

DINÂMICA DE INCÊNDIO EM COMPARTIMENTOS ABERTOS

Ketlen Possoli

Relatório Final da Dissertação apresentado 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 – Campus Pato Branco

Julho 2018

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

DINÂMICA DE INCÊNDIO EM COMPARTIMENTOS ABERTOS

Ketlen Possoli

Relatório Final da Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial
(ramo da Engenharia Mecânica)

Orientadores:

Prof. Dr. Paulo Alexandre Gonçalves Piloto (IPB)

Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Júnior (UTFPR)

Julho 2018

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Instituto Politécnico de Bragança por promoverem a mobilidade estudantil com o programa de Dupla Diplomação. Estendo meus agradecimentos ao Prof. Dr. Paulo Piloto pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho e ao Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Júnior por aceitar contribuir mesmo que a distância.

Sou grata a todos os amigos que me apoiaram durante a graduação, por todas as palavras de carinho e pelo tempo que estivemos juntos, terão para sempre um lugar guardado em meu coração.

Ao Pedro Henrique Lopes, por ter caminhado ao meu lado durante minha graduação. Obrigada pela sua paciência, compreensão e ajuda durante esse período desgastante para mim.

À Beatriz Buratto e à Paula Cechella Philippi, por serem anjos que cresceram ao meu lado e que me ajudaram a chegar até aqui. Agradeço também a Tia Marta e Tia Natália, minhas mães de coração, por tudo que me ensinaram e pelo carinho que me deram desde pequena.

À Karen, minha irmã e madrinha, obrigada por sempre se fazer presente e por me entender como ninguém mais.

Por último agradeço aos meus pais pelo incentivo recebidos durante toda minha vida acadêmica. Agradeço por sempre acreditarem no meu potencial e não medirem esforços quando o assunto é minha educação.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

ABSTRACT (EN)

With the aim to increase fire safety in open compartments, such as open car parks, some correlative models were used to test the ability to recover both dynamics and thermal characteristics of a ceiling-jet flow. The heat flow, coming from a burning vehicle, occurs when the fire plume impinges the ceiling and develops in the radial direction of the fire axis. Both temperature and velocity predictions are decisive for sprinklers positioning, fire alarms positions, detectors (heat, smoke) position and activation times. This investigation deals with a parametric analysis using different fire events (class of the vehicle) and two compartments. Some correlative formulations were used: Alpert, Cooper, Heskestad & Delichatsios and Motevalli & Marks. An advance calculation method (CFAST) based on a two-zone model formulation was used to compare the results, as well as the CFD software ANSYS Fluent, based on the finite volume method. A total of 16 simulation results were obtained taking into consideration 2 different heights for the compartment ($H=3\text{m}$ and $H=5\text{m}$), 4 different car classes (fire events), 6 radial positions (R) and two software (CFAST and ANSYS Fluent). The correlative model from Motevalli & Marks overestimates the dynamic characteristics in small compartments. The two-zone model overestimates the maximum temperature in the biggest compartment and the CFD results for temperature and velocity are always higher than the other calculation methods.

Key words: open car parks; localised fire, ceiling jet; correlative models; two zone models (CFAST); field models (ANSYS Fluent).

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

RESUMO (PT)

Com o objetivo de aumentar a segurança contra incêndios em compartimentos abertos, como estacionamentos abertos, alguns modelos correlativos foram usados para testar a capacidade de recuperar as características dinâmicas e térmicas de um fluxo de calor de jato de teto. O fluxo de calor, vindo de um veículo em chamas, ocorre quando a chama de fogo colide com o teto e se desenvolve na direção radial do eixo do fogo. Ambas previsões de temperatura e velocidade são decisivas para o posicionamento dos sprinklers, alarmes de incêndio, detectores (calor, fumaça) e tempos de ativação. Esta tese trata de uma análise paramétrica usando diferentes eventos de incêndio (classe do veículo) e dois compartimentos. Algumas formulações correlativas foram utilizadas: Alpert, Cooper, Heskestad & Delichatsios e Motevalli & Marks. Um método de cálculo avançado (CFAST) baseado em uma formulação de modelo de duas zonas foi usado para comparar os resultados, bem como o software ANSYS Fluent, baseado no método dos volumes finitos. Um total de 16 resultados de simulação foram obtidos considerando-se 2 alturas diferentes para o compartimento ($H = 3\text{m}$ e $H = 5\text{m}$), 4 classes de carros diferentes (eventos de fogo), 6 posições radiais (R) e dois programas de análise avançada (CFAST e ANSYS Fluent). O modelo correlativo de Motevalli & Marks superestima as características dinâmicas em pequenos compartimentos. O modelo de duas zonas superestima a temperatura máxima no compartimento maior e os resultados do modelo de campo para temperatura e velocidade são sempre mais altos do que os outros métodos de cálculo.

Palavras chave: compartimentos abertos; incêndio localizado; fluxo de jato de teto; modelos correlativos; modelo de duas zonas (CFAST); modelo de campo (ANSYS Fluent).

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
ABSTRACT (EN)	iii
RESUMO (PT)	v
NOMENCLATURA.....	xxi
1- INTRODUÇÃO	1
1.1- Objetivo.....	1
1.2- Estado da arte	1
1.3- Plano da tese.....	5
2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DE INCÊNDIO	7
2.1- Transferência de calor	7
2.2- Incêndio de jato	8
2.3- Chama	10
2.4- Cenários de fogo	13
2.5- Incêndios localizados	16
2.6- Taxa de liberação de calor (HRR).....	17
2.7- Definição de compartimento de fogo.....	19
2.7.1- Fases dos incêndios no compartimento.....	20
2.7.2- Características do compartimento de incêndio.....	21
2.8- Sistemas de detecção de incêndio	22
3- MODELOS CORRELATIVOS	23
3.1- Definição dos modelos correlativos	23
3.2- Correlações de Alpert.....	23
3.2.1- Velocidade e temperatura (correlação de 1972).....	24
3.2.2- Velocidade e temperatura (correlação de 2011).....	29
3.3- Correlação de Cooper.....	33
3.3.1- Velocidade e temperatura.....	33

3.4- Correlação de Heskestad e Delichatsios.....	37
3.4.1- Velocidade e temperatura.....	38
3.5- Correlação de Motevalli e Marks	42
3.5.1- Velocidade e temperatura.....	43
3.6- Comparação dos modelos correlativos.....	47
3.6.1- Velocidade máxima no compartimento 1.....	47
3.6.2- Velocidade máxima no compartimento 2.....	48
3.6.3- Temperatura máxima no compartimento 1	49
3.6.4- Temperatura máxima no compartimento 2	50
4- CFAST	53
4.1- Apresentação do CFAST.....	53
4.2- Modelo	54
4.2.1- Simulação do ambiente	54
4.2.2- Propriedades térmicas	54
4.2.3- Compartimento de incêndio	54
4.2.4- Abertura de parede	55
4.2.5- Tipo de incêndio.....	55
4.2.6- Alvos para medições de temperatura	55
4.2.7- Detectores de incêndio para medição da velocidade.....	55
4.2.8- Resultados	56
4.3- Comparação dos resultados.....	63
4.3.1- Velocidade máxima no compartimento 1.....	63
4.3.2- Velocidade máxima no compartimento 2.....	64
4.3.3- Temperatura máxima no compartimento 1	65
4.3.4- Temperatura máxima no compartimento 2	66
5- ANSYS Fluent	69
5.1- Equações.....	69

5.1.1- Equação de continuidade.....	69
5.1.2- Equação de Navier Stokes.....	70
5.1.3- Equação de conservação de energia.....	70
5.2- Modelo	71
5.2.1- Materiais.....	73
5.2.2- Condições de contorno	73
5.3- Resultados	75
5.3.1- Resultados de velocidade e temperatura das diferentes classes	75
5.3.2- Valores máximos para diferentes posições radiais.....	80
5.4 - Comparação dos resultados.....	81
5.4.1- Velocidade máxima no compartimento 1.....	81
5.4.2- Velocidade máxima no compartimento 2.....	83
5.4.3- Temperatura máxima no compartimento 1	84
5.4.4- Temperatura máxima no compartimento 2	85
6- CONCLUSÕES.....	87
REFERÊNCIAS	89
Anexo 1– Resultados dos Modelos Correlativo	95
1- Resultados de Alpert 1972	95
2- Resultados de Alpert 2011	95
3- Resultados de Cooper.....	96
4- Resultados de Heskestad e Delichatsios.....	97
5- Resultados de Motevalli e Marks	97
6– Comparação dos resultados de velocidade máxima	98
6.1– Compartimento 1	98
6.2– Compartimento 2	99
7– Comparação dos resultados de temperatura máxima	100
7.1– Compartimento 1	100

7.2– Compartimento 2	101
Anexo 2– Programa CFAST	103
1– Posição dos alvos e detectores de incêndio na simulação do CFAST.....	103
2– Teste de convergência	104
3– Resultados de temperatura e velocidade máxima obtidos no CFAST.....	104
4– Comparação dos resultados de velocidade máxima	105
4.1– Compartimento 1	105
4.2– Compartimento 2	106
5– Comparação dos resultados de temperatura máxima	107
5.1– Compartimento 1	108
5.2– Compartimento 2	109
Anexo 3– Programa ANSYS Fluent.....	111
1- Condições de contorno utilizadas no ANSYS Fluent	111
1.1- Classe 1	111
1.2- Classe 2	112
1.3- Classe 3	113
1.4- Classe 4 e 5.....	114
2– Teste de convergência	116
3– Verificação do tempo de teste com base no isolamento.....	116
4– Resultados de temperatura e velocidade máxima obtidos no ANSYS Fluent.....	117
5– Comparação dos resultados de velocidade máxima	118
5.1– Compartimento 1	118
5.2– Compartimento 2	119
6– Comparação dos resultados de temperatura máxima	120
6.1– Compartimento 1	120
6.2– Compartimento 2	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Incêndio de jato sob um teto não confinado [30].....	9
Figura 2. Três zonas de uma chama axisimétrica [2]	11
Figura 3. Incêndio no Liverpool Echo Arena [40]	14
Figura 4. Chama de fogo dianteiro e traseiro	14
Figura 5. Cenários de fogo [41].....	16
Figura 6. Modelo de fogo localizado para chamas que não afetam o teto [45].....	17
Figura 7. HRR para diferentes classes de carros	19
Figura 8. Fases de desenvolvimento do fogo [48].....	21
Figura 9. Vista frontal e lateral do compartimento 1.....	21
Figura 10. Vista frontal e lateral do compartimento 2.....	21
Figura 11. Propriedades do concreto	22
Figura 12. Velocidade perto do teto segundo correlação de Alpert de 1972 para compartimento 1	25
Figura 13. Temperatura perto do teto segundo correlação de Alpert de 1972 para compartimento 1	26
Figura 14. Velocidade perto do teto segundo correlação de Alpert de 1972 para compartimento 2.....	27
Figura 15. Temperatura perto do teto segundo correlação de Alpert de 1972 para compartimento 2.....	27
Figura 16. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação Alpert de 1972 para compartimento 1	28
Figura 17. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Alpert de 1972 para compartimento 1.....	28
Figura 18. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Alpert de 1972 para compartimento 2.....	28
Figura 19. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Alpert de 1972 para compartimento 2.....	28
Figura 20. Velocidade perto do teto segundo correlação de Alpert de 2011 para compartimento 1.....	29
Figura 21. Temperatura perto do teto segundo correlação de Alpert de 2011 para compartimento 1.....	30

Figura 22. Velocidade perto do teto segundo correlação de Alpert de 2011 para compartimento 2.....	31
Figura 23. Temperatura perto do teto segundo correlação de Alpert de 2011 para compartimento 2.....	31
Figura 24. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Alpert de 2011 para compartimento 1.....	32
Figura 25. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Alpert de 2011 para compartimento 1.....	32
Figura 26. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Alpert de 2011 para compartimento 2.....	32
Figura 27. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Alpert de 2011 para compartimento 2.....	32
Figura 28. Velocidade perto do teto segundo correlação de Cooper para compartimento 1	34
Figura 29. Temperatura perto do teto segundo correlação de Cooper para compartimento 1	34
Figura 30. Velocidade perto do teto segundo correlação de Cooper para compartimento 2	35
Figura 31. Temperatura perto do teto segundo correlação de Cooper para compartimento 2	35
Figura 32. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Cooper para compartimento 1	36
Figura 33. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Cooper para compartimento 1	36
Figura 34. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Cooper para compartimento 2.....	36
Figura 35. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Cooper para compartimento 2.....	36
Figura 36. Velocidade perto do teto segundo correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 1	38
Figura 37. Temperatura perto do teto segundo correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 1	39
Figura 38. Velocidade perto do teto segundo correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 2.....	40

Figura 39. Temperatura perto do teto segundo correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 2	40
Figura 40. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 1	41
Figura 41. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 1	41
Figura 42. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 2	41
Figura 43. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 2	41
Figura 44. Velocidade perto do teto segundo correlação de Motevalli e Marks para compartimento 1	43
Figura 45. Temperatura perto do teto segundo correlação de Motevalli e Marks para compartimento 1	44
Figura 46. Velocidade perto do teto segundo correlação de Motevalli e Marks para compartimento 2	45
Figura 47. Temperatura perto do teto segundo correlação de Motevalli e Marks para compartimento 2	45
Figura 48. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Motevalli e Marks para compartimento 1	46
Figura 49. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Motevalli e Marks para compartimento 2	46
Figura 50. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Motevalli e Marks para compartimento 2	46
Figura 51. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Motevalli e Marks para compartimento 2	46
Figura 52. Valores de velocidade máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 1	48
Figura 53. Valores de velocidade máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 2	49
Figura 54. Valores de temperatura máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 1	50
Figura 55. Valores de temperatura máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 2	51

Figura 56. Representação de um volume de controle em um modelo de duas camadas [53]	53
.....	
Figura 57. Compartimento 1 (H=3m).....	56
Figura 58. Compartimento 2 (H=5m).....	56
Figura 59. Resultados do CFAST para velocidade perto do teto para compartimento 1	57
Figura 60. Simulação do CFAST de velocidade máxima para compartimento 1	58
Figura 61. Resultados do CFAST para temperatura perto do teto para compartimento 1	58
.....	
Figura 62. Simulação do CFAST de temperatura máxima, para compartimento 1.....	59
Figura 63. Resultados do CFAST para velocidade perto do teto para compartimento 2	60
Figura 64. Simulação do CFAST de velocidades máximas para compartimento 2	60
Figura 65. Resultados do CFAST para temperatura perto do teto para compartimento 2	61
.....	
Figura 66. Simulação do CFAST de temperatura máxima para compartimento 2.....	61
Figura 67. Resultados do CFAST para velocidade máxima nas diferentes classes de	62
automóveis.....	
Figura 68. Resultados do CFAST para temperatura máxima nas diferentes classes de	62
automóveis.....	
Figura 69. Valores de velocidade máxima obtidos pelos modelos correlativos para	64
compartimento 1	
Figura 70. Valores de velocidade máxima obtidos pelos modelos correlativos para	65
compartimento 2.....	
Figura 71. Valores de temperatura máxima obtidos pelos modelos correlativos para	66
compartimento 1	
Figura 72. Valores de temperatura máxima obtidos pelos modelos correlativos para	67
compartimento 2.....	
Figura 73. Modelo e compartimento de incêndio.....	71
Figura 74. Compartimento 1 (H=3 m).....	72
Figura 75. Compartimento 2 (H=5 m).....	72
Figura 76. Propriedades do ar.....	73
Figura 77. O modelo de um estacionamento aberto	74
Figura 78. Velocidade para as classes de carros.....	74
Figura 79. Temperatura para as classes de carros	75

Figura 80. Resultados do ANSYS Fluent para velocidade perto do teto, para compartimento 1	76
Figura 81. Simulação do ANSYS Fluent de velocidade máxima no tempo igual a 1500 s, para compartimento 1	76
Figura 82. Resultados do ANSYS Fluent para temperatura perto do teto, para compartimento 1	77
Figura 83. Simulação do ANSYS Fluent de temperatura máxima no tempo igual a 1500 s, para compartimento 1.....	77
Figura 84. Resultados do ANSYS Fluent para velocidade perto do teto, para compartimento 2.....	78
Figura 85. Simulação do ANSYS Fluent de velocidade máxima no tempo igual a 1500 s, para compartimento 2.....	79
Figura 86. Resultados do ANSYS Fluent para temperatura perto do teto, para compartimento 2.....	79
Figura 87. Simulação do ANSYS Fluent de temperatura máxima no tempo igual a 1500 s, para compartimento 2.....	80
Figura 88. Resultados do ANSYS Fluent para velocidade máxima nas diferentes classes de automóveis.....	81
Figura 89. Resultados do ANSYS Fluent para temperatura máxima nas diferentes classes de automóveis.....	81
Figura 90. Valores de velocidade máximos obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 1	82
Figura 91. Valores de velocidade máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 2.....	84
Figura 92. Valores de temperatura máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 1	85
Figura 93. Valores de temperatura máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 2.....	86
Figura 94. Temperatura por tempo e Temperatura máxima por r/H da classe 1 para diferentes malhas	104
Figura 95. Velocidade por tempo e Velocidade máxima por r/H da classe 1 para diferentes malhas.....	104
Figura 96. Variação da temperatura no ponto escolhido no tempo para compartimento 1	116

Figura 97. Variação da temperatura no ponto escolhido no tempo para compartimento 2	116
Figura 98. Pontos selecionados no concreto dos compartimentos 1 e 2.....	116
Figura 99. Variação da temperatura no tempo dos 3 pontos para compartimento 1	117
Figura 100. Variação da temperatura no tempo dos 3 pontos para compartimento 2..	117

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Adaptada de McCaffrey [37]	13
Tabela 2. Adaptada de Collier [43]	15
Tabela 3. Medida aproximada de energia liberada ou gerados a partir de várias fontes, adaptada de Karlsson e Quintiere [25]	17
Tabela 4. HRR para diferentes classes de carros	18
Tabela 5. Propriedades térmicas do concreto e aço	54
Tabela 6. Valores máximos para a correlação de Alpert de 1972, compartimento 1	95
Tabela 7. Valores máximos para a correlação de Alpert de 1972, compartimento 2	95
Tabela 8. Valores máximos para a correlação de Alpert de 2011, compartimento 1	95
Tabela 9. Valores máximos para a correlação de Alpert de 2011, compartimento 2	96
Tabela 10. Valores máximos para a correlação de Cooper, compartimento 1	96
Tabela 11. Valores máximos para a correlação de Cooper, compartimento 2	96
Tabela 12. Valores máximos para a correlação de Heskestad e Delichatsios, compartimento 1	97
Tabela 13. Valores máximos para a correlação de Heskestad e Delichatsios, compartimento 2	97
Tabela 14. Valores máximos para a correlação de Motevalli e Marks, compartimento 1	97
Tabela 15. Valores máximos para a correlação de Motevalli e Marks, compartimento 2	98
Tabela 16. Comparação de velocidade máxima para classe 1	98
Tabela 17. Comparação de velocidade máxima para classe 2	98
Tabela 18. Comparação de velocidade máxima para classe 3	99
Tabela 19. Comparação de velocidade máxima para classe 4 e 5	99
Tabela 20. Comparação de velocidade máxima para classe 1	99
Tabela 21. Comparação de velocidade máxima para classe 2	99
Tabela 22. Comparação de velocidade máxima para classe 3	100
Tabela 23. Comparação de velocidade máxima para classe 4 e 5	100
Tabela 24. Comparação de temperatura máxima para classe 1	100
Tabela 25. Comparação de temperatura máxima para classe 2	101
Tabela 26. Comparação de temperatura máxima para classe 3	101
Tabela 27. Comparação de temperatura máxima para classe 4 e 5	101

