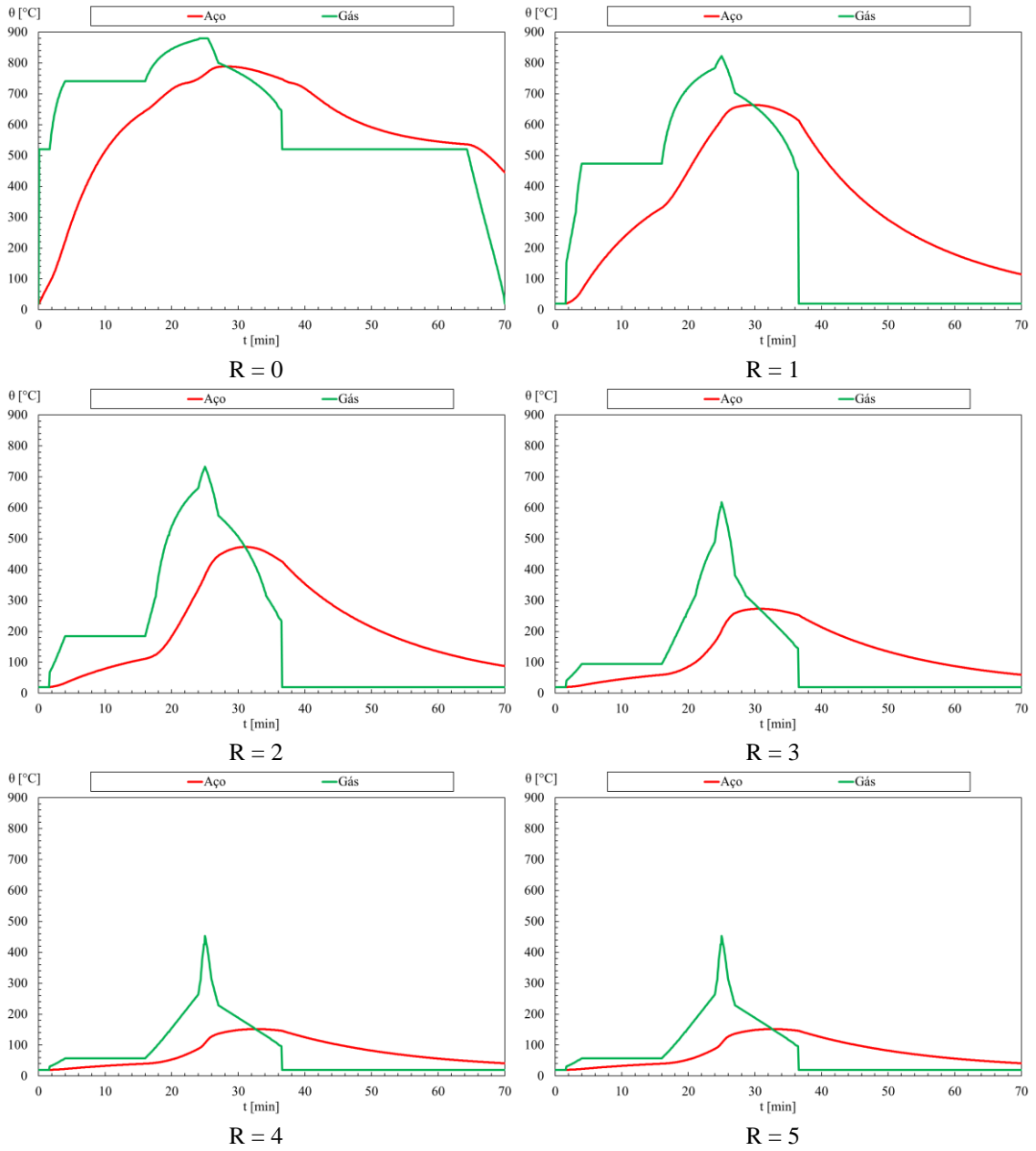


Figura 112 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

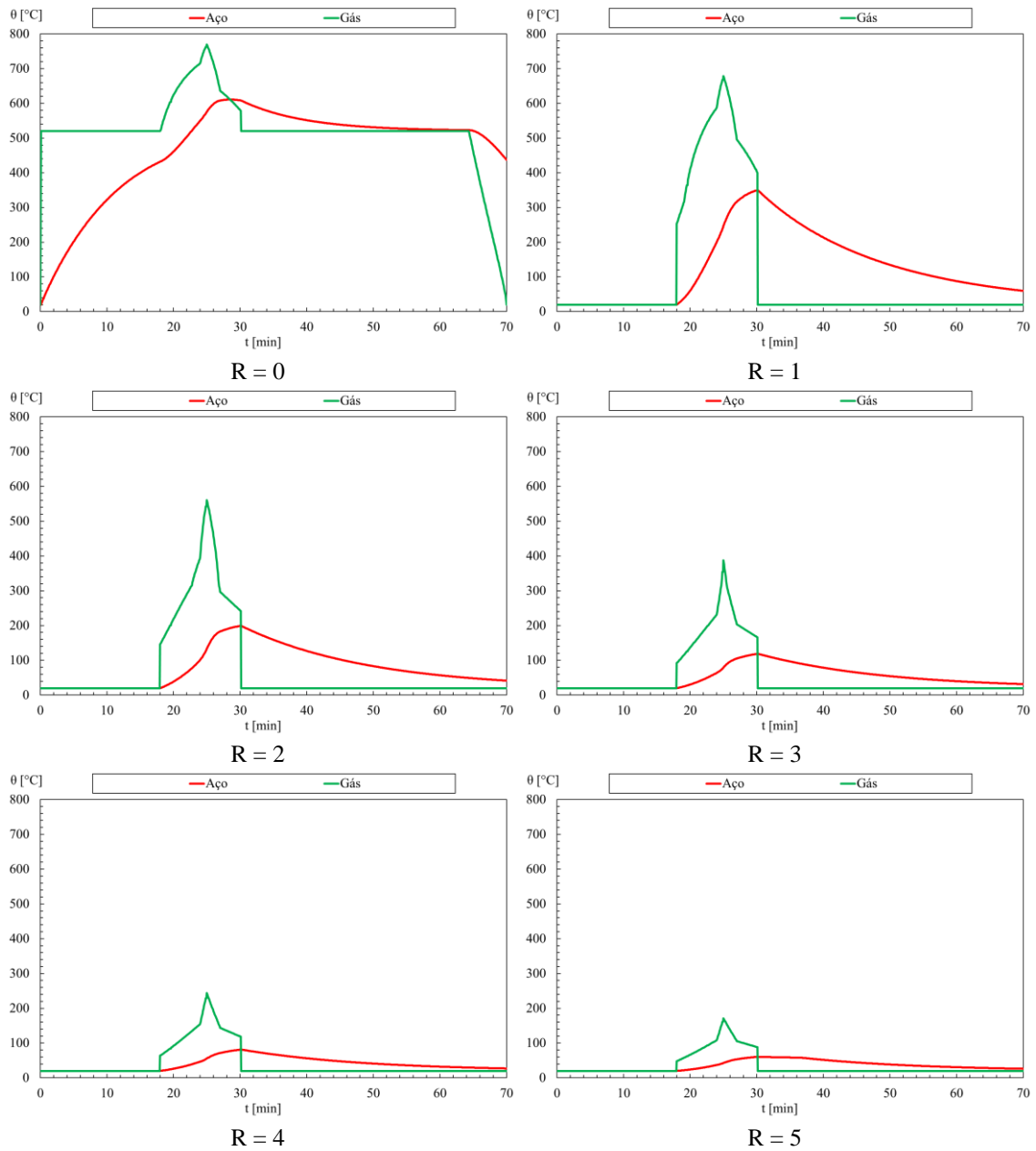


Figura 113 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

#### 4.4- Perfil HE600A

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE600A, considerando a classe 4/5 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 114 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 115 para o compartimento de incêndio 2.

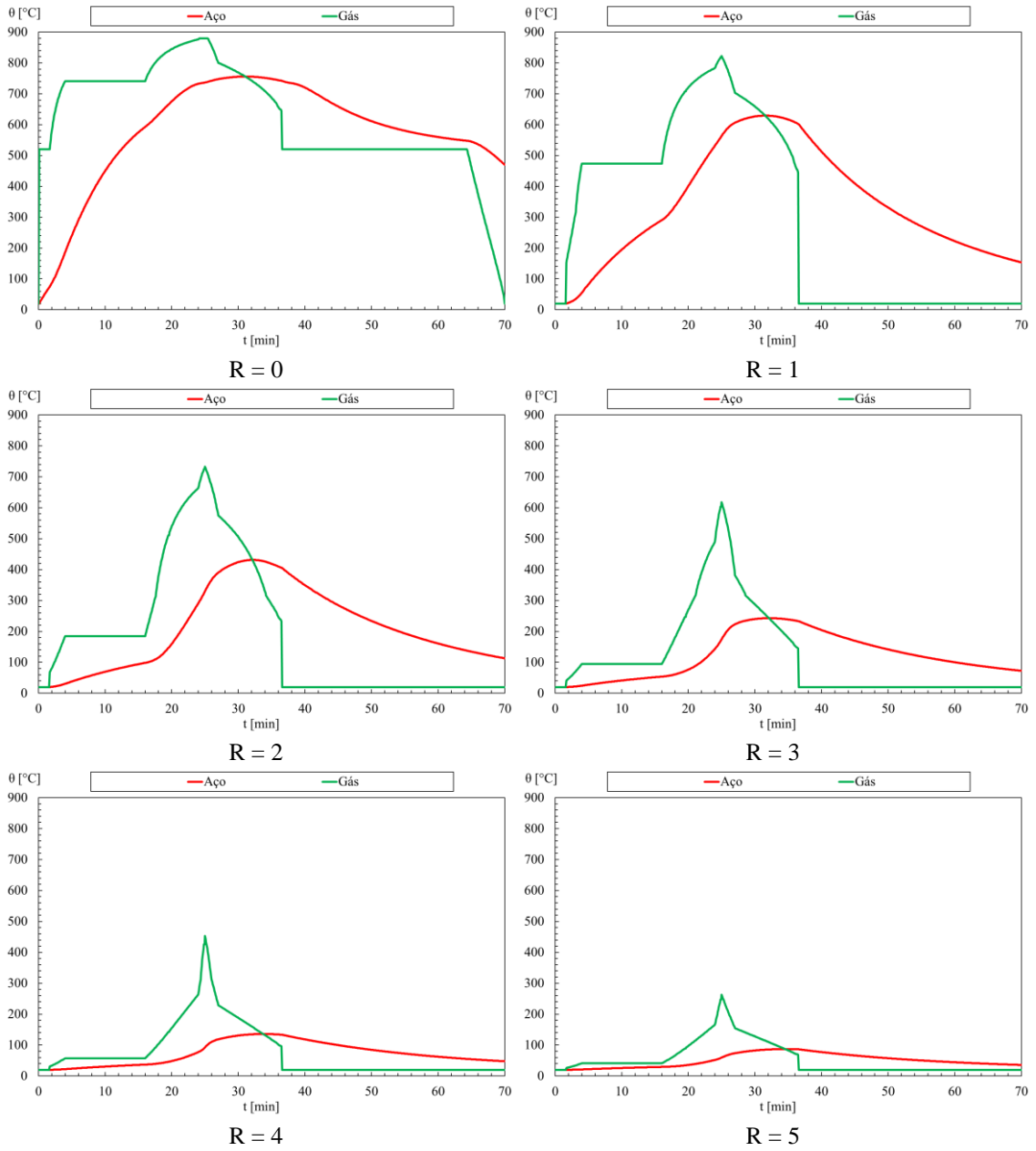


Figura 114 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

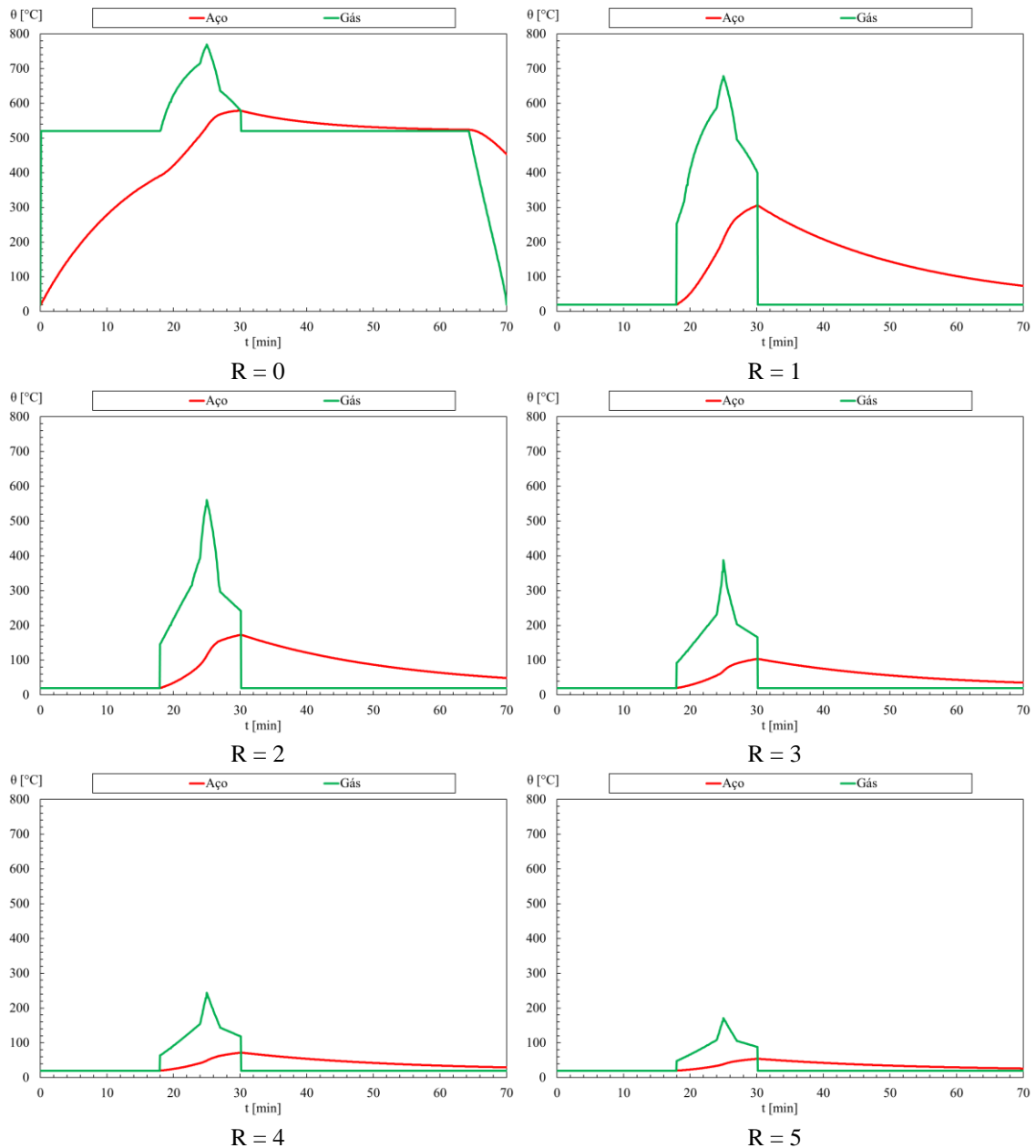


Figura 115 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

#### 4.5- Perfil HE650A

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE650A, considerando a classe 4/5 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 116 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 117 para o compartimento de incêndio 2.

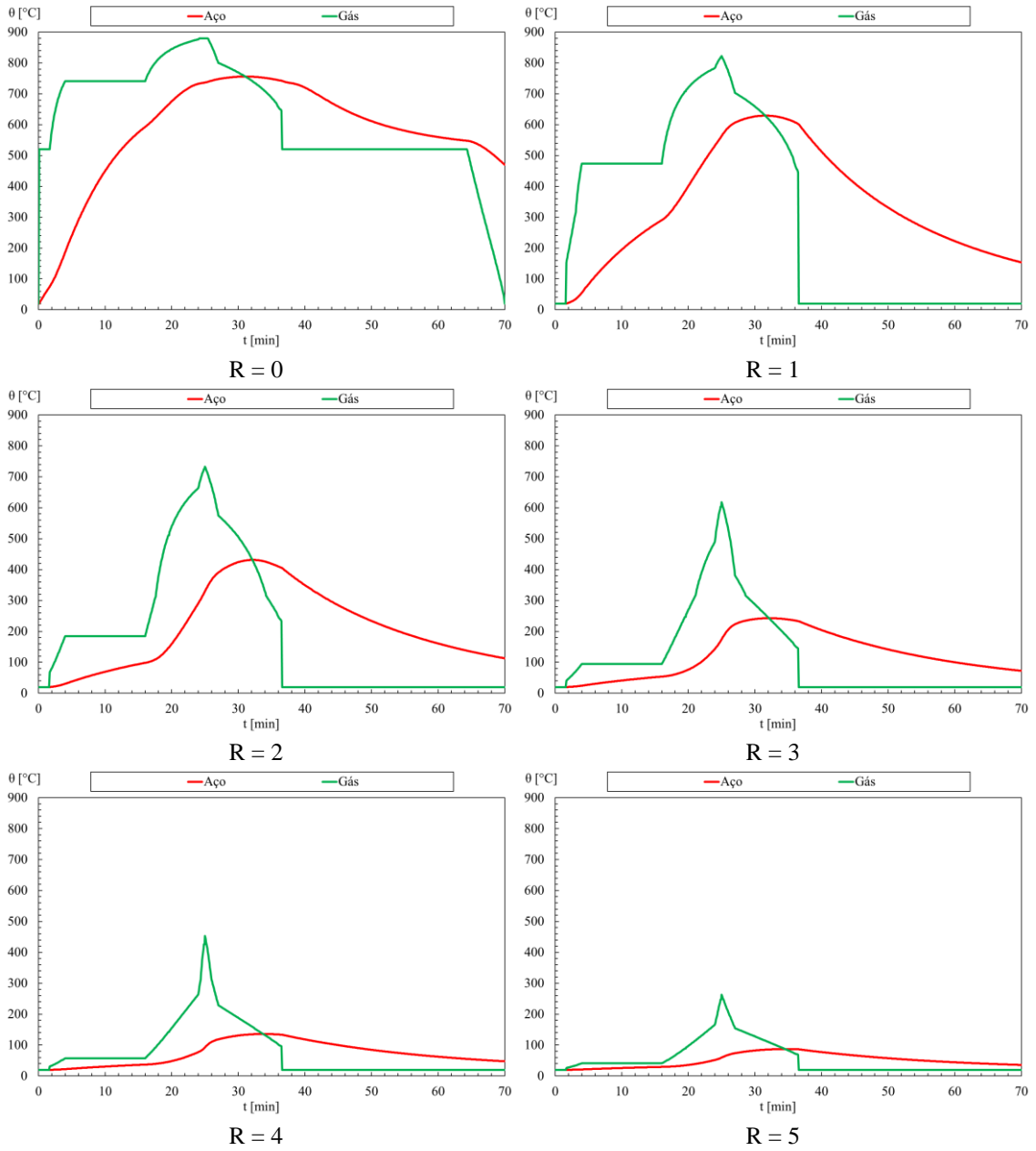


Figura 116 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

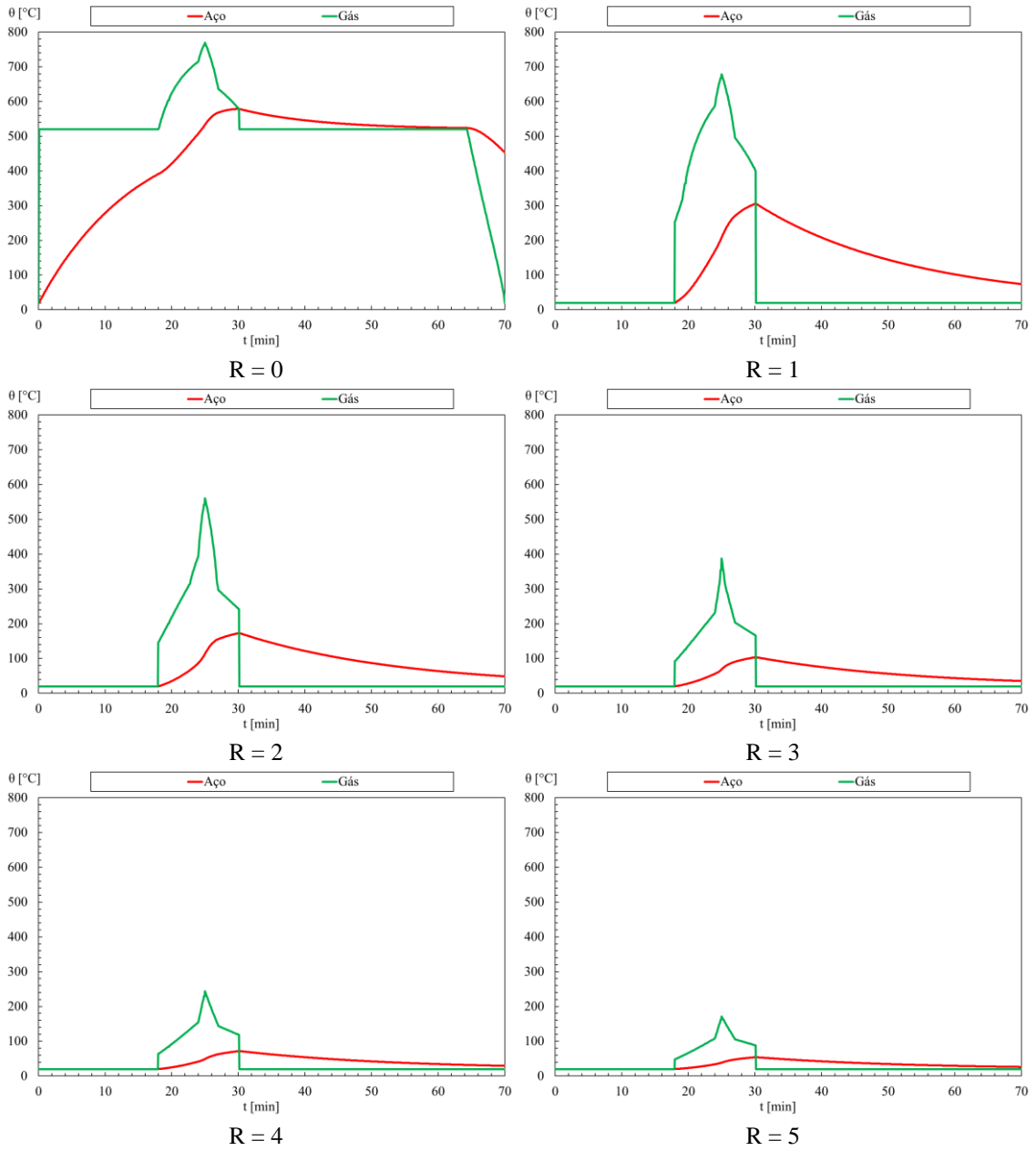


Figura 117 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

## ANEXO B: RESULTADOS PARA O PROGRAMA ELEFIR-EN

### 1- Veículo Classe 1

#### 1.1- Perfil IPE450

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE450, considerando a classe 1 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 118 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 119 para o compartimento 2.