Tabela 28. Comparação de temperatura máxima para classe 1	101
Tabela 29. Comparação de temperatura máxima para classe 2.....	102
Tabela 30. Comparação de temperatura máxima para classe 3	102
Tabela 31. Comparação de temperatura máxima para classe 4 e 5	102
Tabela 32. Alvos para o compartimento 1	103
Tabela 33. Alvos para o compartimento 2.....	103
Tabela 34. Detectores de incêndio para o compartimento 1.....	103
Tabela 35. Detectores de incêndio para o compartimento 2.....	103
Tabela 36. Valores máximos obtidos no CFAST, compartimento 1.....	105
Tabela 37. Valores máximos obtidos no CFAST, compartimento 2.....	105
Tabela 38. Comparação de velocidade máxima para classe 1.....	105
Tabela 39. Comparação de velocidade máxima para classe 2.....	106
Tabela 40. Comparação de velocidade máxima para classe 3.....	106
Tabela 41. Comparação de velocidade máxima para classes 4 e 5	106
Tabela 42. Comparação de velocidade máxima para classe 1.....	106
Tabela 43. Comparação de velocidade máxima para classe 2.....	107
Tabela 44. Comparação de velocidade máxima para classe 3.....	107
Tabela 45. Comparação de velocidade máxima para classes 4 e 5	107
Tabela 46. Comparação de temperatura máxima para classe 1	108
Tabela 47. Comparação de temperatura máxima para classe 2.....	108
Tabela 48. Comparação de temperatura máxima para classe 3	108
Tabela 49. Comparação de temperatura máxima classes 4 e 5	108
Tabela 50. Comparação de temperatura máxima para classe 1	109
Tabela 51. Comparação de temperatura máxima para classe 2.....	109
Tabela 52. Comparação de temperatura máxima para classe 3.....	109
Tabela 53. Comparação de temperatura máxima para classes 4 e 5.....	109
Tabela 54. Máxima temperatura e velocidade obtidos no ANSYS Fluent, compartimento 1	117
Tabela 55. Máxima temperatura e velocidade obtidos no ANSYS Fluent, compartimento 2	118
Tabela 56. Comparação de velocidade máxima para classe 1.....	118
Tabela 57. Comparação de velocidade máxima para classe 2.....	118
Tabela 58. Comparação de velocidade máxima para classe 3.....	119
Tabela 59. Comparação de velocidade máxima para classes 4 e 5	119

Tabela 60. Comparação de velocidade máxima para classe 1.....	119
Tabela 61. Comparação de velocidade máxima para classe 2.....	119
Tabela 62. Comparação de velocidade máxima para classe 3.....	120
Tabela 63. Comparação de velocidade máxima para classes 4 e 5.....	120
Tabela 64. Comparação de temperatura máxima para classe 1.....	120
Tabela 65. Comparação de temperatura máxima para classe 2.....	121
Tabela 66. Comparação de temperatura máxima para classe 3.....	121
Tabela 67. Comparação de temperatura máxima para classes 4 e 5.....	121
Tabela 68. Comparação de temperatura máxima para classe 1.....	121
Tabela 69. Comparação de temperatura máxima para classe 2.....	122
Tabela 70. Comparação de temperatura máxima para classe 3.....	122
Tabela 71. Comparação de temperatura máxima para classes 4 e 5.....	122

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

NOMENCLATURA

Letras minúsculas em latim

b	Raio da pluma [m]
c_p	Calor específico [kJ/(kg K)]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/(m ² K)]
l_V	Espessura de momento gaussiano [m]
l_t	Espessura térmica gaussiana [m]
\dot{m}_r	Fluxo de massa a uma distância r da linha central da chama [kg/s]
\dot{m}_p	Fluxo de massa da chama [kg/s]
q_x	Fluxo de calor por condução na direção x [W]
q_c	Fluxo de calor por convecção [W]
q_r	Fluxo de calor por radiação [W]
r	Distância radial de linha central da chama [m]
t	Tempo [min]
u_0	Velocidade da linha central [m/s ²]
$v_{x,y,z}$	Velocidade do fluido
z	Altura da chama [m]
z_0	Origem virtual [m]
z_t	Distância vertical medida a partir do teto [m]

Letras maiúsculas em latim

C_p	Calor específico
D	Diâmetro da fonte de combustível [m]
H	Altura do teto [m]
K	Condutividade térmica
L	Altura média da chama [m]
L_f	Comprimento da chama de um fogo localizado [m]
P	Perímetro do fogo [m]
Q_V	Fonte de calor volumétrica
\dot{Q}	Taxa de liberação de calor [kW]

\dot{Q}_c	Taxa de liberação de calor convectiva [kW]
R	Resistência distribuída
T	Termos de perda devido a viscosidade
T	Temperatura [°C]
T_∞	Temperatura ambiente [°C]
T_{ad}	Temperatura da superfície do teto para um teto adiabático [°C]
T_f	Temperatura do fluido [°C]
T_g	Temperatura do gás [°C]
T_i	Temperatura de superfície do corpo irradiando [°C]
T_{max}	Temperatura máxima [°C]
T_s	Temperatura de superfície [°C]
T_{up}	Temperatura da camada superior [°C]
ΔT	Diferença de temperatura [°C]
ΔT_{max}	Diferença de temperatura máxima [°C]
ΔT_0	Temperatura da linha central [°C]
V	Velocidade [m/s]
V_{max}	Velocidade máxima [m/s]
\mathbf{V}	Vetor velocidade

Letras gregas

∇	Operador nabla
ε	Emissividade
κ	Expoente das correlações da linha central
η	Expoente das correlações da linha central
μ_e	Viscosidade efetiva do fluido
λ	Condutividade térmica [W/(mK)]
ρ_∞	Densidade ambiente [kg/m ³]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [5,67 x 10 ⁻⁸ W/(m ² K ⁴)]

1- INTRODUÇÃO

A detecção rápida de um incêndio em um compartimento enquanto o fogo está suficientemente pequeno é uma das mais importantes situações da engenharia de segurança contra incêndios a considerar para evitar grandes acidentes. A velocidade e a temperatura dos gases desenvolvidas pelo fogo no compartimento são as duas características dinâmicas principais que devem ser levadas em consideração em eventos de incêndio. Essas previsões são decisivas para o posicionamento dos atuadores *sprinklers*, posição de alarmes de incêndio e posição de detectores (calor e fumaça).

1.1- Objetivo

O objetivo desta tese é avaliar a capacidade de diferentes modelos correlativos (Alpert, Cooper, Heskestad e Delichatsios, Motevalli e Marks) nas características dinâmicas e térmicas de um fluxo de calor de jato, desenvolvida no teto em dois compartimentos distintos. Para isso, foram utilizados dois programas, o CFAST, com método de cálculo baseado no modelo duas zonas, e ANSYS Fluent, baseado no método de volumes finitos. Quatro classes de carros em diferentes cenários de incêndio em estacionamento aberto foram consideradas para análise. Os resultados obtidos dão mais informações sobre o tempo de ativação dos detectores de incêndio, que deve ser reduzido para que o fogo seja suficientemente pequeno e fácil de ser controlado, e permitem avaliar a temperatura de incêndio perto dos elementos de suporte da estrutura.

1.2- Estado da arte

No ano de 1972, Ronald L. Alpert [1] desenvolveu correlações sobre a velocidade máxima do gás e a temperatura máxima no incêndio de jato induzido por incêndios de grande escala. As correlações se baseiam na altura do teto acima da superfície superior do combustível e na taxa real de liberação de calor de fogo.

Em 1979, Gunnar Heskestad e Michael A. Delichatsios [2] realizaram um estudo sobre a modelagem física do ambiente provocado por um incêndio em um recinto. Para isso foram propostos três incêndios em madeira com diferentes taxas de crescimento de fogo combinados com três alturas de teto distintas, totalizando nove configurações

experimentais. Assim, foi possível estabelecer expressões analíticas para temperatura e velocidade não-dimensionais. Outra descoberta importante foi que, independentemente de taxa de crescimento de incêndio e tempo de ignição, a velocidade local do gás na camada mais quente pode ser relacionada diretamente com o aumento local de temperatura e com a altura do teto.

No ano de 1980, Vytenis Babrauskas [3] apresentou um cálculo aproximado do comprimento de chama quando parte do fluxo de chama se desenvolve ao longo do teto. Quatro geometrias foram tratadas (teto ilimitado, chama próxima ao canto, chama no canto e corredor unidirecional) e para calcular o comprimento da chama do teto foi assumido o pressuposto de que o ar total arrastado até a ponta da chama é o mesmo para o fluxo do teto e fogo livre.

Em 1983, Gunnar Heskestad [4] propôs um modelo para correlacionar medidas de origens virtuais de chama de incêndio. O modelo é consistente com a teoria da chama e mostra que correlaciona bem as determinações disponíveis de origens virtuais. As relações aparentam ser válidas mesmo nas regiões flamejantes de chamas.

No ano de 1985, David D. Evans [5] apresentou um método generalizado para determinar o tempo de resposta para *sprinklers* acionados termicamente instalados perto do teto de compartimentos grandes e pequenos. Para tal, uma fonte de substituição para o fogo real foi calculada com intuito de explicar os efeitos de uma camada de gás quente na parte superior do recinto. A resposta dos atuadores *sprinklers* também foi calculada para o caso de um teto não confinado.

O estudo de L. Y. Cooper e A. Woodhouse [6] no ano de 1986 reavaliou os dados existentes de transferência de calor convectivo de jatos flutuantes para tetos não confinados e desenvolveu uma estimativa da temperatura de superfície para um teto adiabático que não depende da temperatura de superfície para teto adiabático. Os resultados obtidos com a nova formulação confirmam as fórmulas anteriores e aumentam o seu alcance de aplicação para $0 \leq r/H \leq 2,2$, onde r é a distância radial da chama e H é a distância da fonte ao teto da chama.

Nesse mesmo ano, Beyler [7] apresenta e revisa um compilado de expressões que descrevem os incêndios de jato de teto. Essas expressões são usadas para prever a transferência de calor convectivo e a taxa de desenvolvimento da combustão em um incêndio em compartimento.

Em 1987, L.Y. Cooper e D. W. Stroup [8] desenvolveram um procedimento para calcular a resposta térmica de tetos não confinados a incêndios crescentes. O

procedimento usa um algoritmo desenvolvido anteriormente e leva em consideração a transferência de calor devido a radiação da zona de combustão para a superfície do teto. Esse algoritmo foi usado para prever a resposta de uma variedade de construções de tetos para diferentes cenários de incêndio.

No ano de 1991, Vahid Motevalli e Colin H. Marks [9] obtiveram medições detalhadas de velocidade e temperatura para jatos de teto não confinados em condições transientes e estacionárias. Através de incêndios de pequena dimensão (0,5 a 2,0 kW) produzidos com um queimador de metano-ar pré-misturado foi possível descrever correlações empíricas para os padrões de temperatura e velocidade do incêndio de jato estável. A temperatura máxima não pode ser medida em função das alturas de fogo ao teto para grandes distâncias radiais.

Em 1993, G. Heskestad & T. Hamada [10] apresentaram medidas de temperatura em jatos de teto produzidos por incêndios de grande dimensão, turbulentos e estáveis, que incidem sobre tetos horizontais planos. A razão da altura da chama na ausência de um teto até a altura do teto variou de aproximadamente 0,3 a 3.

Nesse mesmo ano, L. Cooper [11] desenvolveu um modelo capaz de prever a taxa instantânea de transferência de calor convectivo de gases de incêndio provenientes de pneus para a superfície de teto em um recinto, assim como a distribuição de velocidade e temperatura no jato do teto.

Em 2001, D. Joyeux *et al.* [12] realizou um projeto de pesquisa baseado em estatística no qual afirma que aproximadamente 98% dos incêndios estudados foram restritos a menos de quatro carros. Desses incêndios, quatro carros estavam queimando em apenas dois casos, enquanto um incêndio envolveu cinco carros e dois incêndios envolveram sete carros.

Em 2006, W. G. Weng e Y. Hasemi [13] desenvolveram um modelo para calcular a resposta térmica de um teto não confinado, a partir de uma chama forçada de difusão flutuante. Este modelo usa um algoritmo para condução de calor no material do teto e considera a transferência de calor devido à radiação da fonte de incêndio para a superfície do teto.

No ano de 2008, Vahid Motevalli e Zheng P. Yuan [14] apresentaram perfis de temperatura de jatos de teto para tetos com vigas horizontais, tetos não confinados em grandes espaços ou a longos recintos em que as paredes de extremidade estão muito distantes. A correlação desenvolvida se baseia na profundidade da viga até a altura do teto e os dados foram obtidos a partir de experiências em escala de fogo não dimensionais

(variando de 0,0024 a 0,035), correspondendo a incêndios entre 38 kW a 560 kW em uma sala de 3,0 m de altura.

Em 2010, Oka *et al.* [15] utilizaram uma abordagem experimental para esclarecer o efeito do ângulo de inclinação do teto na distribuição da temperatura ao longo da parte mais íngreme na direção ascendente, distribuição horizontal da temperatura na direção da espessura e a distância de inversão da velocidade na direção descendente.

Em 2013, Johansson *et al.* [16] fez 90 simulações numéricas para avaliar as correlações existentes e demonstrar como as simulações computacionais podem ser utilizadas como complemento das experiências reais de incêndio na pesquisa científica. A avaliação final da pesquisa indica que as correlações existentes darão uma boa estimativa da temperatura média em um incêndio de jato.

No ano de 2014, Oka *et al.* [17] realizou teste de incêndios de jato em grande escala com um teto plano e não confinado. Através da medida da concentração de dióxido de carbono foi estimada a taxa de fluxo de massa de incêndio de jato que se espalhou na direção radial. Fórmulas empíricas foram desenvolvidas e demonstram a dependência da concentração de dióxido de carbono com a distância radial. Também foi descrita a característica do coeficiente de arrasto do incêndio de jato.

Em 2011, Ronald L. Alpert [18] fez a revisão das suas equações utilizando o conhecimento de origem de chama virtual e das novas correlações que foram desenvolvidas desde 1972. Dessa vez, as correlações foram baseadas na altura do teto acima da origem virtual e na taxa de liberação de calor convectiva.

No ano de 2015, Johansson *et al.* [19] realizaram 90 simulações no programa Fire Dynamics Simulator (FDS) para demonstrar que as simulações em computadores poderiam ser usadas como complemento das experiências reais de incêndio na pesquisa científica. Os resultados indicaram que as correlações existentes garantem uma boa estimativa da temperatura média de um incêndio de jato. Foi verificado que as correlações não fornecem uma boa estimativa do excesso de temperatura máxima, portanto uma nova correlação foi desenvolvida com esse intuito.

Nesse mesmo ano, Zhao *et al.* [20] desenvolveram e melhoraram um modelo simplificado para um fluxo de incêndio de jato formado em corredores. As previsões teóricas foram validadas por uma série de experiências em pequena escala e simulações numéricas, sendo que na região de espalhamento radial as equações de Alpert de 1972 foram utilizadas com solução simplificada.

Em 2016, Oka *et al.* [21] apresentaram correlações para a variação na espessura do incêndio de jato ao longo do eixo do túnel com auxílio de uma abordagem teórica. Foi definido que a espessura do jato de teto é a distância do teto do túnel até o ponto em que a temperatura e/ou velocidade caíram para metade dos seus valores máximos.

No ano de 2017, Zhang *et al.* [22] investigaram experimentalmente e teoricamente a temperatura máxima da chama sob um teto não confinado com diferentes ângulos de inclinação induzidos por fontes de fogo retangulares. Os resultados experimentais mostram que o aumento da temperatura é proporcional ao aumento do ângulo de inclinação do teto quando outras condições da experiência permanecem inalteradas, para um determinado cenário de incêndio.

No mesmo ano, Hidalgo *et al.* [23] conduziram um total de doze testes experimentais, dois usando madeira como fonte combustível e dez usando queimadores de gás, variando sistematicamente as características de desenvolvimento e ventilação do fogo. A série experimental foi executada para gerar um conjunto abrangente de dados com intuito de caracterizar incêndios em grandes espaços abertos, típicos das infraestruturas contemporâneas.

Os resultados dessas investigações têm avançado consideravelmente nos últimos anos juntamente com a compreensão dos fenômenos de fogo, sendo possível melhorar sistemas de proteção contra incêndio. Os estudos de simulação computacional e ensaios experimentais descritos acima proporcionaram o entendimento necessário para prever comportamentos do fogo baseados em correlações.

1.3- Plano da tese

No capítulo 1 foram apresentados a introdução e estado da arte. Também foi definido o objetivo da tese.

No capítulo 2 será apresentado a definição dos cenários de fogo, utilizando um incêndio de um carro em um compartimento aberto (parque de estacionamento). As diferentes classes de veículos serão apresentadas, assim como os resultados da taxa de liberação de calor (HRR) para cada classe. Os princípios básicos da transferência de calor, detecção de incêndio e a definição de incêndio de jato, chama, incêndios localizados, compartimento de fogo e evento de fogo também serão apresentados.

No capítulo 3 serão apresentados os diferentes modelos correlativos (Alpert, Cooper, Heskestad e Delichatsios e Motevalli) para estimar a temperatura e velocidade

máximas perto do teto. Os resultados são comparados para os diferentes eventos de fogo e compartimentos de incêndio.

O capítulo 4 apresentará o programa CFAST, assim como uma discussão de resultados para a temperatura máxima e velocidade máxima desenvolvida pela simulação em comparação com os resultados dos modelos correlativos.

O capítulo 5 apresentará o programa ANSYS Fluent. Vários cenários de incêndio serão simulados no programa e serão feitas comparações com os modelos correlativos.

No capítulo 6 está presente a conclusão desta pesquisa.

2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DE INCÊNDIO

2.1- Transferência de calor

Transferência de calor é um processo no qual a energia é transferida entre dois corpos diferentes devido a uma diferença de temperatura. Existem 3 mecanismos pelo qual a energia é transferida: radiação, convecção e condução [24]. Os livros clássicos de transferência de calor fornecem diversas expressões para calcular o fluxo de calor entre dois corpos, sendo que essas expressões normalmente são alcançadas utilizando o balanço energético [25].

No caso de um incêndio em um recinto, à medida que a camada quente desce e aumenta a temperatura, os processos de transferência de calor são aumentados. O calor é transferido por radiação e convecção da camada de gás quente para o teto e para as paredes. O calor da camada quente também é irradiado para o chão e as paredes inferiores, e parte do calor será absorvido pelo ar na camada inferior [25].

A condução ocorre quando há transferência de energia de partículas energéticas para as partículas menos energéticas que o cercam. A energia propaga-se em virtude da agitação molecular e essa transferência de energia é quantificada pela Lei de Fourier [24, 26] mostrada abaixo:

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde q_x é o fluxo de calor por condução na direção x. A constante de proporcionalidade é uma propriedade física do material designada condutividade térmica (λ). Se o material possuir uma condutividade térmica elevada, diz-se que o material é um bom meio de propagação de calor, um bom condutor. Se a condutividade térmica é baixa, o material é um péssimo meio de propagação de calor (isolante). Em geral, a condutividade térmica dos gases é menor do que a dos líquidos e esta é menor que a dos sólidos. [27, 26]

A transferência de calor por convecção é a energia que é transferida entre um sólido e um fluido em movimento, cada um a temperaturas diferentes. A taxa de ocorrência desta troca de energia é dada pela lei de refrigeração de Newton, mostrada na equação seguinte [24, 26]:

$$q_c = h(T_s - T_f) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde o fluxo de calor por convecção é dado por q_c , h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, T_s é a temperatura de superfície e T_f é a temperatura do fluido. O coeficiente de transferência de calor por convecção (h) depende das condições na camada limite, as quais são influenciadas pelas propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido, pela natureza do escoamento do fluido e pela geometria da superfície [26].

Em função da classificação da natureza do escoamento do fluido, a transferência de calor por convecção pode ser definida em: convecção forçada, convecção natural ou livre e uma combinação das duas. A convecção é dita forçada quando o escoamento é causado por meios externos. No caso de convecção livre ou natural, o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo causadas por diferenças de densidades devido às variações de temperatura do fluido. [26]

A radiação se refere à transferência de energia através do espaço por ondas eletromagnéticas. Quando algo aparece no caminho da radiação, ela poderá ser transmitida, refletida ou absorvida. Apenas a energia absorvida é tratada como calor [28]. Esta forma de transferência de energia é exibida por todos os corpos e não requer nenhum meio para que o calor seja transferido. A lei Stefan-Boltzmann dita a quantidade de energia que pode ser irradiada por uma superfície [24]:

$$q_r = \varepsilon \sigma T_i^4 \quad \text{Eq. 3}$$

Onde q_r é o fluxo de calor por radiação, ε representa a emissividade, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T_i é a temperatura de superfície do corpo irradiando. A emissividade tem valores no intervalo de $0 \leq \varepsilon \leq 1$ e fornece uma medida da eficiência na qual uma superfície emite energia em relação ao corpo negro. Essa propriedade radiante depende fortemente do material da superfície e de seu acabamento [26].

2.2- Incêndio de jato

A maioria dos detectores de incêndio são projetados para operar dentro do incêndio de jato, de forma que é importante compreender as características do fluxo desse

incêndio. Yasushi Oka e Masaki Ando [29] afirmam que o aumento da temperatura e a concentração de fumaça do incêndio de jato são utilizadas para iniciar a ação de combate a incêndio ou a evacuação.

Segundo Björn Karlsson e James G. Quintiere [25], o incêndio de jato ocorre “quando o fluxo da chama invade o teto, os gases se espalham por ele com um jato circular impulsionado por momento”. Conforme David D. Evans [30], o incêndio de jato surge da região de impacto da chama no teto, fluindo para longe da origem do fogo. A camada arrasta o ar do compartimento no limite inferior e, à medida que os gases quentes se deslocam através do teto, a parte adjacente à superfície do teto é aquecida por transferência de calor, ver Figura 1.

A velocidade máxima em um incêndio de jato ocorre dentro de 1% da distância do teto para a fonte de fogo [1]. Paredes próximas do fogo afetam a velocidade do incêndio de jato, de forma que os incêndios de jato em túneis são completamente diferentes dos incêndios em recintos abertos [30].

A máxima temperatura também ocorre dentro de 1% da distância do teto para a fonte de fogo [1]. Em um fogo de túnel ventilado, a posição da temperatura máxima do gás do teto é um parâmetro chave para prever a ativação de um sistema de detecção e *sprinklers*. Também pode ser aplicado para prever a localização do ponto de impacto e estimar ainda mais o alcance dos danos na estrutura [31].

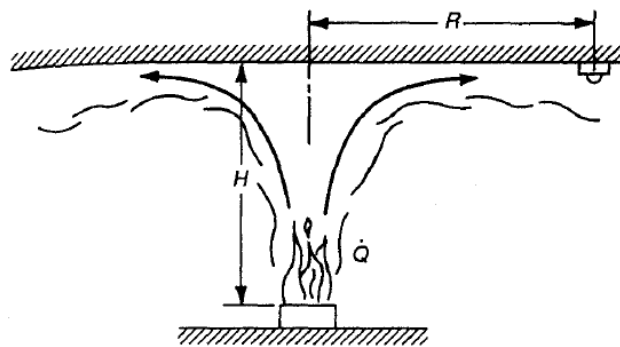


Figura 1. Incêndio de jato sob um teto não confinado [30]

Ingason et al. [32] investigaram a radiação de um incêndio de jato na estrutura de um túnel de Runehemar. Na região vizinha ao fogo, a radiação é a principal fonte de transferência de calor. O fluxo de calor incidente representa a intensidade da radiação que incide nos arredores do fogo. A radiação direta da chama para os objetos em proximidade

do incêndio deve ser investigada minuciosamente, já que o fogo que se espalha para os objetos ou veículos vizinhos resulta, principalmente, dessa radiação [33, 32].

O conhecimento sobre a taxa de fluxo de um incêndio de jato em um grande espaço é importante para prever o comportamento da fumaça, determinar equipamentos de controle de fumaça adequados e projetar as condições de operação nos estágios iniciais de um incêndio [17].

O incêndio de jato é considerado uma camada homogênea de gases que se espalha radialmente sob o teto do compartimento a partir da linha central da chama. Supondo que não há perdas de calor devido à radiação ou à convecção do incêndio de jato, a taxa de fluxo de energia nos gases pode ser expressa pela Eq. 4 [16]:

$$\dot{Q} = \dot{m}_r c_p (T_g - T_\infty) \quad \text{Eq. 4}$$

Onde, \dot{Q} representa a liberação de calor do fogo, \dot{m}_r o fluxo de massa a uma distância r da linha central da chama (dependente da temperatura), c_p o calor específico e a diferença entre a temperatura do gás e a temperatura ambiente é dada por $T_g - T_\infty$.

2.3- Chama

A chama mais usada na engenharia de segurança contra incêndio é chama axisimétrica flutuante, causada por uma chama de difusão formada acima do combustível de queima. Supõe-se que exista um eixo de simetria ao longo da linha central vertical da pluma e o ar é arrastado horizontalmente de todas as direções [25].

A velocidade na qual os gases dentro dos limites da chama se movem para cima, a uma certa altura acima da fonte de combustível é denominada velocidade da chama. A temperatura da chama é definida como a temperatura dos gases dentro dos limites da chama. Para chamas axisimétricas, independente da altura, a temperatura e a velocidade mais alta está na linha central da chama, diminuindo em direção à borda da chama [25].

A chama de incêndio axisimétrica é convencionalmente dividida nas três zonas, como mostrado na Figura 2. Na zona de chamas contínua, a velocidade é próxima de zero na base e aumenta com a altura. Nessa primeira zona ocorrem as reações químicas e a liberação de calor, que induz grande aumento na velocidade e temperatura do gás nesta região. Na zona de chamas intermitentes, a velocidade é relativamente constante e na zona de chamas flutuantes a velocidade diminui com a altura [34, 25].

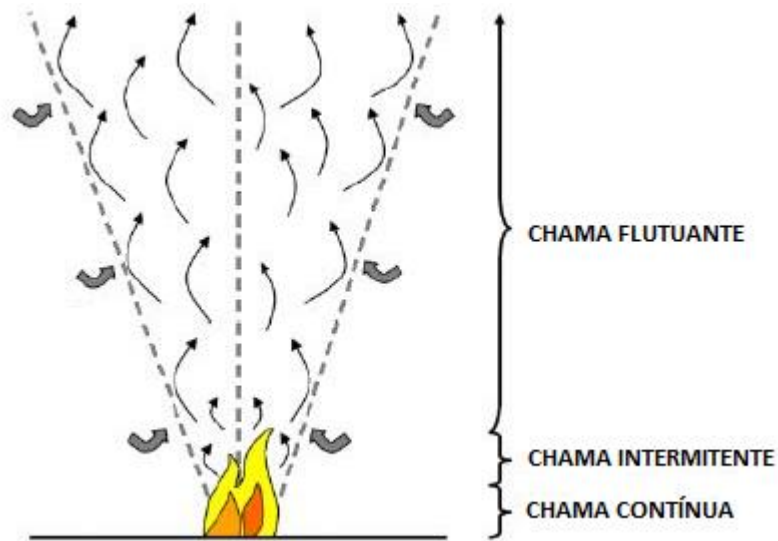


Figura 2. Três zonas de uma chama axisimétrica [2]

Zukoski *et al.* [35] usou a teoria da chama ideal para propor a seguinte equação de fluxo de massa da chama:

$$\dot{m}_p = 0,21 \left(\frac{\rho_\infty^2 g}{c_p T_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde a densidade do ar ambiente é dada por ρ_∞ , o c_p representa o calor específico a pressão constante, o \dot{Q} é a taxa de liberação de calor, T_∞ representa a temperatura ambiente do ar e o z a altura da chama.

A chama proposta por Heskestad [36] tem uma origem virtual (z_0) que depende do diâmetro da fonte de fogo e da energia total liberada. A origem virtual é dada por:

$$z_0 = 0,083 \dot{Q}^{2/5} - 1,02D \quad \text{Eq. 6}$$

Na qual D representa o diâmetro da fonte de combustível. O valor de z_0 pode ser negativo e ficar abaixo da fonte de combustível, indicando que a área da fonte de combustível é grande em comparação com a energia que está sendo liberada sobre essa área. Para fontes de incêndio onde o combustível libera alta energia em uma área pequena, z_0 pode ser positivo [25].

A taxa de liberação total de calor, \dot{Q} , é usada ao calcular a altura média da chama e a posição da origem virtual. Porém, ao estimar outras propriedades da pluma devemos usar a taxa de liberação de calor convectiva, \dot{Q}_c , já que esta é a parte da taxa de liberação de calor que causa a flutuabilidade. A taxa de liberação de calor convectiva está frequentemente no intervalo $\dot{Q}_c = 0.6\dot{Q}$ a $\dot{Q}_c = 0.8\dot{Q}$ [25].

Heskestad [36] examinou dados experimentais e descobriu que o raio da pluma (b), a temperatura da linha central (ΔT_0) e a velocidade da linha central (u_0) obedecem às seguintes relações, em unidades SI, válidas acima da altura média da chama:

$$b = 0,12 \left(\frac{T_0}{T_\infty} \right)^{1/2} (z - z_0) \quad \text{Eq. 7}$$

$$\Delta T_0 = 9,1 \left(\frac{T_\infty}{g c_p^2 \rho_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \quad \text{Eq. 8}$$

$$u_0 = 3,4 \left(\frac{g}{c_p T_\infty \rho_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{-1/3} \quad \text{Eq. 9}$$

A altura média da chama (L) é obtida por:

$$L = 0,235 \dot{Q}^{2/5} - 1,02D \quad \text{Eq. 10}$$

Para $z > L$, isto é, o fluxo de massa da chama acima da altura da chama é dado pela equação:

$$\dot{m}_p = 0,071 \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{5/3} + 1,92 \times 10^{-3} \dot{Q}_c \quad \text{Eq. 11}$$

Para $z < L$, ou seja, a taxa de fluxo de massa da chama abaixo da altura da chama,

$$\dot{m}_p = 0,0056 \dot{Q}_c \frac{z}{L} \quad \text{Eq. 12}$$

Com dados experimentais e análise dimensional, McCaffrey [37] encontrou relações de chama para velocidade e temperatura ascendentes.

$$\Delta T_0 = \left(\frac{\kappa}{0,9\sqrt{2g}} \right)^2 \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{2\eta-1} T_\infty \quad \text{Eq. 13}$$

$$u_0 = \kappa \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^\eta \dot{Q}^{1/2} \quad \text{Eq. 14}$$

A chama de McCaffrey, assim como as outras duas apresentadas têm propriedades independentes do combustível, dependendo apenas da liberação de energia. Ele dividiu a chama em três regiões, a região de chamas contínua, a região intermitente e flutuante. As constantes η e κ variam dependendo das três regiões, conforme Tabela 1 [37].

Tabela 1. Adaptada de McCaffrey [37]

	κ	η	$z/\dot{Q}^{2/5}$
Flutuante	6,8	1/2	<0,08
Intermitente	1,9	0	0,08-0,2
Contínua	1,1	-1/3	>0,2

Thomas *et al.* [38] descobriu que na região de chama contínua, a taxa de fluxo de massa da chama não depende da taxa de liberação de calor e sim do perímetro do fogo (P) e da altura acima da fonte de fogo (z), conforme equação:

$$\dot{m}_p = 0,188Pz^{3/2} \quad \text{Eq. 15}$$

Isto foi considerado particularmente válido para incêndios onde a altura média da chama é consideravelmente menor do que o diâmetro. A forma da chama nesse caso não se supõe mais cônica, mas sim cilíndrica. Isso é típico para incêndios maiores, onde a altura da chama tende a ser menor do que o diâmetro do fogo [25].

2.4- Cenários de fogo

Incêndios em parques de estacionamento tem sido um grande problema para edifícios, veículos e humanos, porém poucos eventos em parques de estacionamento abertos foram relatados. Um estacionamento pode ser considerado aberto se as áreas de ventilação nas paredes situadas em pelo menos duas fachadas opostas, forem no mínimo igual a 1/3 da superfície total de todas as paredes e devem corresponder a pelo menos 5 % da área do chão de um nível de estacionamento [39].

O número de veículos envolvidos em incêndios em estacionamentos abertos normalmente varia de 0 a 3 e em 30 % dos casos os incêndios não são causados pelos carros, mas sim por papéis, lixo e outros materiais combustíveis [12]. Contradizendo as estatísticas, no dia 1 de janeiro de 2018, no Liverpool Echo Arena, 1400 carros foram destruídos devido a um grande evento de incêndio. O incêndio atingiu temperaturas

próximas de 1000 °C e o prédio apresenta um enorme nível de dano em lajes e outros elementos estruturais, ver Figura 3.



Figura 3. Incêndio no Liverpool Echo Arena [40]

Quando um carro se incendia, as chamas são normalmente divididas em duas partes: chama de fogo dianteiro e a chama de fogo traseira, conforme Figura 4. A distância entre as duas chamas é de, aproximadamente, 2 m.

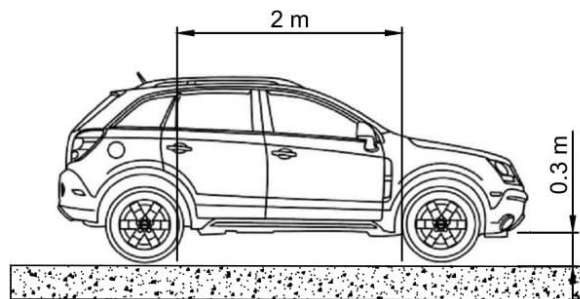


Figura 4. Chama de fogo dianteiro e traseiro

Os cenários de fogo descrevem as posições dos veículos dentro de um estacionamento e devem sempre representar a posição mais desfavorável, a pior hipótese. Os carros utilizados nos cenários de fogo são classificados de acordo com o potencial calorífico (energia de combustão) [41]. Schleich *et al.* [42], classificou os carros feitos em 1996 em 5 categorias mostradas na Tabela 2. A energia liberada foi baseada na queima completo de um carro com um tanque de combustível cheio.

Tabela 2. Adaptada de Collier [43]

Classe	Perda de massa [kg]	Energia Liberada [MJ]	Massa do carro [kg]
1	200	6000	850
2	250	7500	1000
3	320	9500	1250
4	400	12000	1400
5	400	12000	1400

Numa análise estatística, feita no estudo de Schleich et al. [42], 90 % dos veículos envolvidos em incêndios são classificados como classe 1, 2 ou 3. O INERI (*Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques*) recomenda que devem ser utilizados os cenários de incêndio com carros da classe 3 para avaliar a estabilidade estrutural do estacionamento sob incêndio e a resistência ao fogo da estrutura [41].

A ECCS – *European Convention for Construction Steelwork* recomenda dois cenários de incêndio. O primeiro cenário implica um veículo queimando sob o meio de uma viga. O local corresponde a posição máxima de flexão, portanto, a situação mais crítica para as vigas. O segundo cenário é o evento de fogo mais perigoso para as colunas, dois carros em chamas, um de cada lado da coluna, sendo que o tempo de ignição do primeiro carro para o segundo é de 15 minutos [39].

A INERI define 3 outros cenários: o cenário 1 do ECCS, mas com um veículo comercial sob a viga; um cenário envolvendo sete carros classe 3 (Figura 5, cenário 3) e um cenário envolvendo quatro carros classe 3 estacionados face a face (Figura 5, cenário 4). De acordo com o INERI o tempo de propagação do fogo de um veículo para outro é de 12 minutos, contradizendo documento da ECCS que recomendou um tempo igual a 15 minutos [41].

Outro cenário já considerado pela CTICM (*Centre Technique Industriel de la Construction Métallique*) é o cenário 5: três carros classe 3, estacionados lado a lado. De acordo com a mesma fonte estatística, um cenário de 3 carros de classe 3 envolvido em um incêndio é um cenário de envolve de cerca de 98,7% de todo o cenário possível. [41]

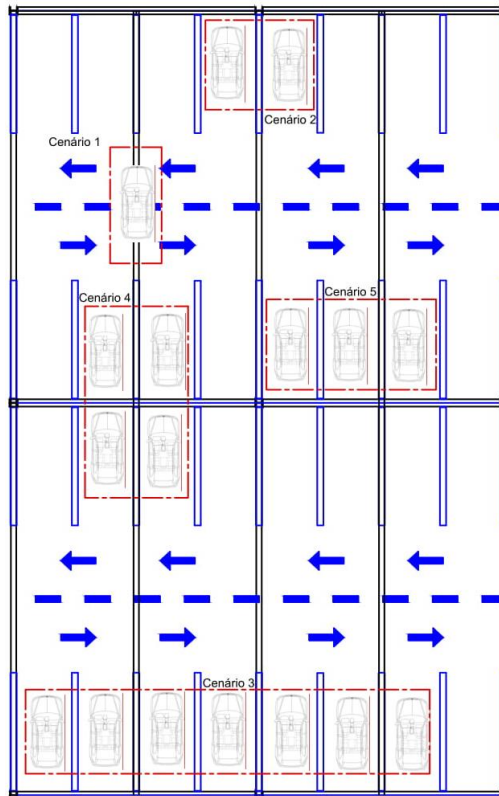


Figura 5. Cenários de fogo [41]

2.5- Incêndios localizados

Dependendo da altura da chama de fogo, em relação ao teto do compartimento, um incêndio localizado pode ser definido como um pequeno fogo ou um grande incêndio que impacta o teto. Em um incêndio localizado, os produtos da combustão se acumulam em uma camada abaixo do teto (camada superior), com uma interface horizontal entre a camada quente e a camada inferior, onde a temperatura dos gases permanece muito mais fria [44].

Em um incêndio localizado, como mostrado na Figura 6, a temperatura mais alta está no eixo da chama vertical, diminuindo em direção à borda da chama. A temperatura do eixo da chama muda com a altura [25]. A ação térmica de um fogo localizado pode ser avaliada usando o método Heskestad, de forma que o comprimento da chama (L_f) de um fogo localizado é dado por [44]:

$$L_f = -1,02D + 0,014Q^{2/5} \quad \text{Eq. 16}$$

Onde D é o diâmetro do fogo e Q é a taxa de liberação de calor do fogo.

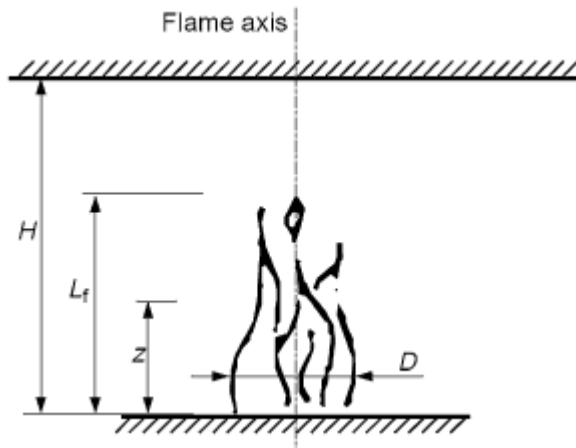


Figura 6. Modelo de fogo localizado para chamas que não afetam o teto [45]

Quando um fogo localizado se torna grande o suficiente, com $L_f \geq H$, as chamas do fogo irão impactar no teto do compartimento. A EN 1991-1-2 [46] apresenta uma formulação de projeto para calcular temperaturas dos gases perto da laje de teto e nas vigas, baseado nos trabalhos experimentais realizados pela Hasemi para calcular a localização da fonte de calor virtual. As limitações desta abordagem incluem: (i) o diâmetro de fogo ($D \leq 10 \text{ m}$) e (ii) a taxa de liberação de calor do fogo ($Q \leq 50 \text{ MW}$) [45].

2.6- Taxa de liberação de calor (HRR)

A taxa de liberação de energia também é denominada taxa de liberação de calor ou HRR. A Tabela 3 compara alguns valores característicos de energia liberados por vários tipos de material combustível e produção de calor de diferentes fontes [25].