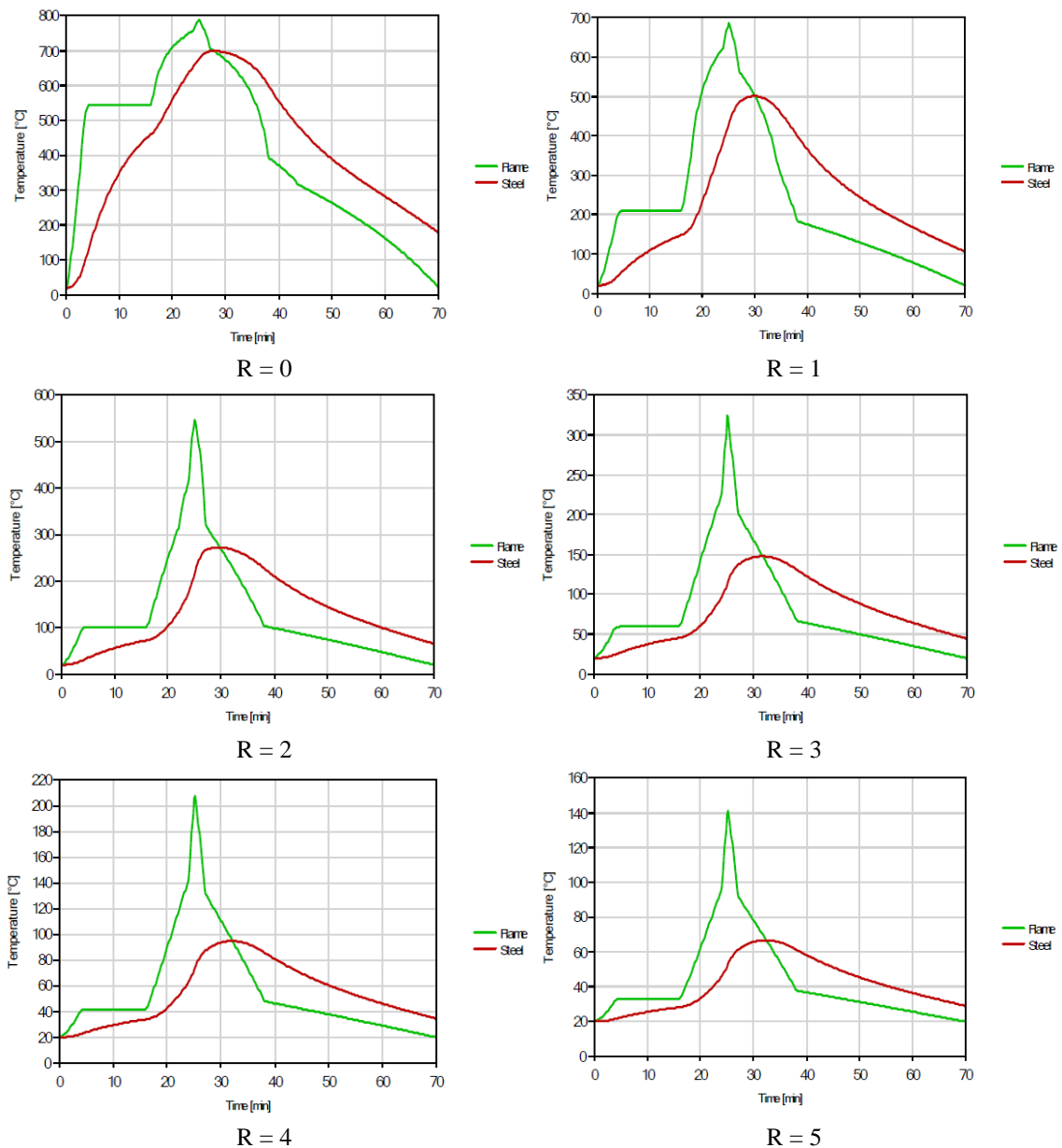


Figura 118 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

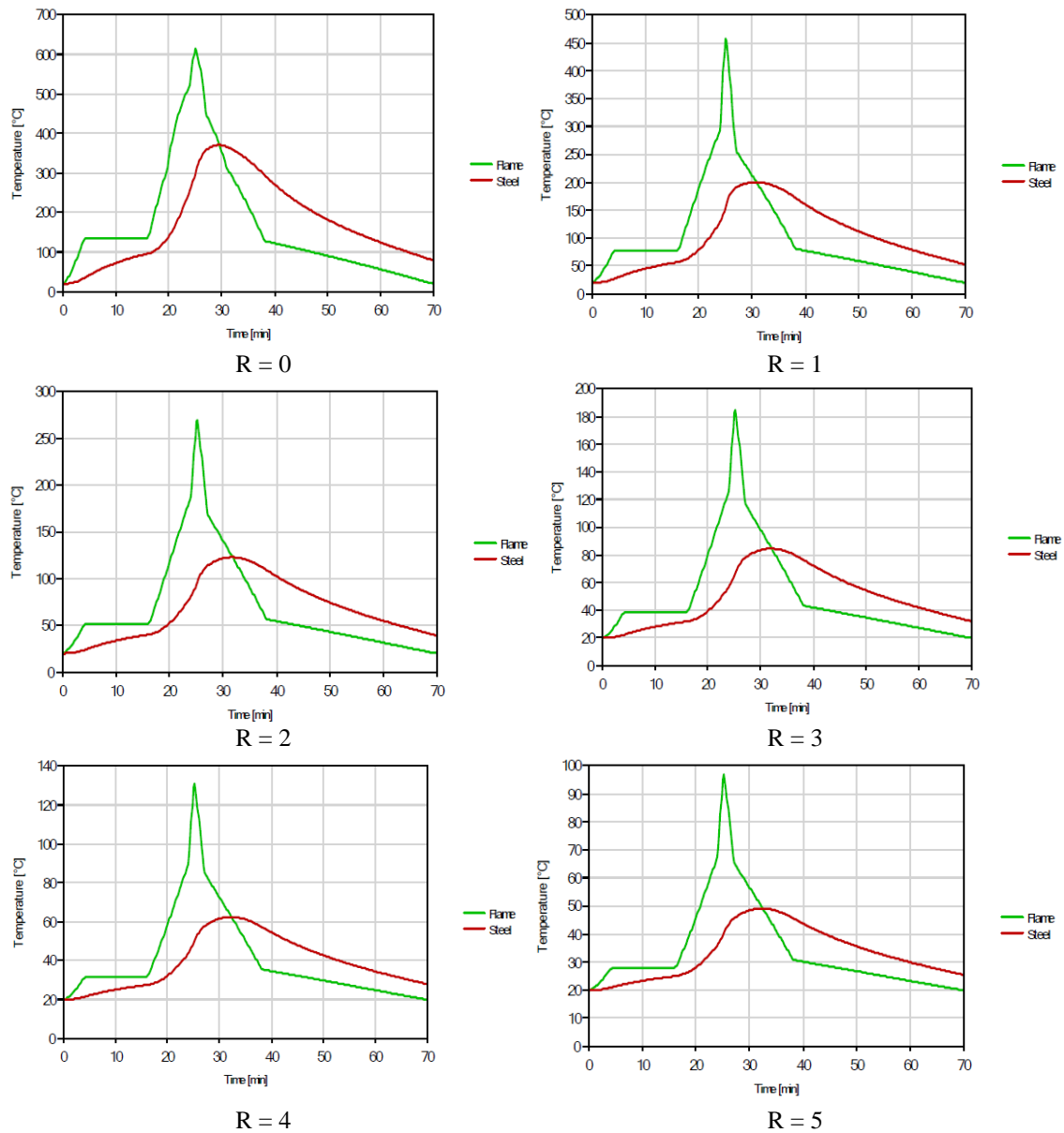
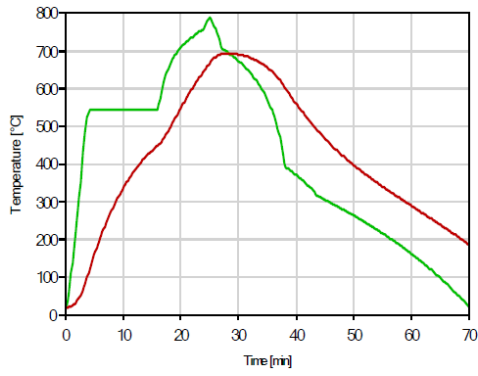


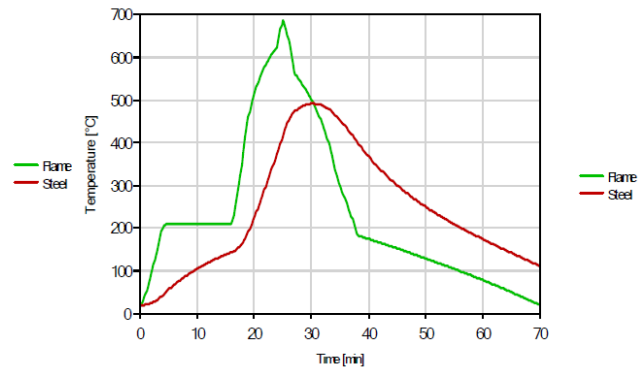
Figura 119 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

## 1.2- Perfil IPE500

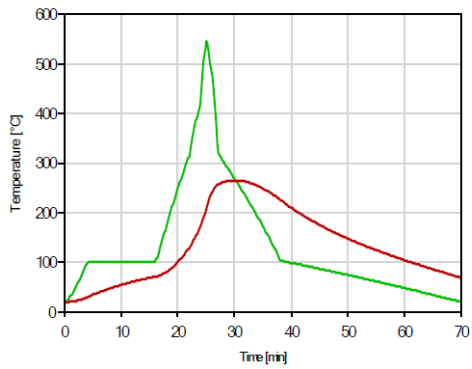
Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE500, considerando a classe 1 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 120 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 121 para o compartimento 2.



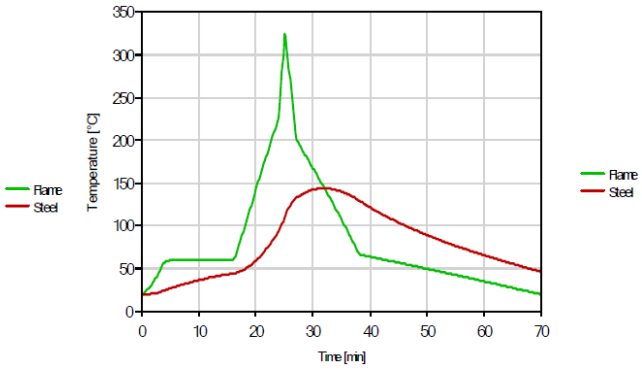
R = 0



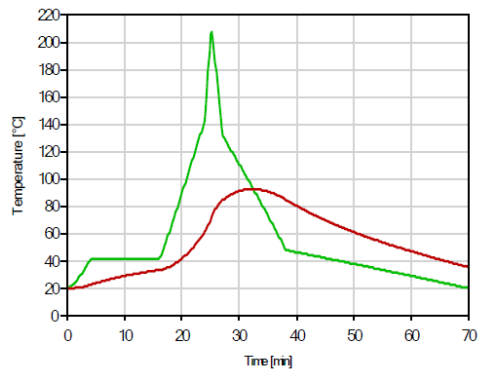
R = 1



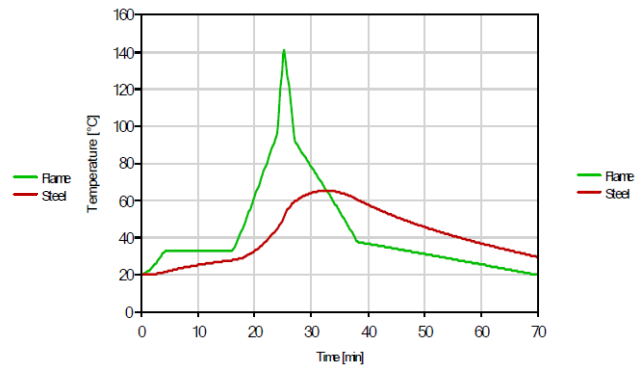
R = 2



R = 3



R = 4



R = 5

Figura 120 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

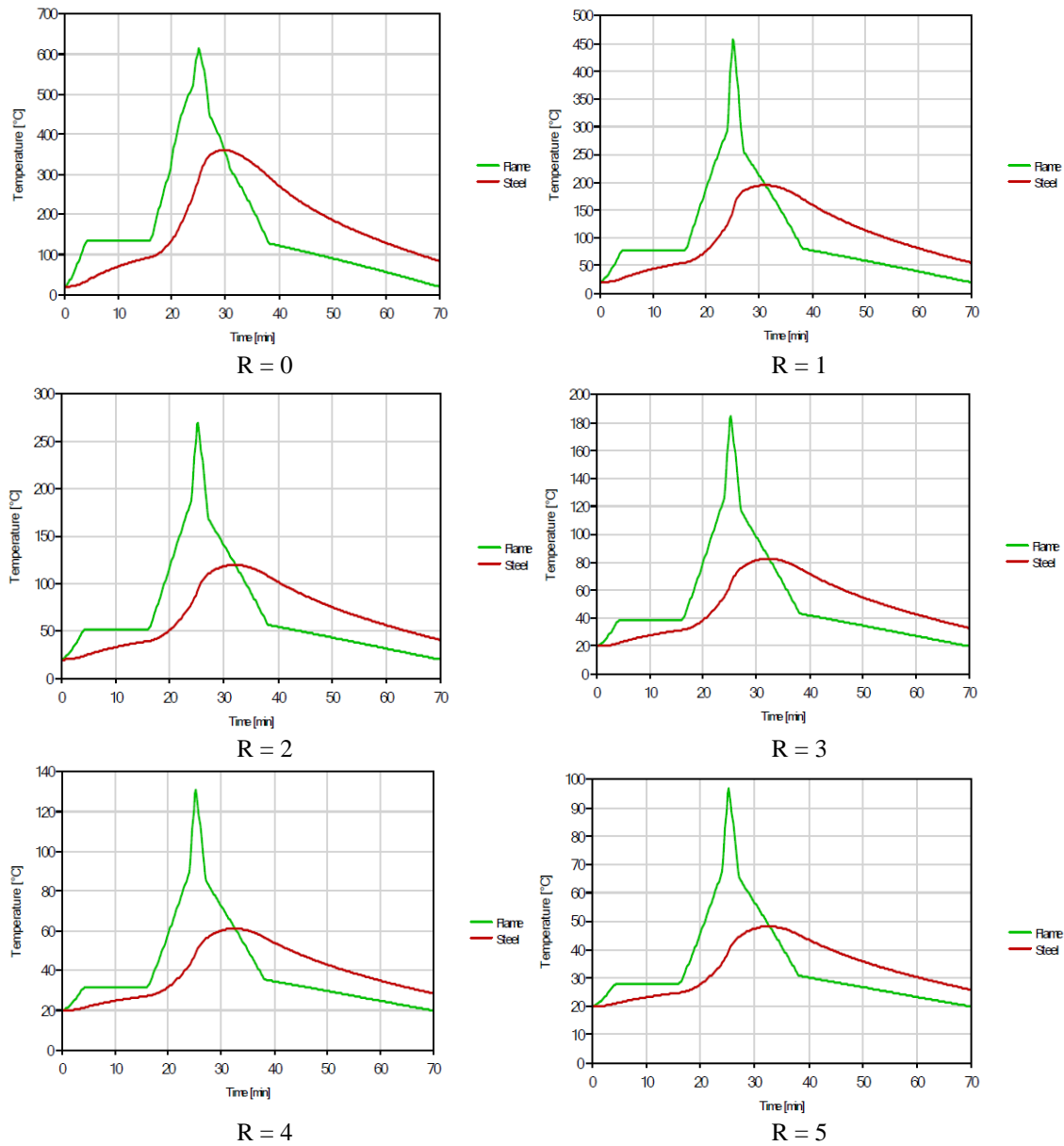
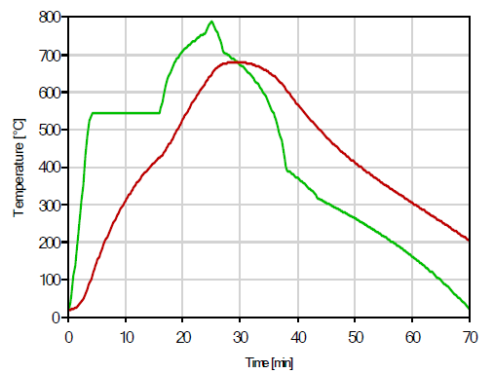


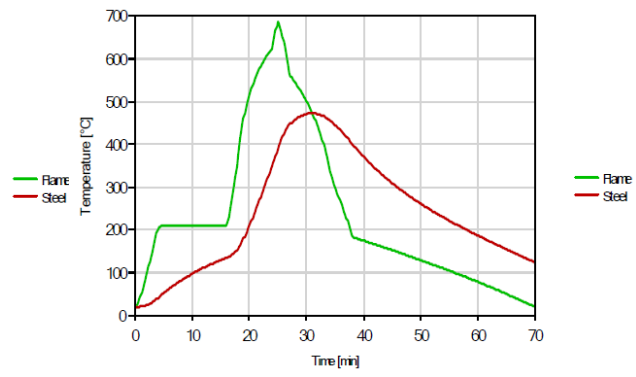
Figura 121 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 1.3- Perfil IPE600

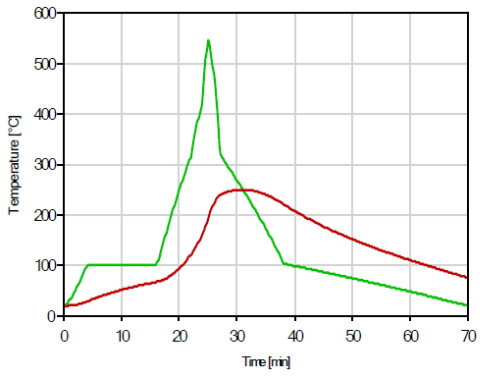
Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE600, considerando a classe 1 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 122 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 123 para o compartimento 2.



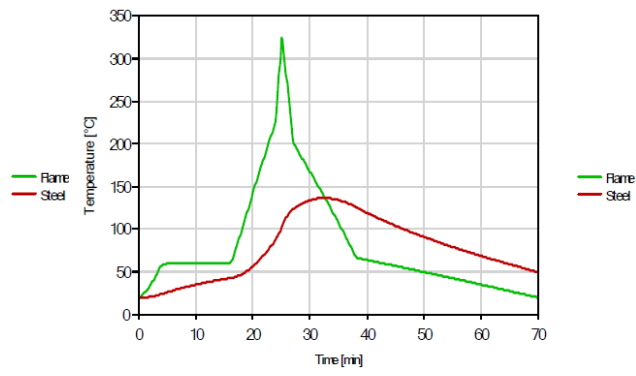
R = 0



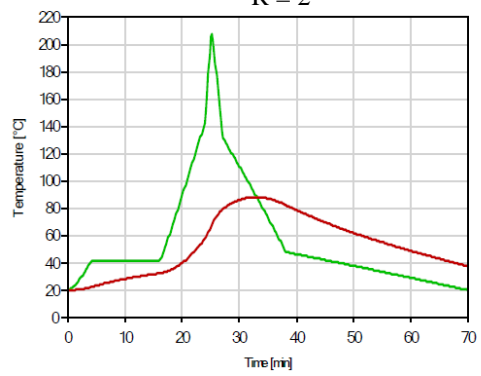
R = 1



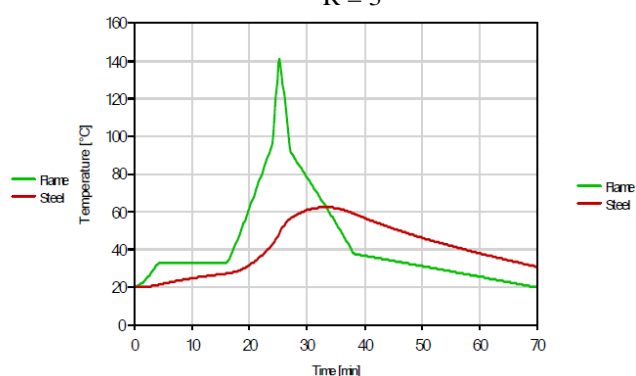
R = 2



R = 3



R = 4



R = 5

Figura 122 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

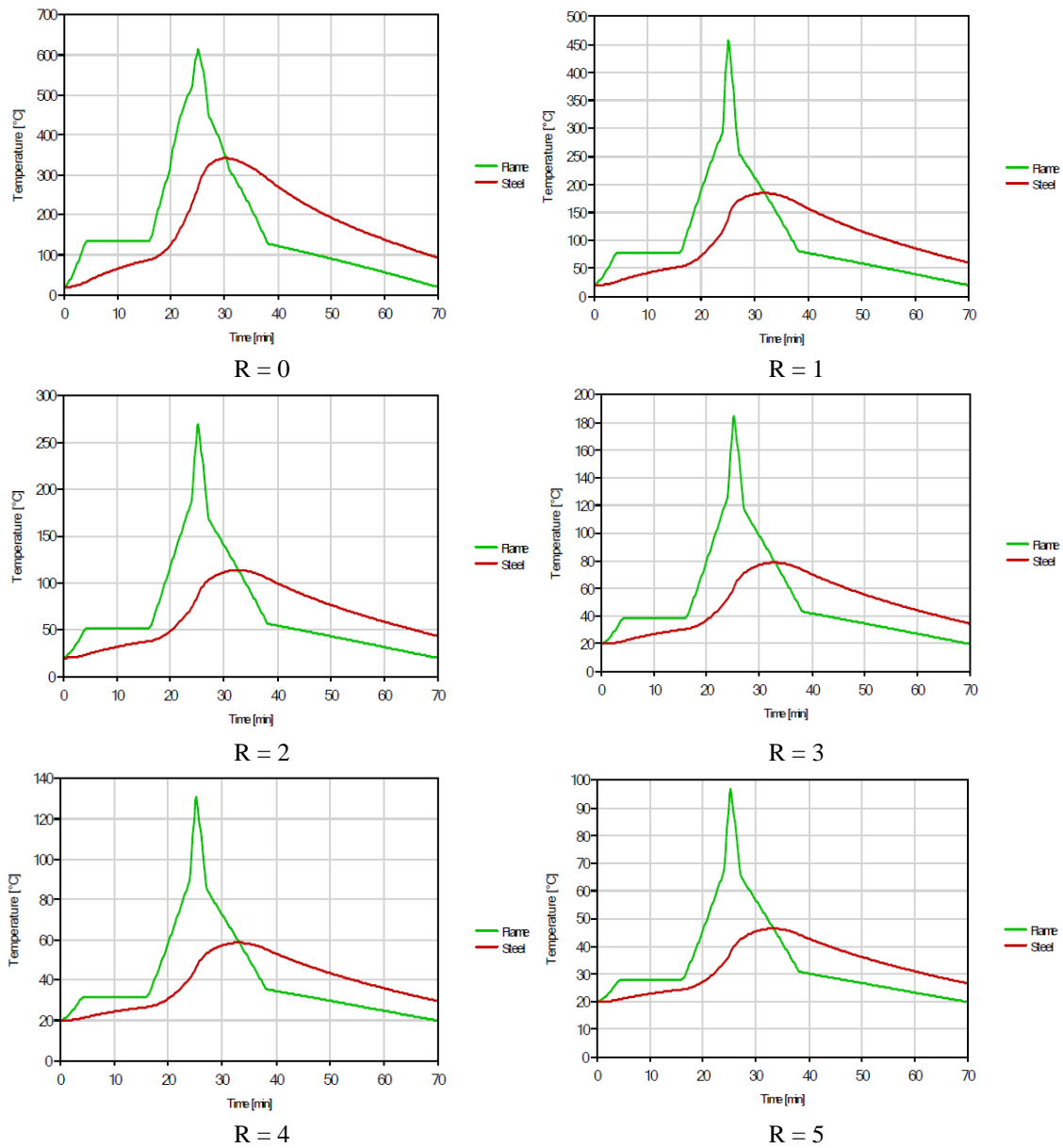
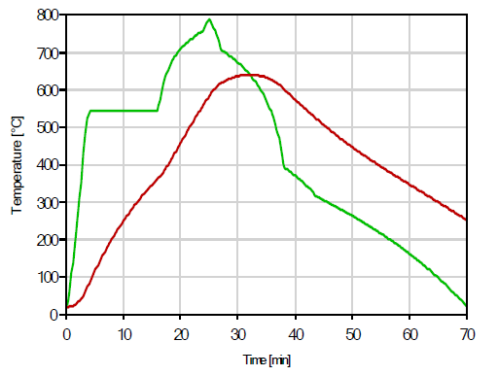


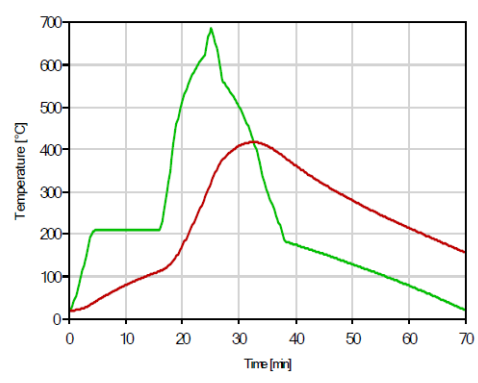
Figura 123 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

#### 1.4- Perfil HE600A

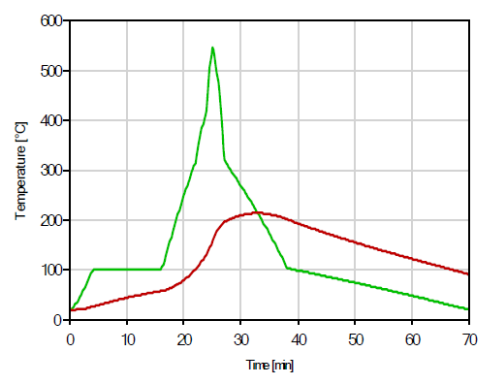
Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE600A, considerando a classe 1 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 124 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 125 para o compartimento 2.



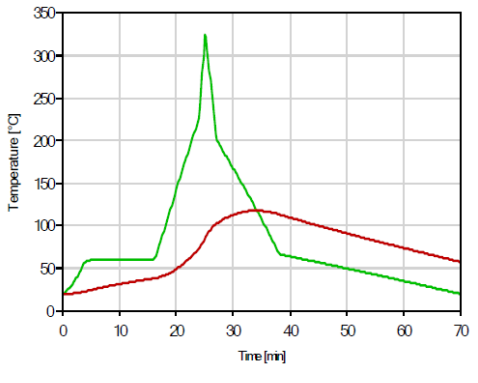
R = 0



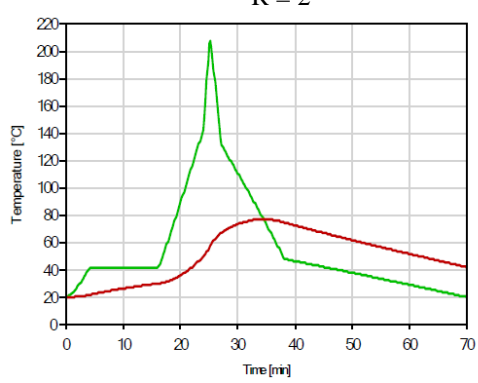
R = 1



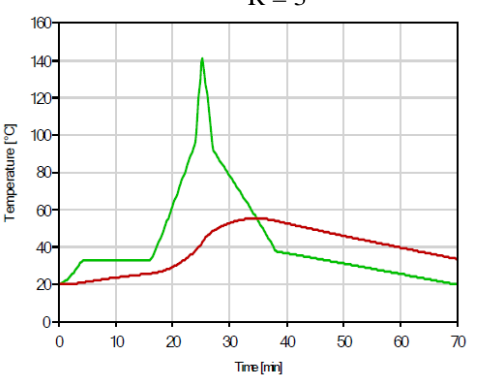
R = 2



R = 3



R = 4



R = 5

Figura 124 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

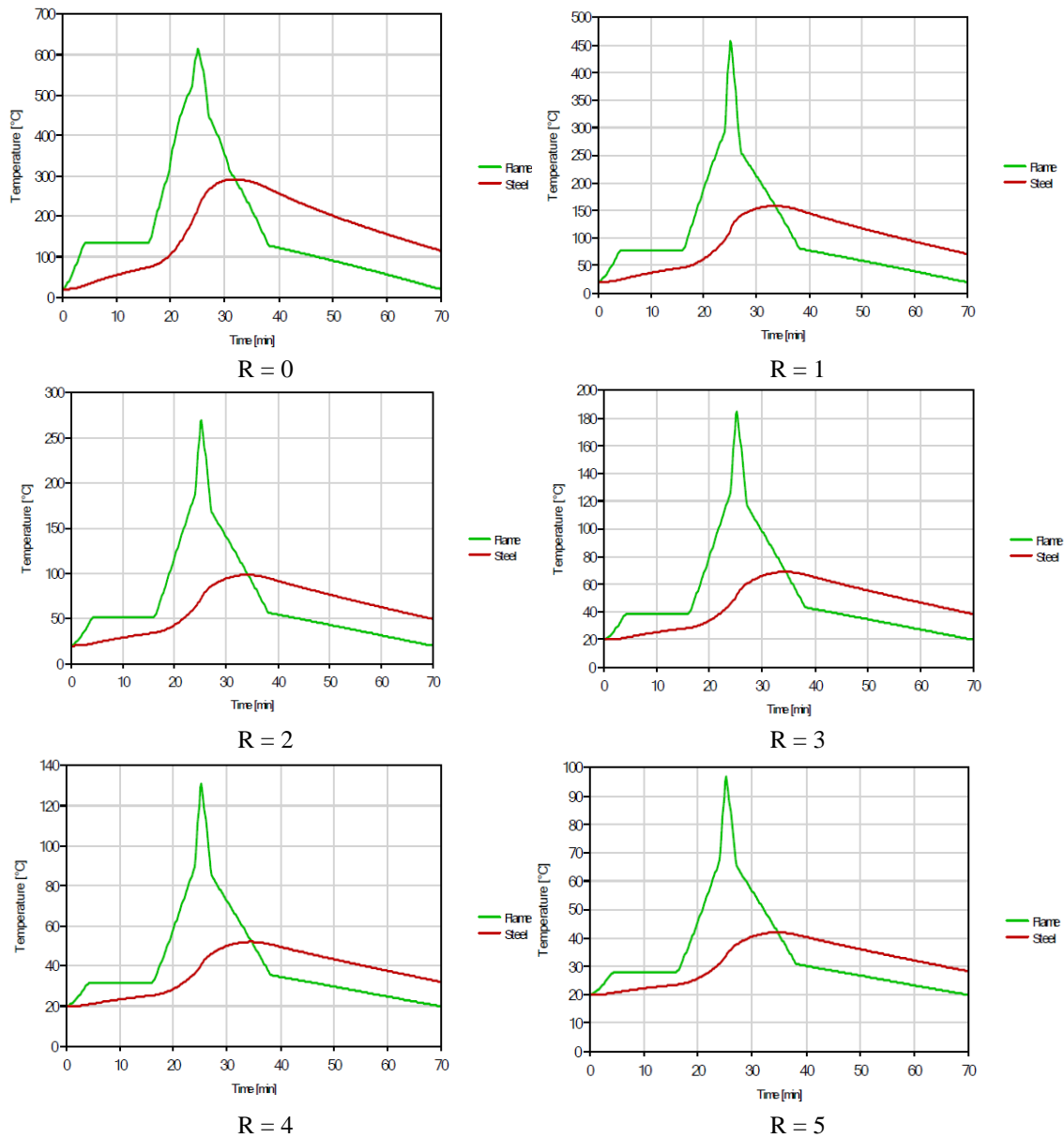
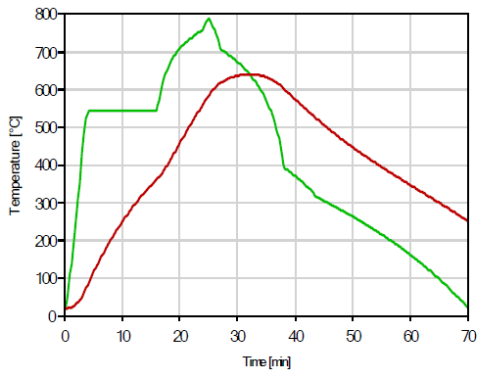


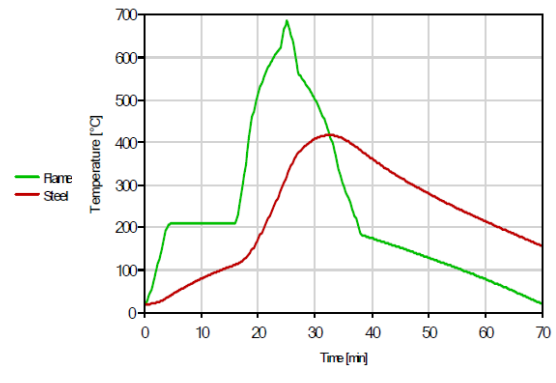
Figura 125 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 1.5- Perfil HE650A

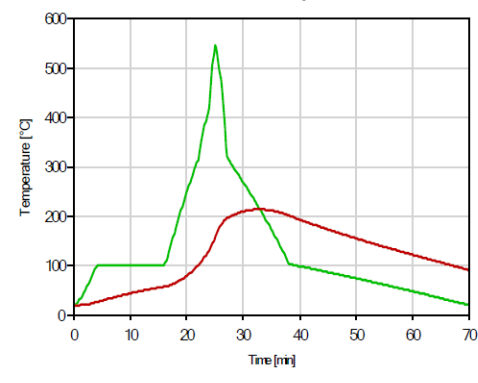
Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE650A, considerando a classe 1 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 126 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 127 para o compartimento 2.



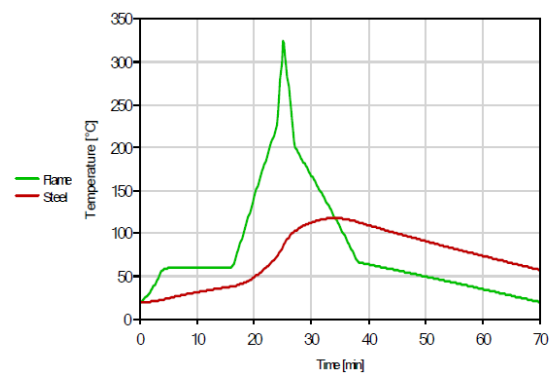
R = 0



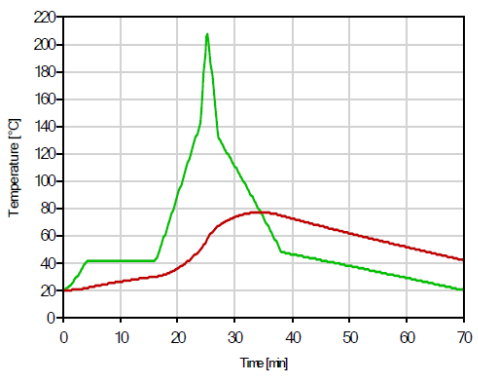
R = 1



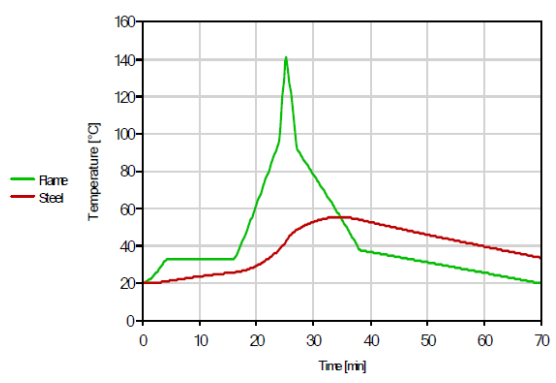
R = 2



R = 3

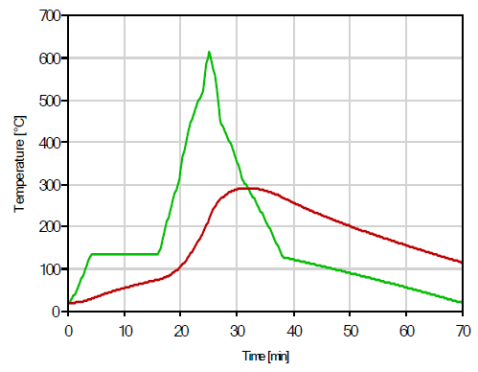


R = 4

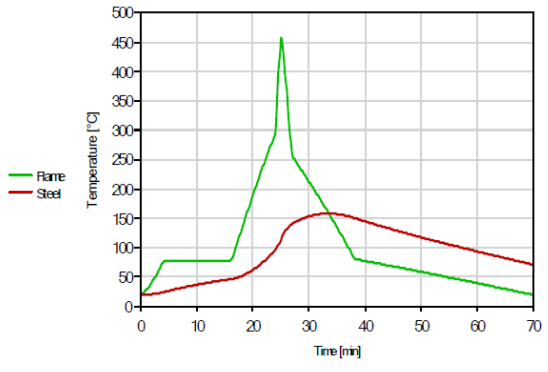


R = 5

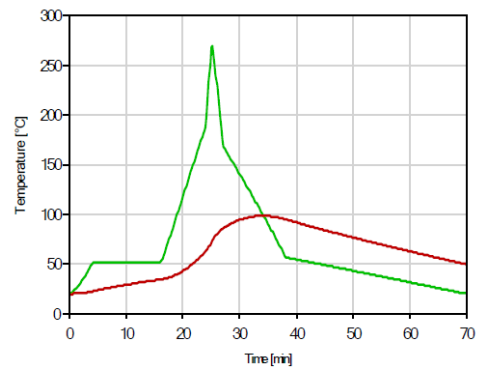
Figura 126 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.



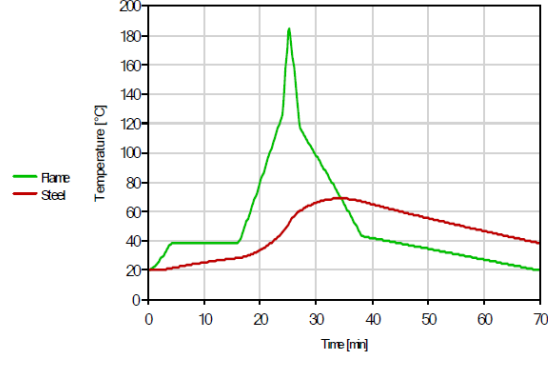
R = 0



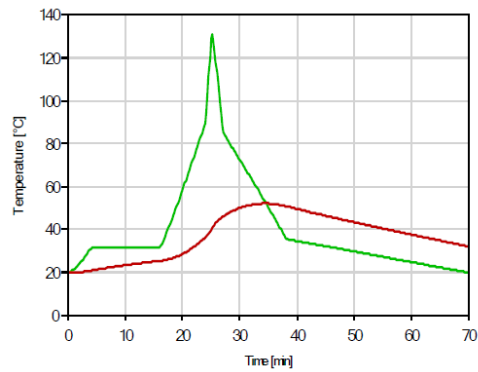
R = 1



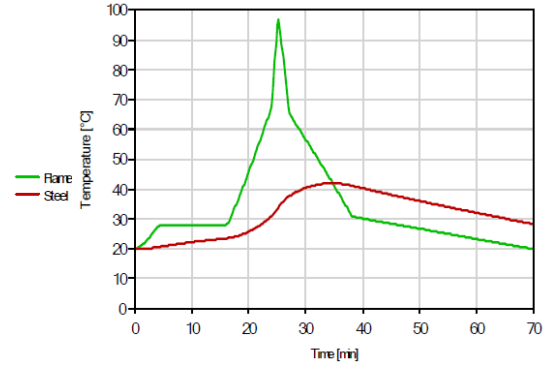
R = 2



R = 3



R = 4



R = 5

Figura 127 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

## 2- Veículo Classe 2

### 2.1- Perfil IPE450

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE450, considerando a classe 2 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 128 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 129 para o compartimento 2.

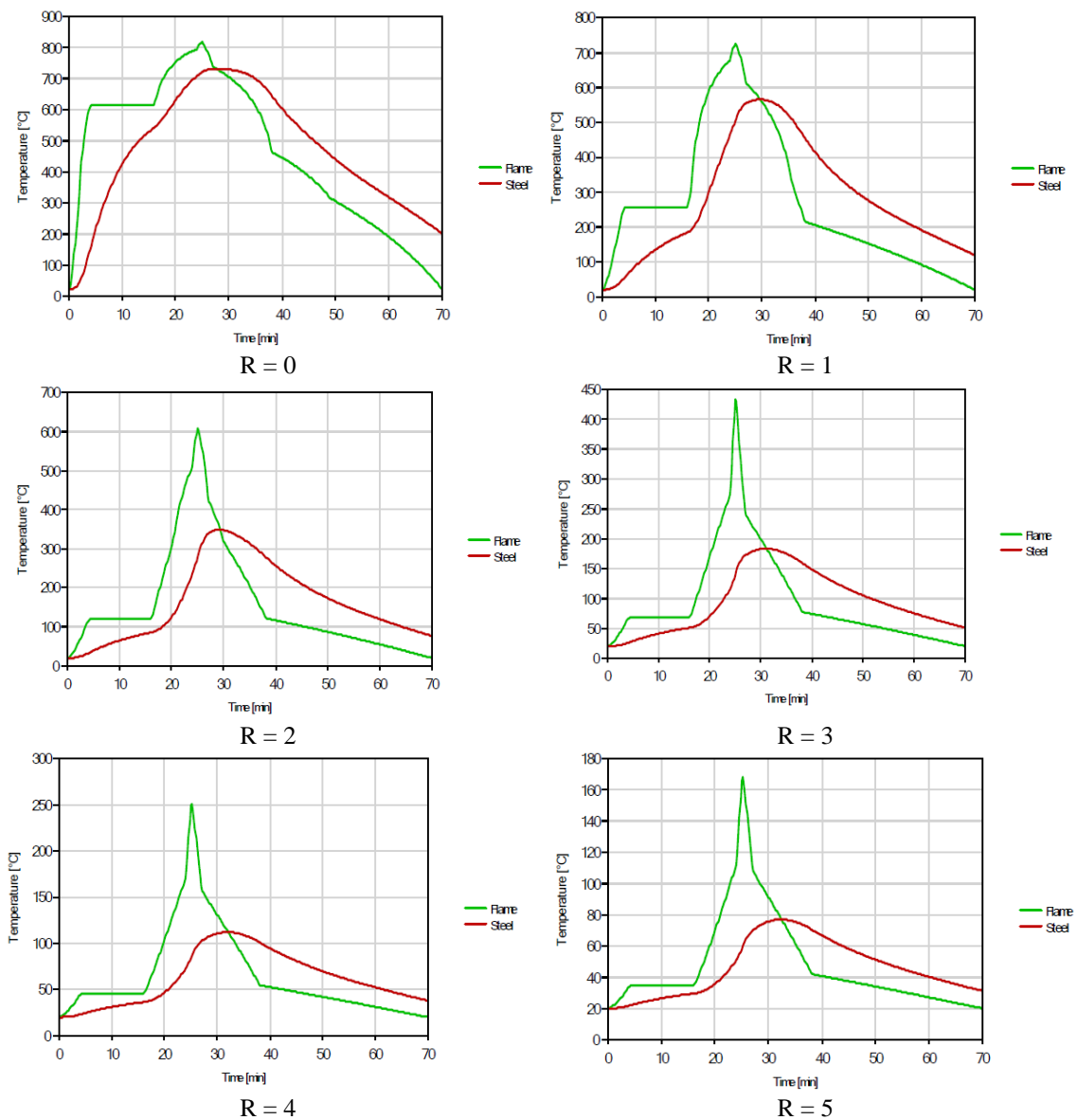


Figura 128 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

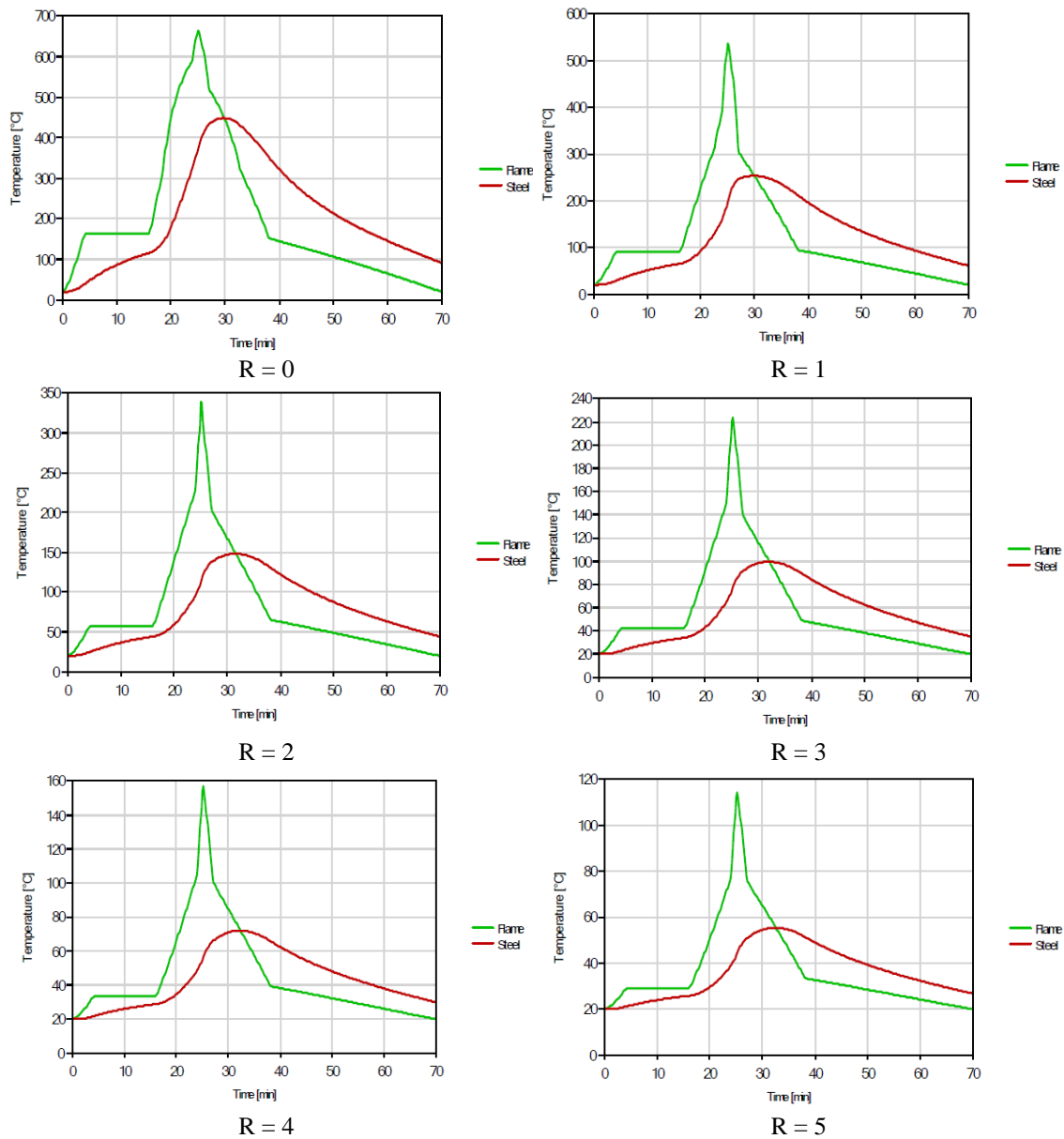
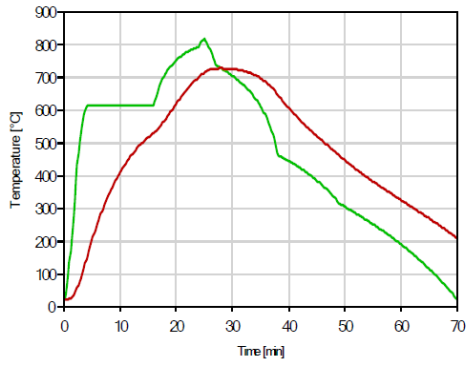


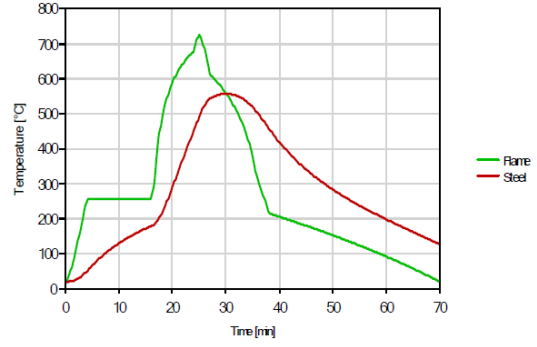
Figura 129 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

## 2.2- Perfil IPE500

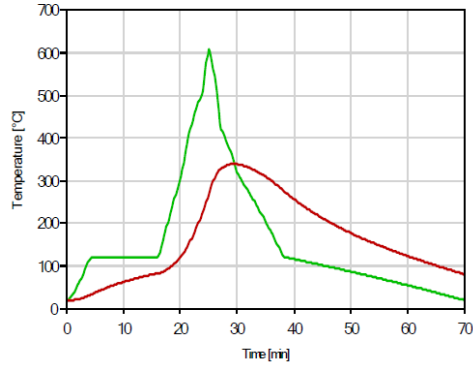
Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE500, considerando a classe 2 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 120 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 121 para o compartimento 2.



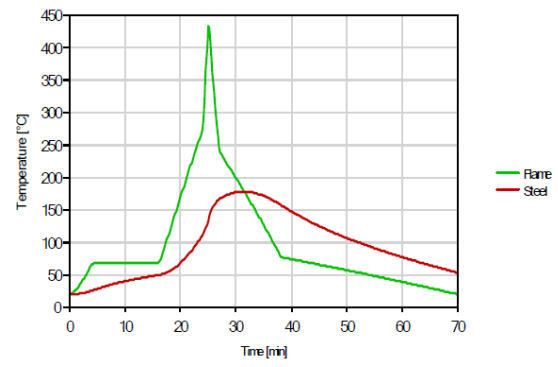
R = 0



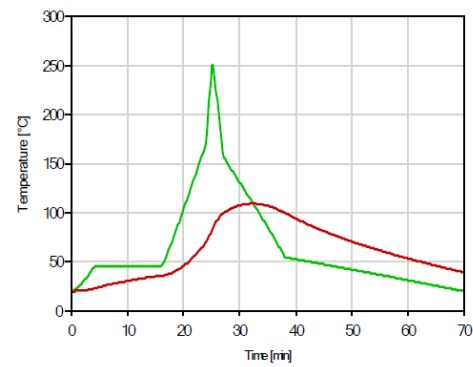
R = 1



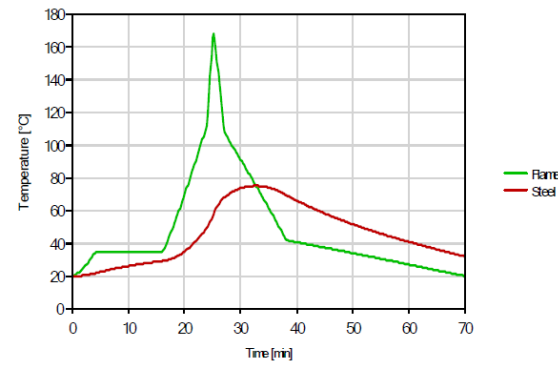
R = 2



R = 3



R = 4



R = 5

Figura 130 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

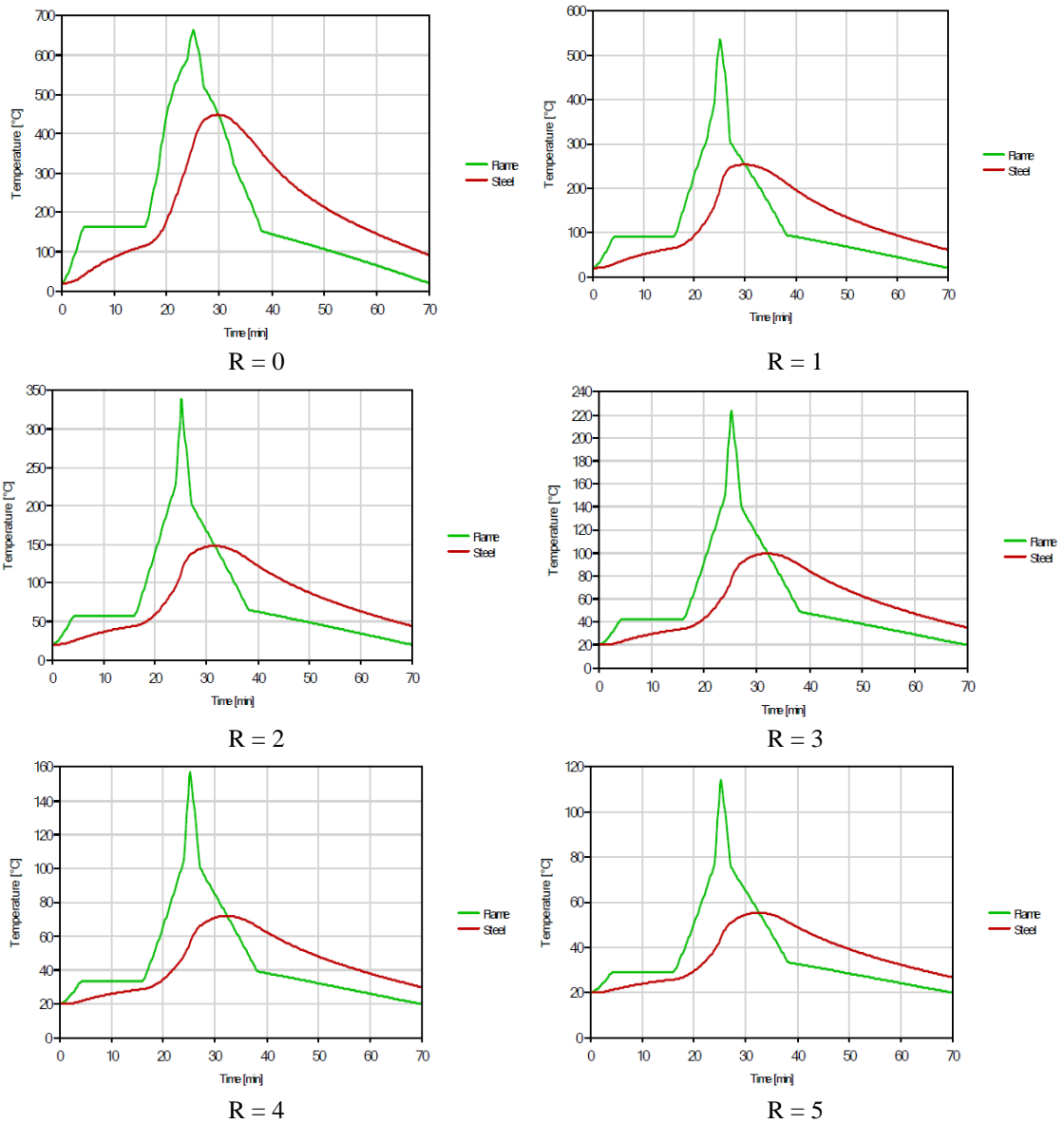
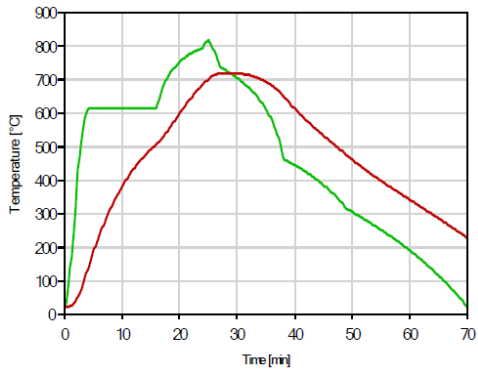


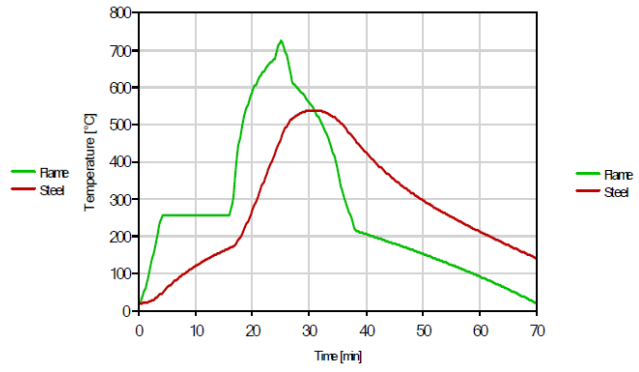
Figura 131 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 2.3- Perfil IPE600

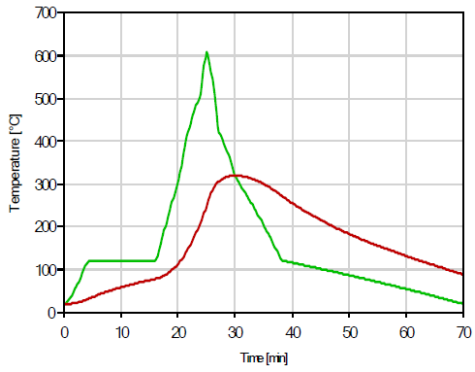
Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE600, considerando a classe 2 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 132 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 133 para o compartimento 2.