Tabela 3. Medida aproximada de energia liberada ou gerados a partir de várias fontes, adaptada de Karlsson e Quintiere [25]

Fonte de calor	HRR
Cigarro queimando	5 W
Lâmpada típica	60 W
Um ser humano fazendo esforço normal	100 W
Lixeira pegando fogo	100 kW
Queima de uma poça de gasolina de 1 m ²	2,5 MW
Paletes de madeira ardente, empilhados até a altura de 3 m	7 MW
Frascos de poliestireno queimando, 4,9 m de altura	30-40 MW
Saída de um reator típico em uma Usina de Energia Nuclear	500-1000 MW
Veículo classe 3 (valor de pico)	8300 kW

Segundo Karlsson e Quintiere, existem duas abordagens disponíveis ao determinar o fogo para um determinado cenário. A primeira se baseia no conhecimento da quantidade e do tipo de materiais combustíveis no compartimento de origem do fogo. Nesse caso, a taxa de liberação de energia resultante em relação ao tempo pode ser estimada usando dados de experiências anteriores em que a taxa de liberação de energia foi medida. O outro é baseado no conhecimento do tipo de ocupação, onde há pouca informação disponível sobre o conteúdo combustível. Neste caso, o conhecimento sobre o tipo de ocupação, as estatísticas disponíveis e o julgamento de engenharia devem ser usados [25].

A Tabela 4 mostra o valor da taxa de liberação de calor total (HRR) definido por classe, obtido por testes de veículos em chamas em tempo específico (dado em minutos).

Tabela 4. HRR para diferentes classes de carros

Tempo Min	Tempo Seg	Classe 1 HRR [kW]	Classe 2 HRR [kW]	Classe 3 HRR [kW]	Classe 4 HRR [kW]	Classe 5 HRR [kW]
0	0	0	0	0	0	0
4	240	884	1105	1400	1768	1768
16	960	884	1105	1400	1768	1768
24	1440	3474	4342	5500	6947	6947
25	1500	5242	6553	8300	10484	10484
27	1620	2842	3553	4500	5684	5684
38	2280	632	789	1000	1263	1263
70	4200	0	0	0	0	0

Conforme informação da Tabela 4, temos que os veículos de classe 4 e 5 possuem os mesmos valores de HRR. Na Figura 7 temos uma comparação das curvas de diferentes classes. Durante qualquer evento de incêndio, dependente do tempo, a taxa de liberação de energia (HRR) aumenta de zero para um valor máximo no tempo igual a 25 minutos e diminui para zero no final do evento.

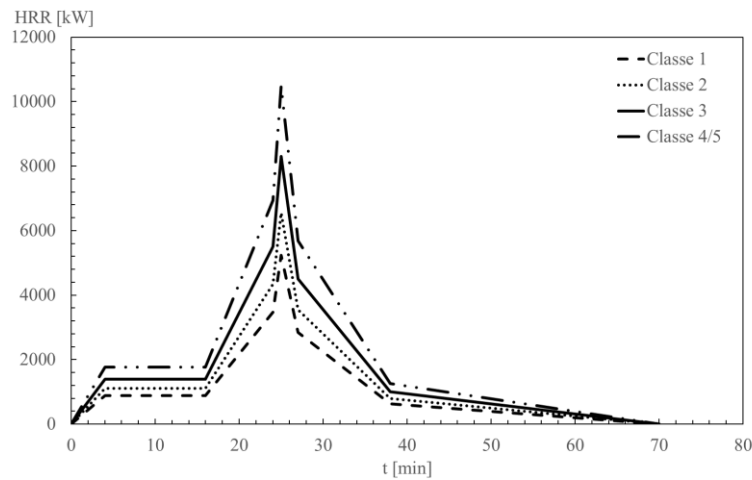


Figura 7. HRR para diferentes classes de carros

Quando um produto queima dentro de um recinto, os gases quentes no nível do teto aquecem o teto e as paredes que irradiam calor em direção à superfície do combustível, aumentando a taxa de queima. As aberturas do recinto (portas, janelas, entre outros) podem restringir a disponibilidade de oxigênio necessário para a combustão, diminuindo da taxa de liberação de energia e aumentando a concentração de gases não queimados. Os gases não queimados podem liberar energia ao fluir através de uma abertura e se misturar com oxigênio, fazendo com que as chamas apareçam na abertura. Testes de “queima livre” são aqueles que os produtos que estão queimando não sofrem o efeito do recinto onde o incêndio ocorre [25].

A taxa de liberação de energia de um produto é feita por medição direta e os efeitos do recinto são minimizados. Os gases quentes são ventilados para longe do combustível e não há limitação no fornecimento de ar, de forma que os resultados podem então ser usados pelos engenheiros como diretrizes ao determinar o fogo para um determinado cenário. A taxa de liberação de energia pode ser calculada se for um combustível líquido e o diâmetro do reservatório for conhecido [25].

2.7- Definição de compartimento de fogo

Segundo o EUROCODE 1991-1-2 [46], o compartimento de fogo pode ser definido como o espaço dentro de um edifício, que se estende sobre um ou vários andares, em que o fogo é impedido de passar de um compartimento para o outro. Quando um incêndio começa dentro de um compartimento, a natureza selada da área pode evitar que ele se espalhe para outras áreas. Os compartimentos de incêndio não são absolutamente à

prova de fogo, de forma que o fogo pode entrar ou sair de um compartimento de fogo se for intenso o suficiente, mal gerenciado ou não abordado com rapidez suficiente [47].

2.7.1- Fases dos incêndios no compartimento

Compartimentos de incêndio são discutido em termos de crescimento. Segundo Walton e Thomas [48, 25] as fases dos incêndios são, conforme Figura 8:

- Fase de ignição: Pode ocorrer através de ignição forçada (por combinação de fogo, faísca ou outra fonte) ou por ignição espontânea (através da acumulação de calor no combustível).
- Etapa de crescimento: Após a ignição, o fogo pode crescer a uma velocidade rápida ou lenta, dependendo do tipo de combustível, do tipo de combustão, da interação com o ambiente e do acesso ao oxigênio. O incêndio inicialmente cresce devido ao próprio combustível, com pouca ou nenhuma influência do compartimento. O fogo pode ser descrito em termos de sua taxa de energia e geração de produtos de combustão. Se houver suficiente combustível e oxigênio, o fogo continuará a crescer, fazendo com que a temperatura no compartimento aumente.
- Incêndio generalizado: Geralmente é definido como a transição de um crescimento para um fogo totalmente desenvolvido no qual todos os itens combustíveis no compartimento estão envolvidos no fogo. Segundo Waterman, seria necessário um fluxo de calor de cerca de 20 kW/m² no nível do piso para que ocorresse o flashover. Durante os testes experimentais desenvolvidos por Waterman, a temperatura abaixo do teto atingiu 600°C [49].
- Fogo totalmente desenvolvido: Durante esta fase, a taxa de liberação de calor do fogo é a maior. Nesta fase, a energia liberada é muitas vezes limitada pela disponibilidade de oxigênio, portanto é definido como queima de ventilação controlada.
- Fase de decaimento: À medida que o combustível é consumido, a taxa de liberação de energia diminui, assim como a temperatura média do gás no compartimento. O fogo pode passar queima de ventilação controlada para queima de combustível controlado.

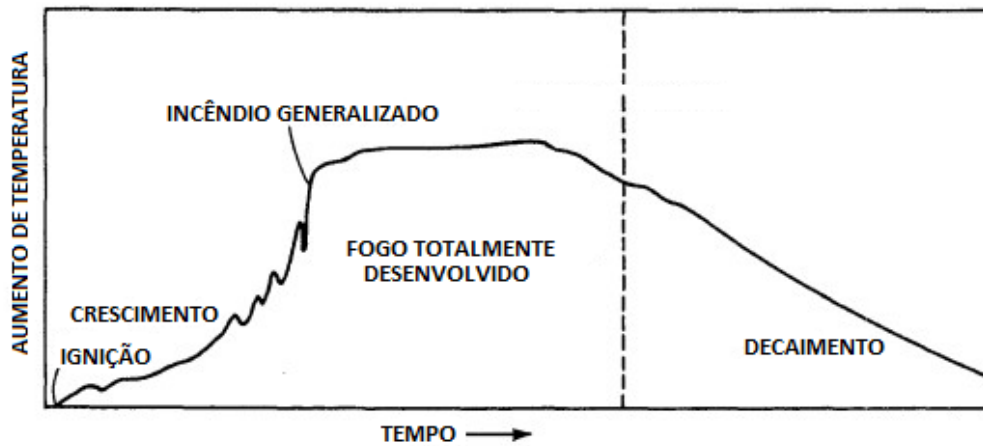


Figura 8. Fases de desenvolvimento do fogo [48]

2.7.2- Características do compartimento de incêndio

Foram estudados dois compartimentos definidos como estacionamentos abertos. Ambos possuem 10 m de largura e 10 m de profundidade, sendo que o primeiro tem 3 m (Figura 9) de altura e o segundo 5 m (Figura 10).

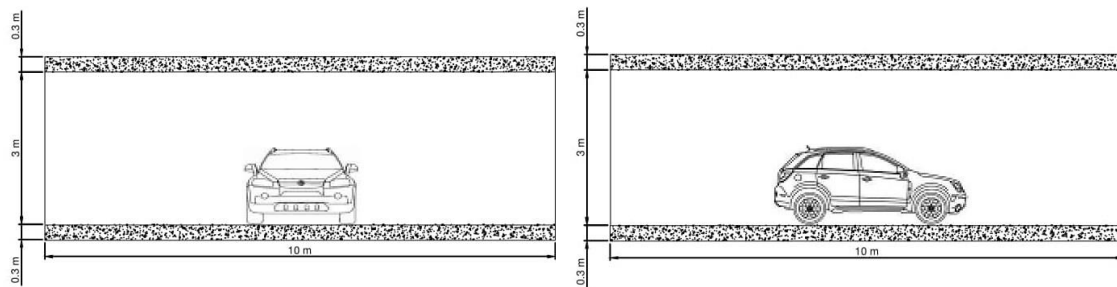


Figura 9. Vista frontal e lateral do compartimento 1

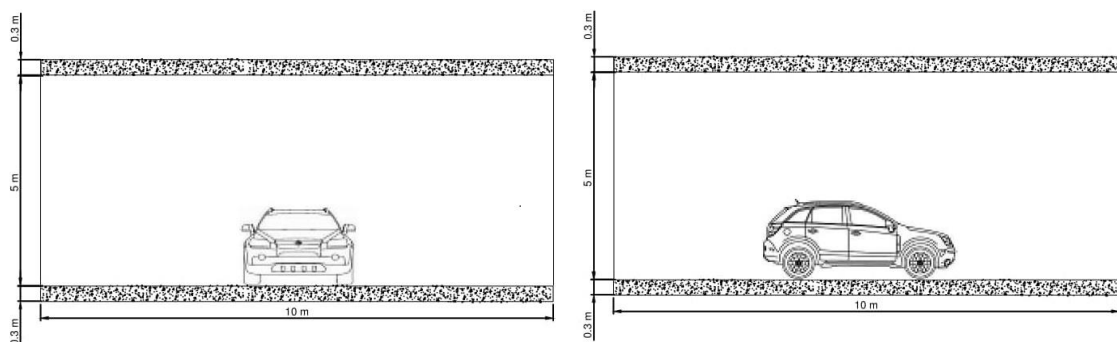


Figura 10. Vista frontal e lateral do compartimento 2

O calor específico (c_p), a densidade (ρ) e a condutividade térmica (λ) do material das lajes (concreto) são dependentes da temperatura, conforme possível observar na Figura 11, tornado o processo de análise não linear.

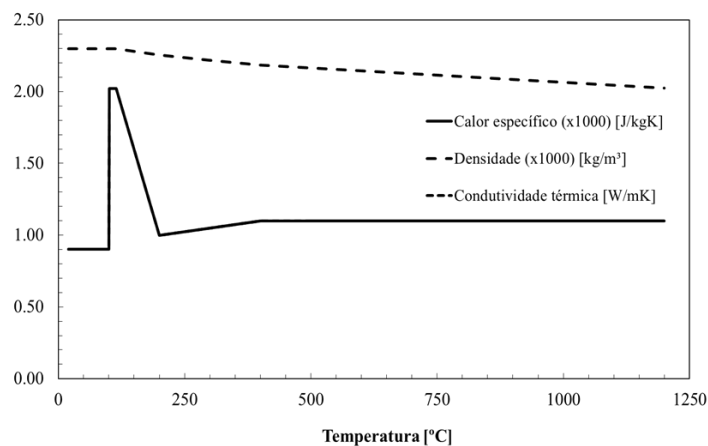


Figura 11. Propriedades do concreto

2.8- Sistemas de detecção de incêndio

A maioria dos dispositivos associados à detecção e supressão de incêndio estão localizados perto das superfícies do teto. A detecção de fumaça pode ser feita por sensores fotossensíveis, de forma que o sinal de redução de luz é processado e usado para transmitir um alarme se atender a critérios predefinidos. Uma pequena quantidade de material radioativo para ionizar o ar entre dois eletrodos também pode ser utilizada como detector de fumaça. As partículas de fumaça diminuem a condutância do ar, reduzindo a mobilidade iônica, ativando um alarme quando necessário [50].

Os detectores de calor são uma das formas mais antigas e normalmente possuem a menor taxa de alarme falso de todos os dispositivos de detecção automática de incêndio. Porém, por não detectar a fumaça, eles normalmente são os mais lentos para detectar incêndios. Os detectores de temperatura fixa alarmam quando a temperatura de seus elementos operacionais atinge valores específicos. Os metais eutéticos que fundem rapidamente a uma temperatura predeterminada também são usados para atuar como detectores de calor, contudo não podem ser reutilizados. Outro tipo de detector de calor usa um par de fios, no qual o isolamento que mantém os condutores separados derrete a determinada temperatura, de forma que os fios entram em contato e inicia o alarme. Nesse caso, os fios devem ser substituídos para reativar o sistema [50].

3- MODELOS CORRELATIVOS

3.1- Definição dos modelos correlativos

As correlações para estimar temperaturas e velocidades nos gases quentes em um jato de incêndio sob teto são frequentemente utilizados pela engenharia de segurança com objetivo de obter uma estimativa de ativação de *sprinklers* e de detectores de incêndio, assim como para estimar danos na estrutura e teto. As correlações também foram implementadas em diversos programas [16].

Há uma gama de correlações de jatos de incêndio disponíveis para aplicações diferentes, apenas 4 modelos correlativos serão comparados: Alpert, Cooper, Heskestad e Delichatsios e Motevalli e Marks. Uma tabela de comparação com as diferenças entre os valores de temperatura máxima e velocidade são apresentadas no anexo 1.

3.2- Correlações de Alpert

Alpert assumiu um fluxo direcionado de incêndio assimétrico sob um teto plano e horizontal que estava desobstruído pelas paredes [16]. As correlações foram baseadas na altura real do teto acima da superfície superior do combustível e na taxa real de liberação de calor de fogo. Uma gama de diferentes tipos de combustíveis foi utilizada nas experiências, mas não foi considerado o tamanho da parte convectiva da taxa de liberação de calor. Os combustíveis líquidos tinham taxas de liberação de energia variando de 668 kW a quase 105 MW, enquanto as alturas do teto variaram de 4,57 a 15,55 m.

As correlações de Alpert de 1972 sobre a velocidade máxima do gás e o excesso de temperatura no incêndio de jato induzido por incêndios de grande escala são dadas abaixo, com unidade SI (kW, m, °C, s) [1]. Existem expressões diferentes para o cálculo na região do eixo da pluma e para o cálculo na região de jato.

$$V_{max} = 0,197 \frac{\dot{Q}^{1/3} H^{1/2}}{r^{5/6}}, \quad \text{se } r/H > 0,15 \quad \text{Eq. 17}$$

$$V_{max} = 0,96 \left(\frac{\dot{Q}}{H} \right)^{1/3}, \quad \text{se } r/H \leq 0,15 \quad \text{Eq. 18}$$

$$T_{max} = T_{\infty} + 5,38 \frac{(\dot{Q}/r)^{2/3}}{H}, \quad se \ r/H > 0,18 \quad Eq. 19$$

$$T_{max} = T_{\infty} + 16,9 \frac{\dot{Q}^{2/3}}{H^{5/3}}, \quad se \ r/H \leq 0,18 \quad Eq. 20$$

Onde T_{∞} representa a temperatura ambiente; \dot{Q} é a taxa de liberação de calor do fogo, H a altura do teto e r a distância radial de linha central da chama. A primeira equação de velocidade (para $r/H > 0,15$) e de temperatura (para $se \ r/H > 0,18$) dependem da distância radial da linha central da chama (r). A segunda equação de velocidade (para $r/H \leq 0,15$) e de temperatura (para $r/H \leq 0,18$) é válida na região onde a chama invade o teto e independe da distância radial da chama.

Em 2011, Alpert fez a revisão das suas equações, com base no conhecimento de origem de chama virtual. As novas correlações foram baseadas na altura do teto acima da origem virtual e na taxa de liberação de calor convectiva, assim como as equações de Heskestad e Delichatsios. Para a região da pluma, $r/H \leq 0,15$ e $r/H \leq 0,18$, as equações não foram modificadas.

$$V_{max} = 0,215 \frac{(\dot{Q}_c/H)^{1/3}}{(r/H)^{1,003}}, \quad se \ r/H > 0,15 \quad Eq. 21$$

$$T_{max} = T_{\infty} + 5,289 \frac{\dot{Q}_c^{1/3}/H^{5/3}}{(r/H)^{0,611}}, \quad se \ r/H > 0,18 \quad Eq. 22$$

$$V_{max} = 0,2526 \frac{\dot{Q}_c^{1/3}}{(H-z_0)^{1/3}} \left(\frac{r}{H-z_0}\right)^{-1,0739}, \quad se \ \frac{r}{H-z_0} > 0,246 \quad Eq. 23$$

$$T_{max} = T_{\infty} + 6,721 \frac{\dot{Q}_c^{2/3}}{(H-z_0)^{5/3}} \left(\frac{r}{H-z_0}\right)^{-0,6545}, \quad se \ \frac{r}{H-z_0} > 0,134 \quad Eq. 24$$

Onde \dot{Q}_c representa a parte convectiva da taxa de liberação de calor ($\dot{Q}_c = 0,8\dot{Q}$) e z_0 é a origem virtual ou a altura da fonte virtual sobre item de queima.

3.2.1- Velocidade e temperatura (correlação de 1972)

Os resultados da velocidade e temperatura máximas próximas ao teto dependem das classes dos veículos. As seguintes condições foram assumidas no estacionamento

aberto estudado: $T_{\infty} = 20^{\circ}C$, $H = 2,7 m$ e $D = 2 m$. A velocidade máxima e a temperatura máxima foram calculadas para as posições de seis sensores no teto, $r/H = 0; 0,37; 0,74; 1,11; 1,48$ e $1,85$, conforme se representa na Figura 12 e Figura 13.