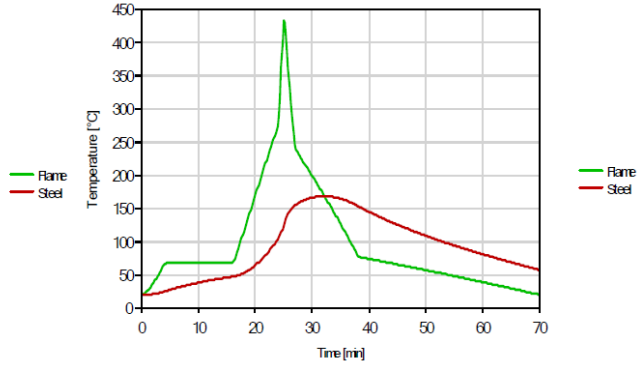
R = 0



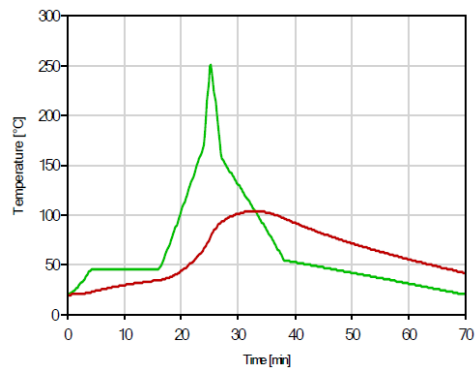
R = 1



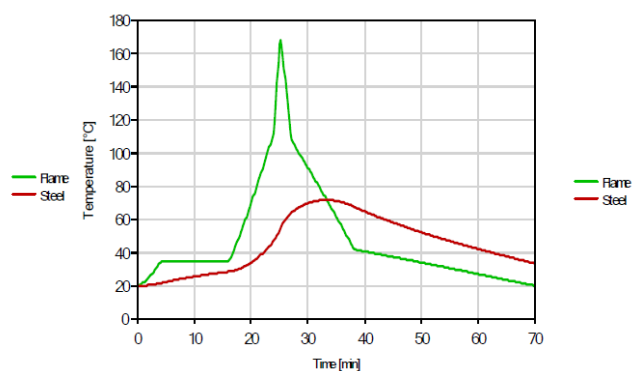
R = 2



R = 3



R = 4



R = 5

Figura 132 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

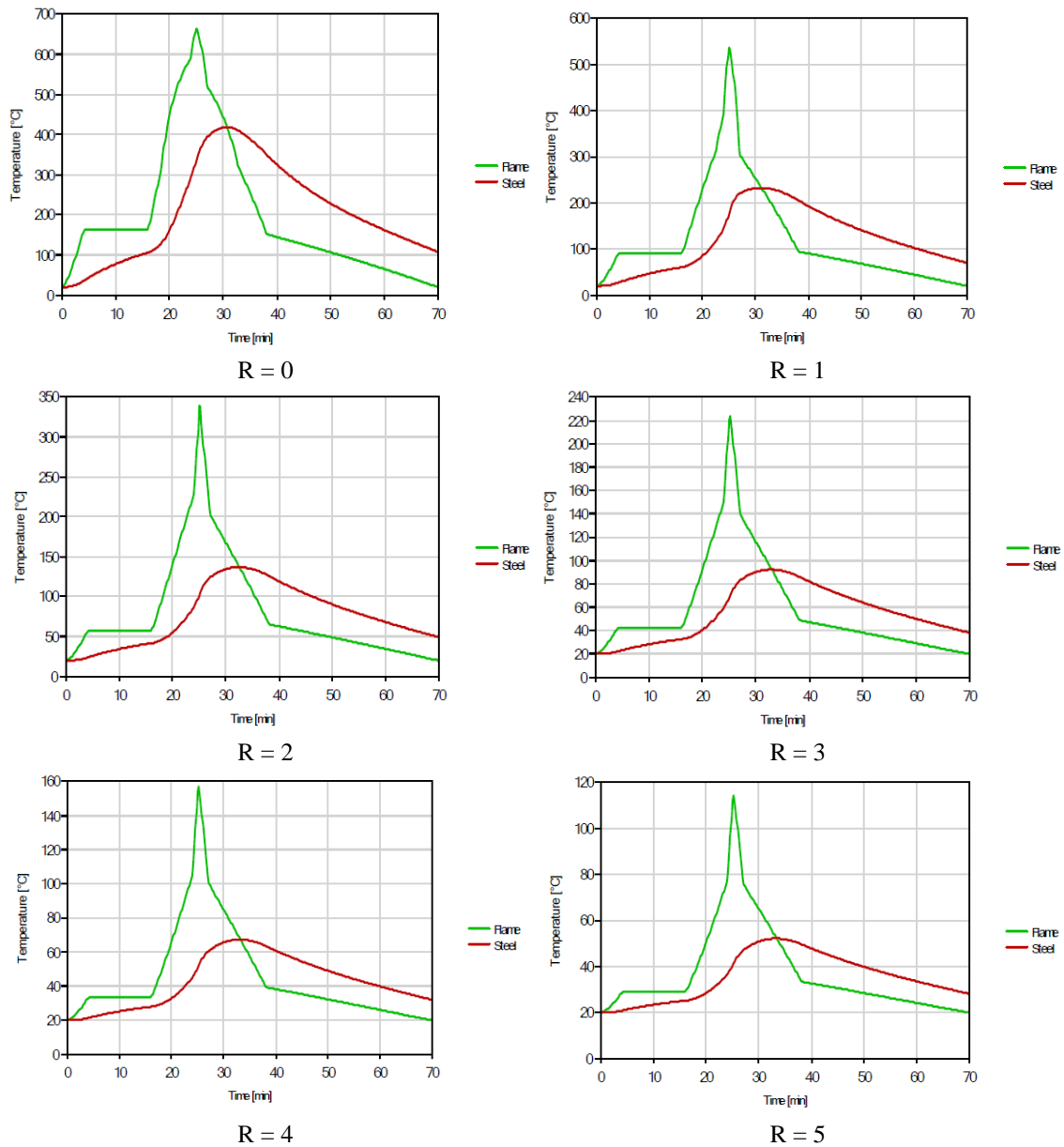
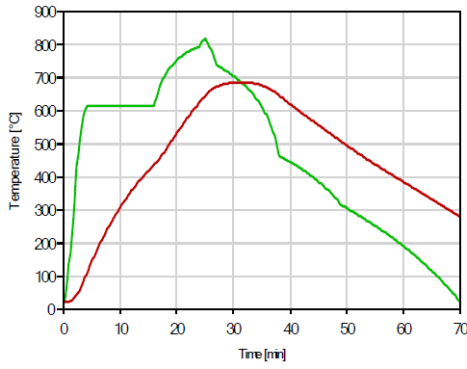


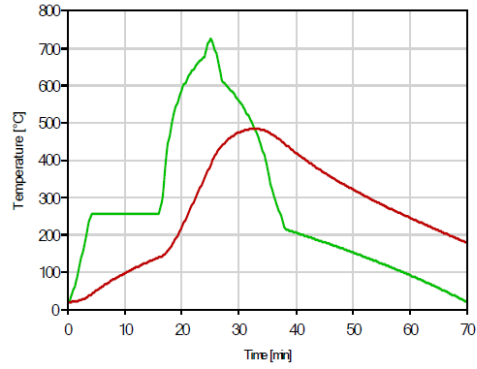
Figura 133 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

## 2.4- Perfil HE600A

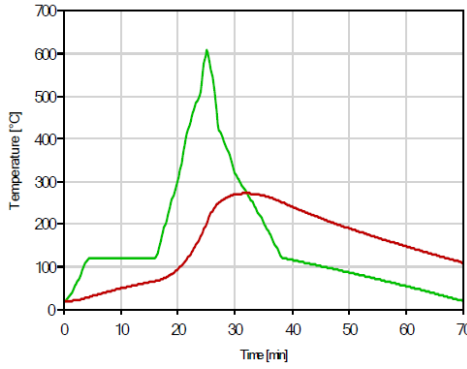
Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE600A, considerando a classe 2 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 134 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 135 para o compartimento 2.



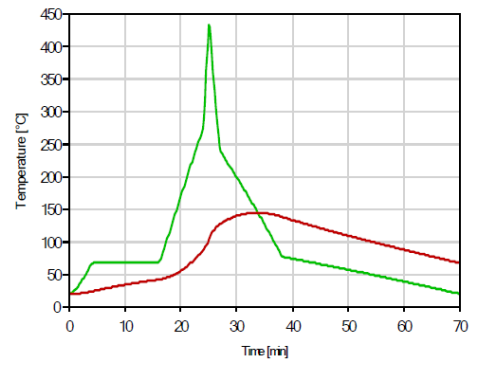
R = 0



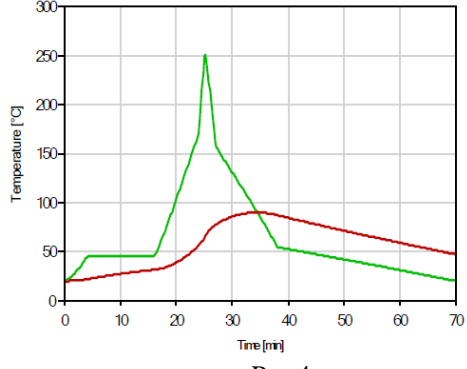
R = 1



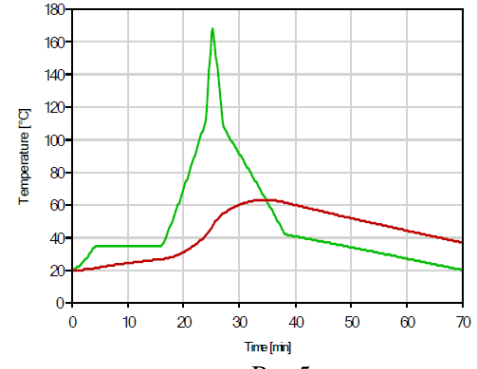
R = 2



R = 3



R = 4



R = 5

Figura 134 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

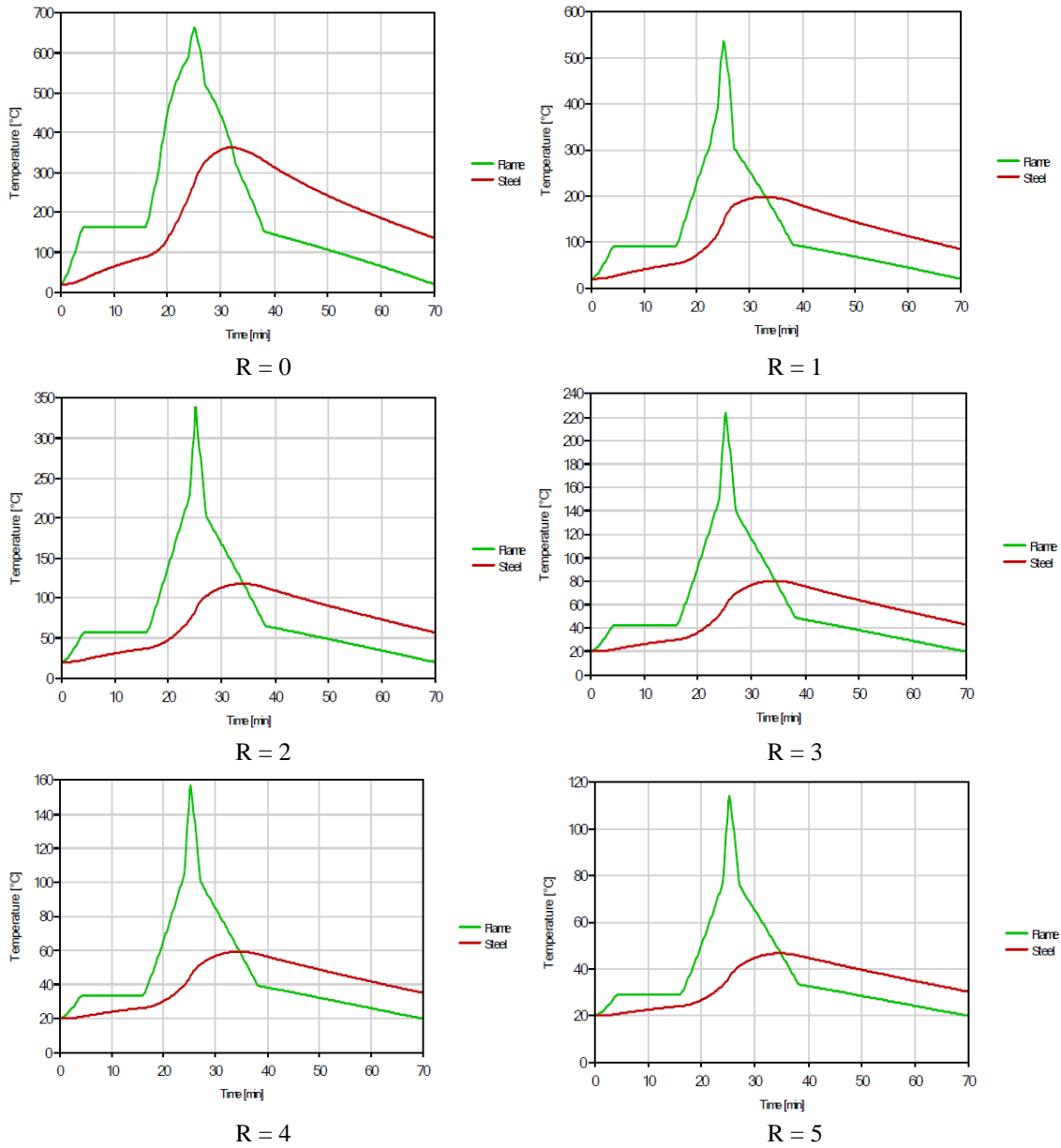
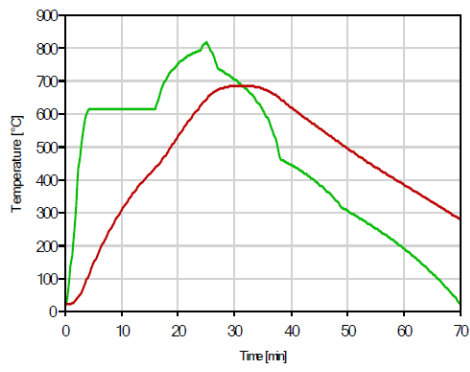


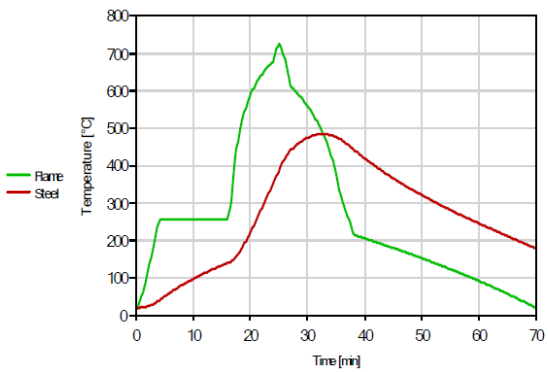
Figura 135 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

## 2.5- Perfil HE650A

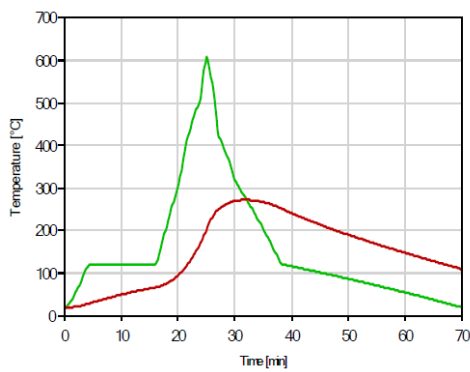
Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE650A, considerando a classe 2 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 136 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 137 para o compartimento 2.



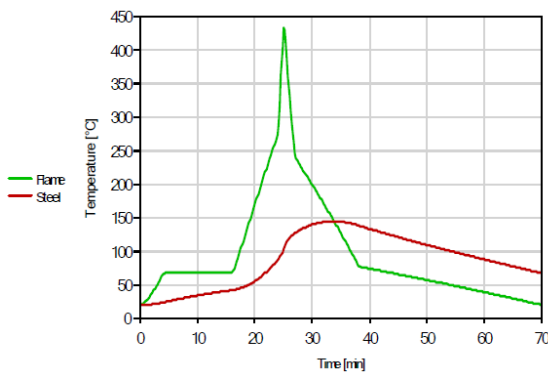
R = 0



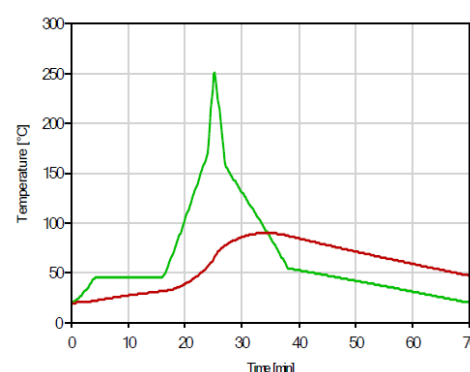
R = 1



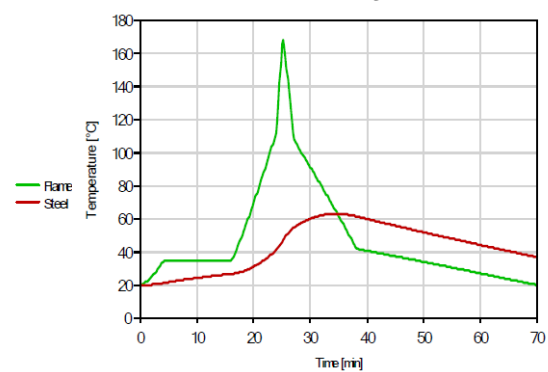
R = 2



R = 3



R = 4



R = 5

Figura 136 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

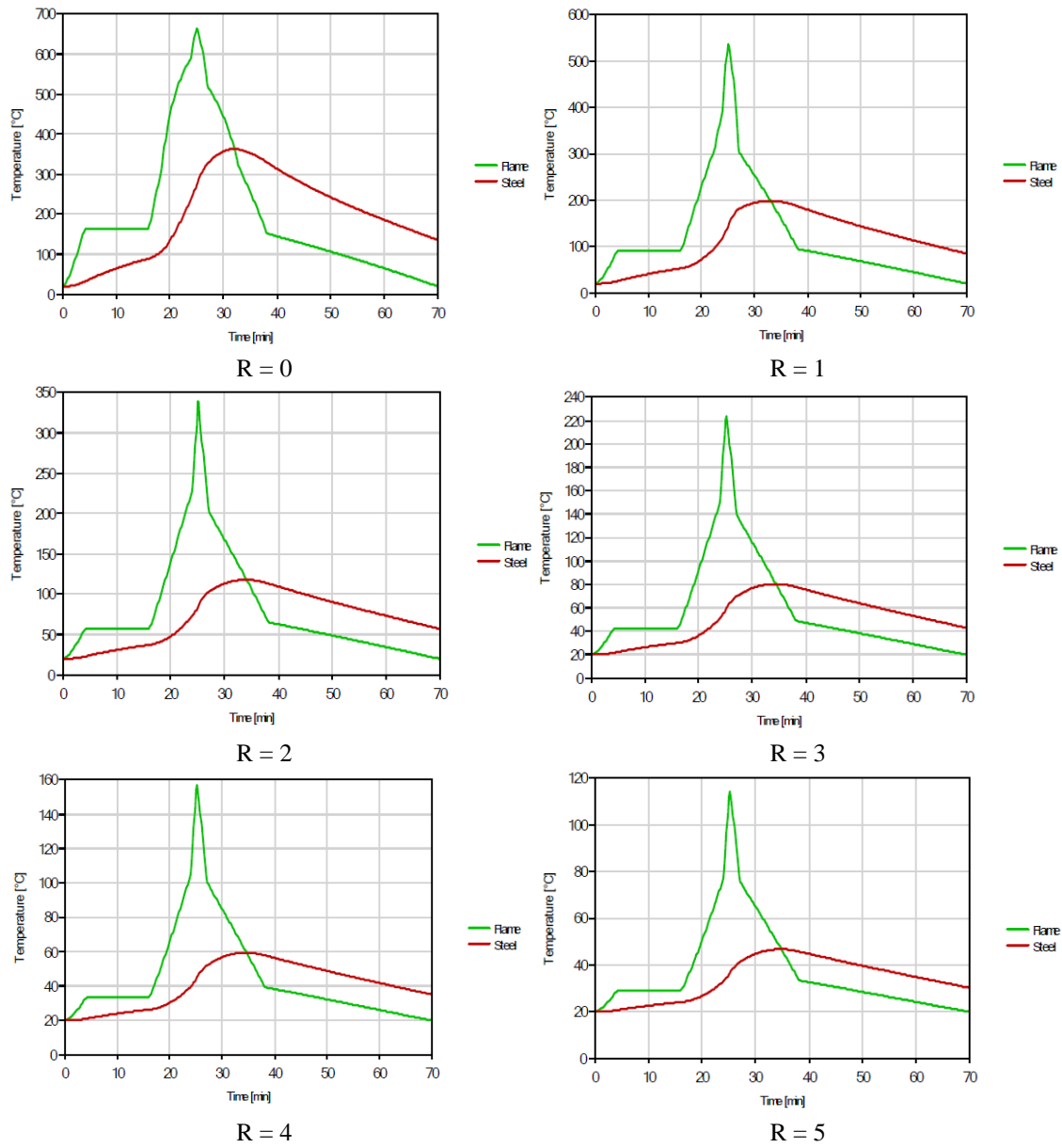


Figura 137 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 3- Veículo Classe 3

#### 3.1- Perfil IPE450

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE450, considerando a classe 3 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 138 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 139 para o compartimento 2.

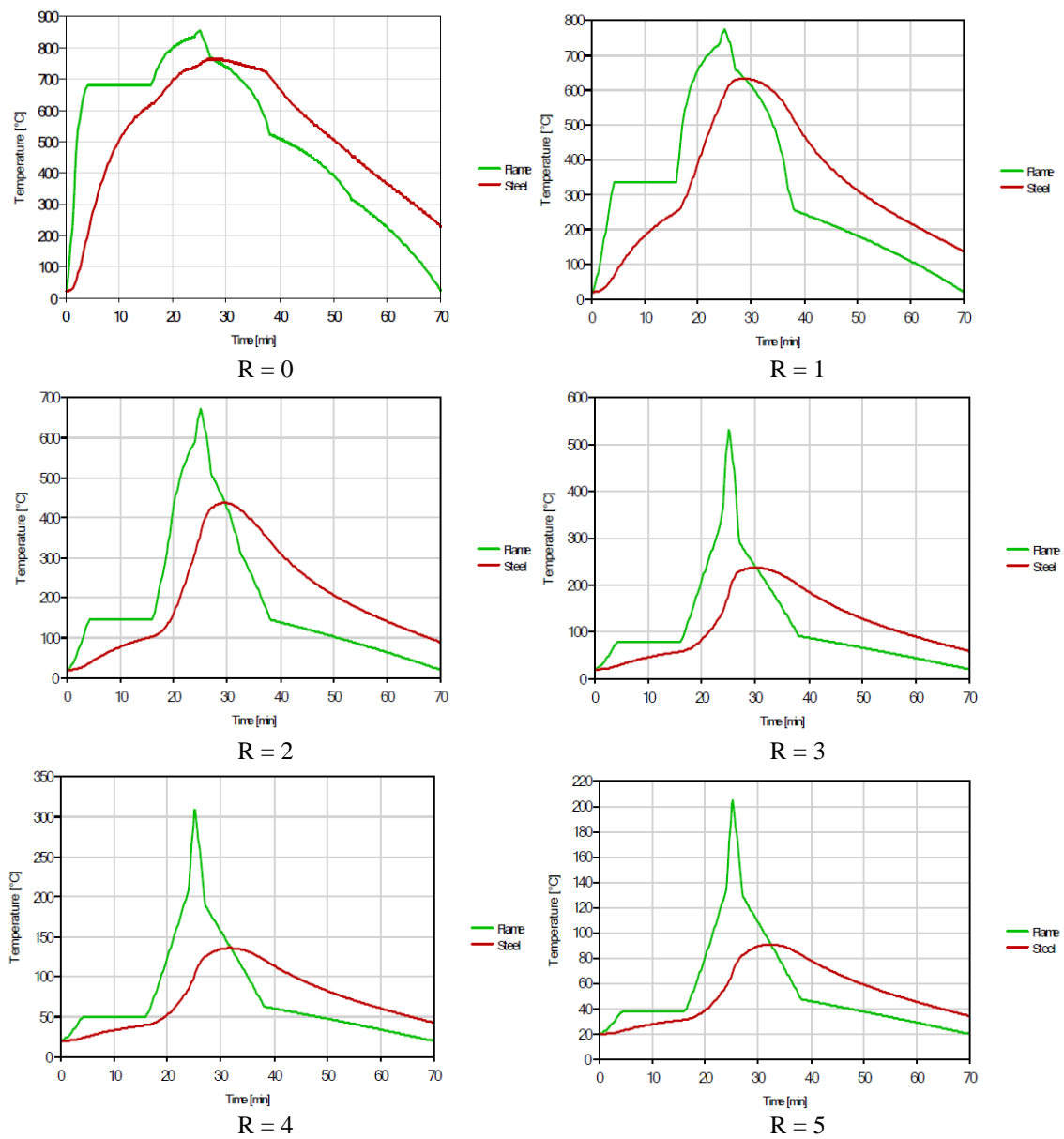


Figura 138 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

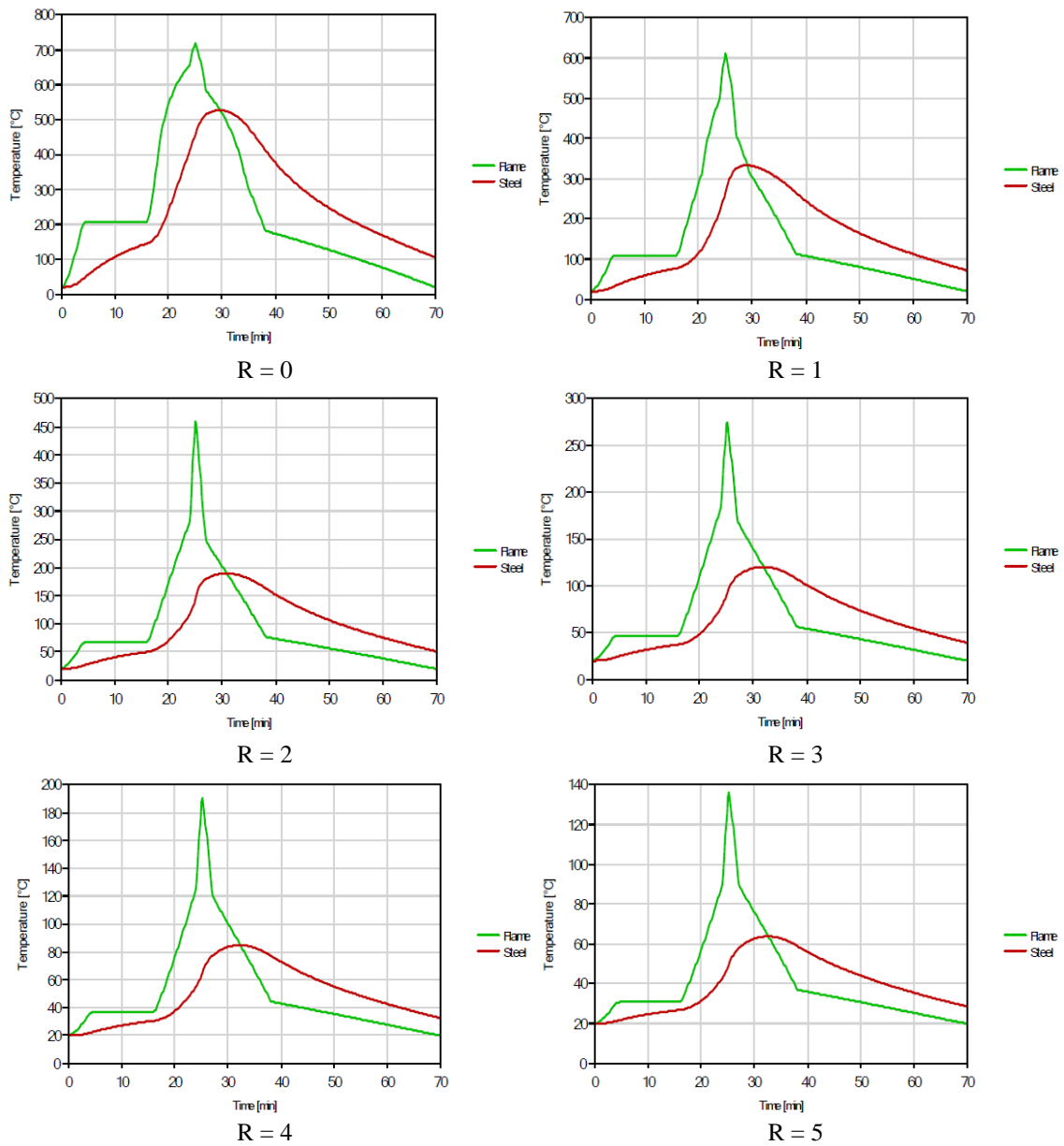
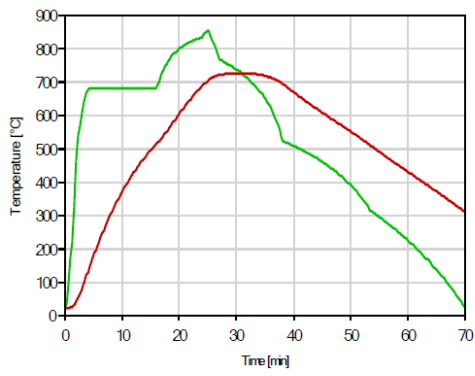


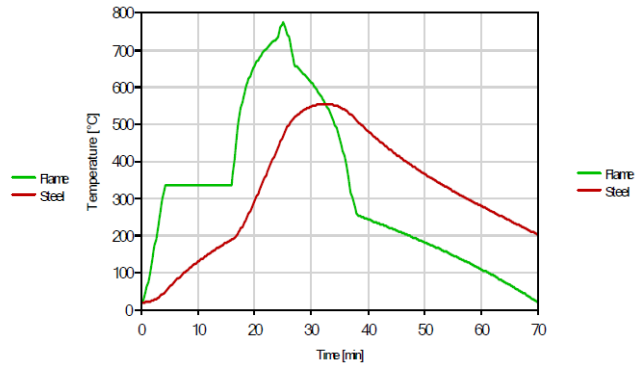
Figura 139 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 3.2- Perfil HE600A

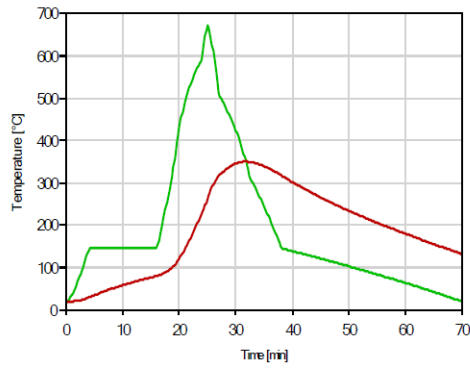
Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE600A, considerando a classe 3 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 140 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 141 para o compartimento 2.



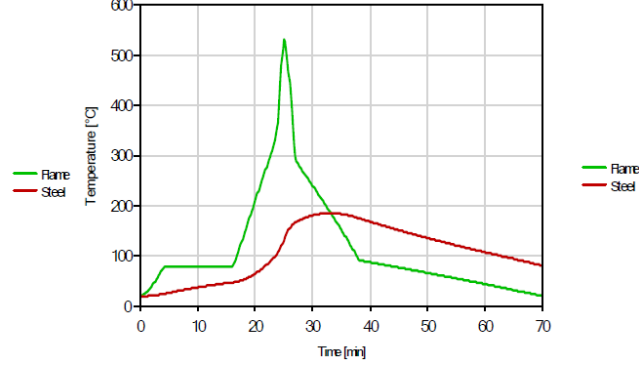
R = 0



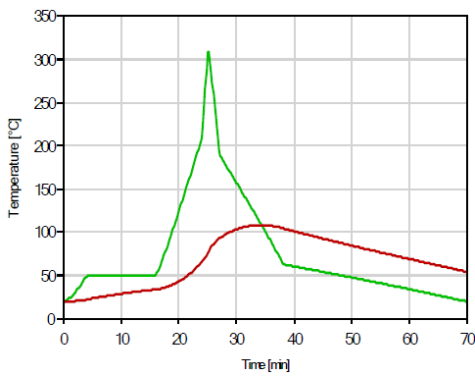
R = 1



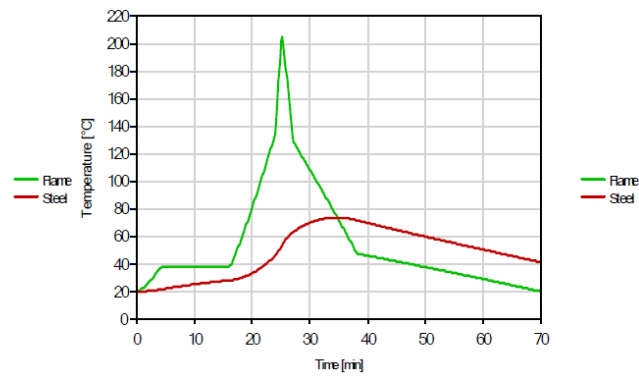
R = 2



R = 3



R = 4



R = 5

Figura 140 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

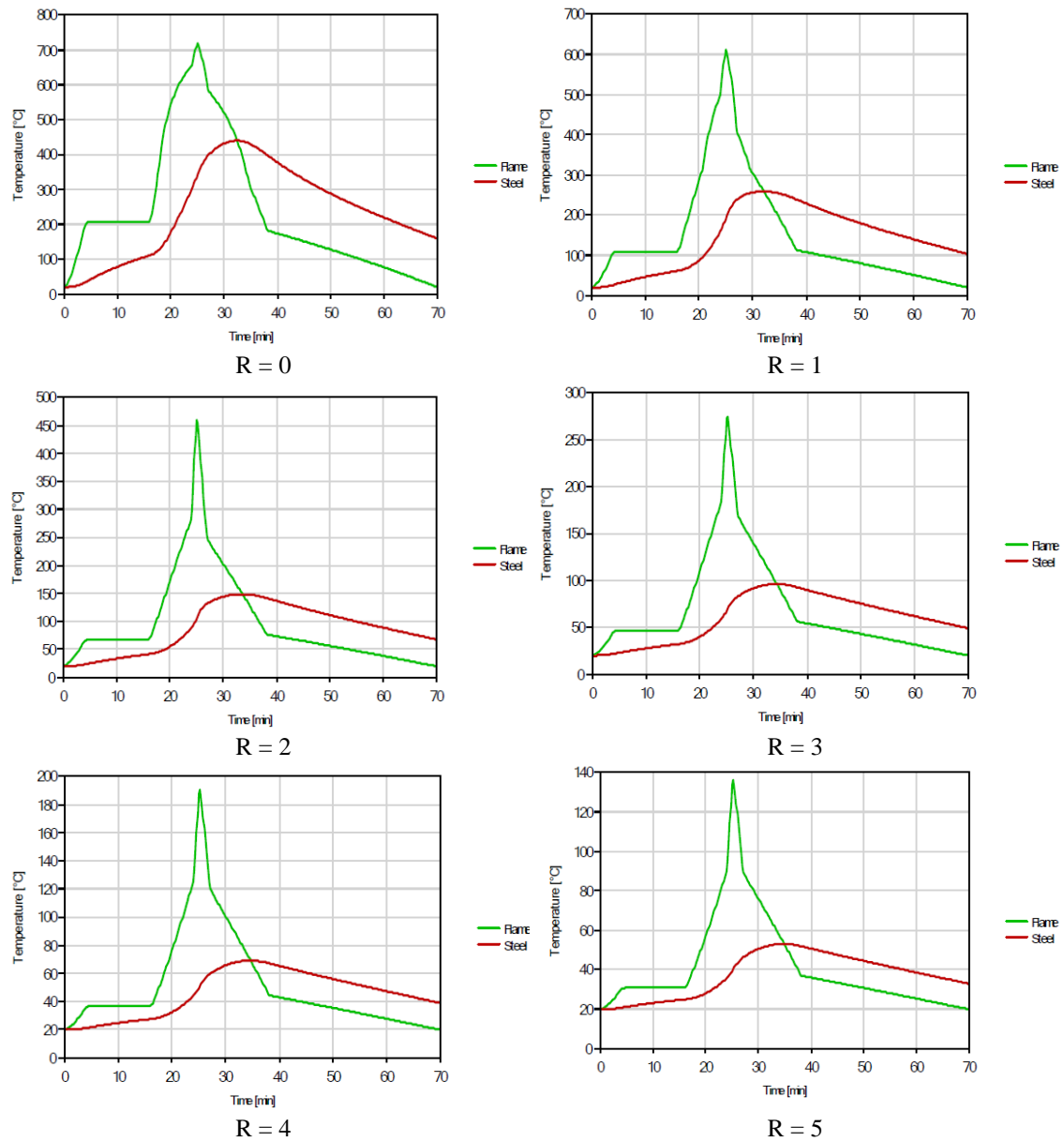


Figura 141 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 3.3- Perfil HE650A

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE650A, considerando a classe 3 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 142 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 143 para o compartimento 2.

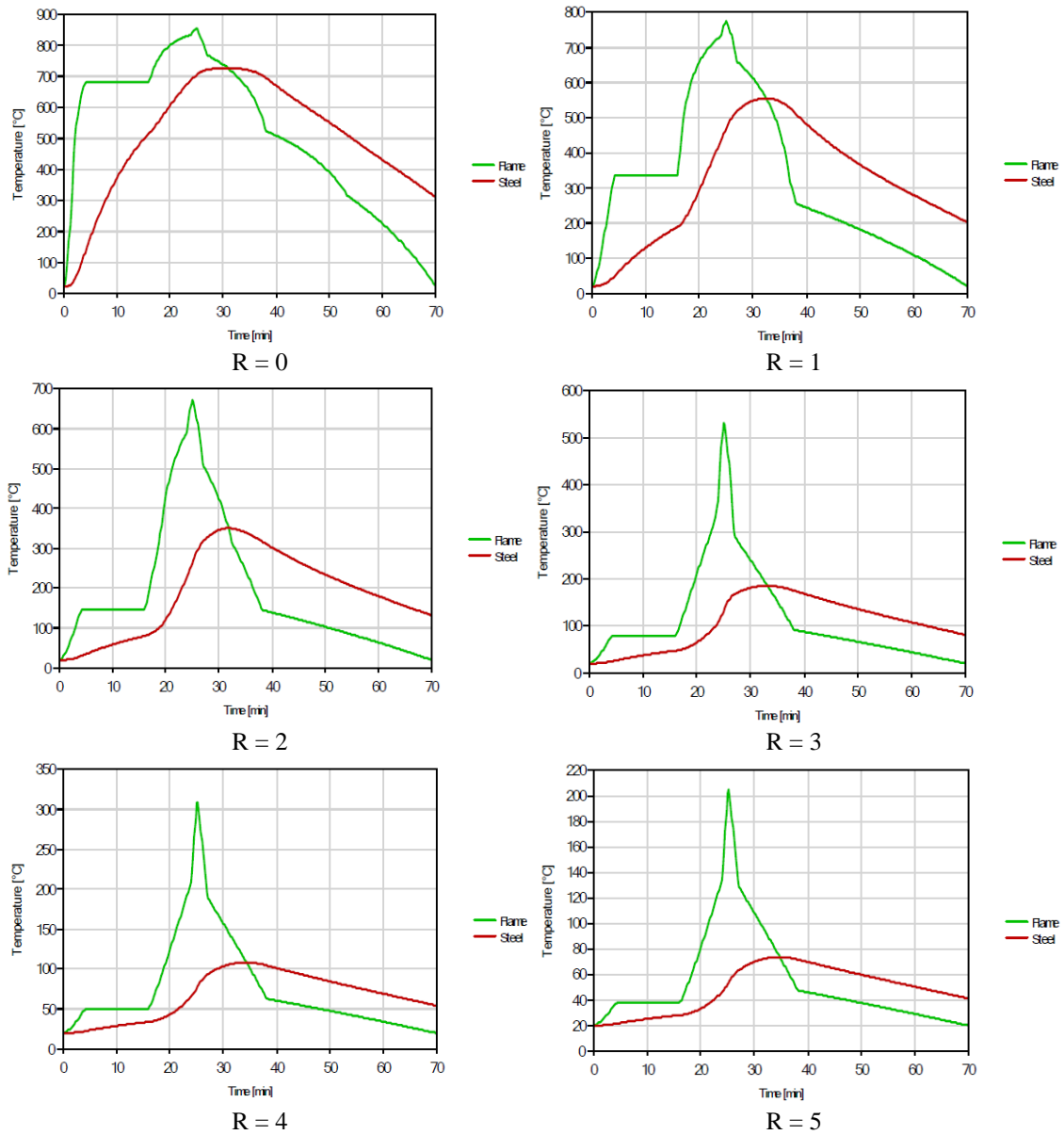
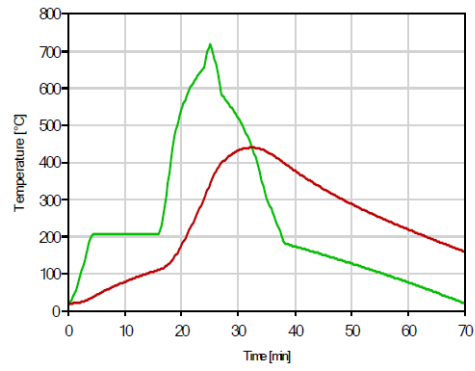
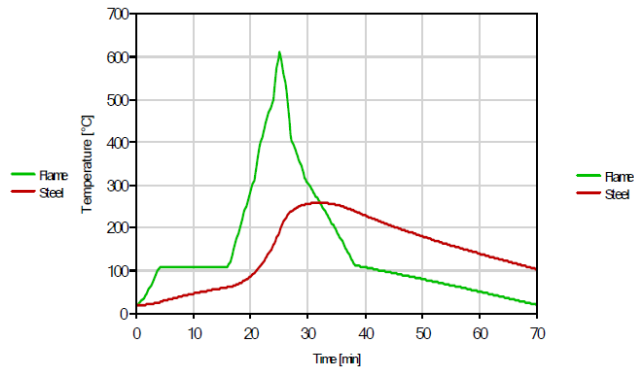


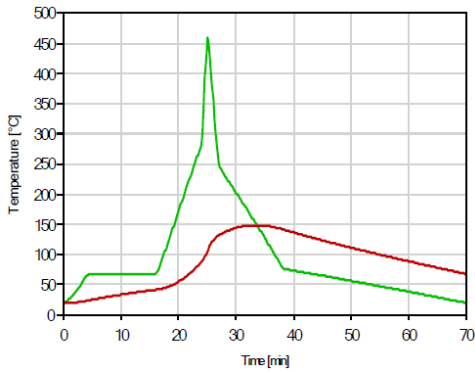
Figura 142 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.



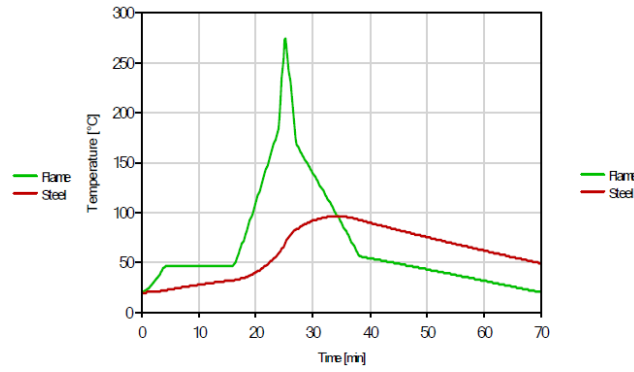
R = 0



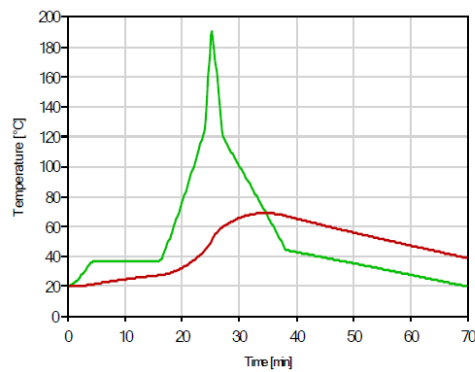
R = 1



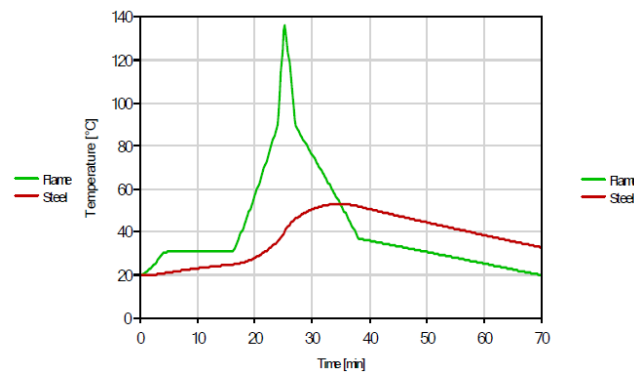
R = 2



R = 3



R = 4



R = 5

Figura 143 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

## 4- Veículo Classe 4/5

### 4.1- Perfil IPE450

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE450, considerando a classe 4/5 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 144 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 145 para o compartimento 2.

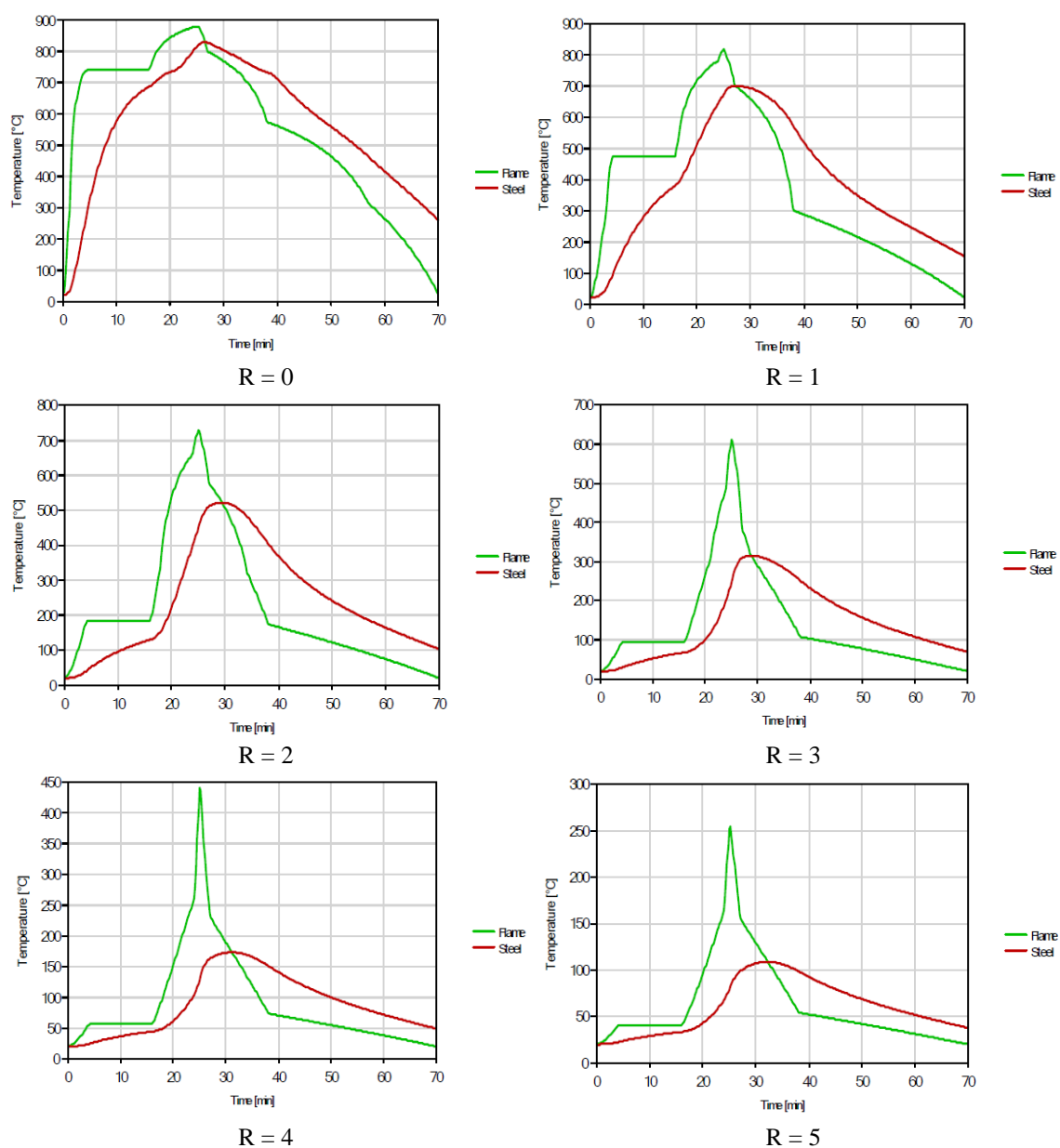


Figura 144 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

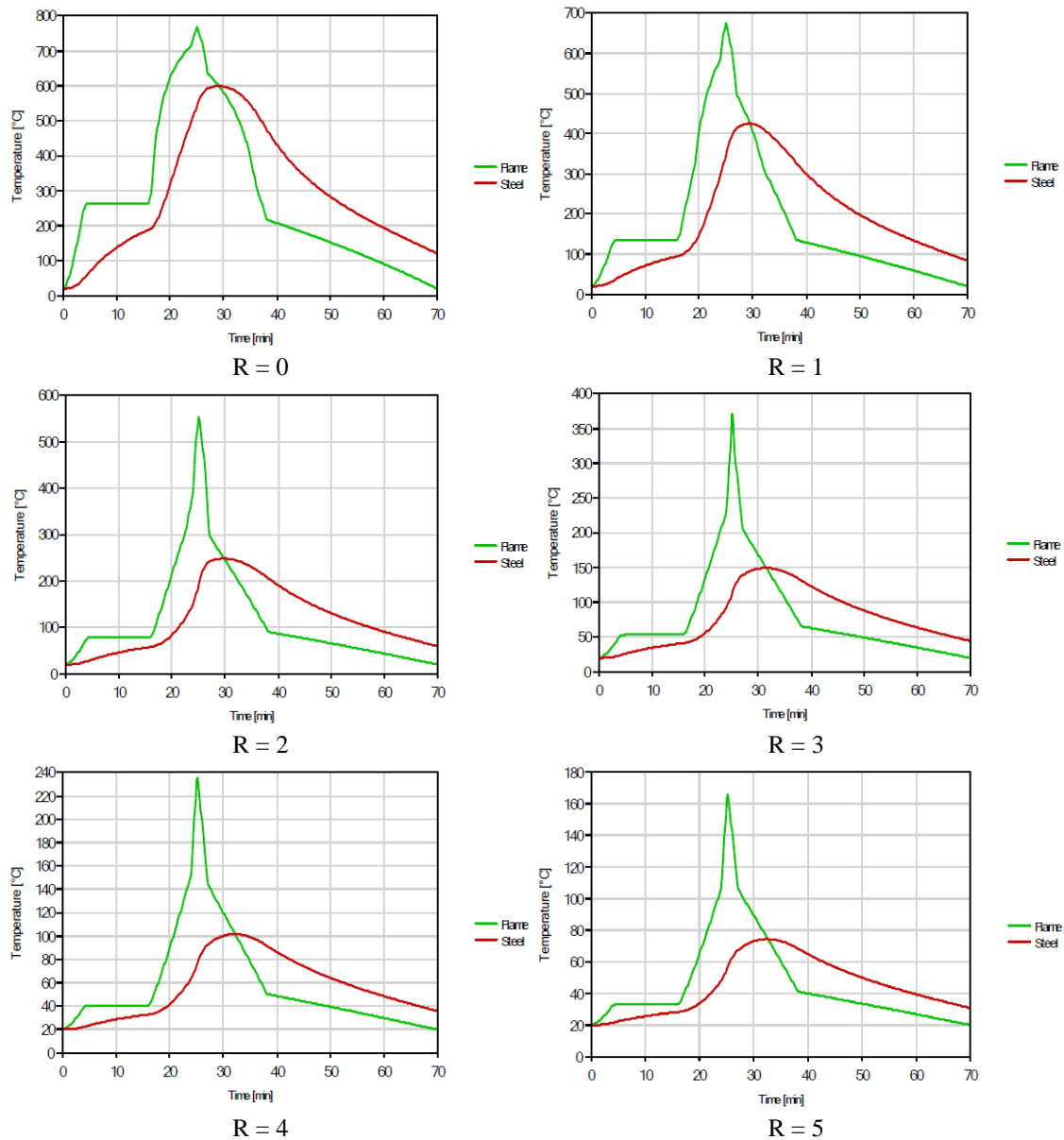


Figura 145 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

#### 4.2- Perfil IPE500

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE500, considerando a classe 4/5 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 146 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 147 para o compartimento 2.