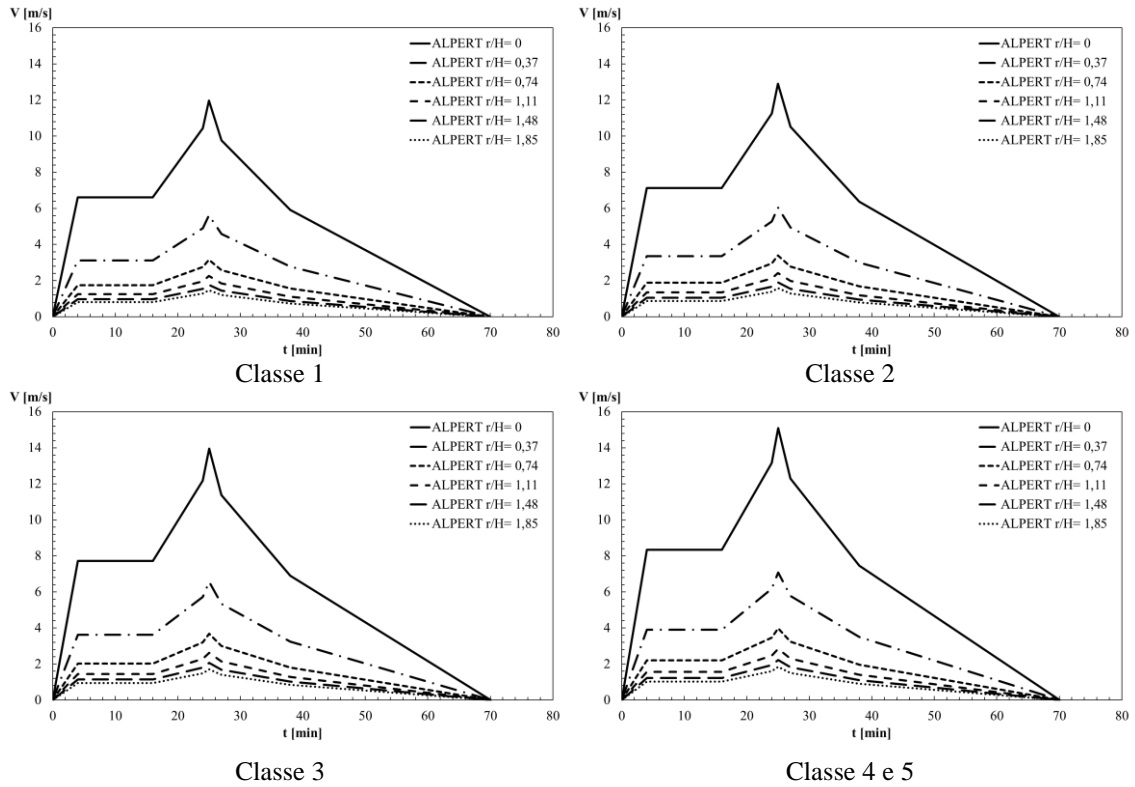


Figura 12. Velocidade perto do teto segundo correlação de Alpert de 1972 para compartimento 1

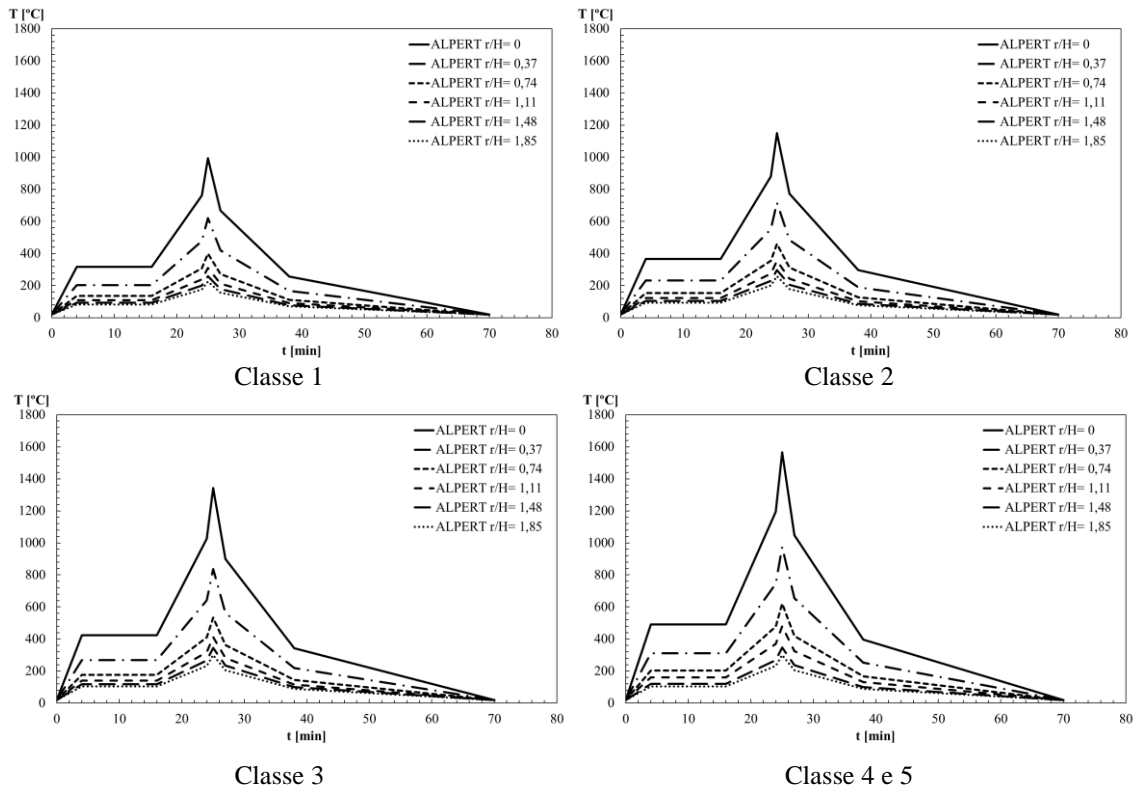


Figura 13. Temperatura perto do teto segundo correlação de Alpert de 1972 para compartimento 1

Também foi testada a correlação de Alpert de 1972 de acordo com as seguintes condições $T_{\infty} = 20^{\circ}C$, $H = 4,7 m$ e $D = 2 m$, para uma altura de parede de 5 m. A velocidade máxima e a temperatura foram calculadas para as mesmas posições radiais no teto, $r/H = 0; 0,21; 0,42; 0,64; 0,85$ e $1,06$, conforme Figura 14 e Figura 15.

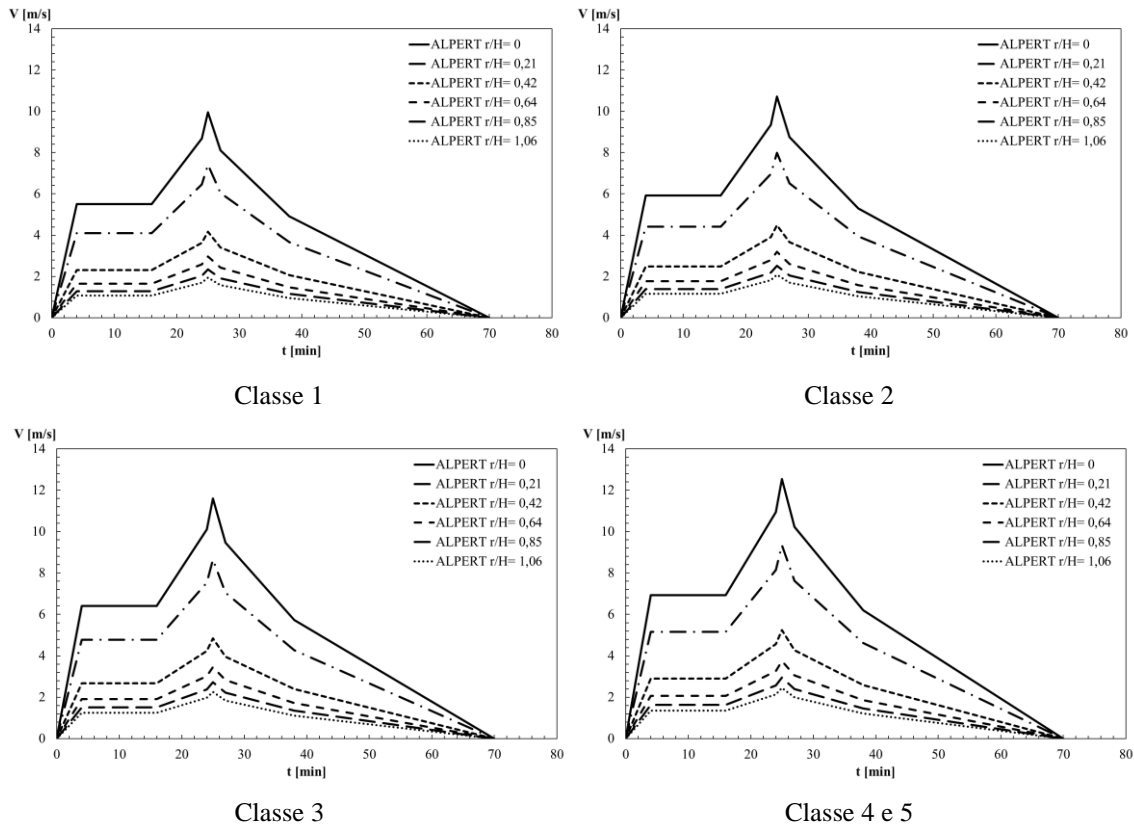


Figura 14. Velocidade perto do teto segundo correlação de Alpert de 1972 para compartimento 2

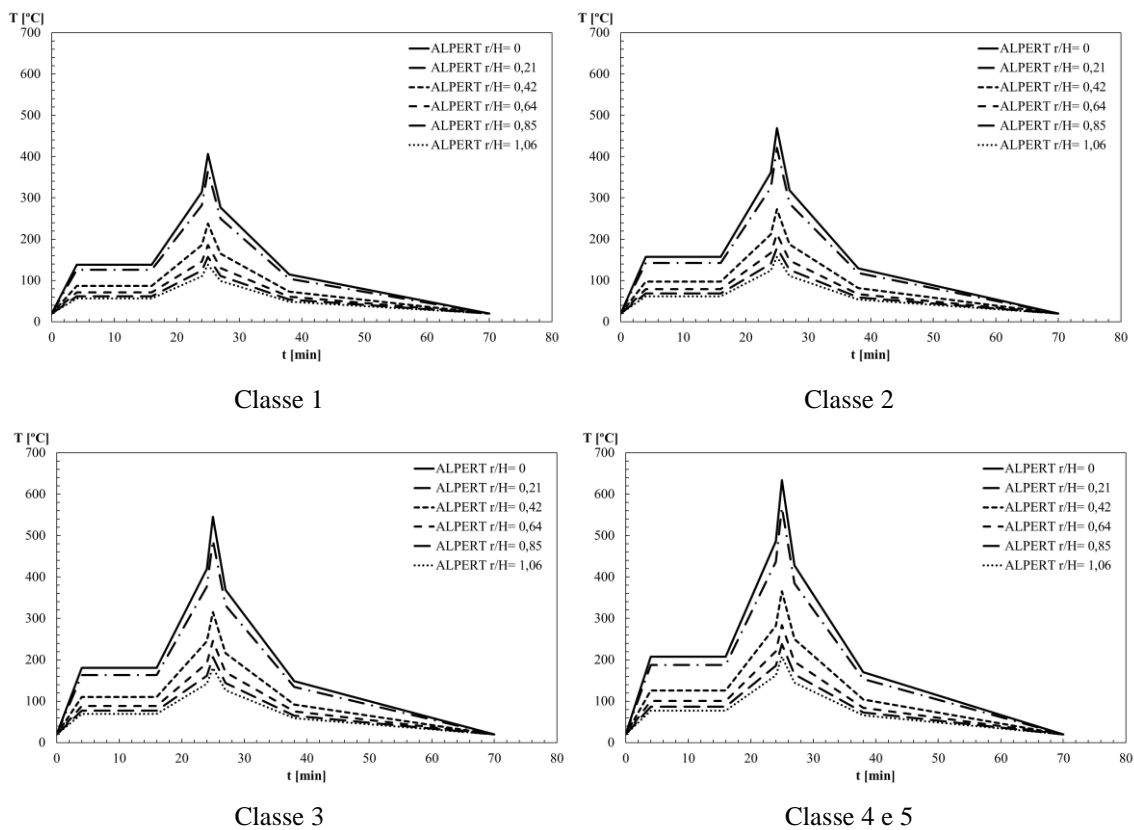


Figura 15. Temperatura perto do teto segundo correlação de Alpert de 1972 para compartimento 2

A partir dos resultados de velocidade e temperatura calculadas pela correlação desenvolvidas por Alpert em 1972, é possível verificar que a velocidade e a temperatura máxima se encontram no tempo igual a 25 minutos (1500s). As curvas de velocidade e temperatura máximas para compartimento 1 são mostradas na Figura 16 e Figura 17 respectivamente, comparando r/H em posições diferentes posições para classe 1, 2, 3 e 4/5.

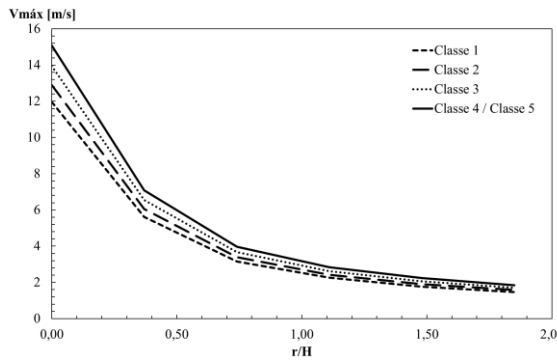


Figura 16. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação Alpert de 1972 para compartimento 1

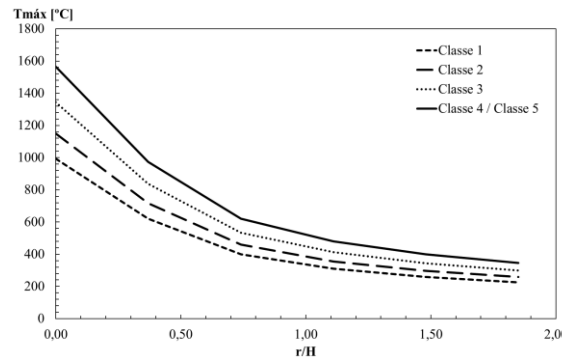


Figura 17. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Alpert de 1972 para compartimento 1

As curvas de velocidade e temperatura máximas para compartimento 2 com os mesmos parâmetros anteriores são mostradas na Figura 18 e Figura 19, respectivamente.

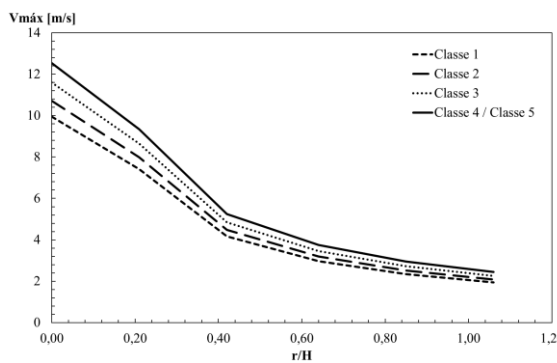


Figura 18. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Alpert de 1972 para compartimento 2

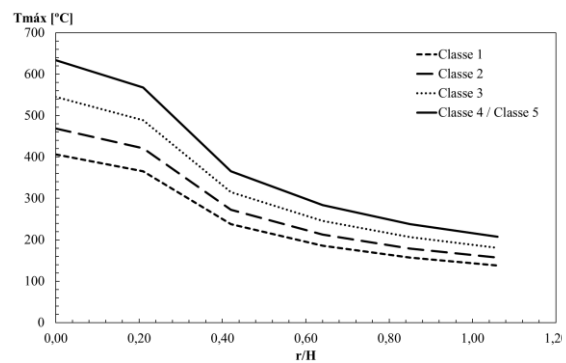


Figura 19. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Alpert de 1972 para compartimento 2

Em todos os casos temos que a temperatura e velocidade máximas diminuem com a razão r/H , conforme esperado. Os valores de velocidade e temperatura máximas aumentam com a classe dos carros. Os resultados de máxima velocidade e temperatura

das seis posições radiais estão disponíveis na Tabela 6 (compartimento 1) e Tabela 7 (compartimento 2) do anexo 1.

3.2.2- Velocidade e temperatura (correlação de 2011)

As mesmas condições foram assumidas para o uso da correlação de Alpert de 2011. Para uma altura de parede de 3 metros, a velocidade e temperatura máximas foram calculadas para seis sensores no teto, nas posições $r/H = 0; 0,37; 0,74; 1,11; 1,48$ e $1,85$, conforme Figura 20 e Figura 21.

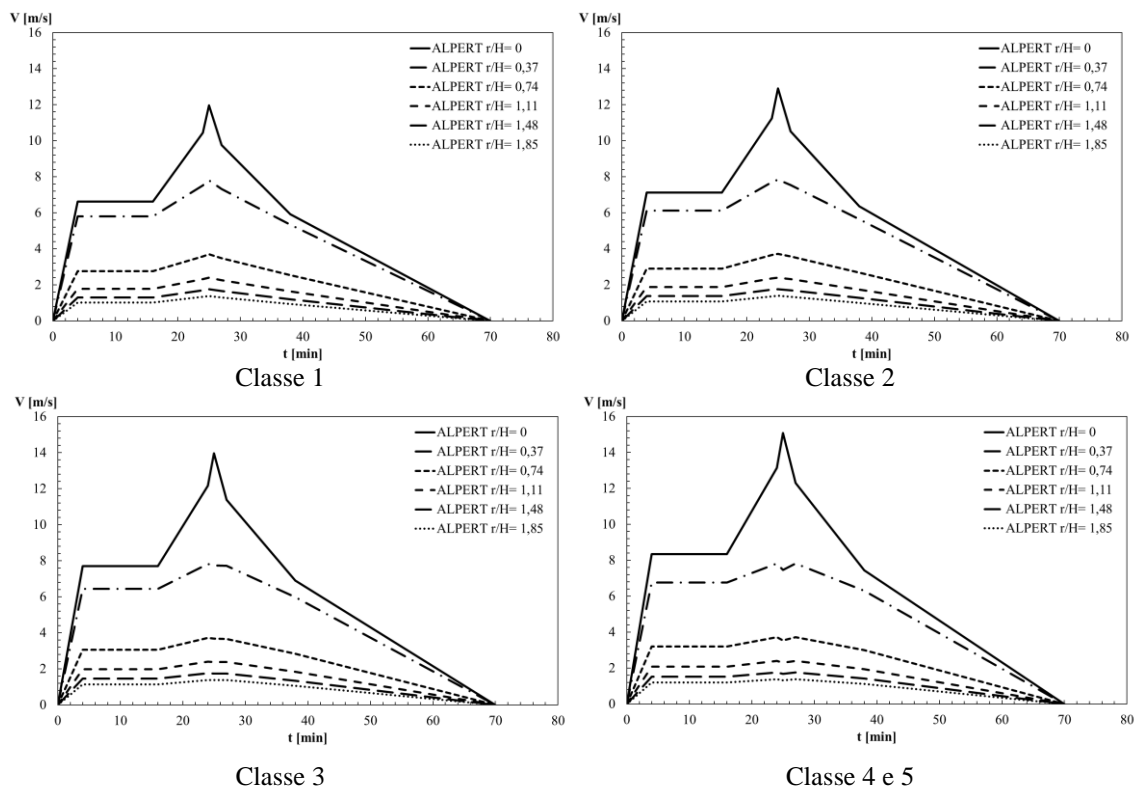


Figura 20. Velocidade perto do teto segundo correlação de Alpert de 2011 para compartimento 1