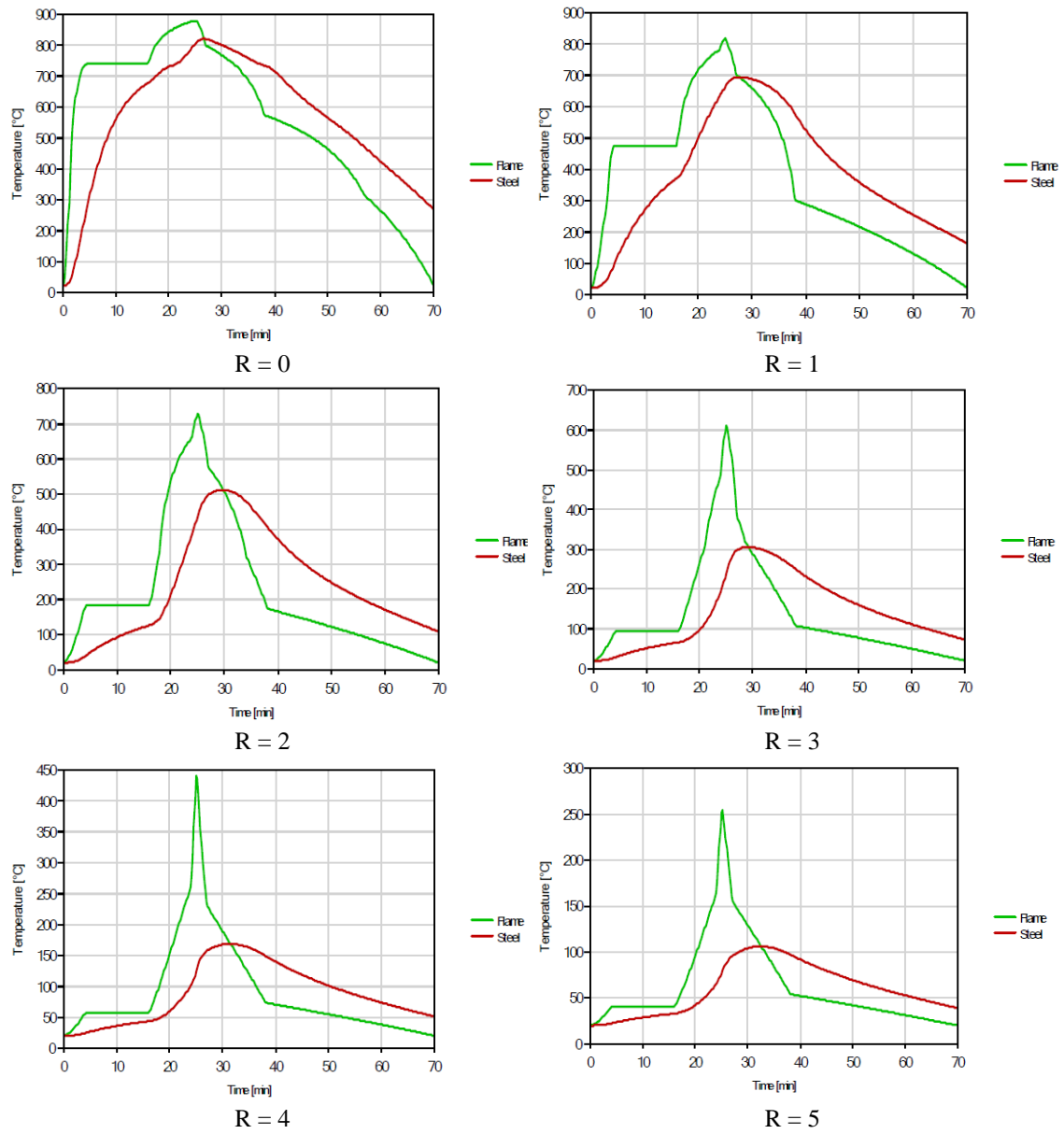


Figura 146 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

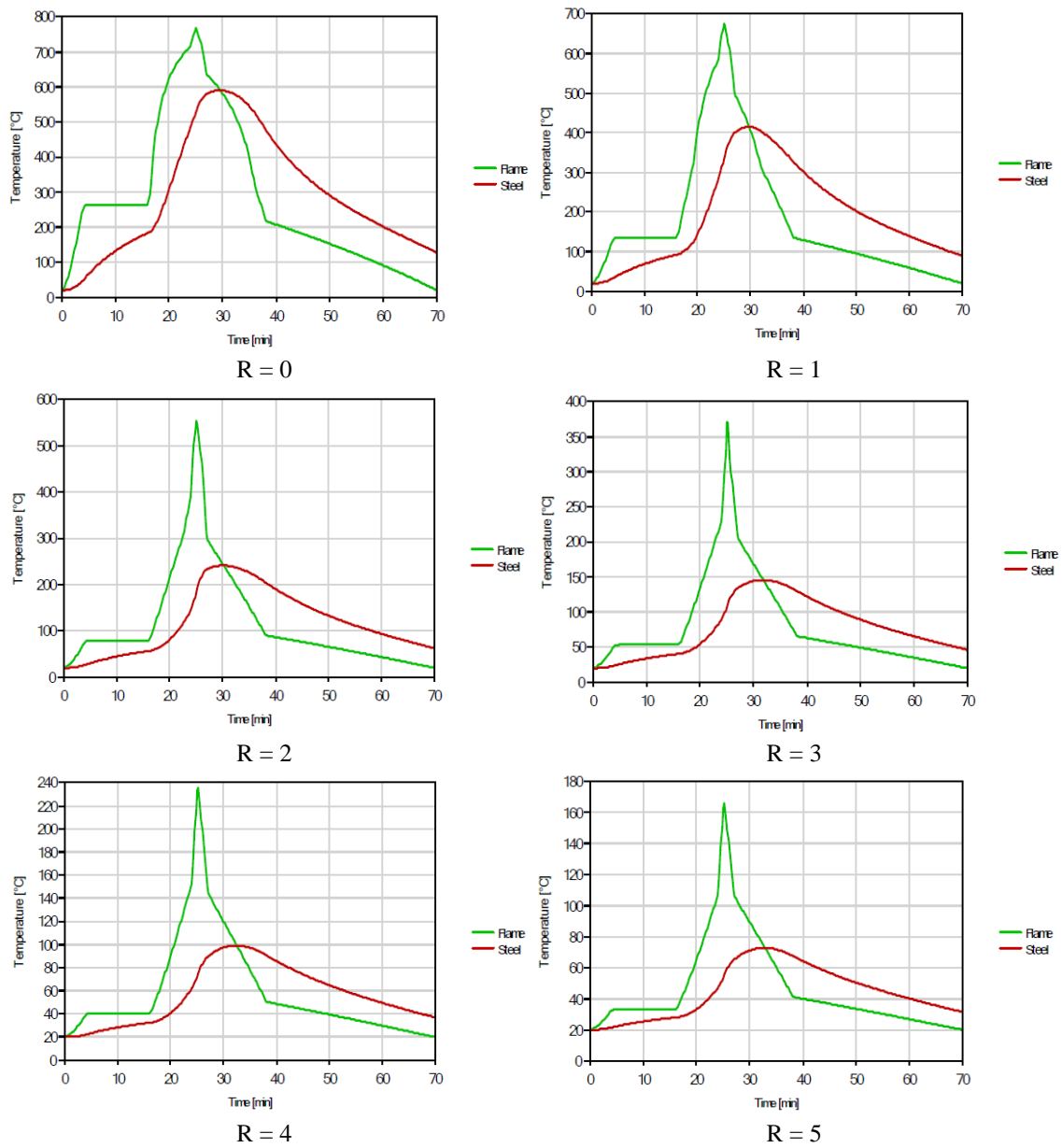
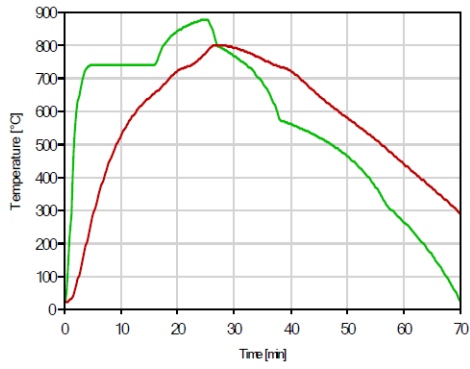


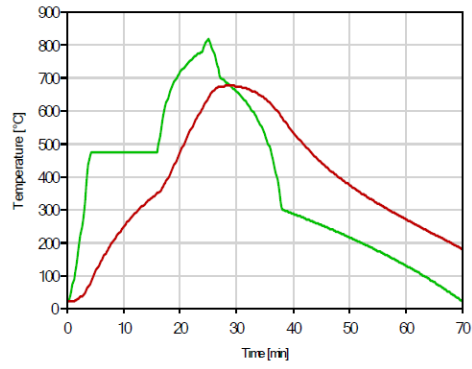
Figura 147 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 4.3- Perfil IPE600

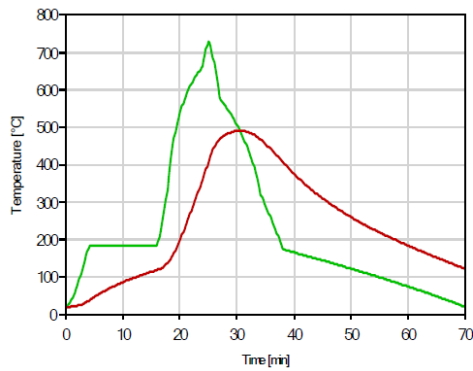
Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE600, considerando a classe 4/5 de automóvel para as posições relativas  $R = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  m. Na Figura 148 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 149 para o compartimento 2.



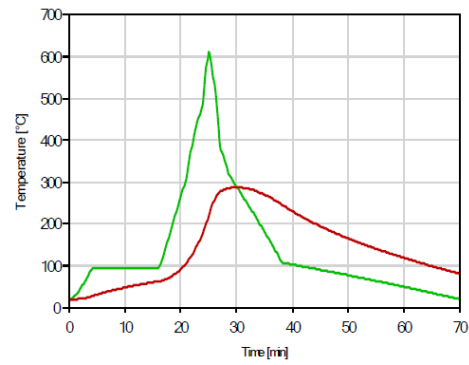
R = 0



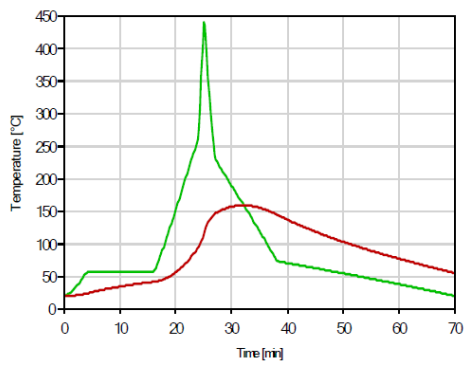
R = 1



R = 2



R = 3



R = 4



R = 5

Figura 148 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

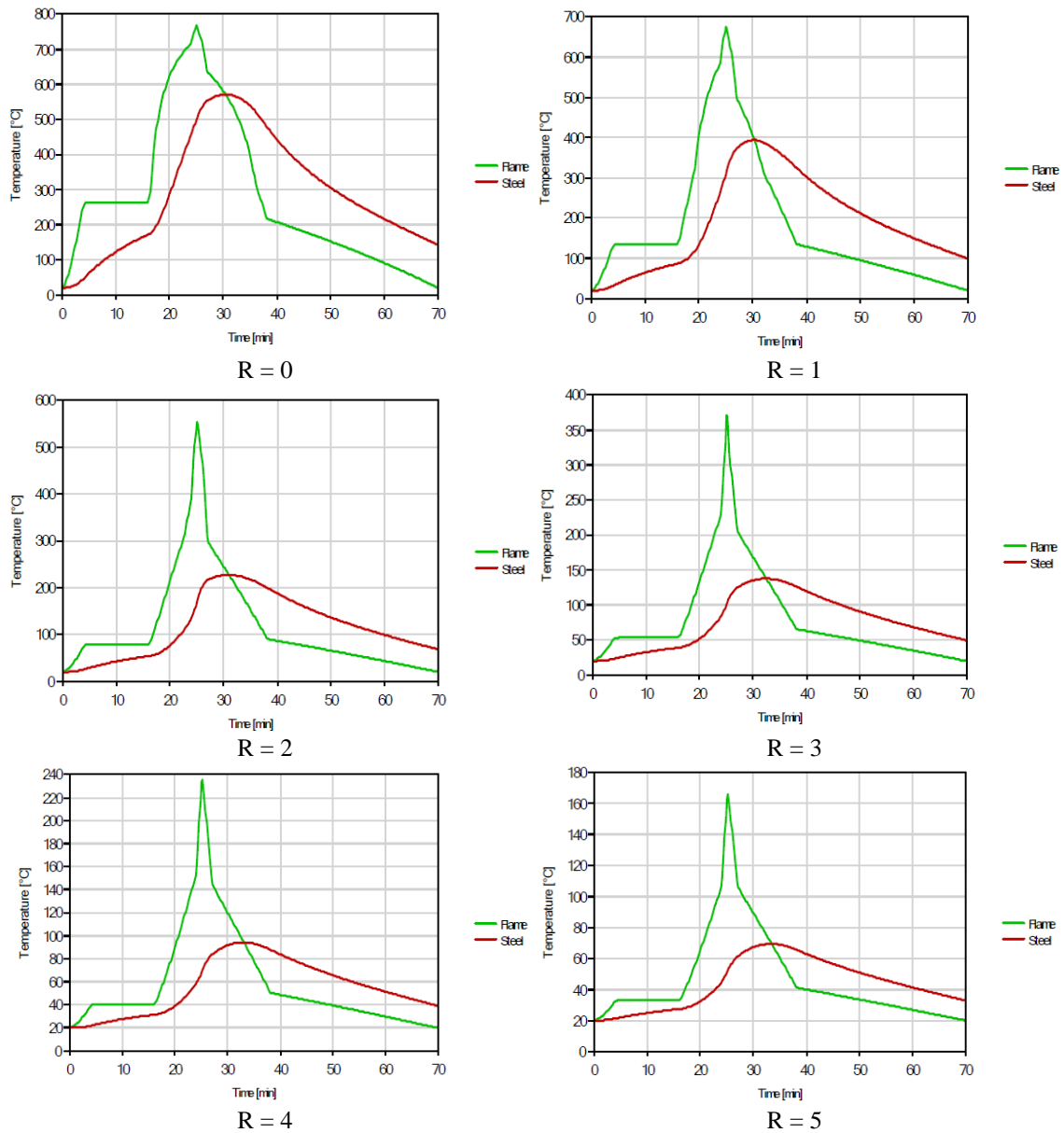
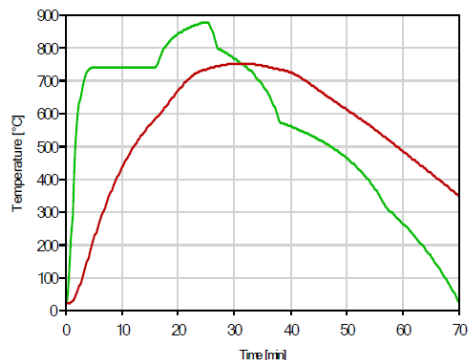


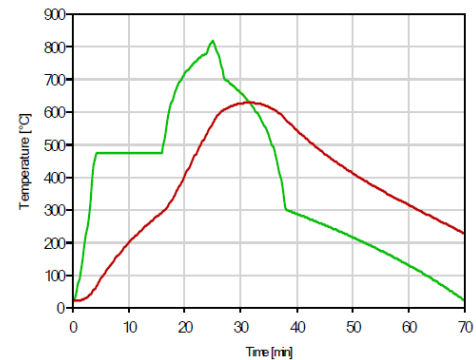
Figura 149 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

#### 4.4- Perfil HE600A

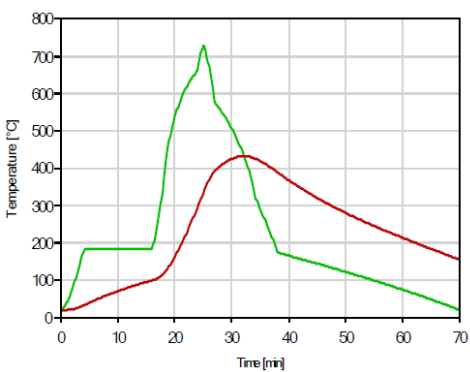
Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE600A, considerando a classe 4/5 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 150 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 151 para o compartimento 2.



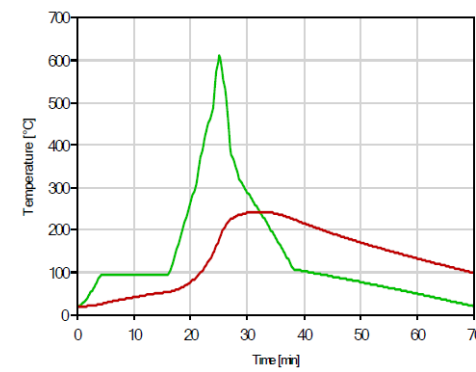
R = 0



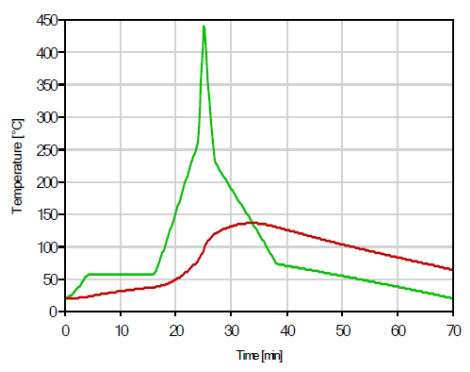
R = 1



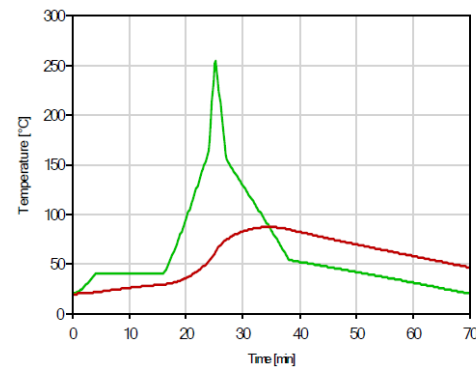
R = 2



R = 3



R = 4



R = 5

Figura 150 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

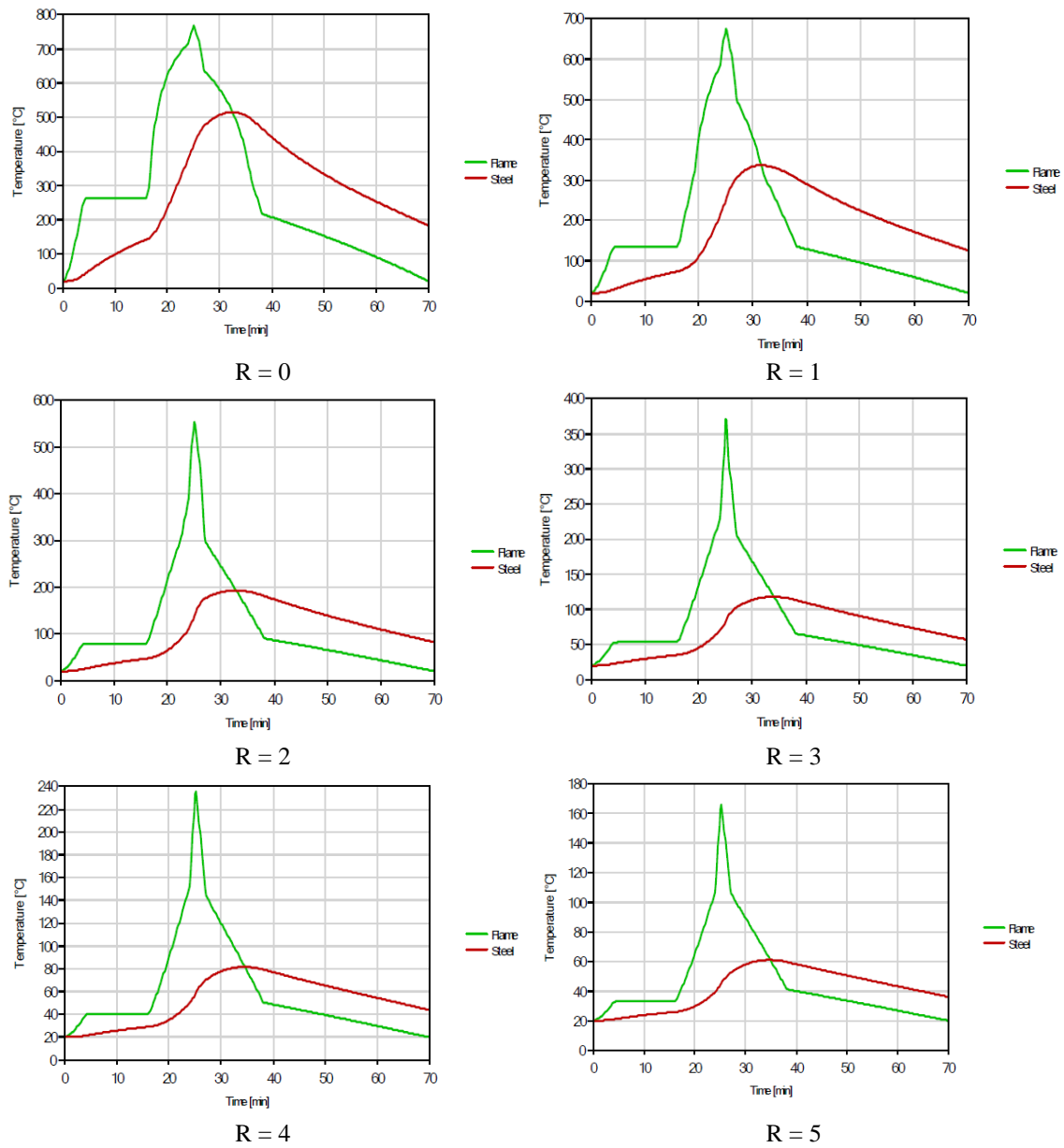
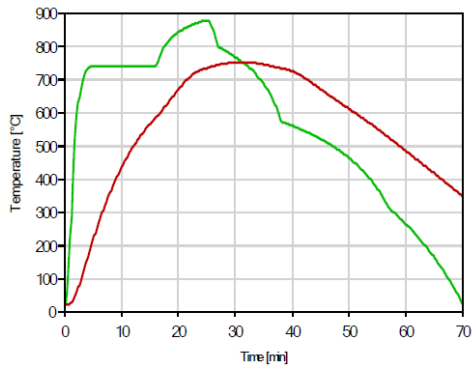


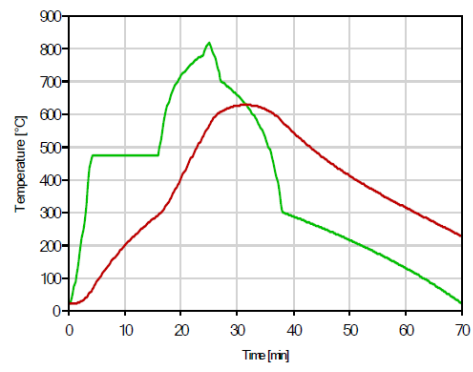
Figura 151 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

#### 4.5- Perfil HE650A

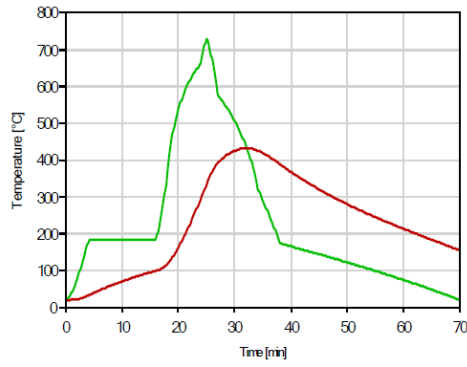
Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE650A, considerando a classe 4/5 de automóvel para as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 152 para o compartimento de incêndio 1 e na Figura 153 para o compartimento 2.



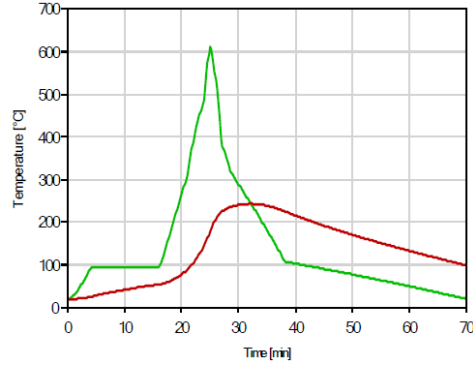
R = 0



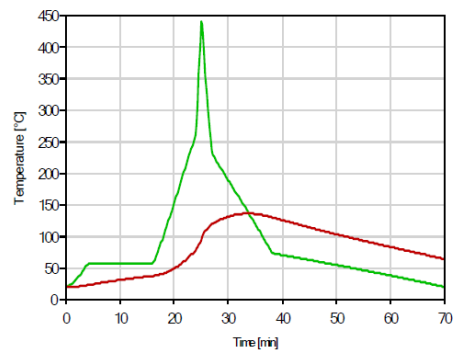
R = 1



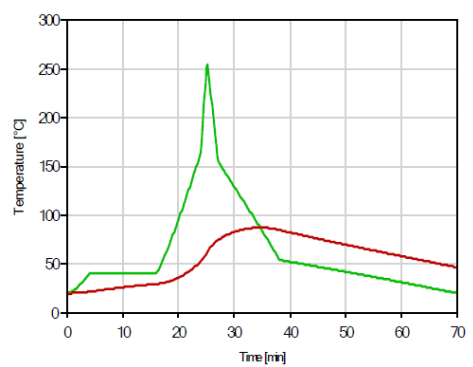
R = 2



R = 3

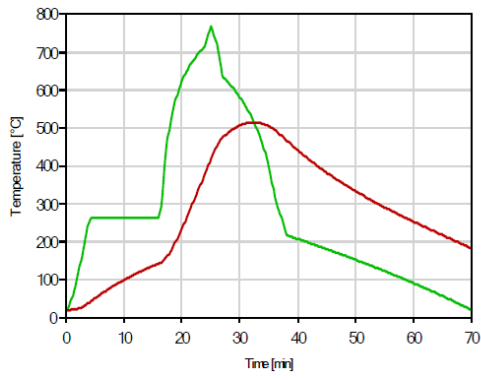


R = 4

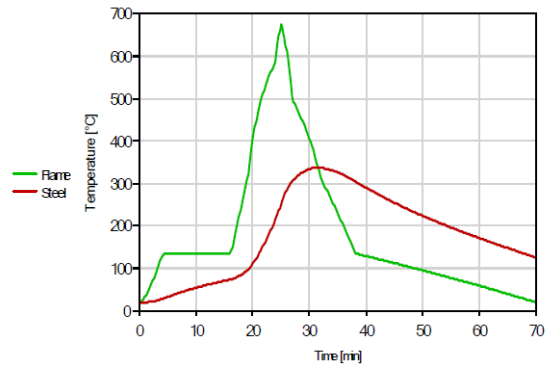


R = 5

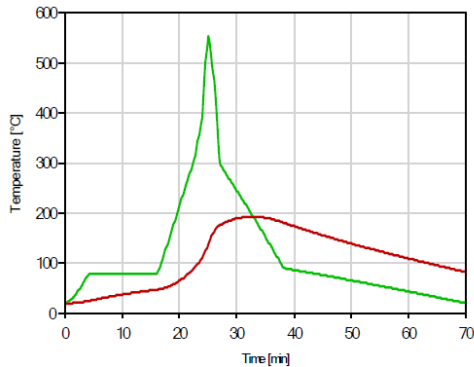
Figura 152 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.