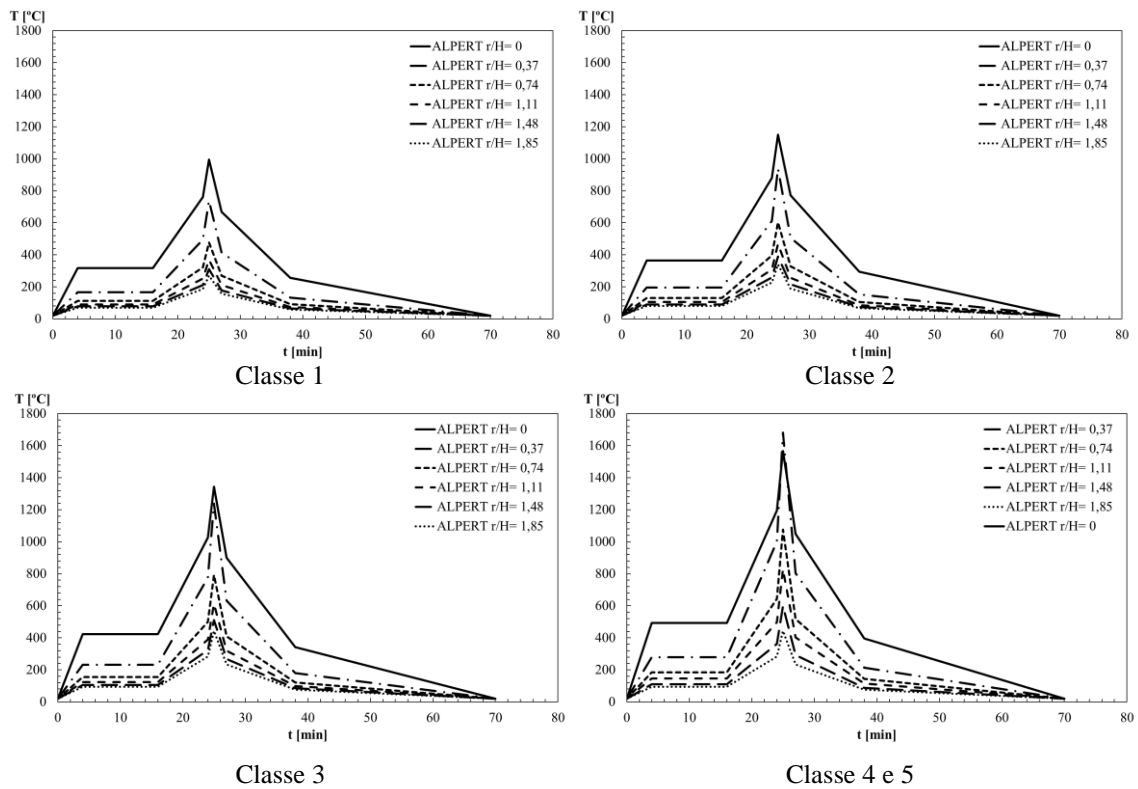


Figura 21. Temperatura perto do teto segundo correlação de Alpert de 2011 para compartimento 1

Para uma altura de parede de 5m, o modelo correlativo de Alpert de 2011 nas posições $r/H = 0; 0,21; 0,42; 0,64; 0,85$ e $1,06$ obtém velocidade e temperaturas máximas conforme, respectivamente, Figura 22 e Figura 23

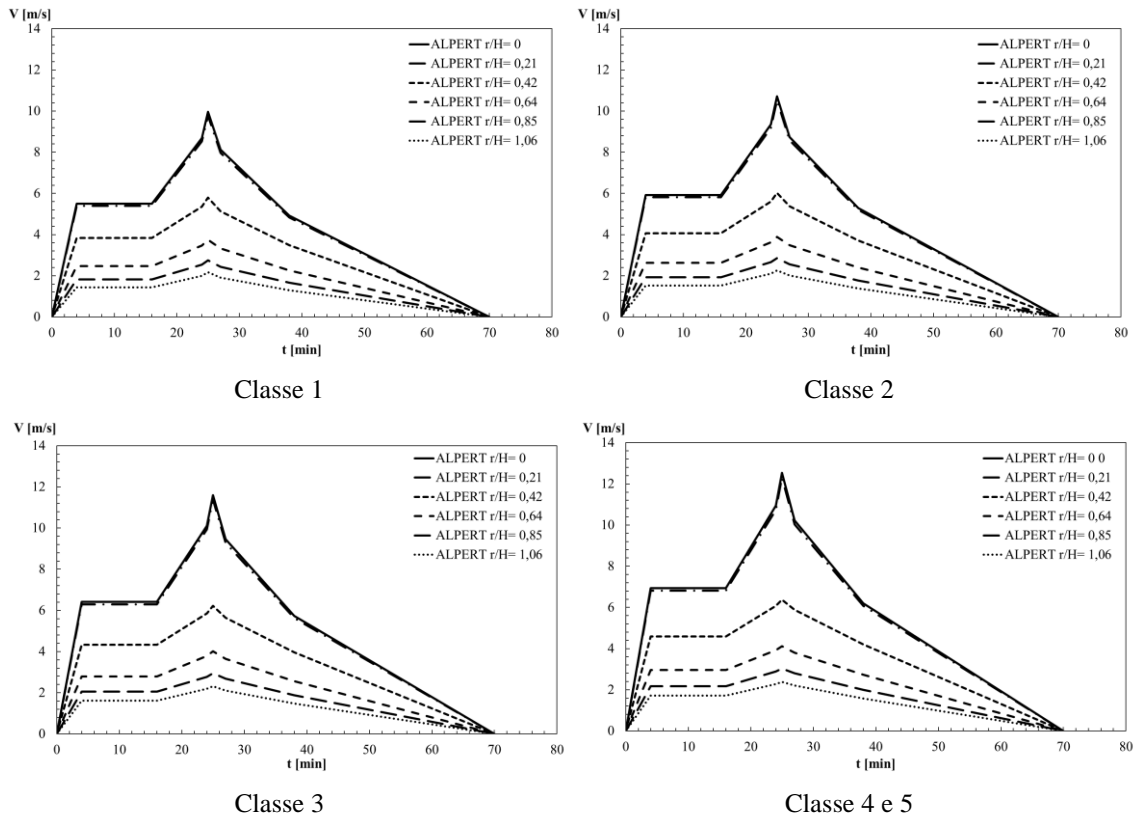


Figura 22. Velocidade perto do teto segundo correlação de Alpert de 2011 para compartimento 2

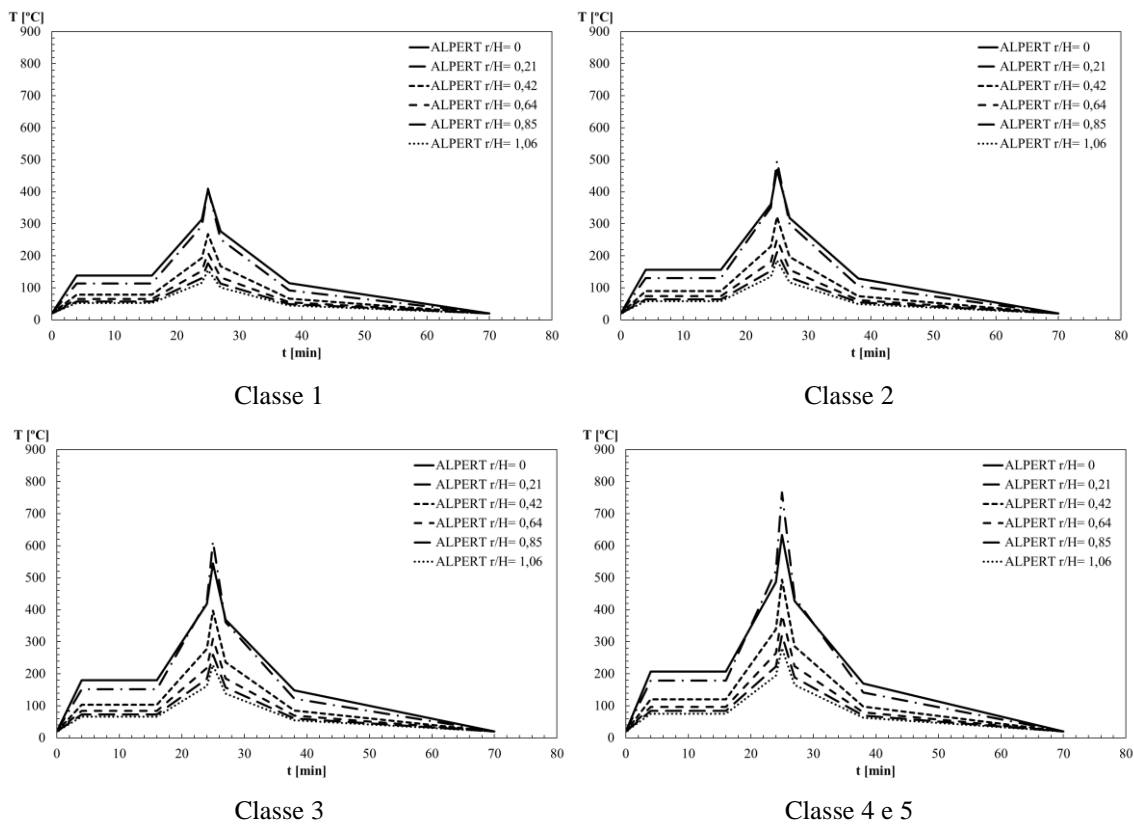


Figura 23. Temperatura perto do teto segundo correlação de Alpert de 2011 para compartimento 2

As curvas de velocidade e temperatura máximas ($t=1500$ s) para compartimento 1 nas equações de Alpert de 2011 são mostradas na Figura 24 e Figura 25, respectivamente, comparando r/H em posições diferentes para classe 1, 2, 3 e 4/5.

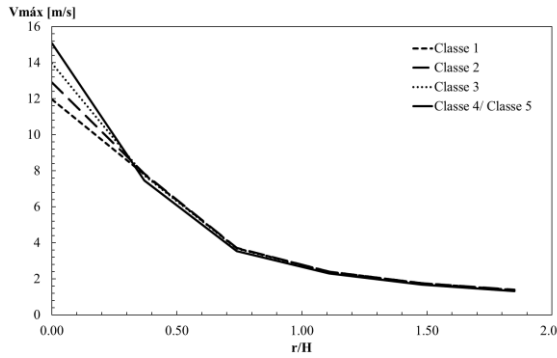


Figura 24. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Alpert de 2011 para compartimento 1

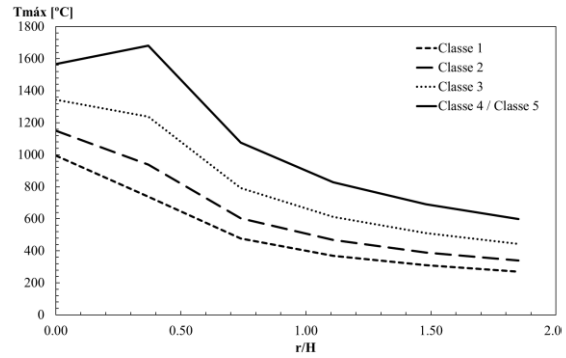


Figura 25. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Alpert de 2011 para compartimento 1

As curvas de velocidade e temperatura máximas para compartimento 2 com os mesmos parâmetros anteriores são mostradas na Figura 26 e Figura 27, respectivamente.

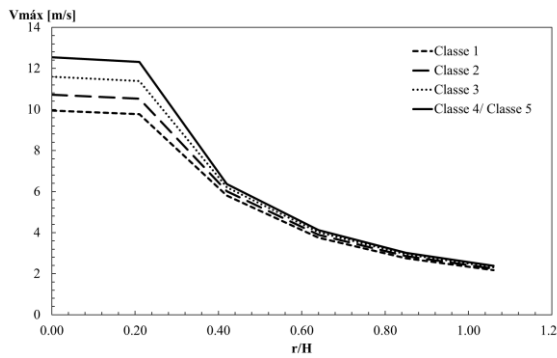


Figura 26. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Alpert de 2011 para compartimento 2

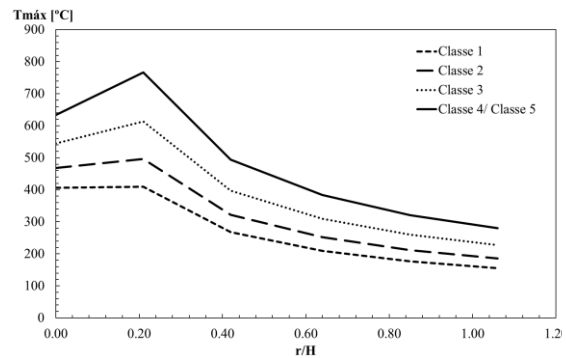


Figura 27. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Alpert de 2011 para compartimento 2

Os resultados da velocidade e temperatura máximas das seis posições radiais estão disponíveis na Tabela 8 (compartimento 1) e Tabela 9 (compartimento 2) do anexo 1.

3.3- Correlação de Cooper

Cooper desenvolveu correlações para estimar as propriedades dinâmicas da chama e as características resultantes do jato de incêndio. As equações de Cooper são válidas para a situação em que apenas uma parte da chama está fluindo para a camada superior e atingindo o teto [51, 7, 6].

$$T_{max} = T_{\infty} + 28,1\dot{Q}^{2/3}H^{-5/3} \exp\left(-1,77\frac{r}{H}\right), \quad se\ 0 \leq r/H \leq 0,75 \quad \text{Eq. 25}$$

$$T_{max} = T_{\infty} + 5,77\dot{Q}^{2/3}H^{-5/3} \left(\frac{r}{H}\right)^{-0,88}, \quad se\ 0,75 \leq r/H \quad \text{Eq. 26}$$

$$V_{max} = 0,26 \left(\frac{r}{H}\right)^{-1,1} H^{-1/3} \dot{Q}^{1/3}, \quad se\ 0,2 \leq r/H \leq 4 \quad \text{Eq. 27}$$

3.3.1- Velocidade e temperatura

Os cálculos para o modelo de Cooper foram feitos usando as mesmas dimensões e do cenário de incêndio e as mesmas posições para os sensores estipulados para Alpert. A Figura 28 e a Figura 29 mostram os resultados para a velocidade e temperatura máximas, próximas ao teto, as quais dependem das classes dos carros, para compartimento 1.

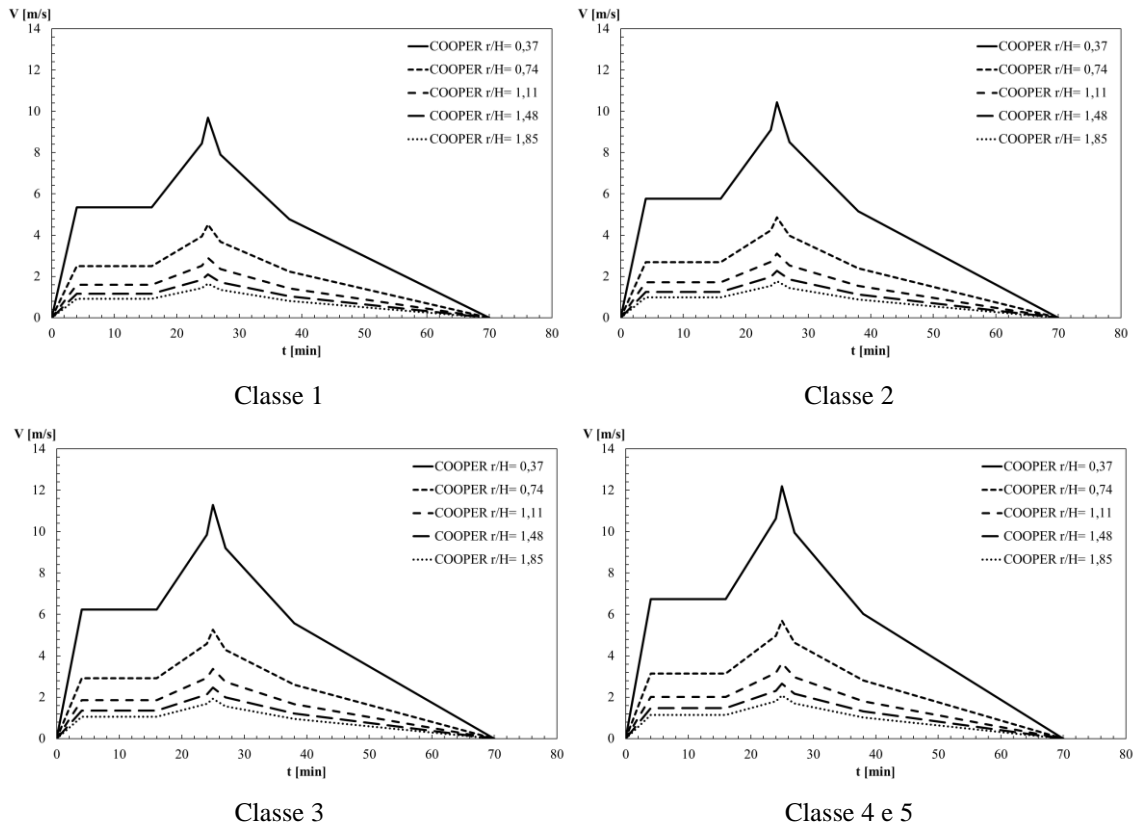


Figura 28. Velocidade perto do teto segundo correlação de Cooper para compartimento 1

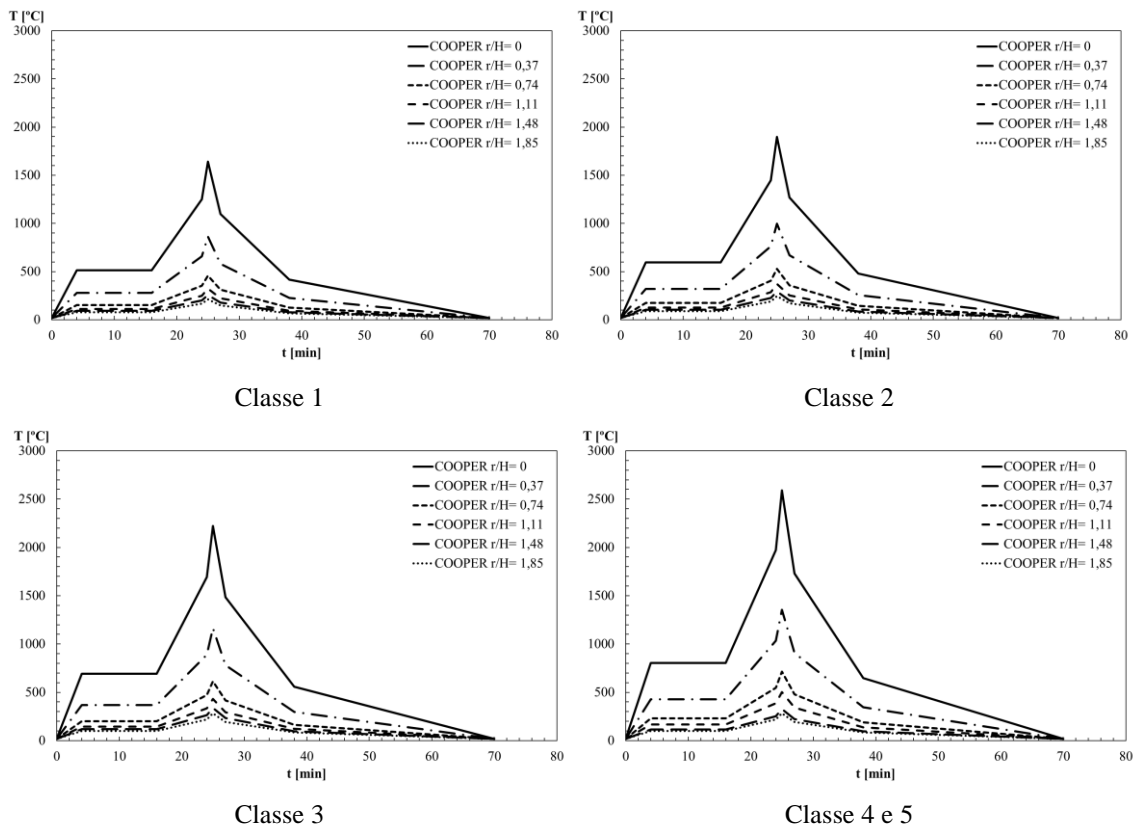


Figura 29. Temperatura perto do teto segundo correlação de Cooper para compartimento 1

Também foram testadas as correlações de Cooper para compartimento 2, conforme mostrado na Figura 30 e Figura 31.