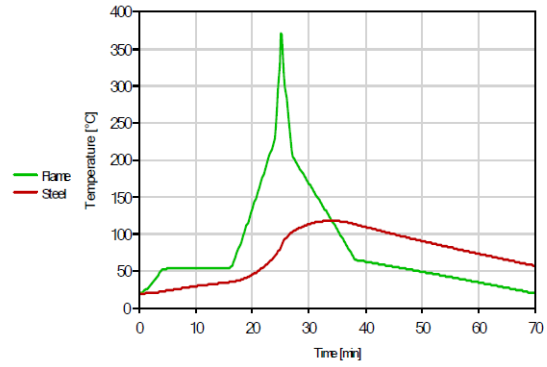
R = 0



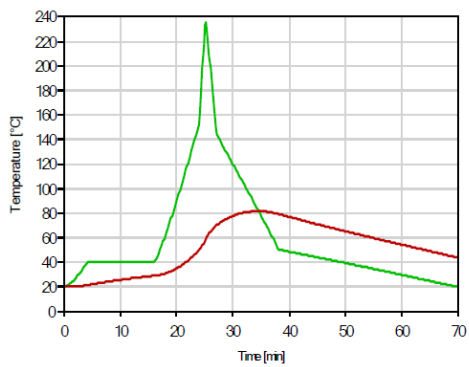
R = 1



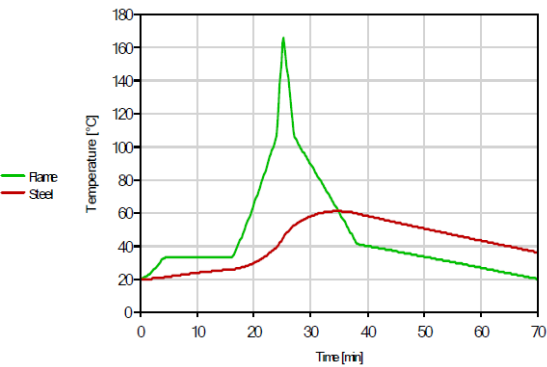
R = 2



R = 3



R = 4



R = 5

Figura 153 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

## ANEXO C: RESULTADOS PARA O MÉTODO AVANÇADO DE CÁLCULO

Os resultados para o método avançado levam em consideração apenas incêndios relacionados com a queima de um veículo da classe 3. Para a resolução por este método foram utilizadas simulações realizadas por meio do programa ANSYS Workbench, rodando o Fluent.

### 1- Equações de temperatura e velocidade de entrada

As equações obtidas por meio do programa CFAST para a criação das condições iniciais de entrada na geometria em análise, estão representadas a seguir, com o tempo em segundos [s], temperatura em Kelvin [K] e velocidade em metros por segundo [m/s]. O conjunto de equações (44) e (45) dizem respeito, respectivamente, a temperatura e a velocidade para o compartimento de incêndio 1, enquanto os conjuntos de equações (46) e (47) dizem respeito, respectivamente a temperatura e a velocidade para o compartimento 2.

$$0 \leq t \leq 120 \quad T = 7,50 * t + 293,15 \quad (44a)$$

$$120 \leq t \leq 1500 \quad T = 6,52E - 3 * t + 1192,37 \quad (44b)$$

$$1500 \leq t \leq 2280 \quad T = -2,56E - 3 * t + 1206,00 \quad (44c)$$

$$2280 \leq t \leq 4200 \quad T = 0,47 * t + 2271,99 \quad (44d)$$

$$0 \leq t \leq 240 \quad V = 0,035 * t + 0,10 \quad (45a)$$

$$240 \leq t \leq 960 \quad V = 8,44 \quad (45b)$$

$$960 \leq t \leq 1440 \quad V = 5,54E - 3 * t + 3,12 \quad (45c)$$

$$1440 \leq t \leq 1500 \quad V = 0,015 * t - 10,50 \quad (45d)$$

$$1500 \leq t \leq 1620 \quad V = -0,012 * t + 29,50 \quad (45e)$$

$$1620 \leq t \leq 2280 \quad V = -4,15E - 3 * t + 17,33 \quad (45f)$$

$$2280 \leq t \leq 3180 \quad V = -1,02E - 3 * t + 10,19 \quad (45g)$$

$$3180 \leq t \leq 4200 \quad V = -6,71E - 3 * t + 28,27 \quad (45h)$$

$$0 \leq t \leq 120 \quad T = 7,50 * t + 293,15 \quad (46a)$$

$$120 \leq t \leq 1500 \quad T = 2,39E - 3 * t + 1193,03 \quad (46b)$$

$$1500 \leq t \leq 2280 \quad T = -0,603E - 4 * t + 1197,52 \quad (46c)$$

$$2280 \leq t \leq 4200 \quad T = 0,47 * t + 2266,19 \quad (46d)$$

$$0 \leq t \leq 240 \quad V = 0,035 * t + 0,10 \quad (47a)$$

$$240 \leq t \leq 960 \quad V = 8,45 \quad (47b)$$

$$960 \leq t \leq 1440 \quad V = 5,50E - 3 * t + 3,17 \quad (47c)$$

$$1440 \leq t \leq 1500 \quad V = 0,016 * t - 11,47 \quad (47d)$$

$$1500 \leq t \leq 1620 \quad V = -0,0116 * t + 29,41 \quad (47e)$$

$$1620 \leq t \leq 2280 \quad V = -4,18E - 3 * t + 17,42 \quad (47f)$$

$$2280 \leq t \leq 3180 \quad V = -1,03E - 3 * t + 10,27 \quad (47g)$$

$$3180 \leq t \leq 4200 \quad V = -6,72E - 3 * t + 28,31 \quad (47h)$$

## 2- Campos de temperatura e velocidade

A seguir encontram-se os contornos de temperatura e velocidade, obtidos durante a simulação, para o perfil IPE600, considerando  $R = 0$ ,  $R = 2 m$  e  $R = 5 m$  para o compartimento de incêndio 2, bem como os contornos de velocidade para os mesmos cenários considerando o compartimento 1.

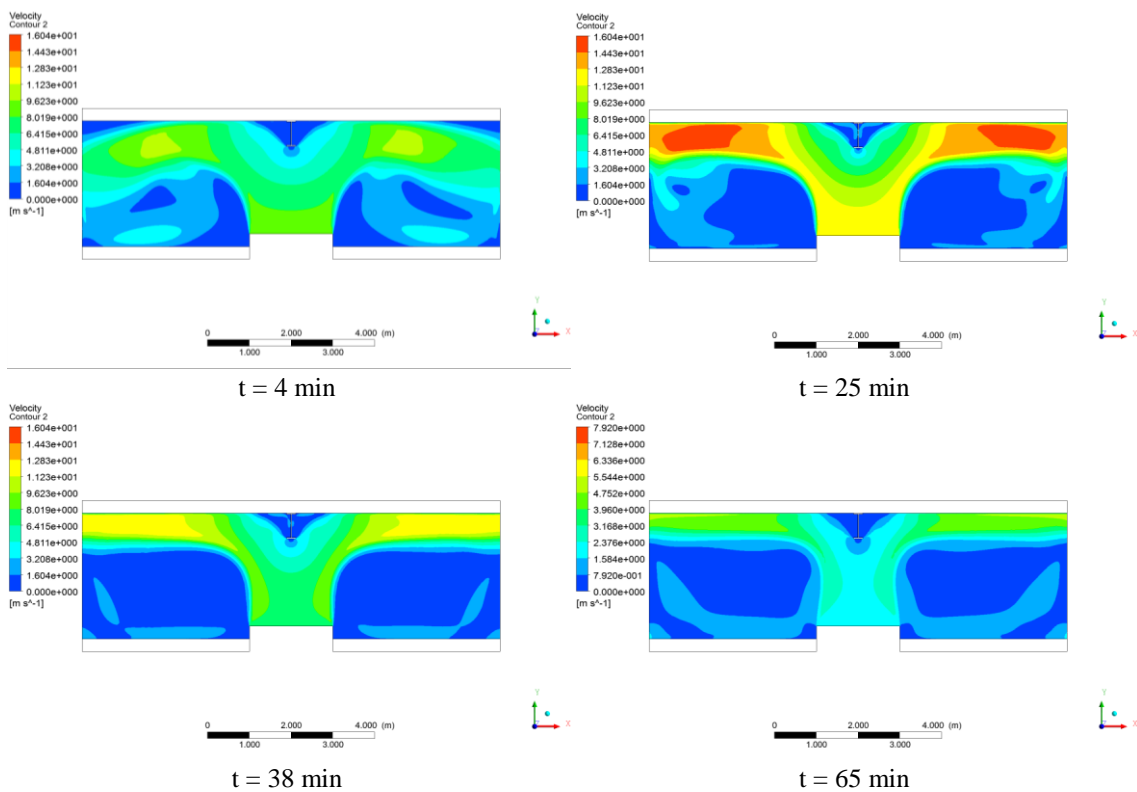


Figura 154 - Campo de velocidade para  $R=0$  e C1.

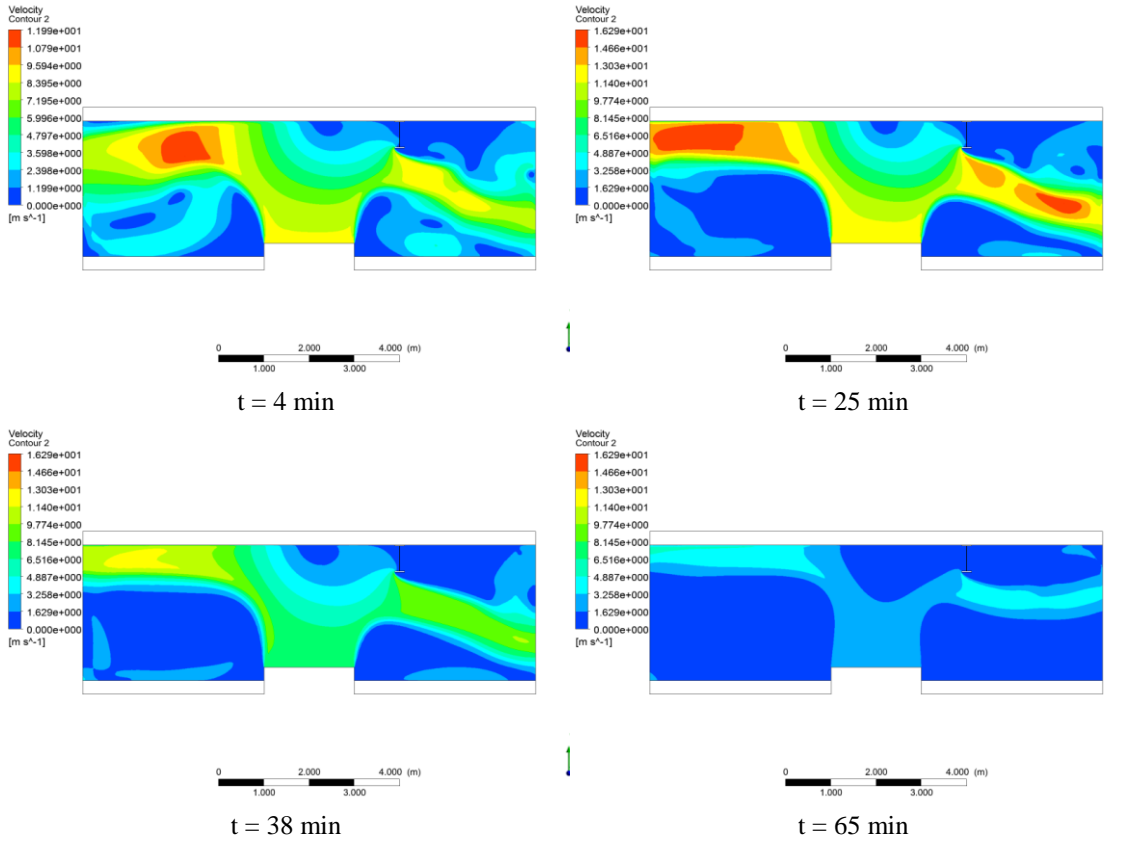


Figura 155 - Campo de velocidade para R=2 e C1.

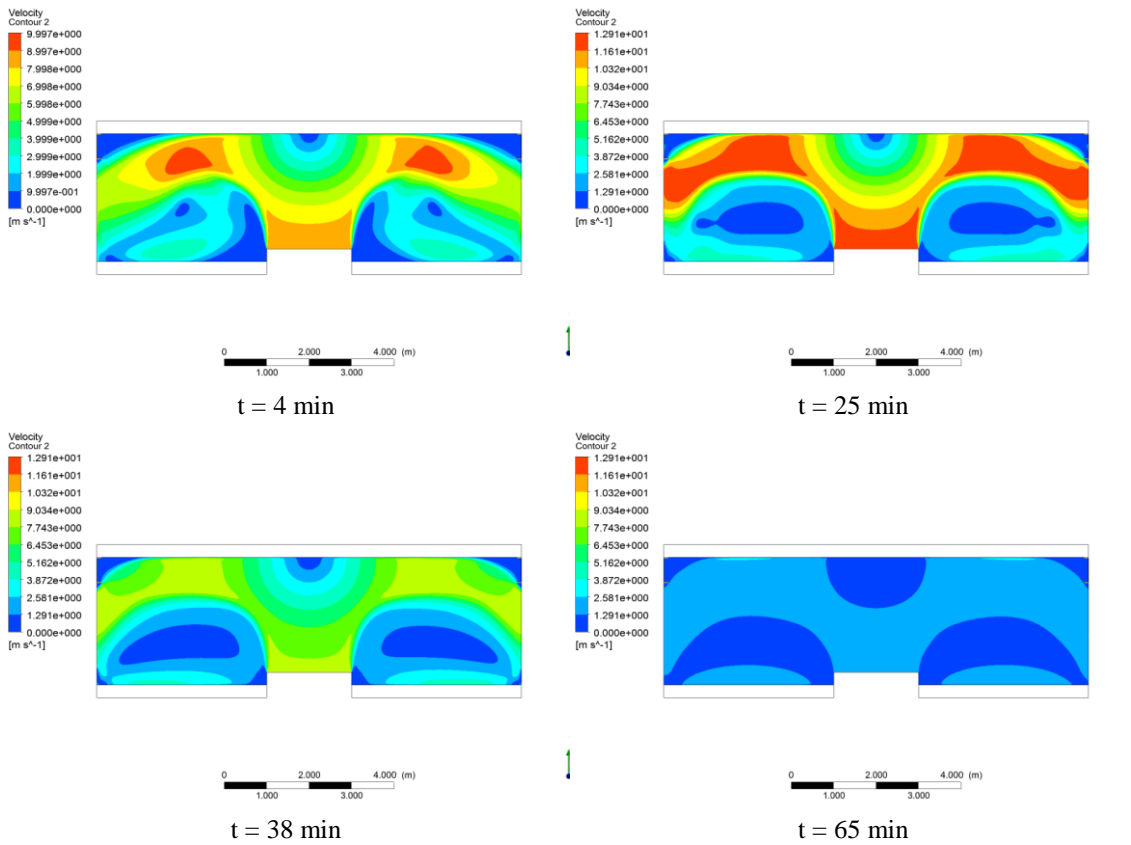
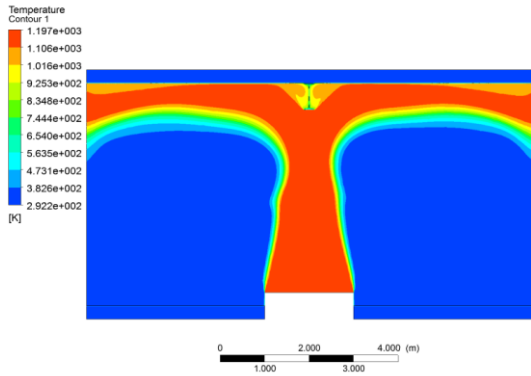
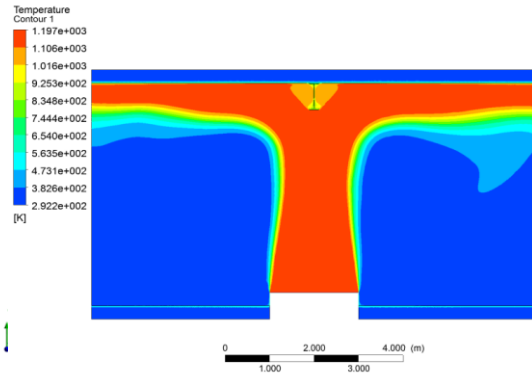


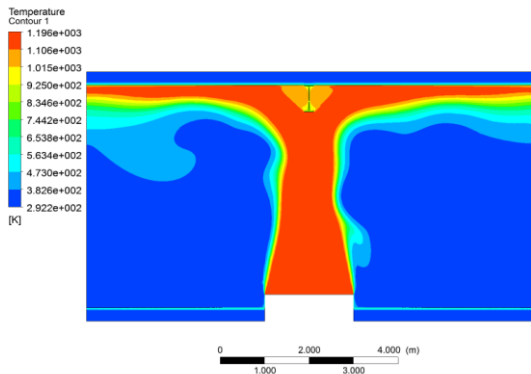
Figura 156 - Campo de velocidade para R=5 e C1.



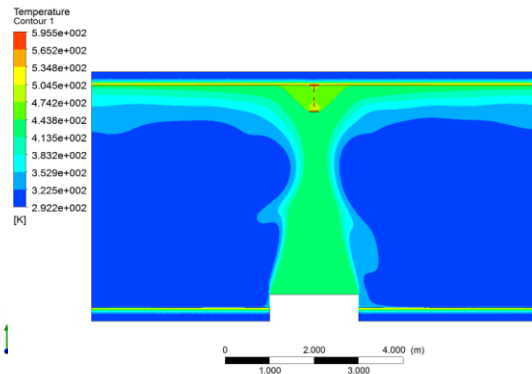
t = 4 min



t = 25 min

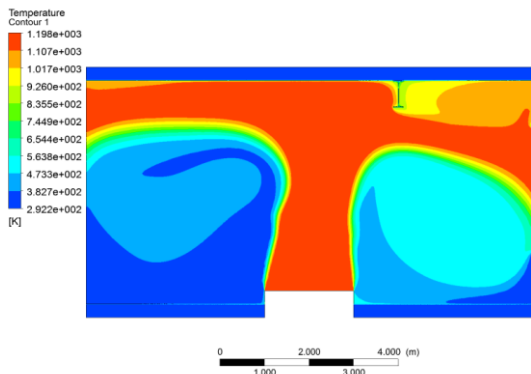


t = 38 min

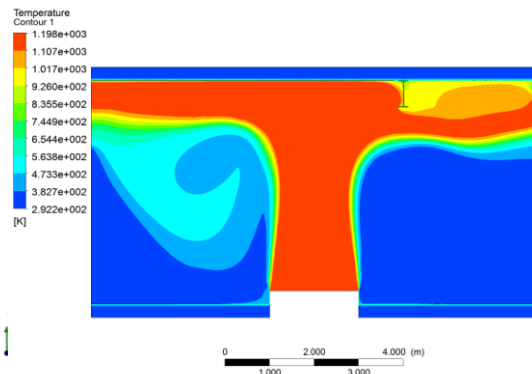


t = 65 min

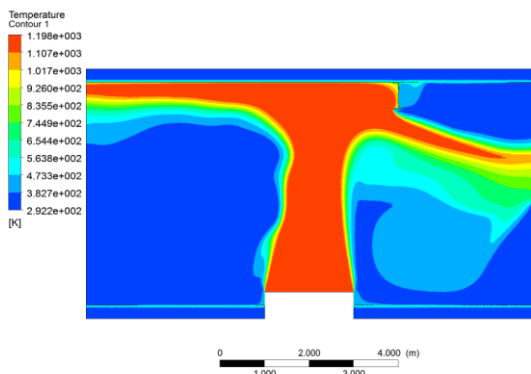
Figura 157 - Campo de temperatura para R=0 e C2.



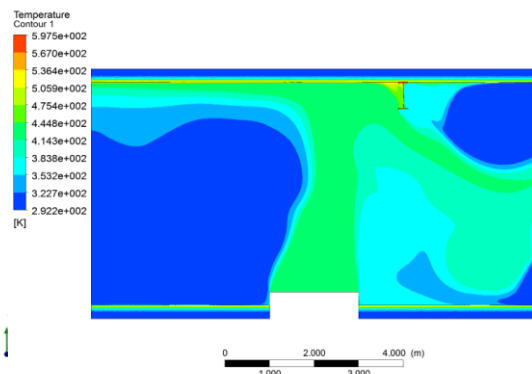
t = 4 min



t = 25 min



t = 38 min



t = 65 min

Figura 158 - Campo de temperatura para R=2 e C2.

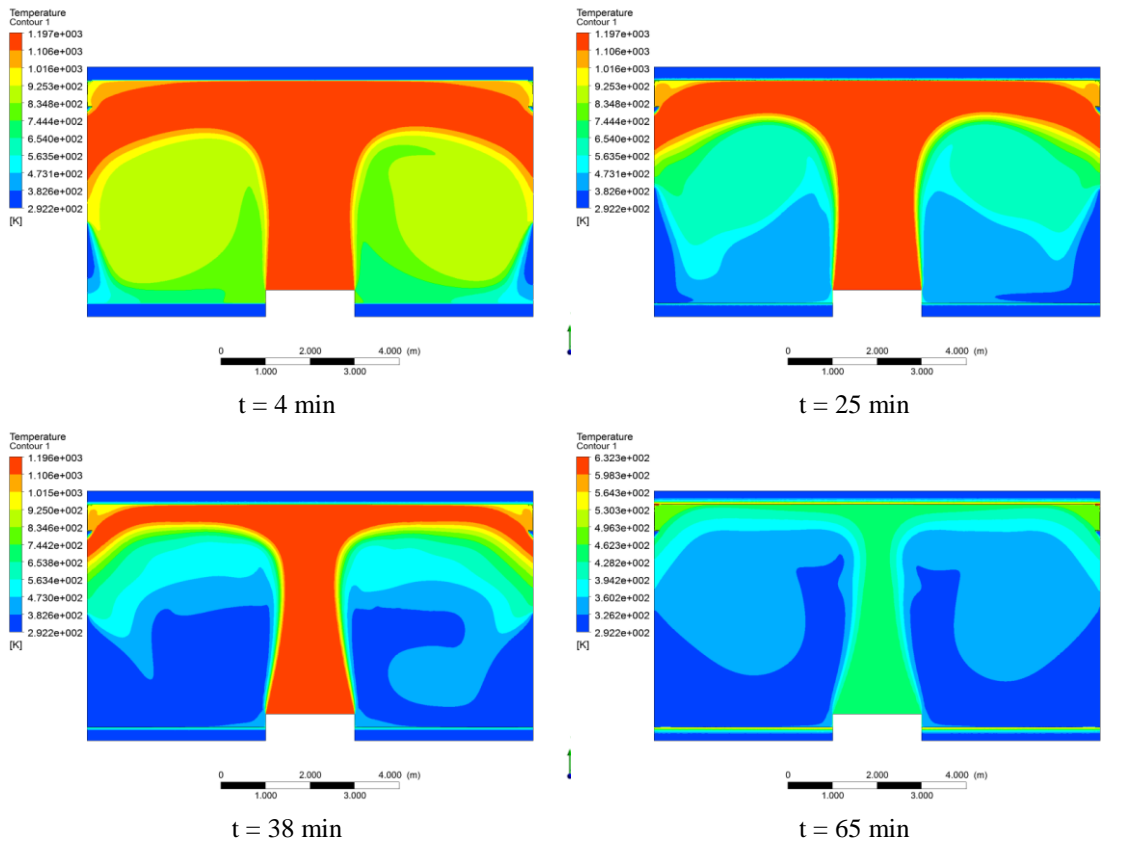


Figura 159 - Campo de temperatura para R=5 e C2.

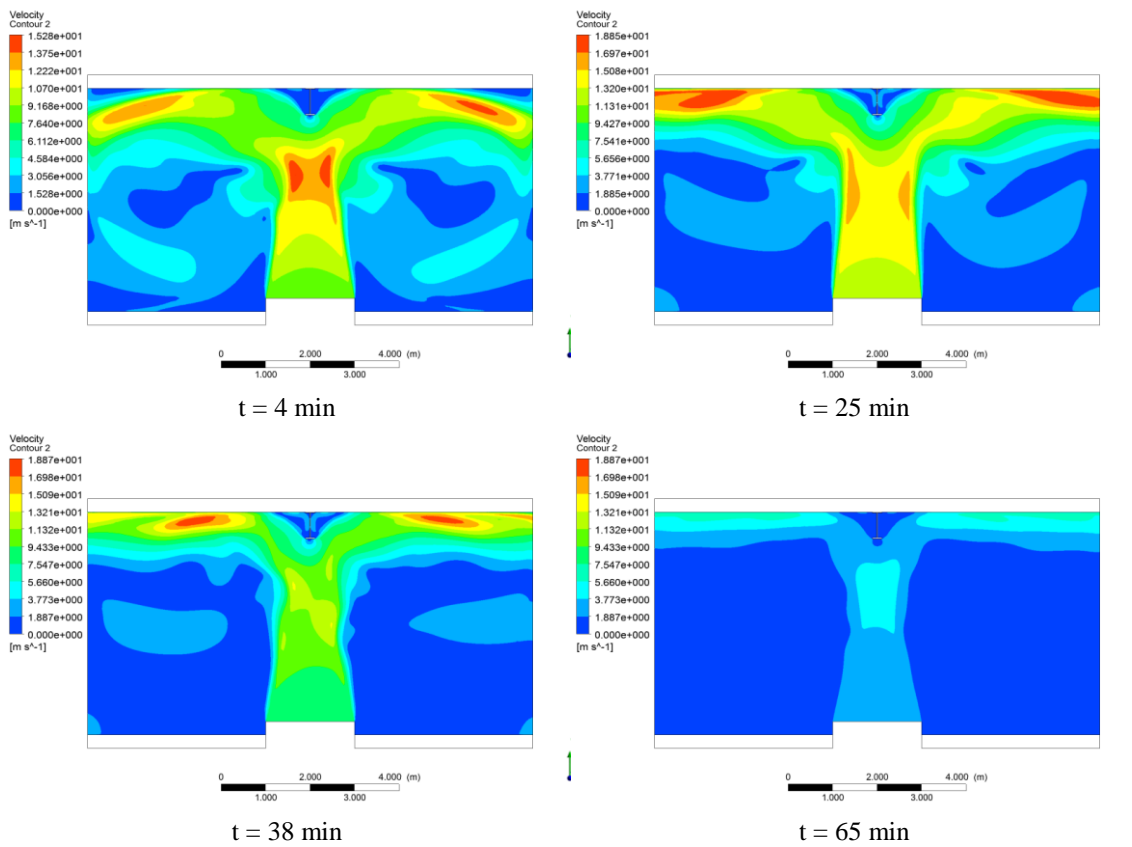
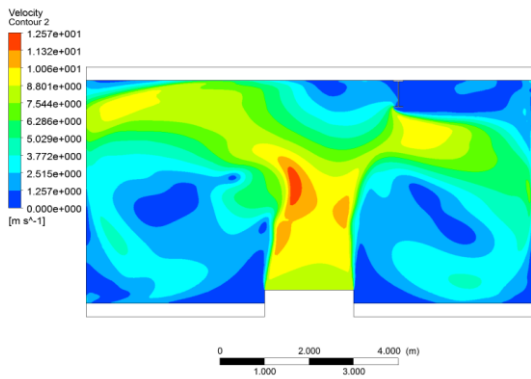
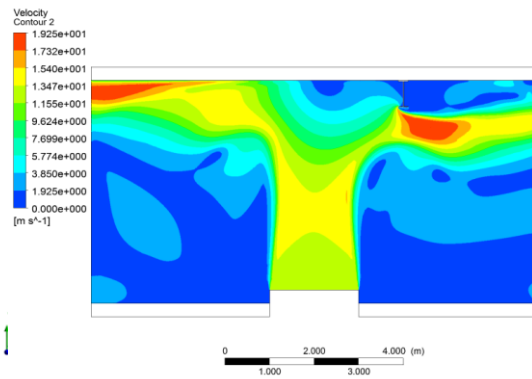


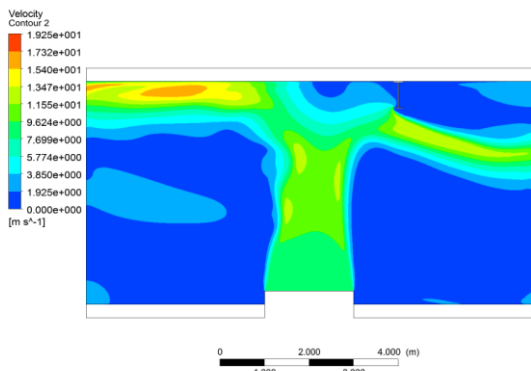
Figura 160 - Campo de velocidade para R=0 e C2.



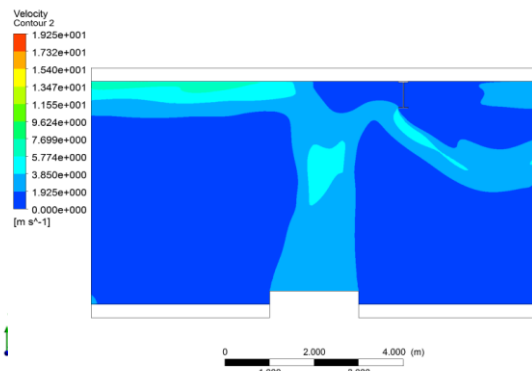
t = 4 min



t = 25 min

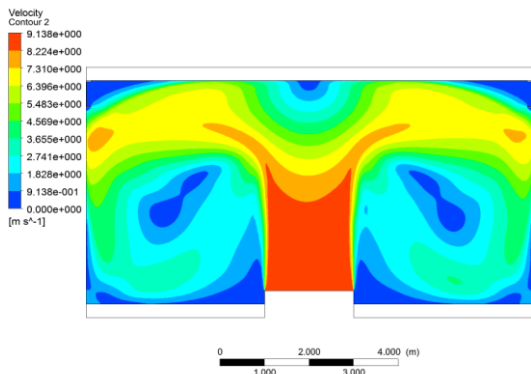


t = 38 min

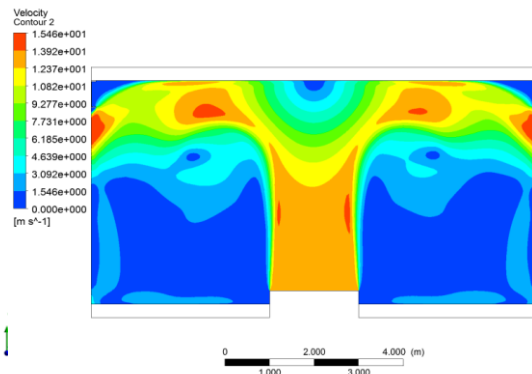


t = 65 min

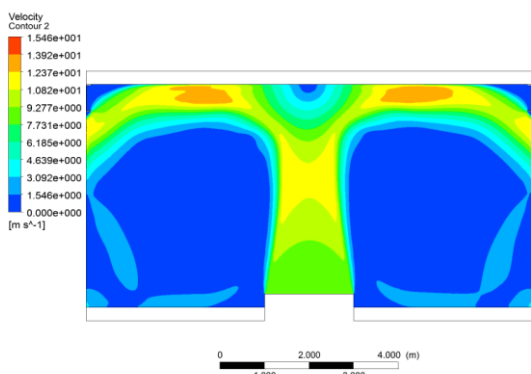
Figura 161 - Campo de temperatura para R=2 e C2.



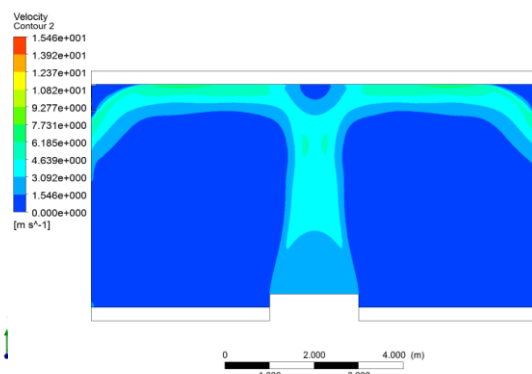
t = 4 min



t = 25 min



t = 38 min



t = 65 min

Figura 162 - Campo de velocidade para R=5 e C2.

### **3- Resultado para os perfis**

Para a confecção dos gráficos apresentados abaixo foram utilizadas as médias das temperaturas para os pontos analisados na simulação. Ver Figura 69.

#### **3.1- Perfil IPE450**

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil IPE450, considerando as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 163 para o compartimento C1 e na Figura 164 para o compartimento C2.

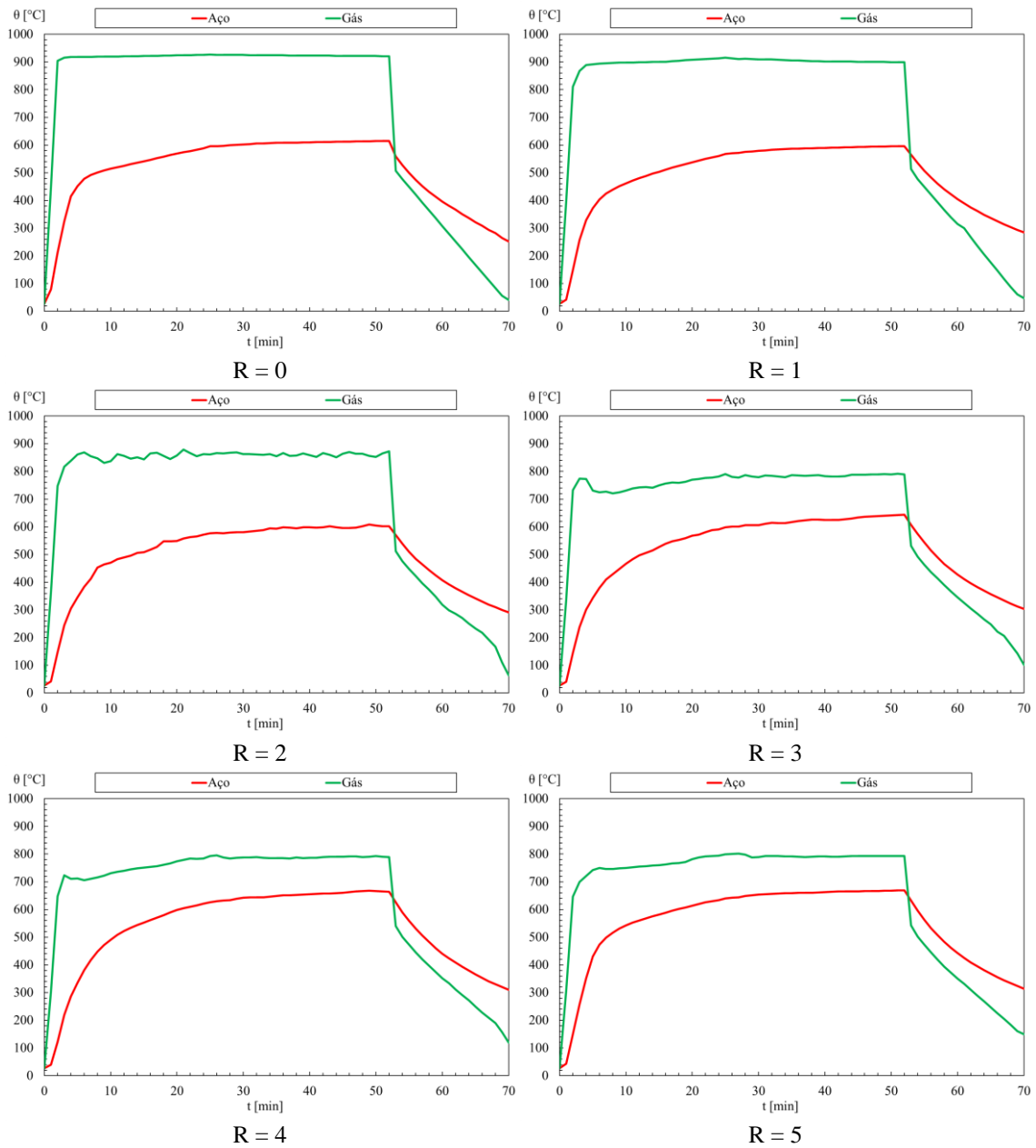


Figura 163 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

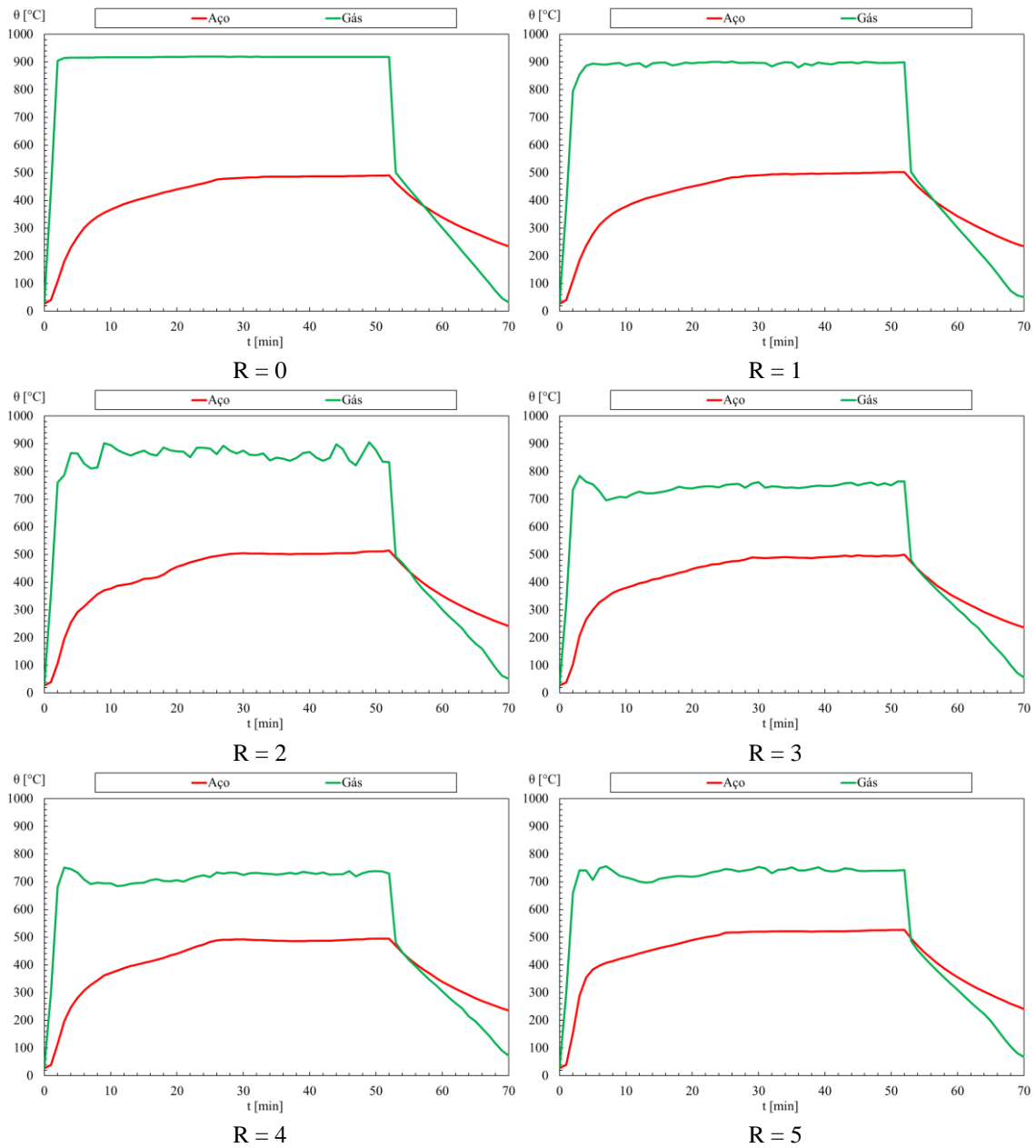


Figura 164 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 3.2- Perfil HE600A

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE600A, considerando as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$  m. Na Figura 165 para o compartimento C1 e na Figura 166 para o compartimento C2.

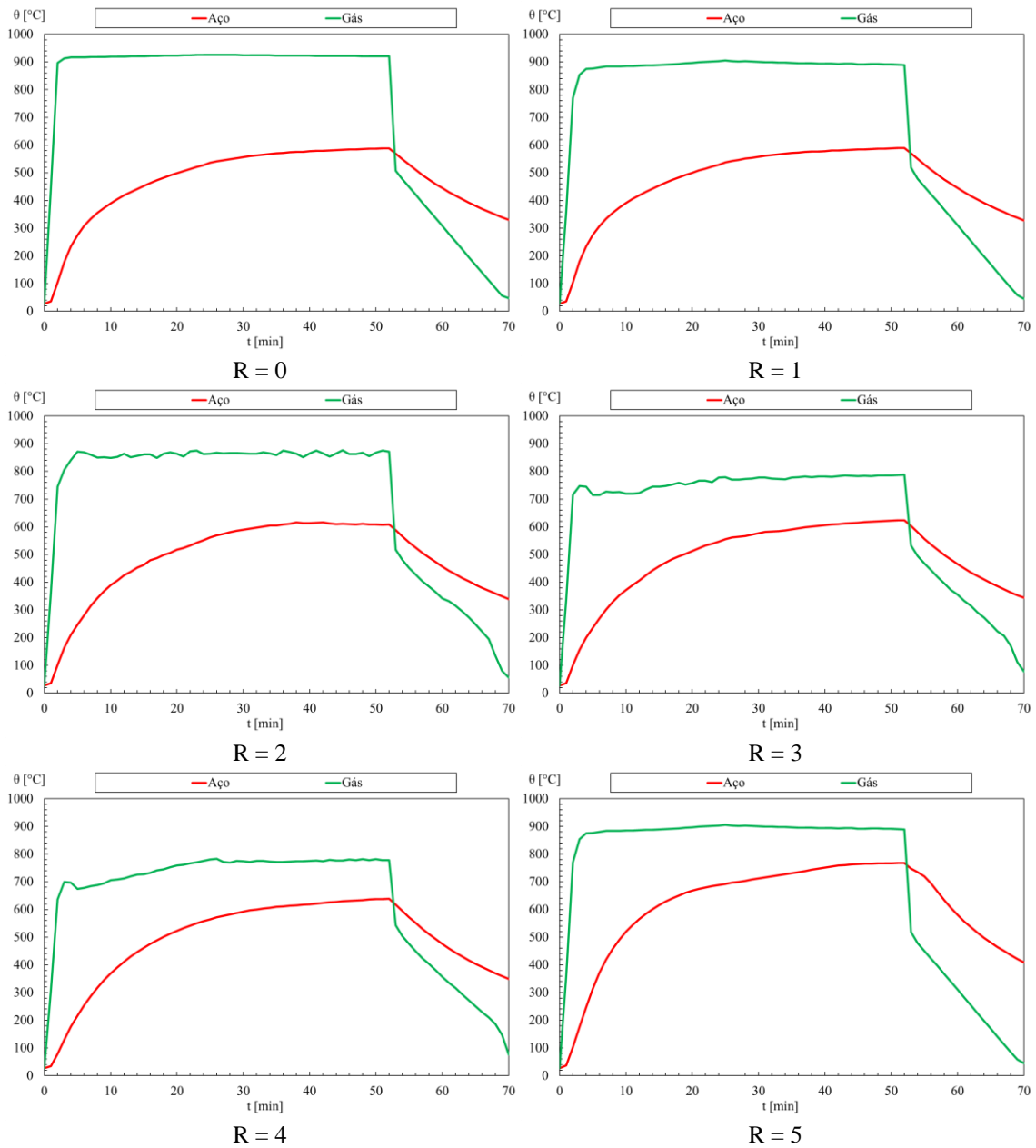


Figura 165 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

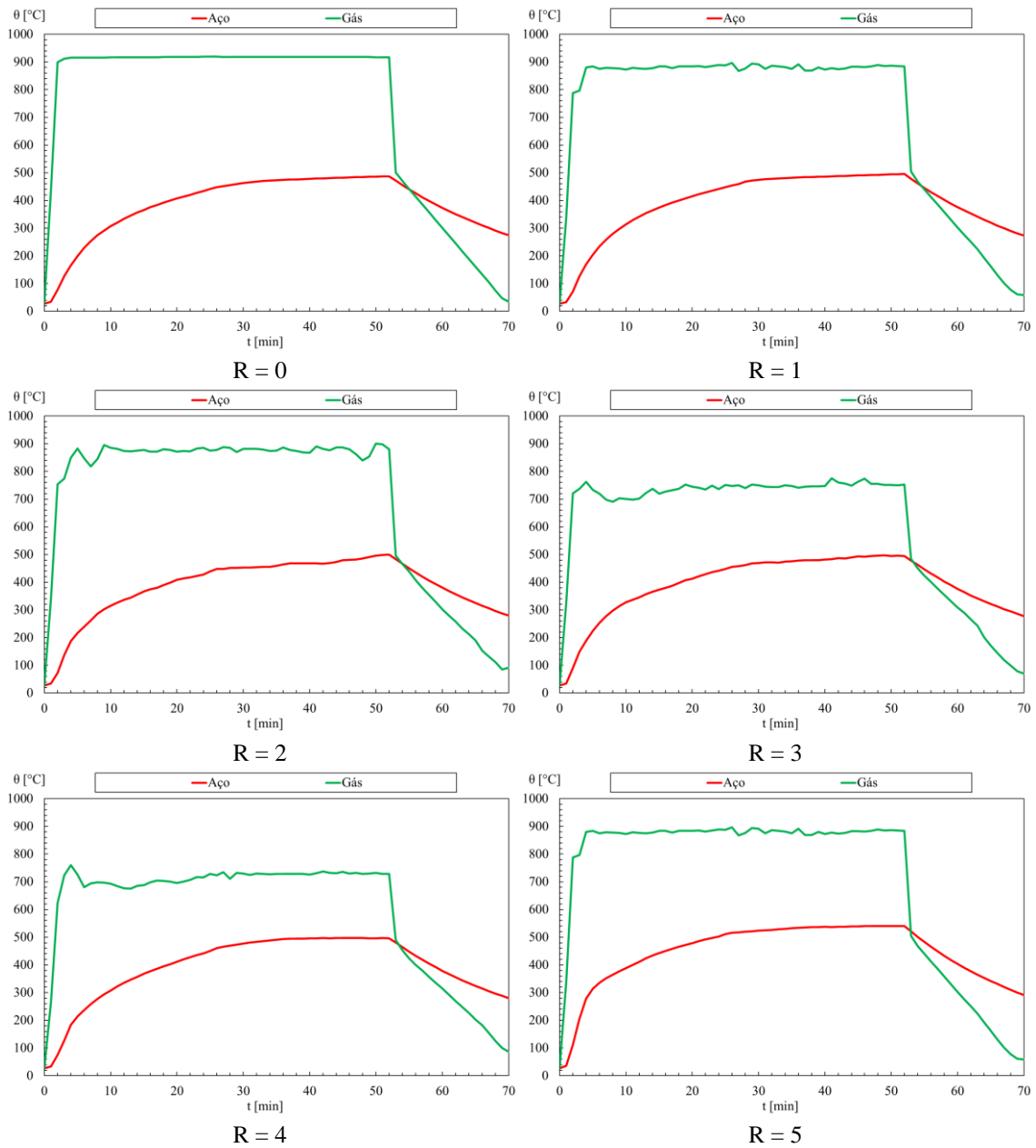


Figura 166 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

### 3.3- Perfil HE650A

Abaixo podem-se observar os resultados encontrados para a viga com perfil HE650A, considerando as posições relativas  $R = 0,1,2,3,4,5$ . Na Figura 167 para o compartimento C1 e na Figura 168 para o compartimento C2.

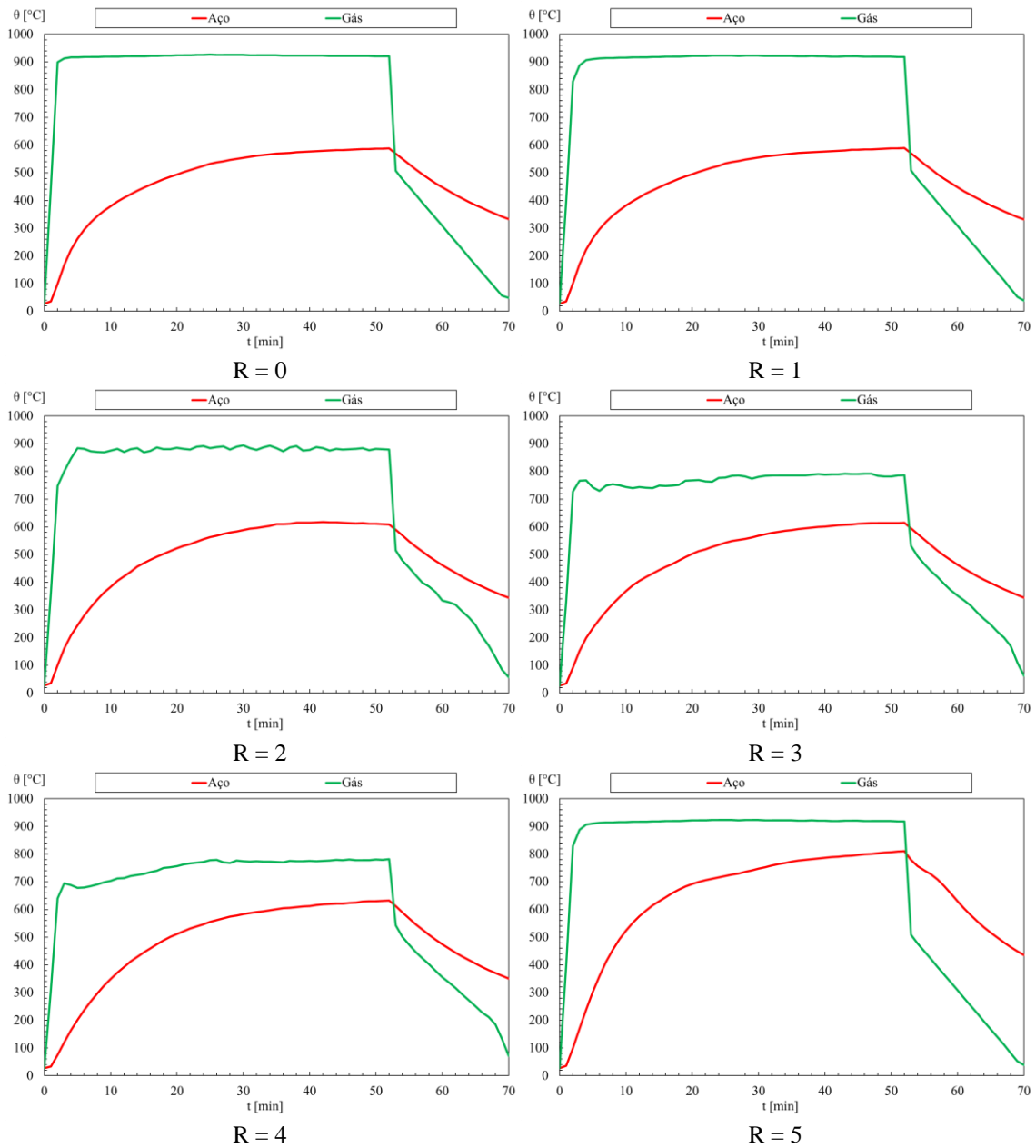


Figura 167 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.

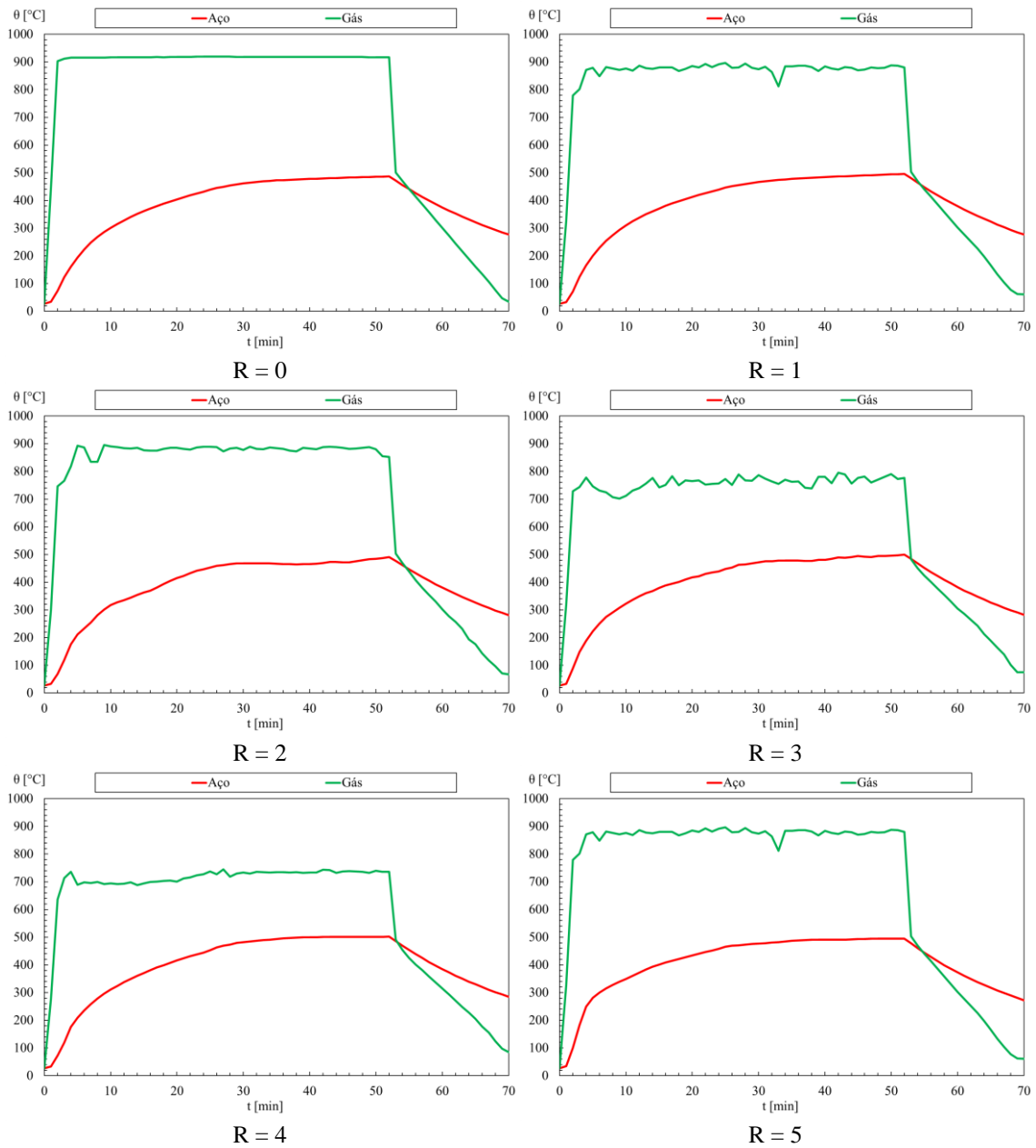


Figura 168 - Temperatura da chama para o gás e para a viga em aço.