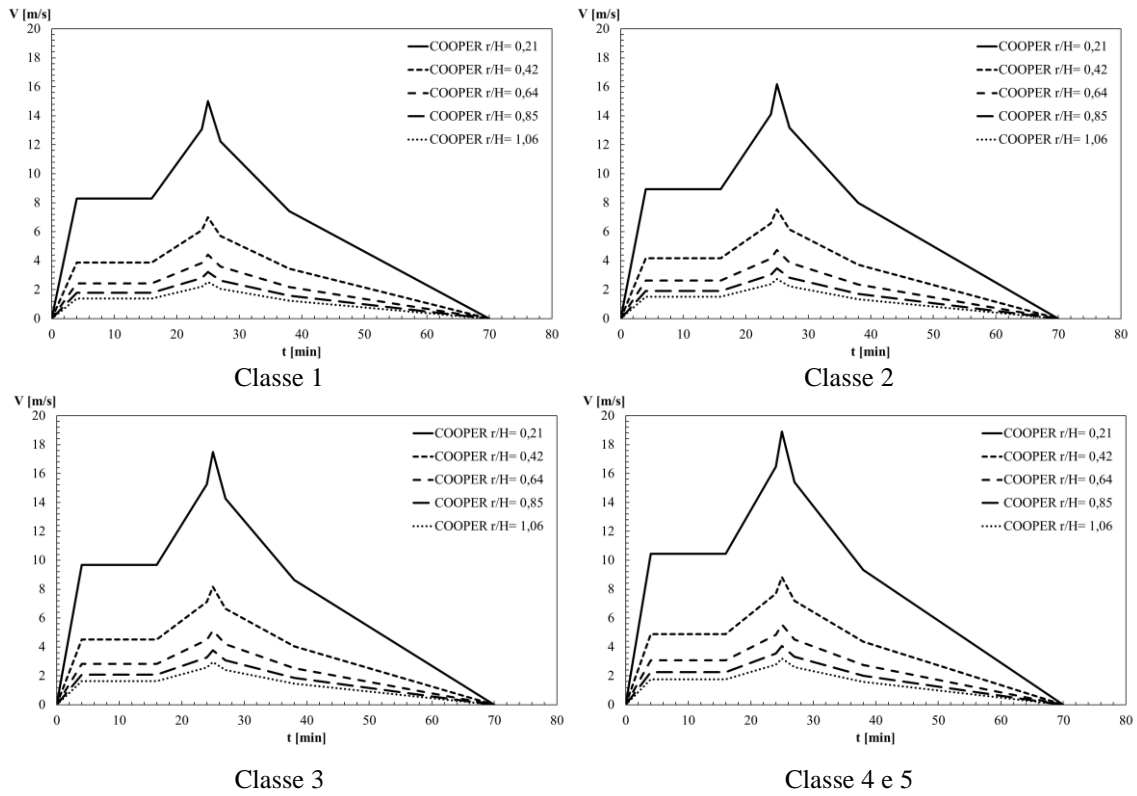


Figura 30. Velocidade perto do teto segundo correlação de Cooper para compartimento 2

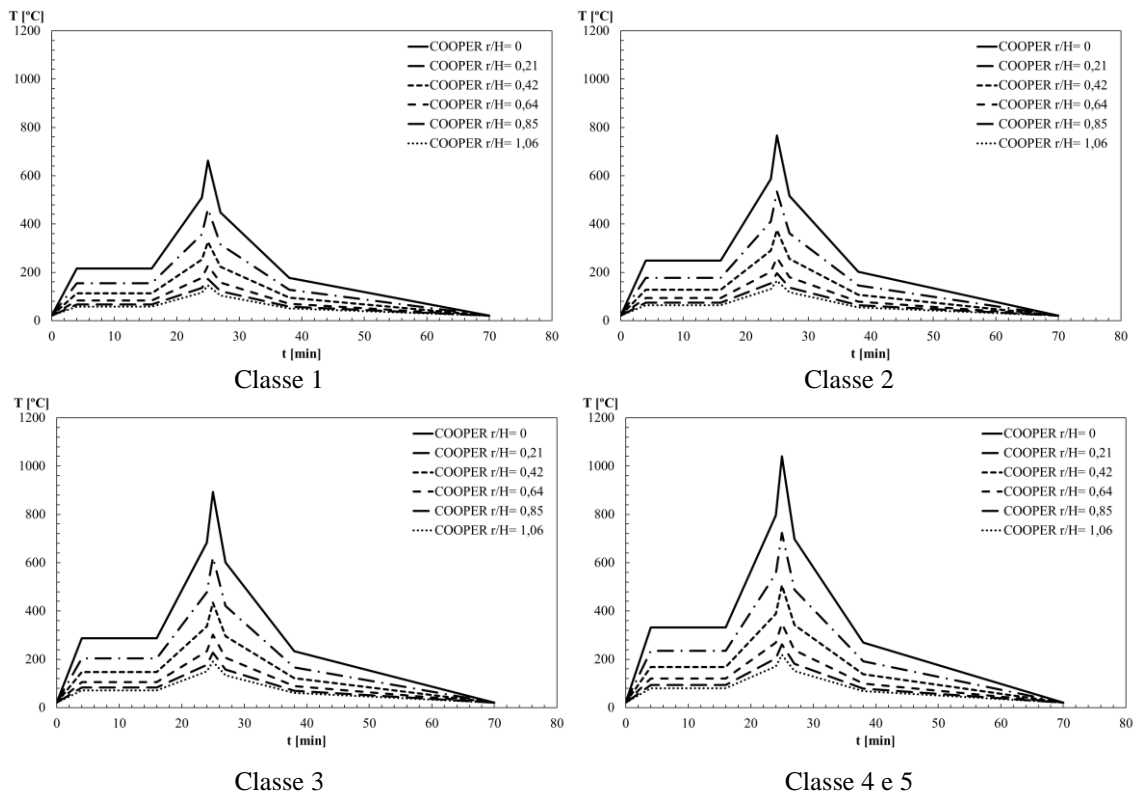


Figura 31. Temperatura perto do teto segundo correlação de Cooper para compartimento 2

Assim como explicado para as correlações anteriores, a temperatura e velocidade máximas são obtidas para o mesmo instante de tempo de 25 minutos. As curvas de velocidade e temperatura máximas para $H=2,7$ são mostradas na Figura 32 e Figura 33 respectivamente, comparando r/H em posições diferentes para as diferentes classes de veículo.

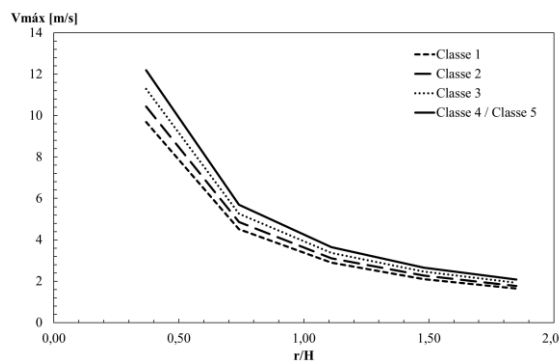


Figura 32. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Cooper para compartimento 1

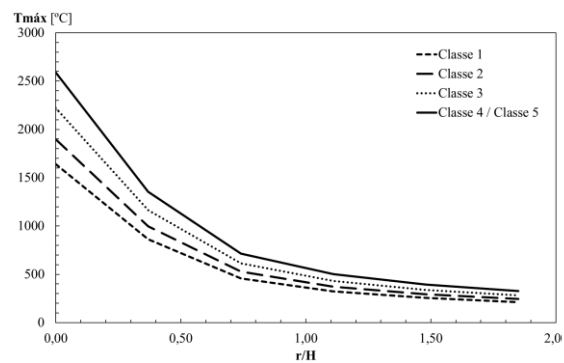


Figura 33. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Cooper para compartimento 1

As curvas de velocidade e temperatura máximas para compartimento 2 com os mesmos parâmetros anteriores são mostradas na Figura 34 e Figura 35 respectivamente.

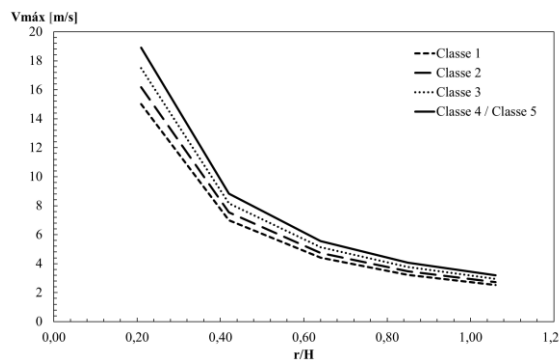


Figura 34. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Cooper para compartimento 2

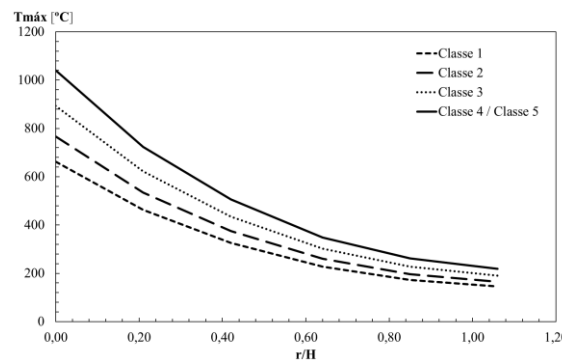


Figura 35. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Cooper para compartimento 2

Em todos os casos temos que a temperatura e velocidade máximas diminuem com a razão r/H , conforme esperado. Os valores de velocidade e temperatura máximas aumentam com a classe dos veículos. Os resultados estão de acordo com os obtidos pelos modelos correlativos de Alpert. A Tabela 10 e Tabela 11 (anexo 1) mostram os resultados velocidade e temperatura máximas das seis posições radiais para o primeiro e segundo compartimento, respectivamente.

3.4- Correlação de Heskestad e Delichatsios

Heskestad e Delichatsios desenvolveram correlação para a máxima temperatura e velocidade baseado em testes subsequentes da análise feita por Alpert em 1972. Geralmente, os resultados dessa correlação predizem uma maior temperatura e velocidade de gases que os resultados utilizando as equações propostas por Alpert em 1972 [30].

O principal objetivo do estudo de Heskestad e Delichatsios em 1979 foi investigar experimentalmente a validade das relações de modelagem propostas anteriormente para o fluxo convectivo gerado por incêndios de "lei de força", ou seja, incêndios crescendo em taxa de liberação de calor com uma potência específica de ignição [2].

As expressões relacionam o tamanho do fogo, a taxa de crescimento do fogo, a altura acima do incêndio, a distância radial do fogo, a temperatura do gás e a velocidade do gás para a classe geral de incêndios. As correlações propostas estão descritas abaixo [10, 30, 52]:

$$T_{max} = T_{\infty} + 2,75 \left(0,188 + 0,313 \frac{r}{H}\right)^{-4/3} \dot{Q}^{2/3} H^{-5/3}, se 0 < r/H \leq 8 \quad \text{Eq. 28}$$

$$V_{max} = 0,197 \left(\frac{r}{H}\right)^{-0,63} \left(0,188 + 0,313 \frac{r}{H}\right)^{-2/3} \dot{Q}^{1/3} H^{-1/3}, se 0,4 < r/H \leq 8 \quad \text{Eq. 29}$$

Heskestad examinou os dados experimentais e descobriu que a temperatura do centro e a velocidade da linha central obedecem às seguintes relações, válidas acima da altura média da chama (L) [25]:

$$T_{max} = T_{\infty} + 25 \left(\frac{\dot{Q}_c^{2/5}}{H - z_0}\right)^{5/3} \quad \text{Eq. 30}$$

$$V_{max} = \left(\frac{\dot{Q}_c}{H - z_0}\right)^{1/3} \quad \text{Eq. 31}$$

$$L = 0,235 \dot{Q}^{2/5} - 1,02D \quad \text{Eq. 32}$$

3.4.1- Velocidade e temperatura

Os cálculos para o modelo de Heskestad e Delichatsios foram feitos utilizando as mesmas dimensões do cenário de incêndio e as mesmas posições para os sensores estipulados para Alpert e Cooper. A Figura 36 e Figura 37 mostram que os resultados para velocidade e temperatura máximas próximas ao teto dependem das classes dos veículos, para compartimento 1.

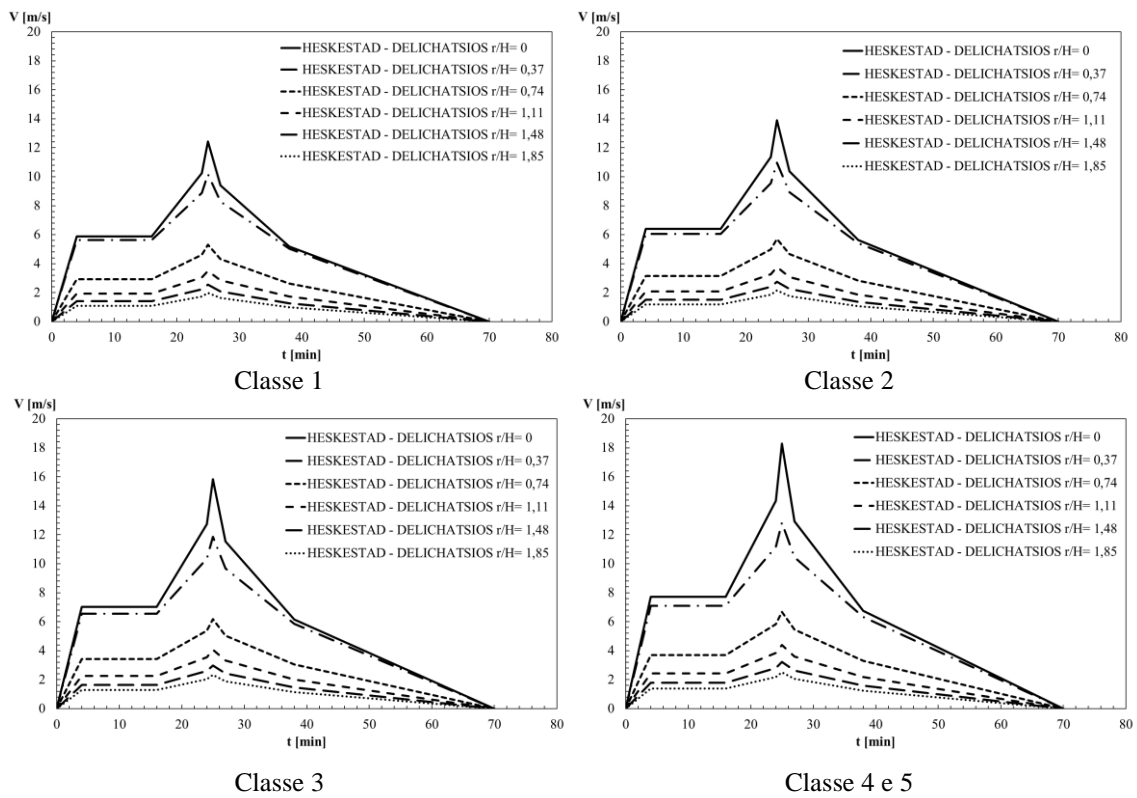


Figura 36. Velocidade perto do teto segundo correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 1

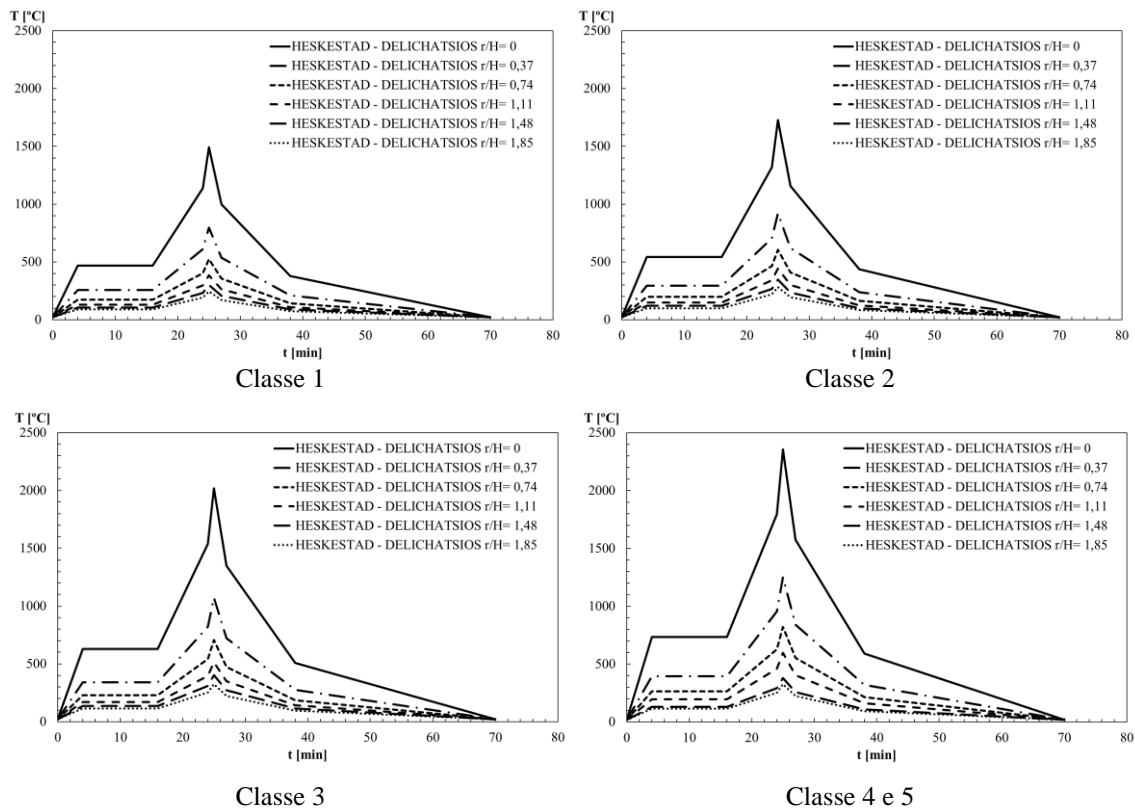


Figura 37. Temperatura perto do teto segundo correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 1

Também foram testadas as correlações de Heskestad e Delichatsios para compartimento 2, conforme mostrado na Figura 38 e Figura 39.

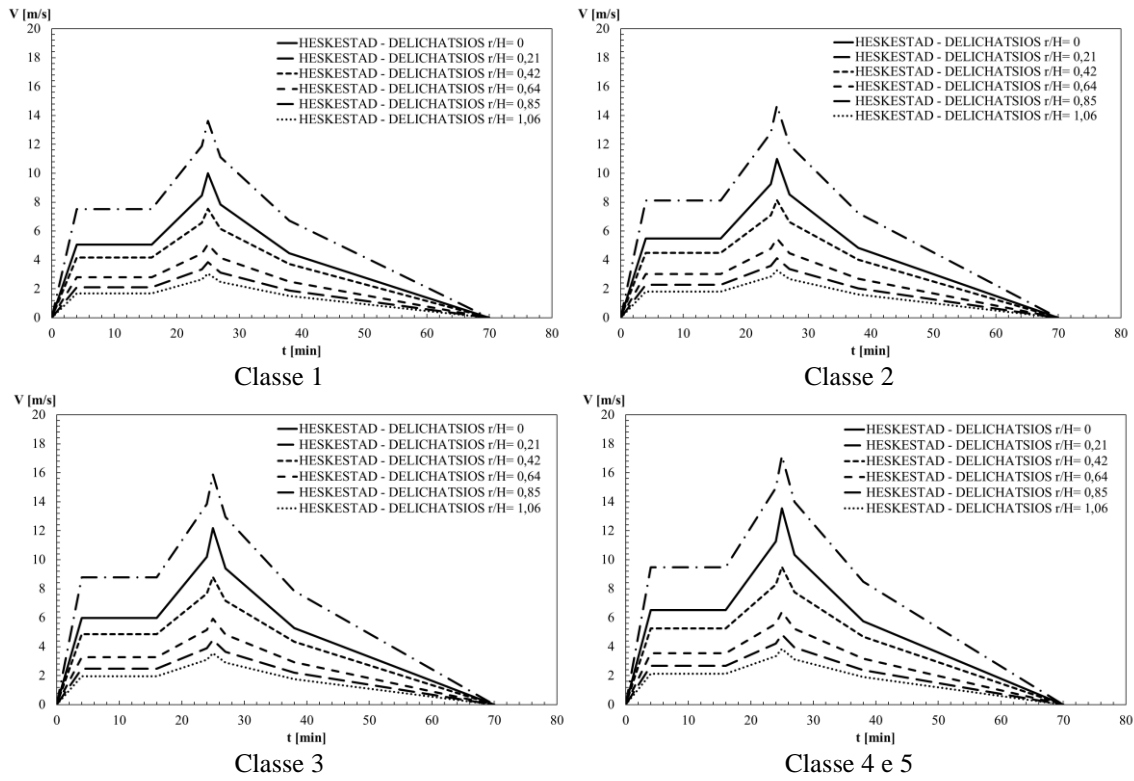


Figura 38. Velocidade perto do teto segundo correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 2

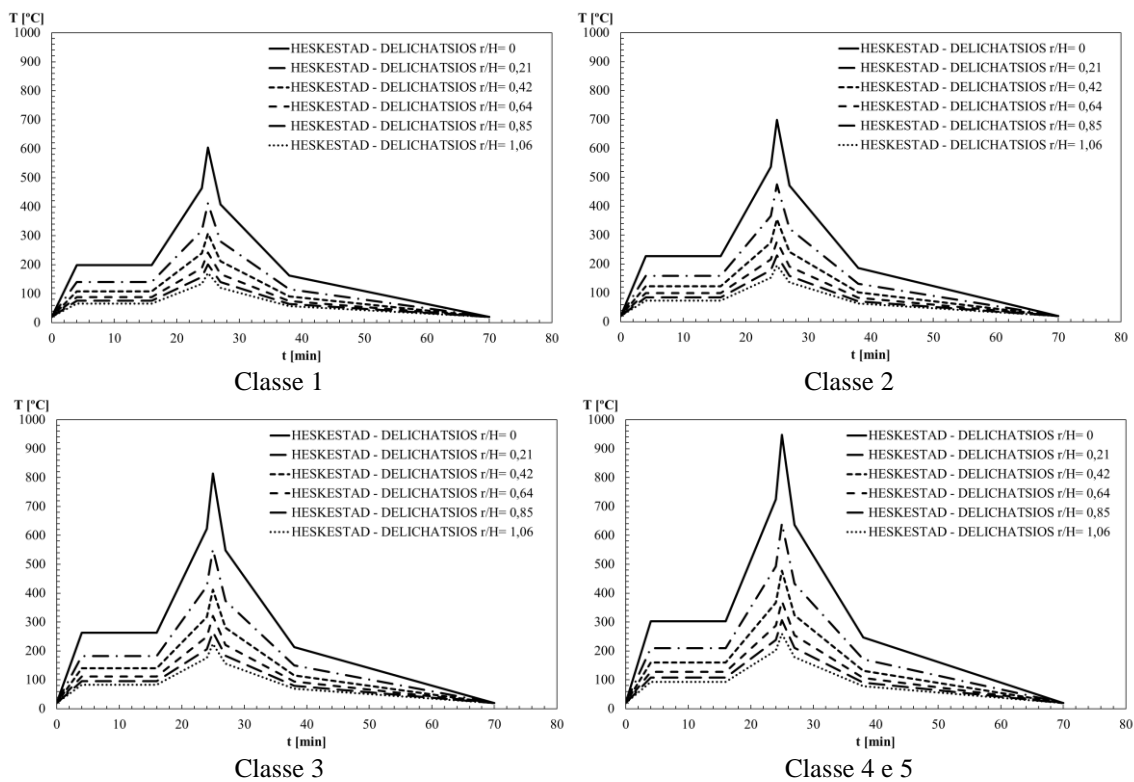


Figura 39. Temperatura perto do teto segundo correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 2

Assim como explicado para as correlações anteriores, a temperatura e velocidade máximas são obtidas para o mesmo instante de tempo de 25 minutos. As curvas de velocidade e temperatura máximas para compartimento 1 são mostradas na Figura 40 e Figura 41, respectivamente, comparando r/H em posições diferentes posições para todas as classes de veículos.

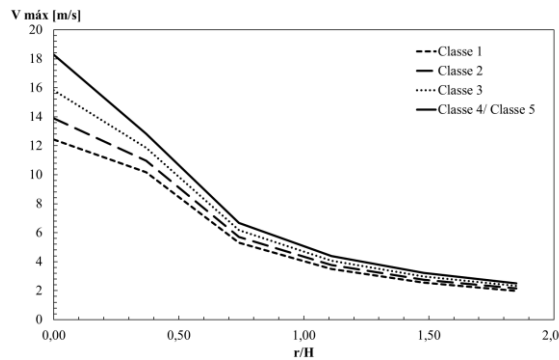


Figura 40. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 1

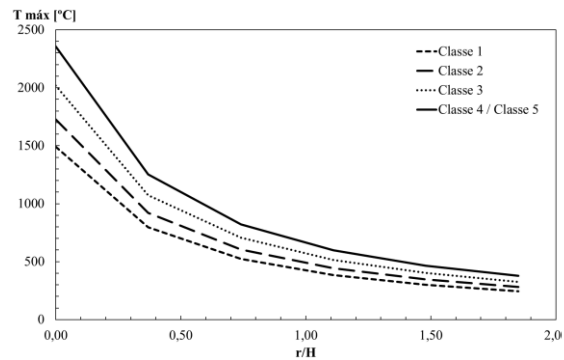


Figura 41. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 1

As curvas de velocidade e temperatura máximas para compartimento 2 com os mesmos parâmetros anteriores são mostradas na Figura 42 e Figura 43 respectivamente.

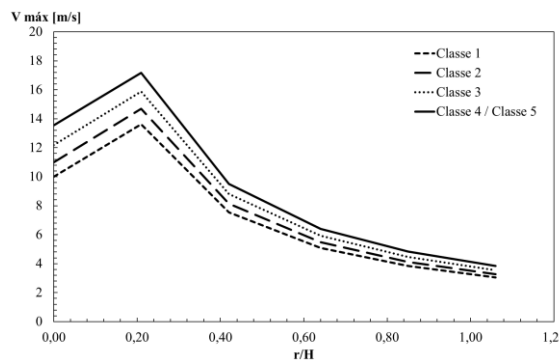


Figura 42. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 2

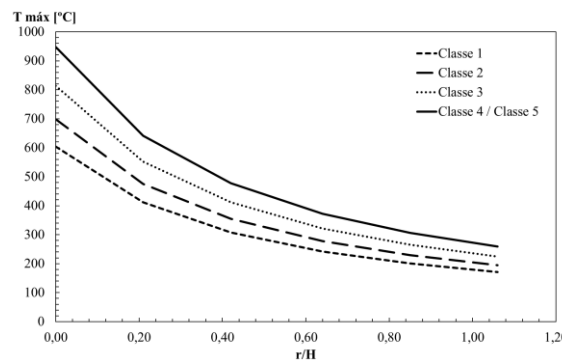


Figura 43. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Heskestad e Delichatsios para compartimento 2

Em todos os casos se verifica que a temperatura e velocidade máximas diminuem com a razão r/H , conforme esperado. Os valores de velocidade e temperatura máximas aumentam com a classe dos carros. Os resultados dessa correlação predizem uma maior temperatura e velocidade de gases que os resultados utilizando a equação proposta por

Alpert, em concordância com o esperado. A Tabela 12 e Tabela 13 (anexo 1) dispõe os resultados máximos de velocidade e temperatura nas seis posições radiais do compartimento 1 e 2, respectivamente.

3.5- Correlação de Motevalli e Marks

Motevalli realizou medições detalhadas usando velocimetria de correlação cruzada para incêndio de jato com teto não confinado em condições transientes e estacionária. Pequenos incêndios de 0,5 a 2,0 kW foram produzidos com um queimador de metano-ar pré-misturado. As correlações descritas abaixo se equivalem ou melhoraram os resultados de trabalhos anteriores [9]:

$$\frac{V}{V_{max}} = 1,59 \left(\frac{z_t}{l_V}\right)^{0,14} \exp\left[-1,517 \left(\frac{z_t}{l_V}\right)\right], \text{ se } 0,26 \leq r/H \leq 0,75 \quad \text{Eq. 33}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} = 4,24 \left(\frac{z_t}{l_T} + 0,094\right)^{0,755} \exp\left[-2,57 \left(\frac{z_t}{l_T}\right)\right], \text{ se } 0,26 \leq r/H \leq 2,0 \quad \text{Eq. 34}$$

$$\frac{l_V}{H} = 0,205 \left(1 - \exp\left[-1,75 \frac{r}{H}\right]\right), \text{ se } 0,26 \leq r/H \leq 1,5 \quad \text{Eq. 35}$$

$$\frac{l_T}{H} = 0,112 \left(1 - \exp\left[-2,24 \frac{r}{H}\right]\right), \text{ se } 0,26 \leq r/H \leq 2,0 \quad \text{Eq. 36}$$

Onde z_t representa a distância vertical medida a partir do teto. Os dados de l_T correlacionaram-se bem para ambas as alturas testadas ($H = 0,5 \text{ m}$ e $H = 1 \text{ m}$), todos os pontos fortes de fogo e em todos os locais r/H . Além de uma determinação mais precisa de l_T (devido à menor dispersão nos dados de temperatura), $l_T \ll H$ é válido para toda essa gama explicando a correlação superior dos perfis de temperatura em comparação com o da velocidade [9].

A Eq. 33 e a Eq. 34 descritas em função de \dot{Q} e H , respectivamente [9, 52]:

$$V_{max} = 0,0415 \left(\frac{r}{H}\right)^{-2} \dot{Q}^{1/3} H^{-1/3} + 0,427 \left(\frac{r}{H}\right)^{-1} \dot{Q}^{1/3} H^{-1/3} + 0,281 \dot{Q}^{1/3} H^{-1/3}, \quad \text{se } 0,26 \leq r/H \leq 2 \quad \text{Eq. 37}$$

$$T_{max} = T_{\infty} + 0,23 \left(\frac{r}{H}\right)^{-2} \dot{Q}^{2/3} H^{-5/3} + 5,2 \left(\frac{r}{H}\right)^{-1} \dot{Q}^{2/3} H^{-5/3} + 2,7 \dot{Q}^{2/3} H^{-5/3}, \quad \text{se } 0,26 \leq r/H \leq 2,0 \quad \text{Eq. 38}$$

3.5.1- Velocidade e temperatura

Os cálculos para o modelo de Motevalli e Marks foram feitos usando as mesmas dimensões para os diferentes cenários de incêndio e as mesmas posições para os sensores estipulados para as outras correlações. A Figura 44 e a Figura 45 mostram os resultados para velocidade e temperatura máximas próximas ao teto, para $H=2,7$ m.

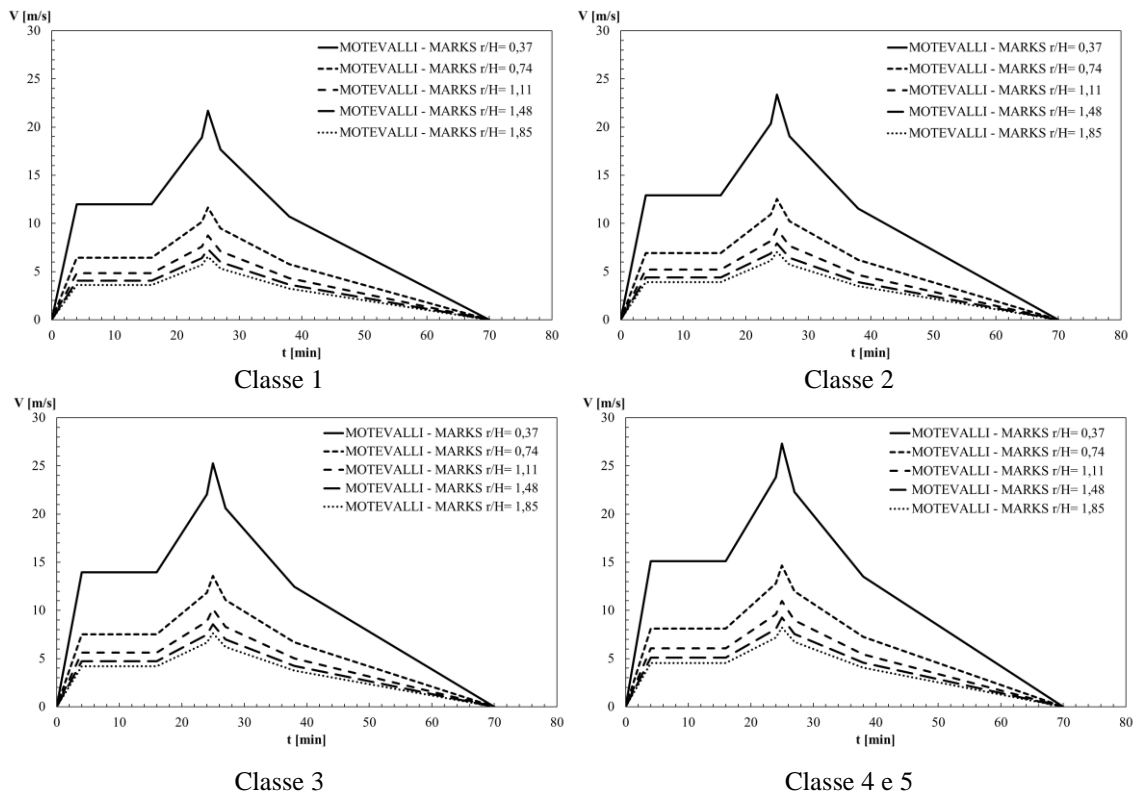


Figura 44. Velocidade perto do teto segundo correlação de Motevalli e Marks para compartimento 1

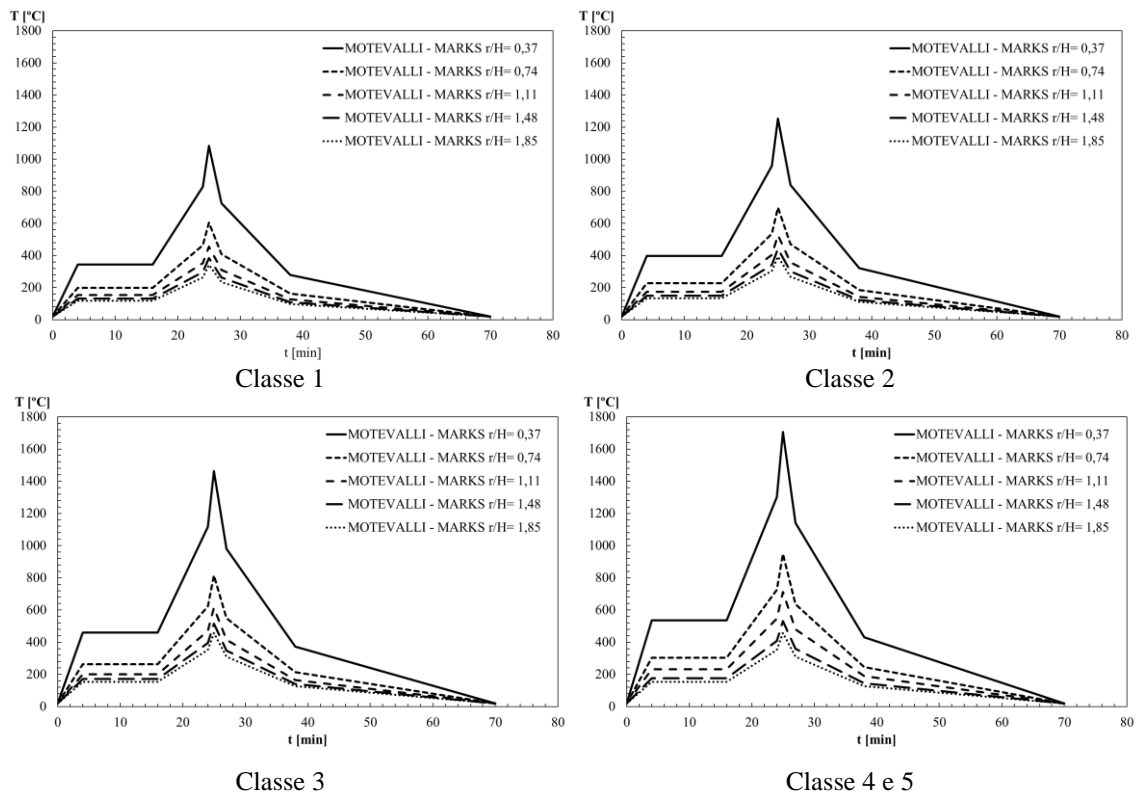


Figura 45. Temperatura perto do teto segundo correlação de Motevalli e Marks para compartimento 1

Também foram testadas as equações de Motevalli e Marks para compartimento 2, conforme mostrado na Figura 46 e Figura 47.

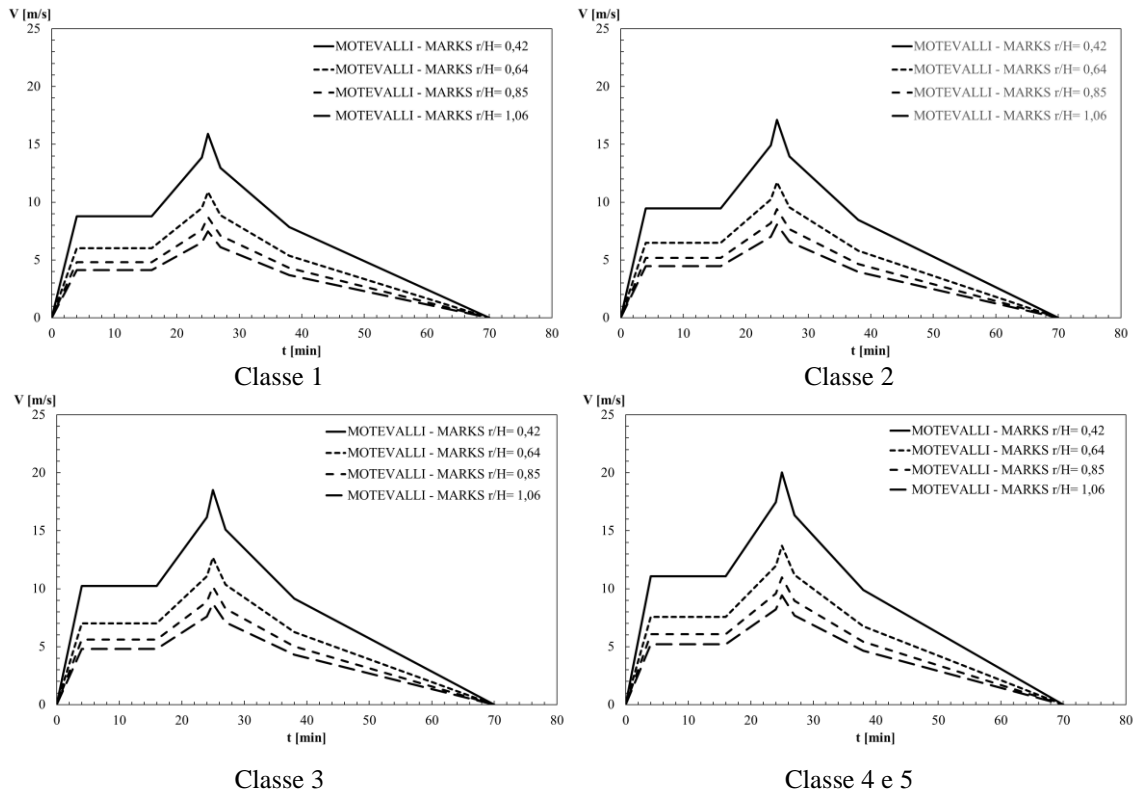


Figura 46. Velocidade perto do teto segundo correlação de Motevalli e Marks para compartimento 2

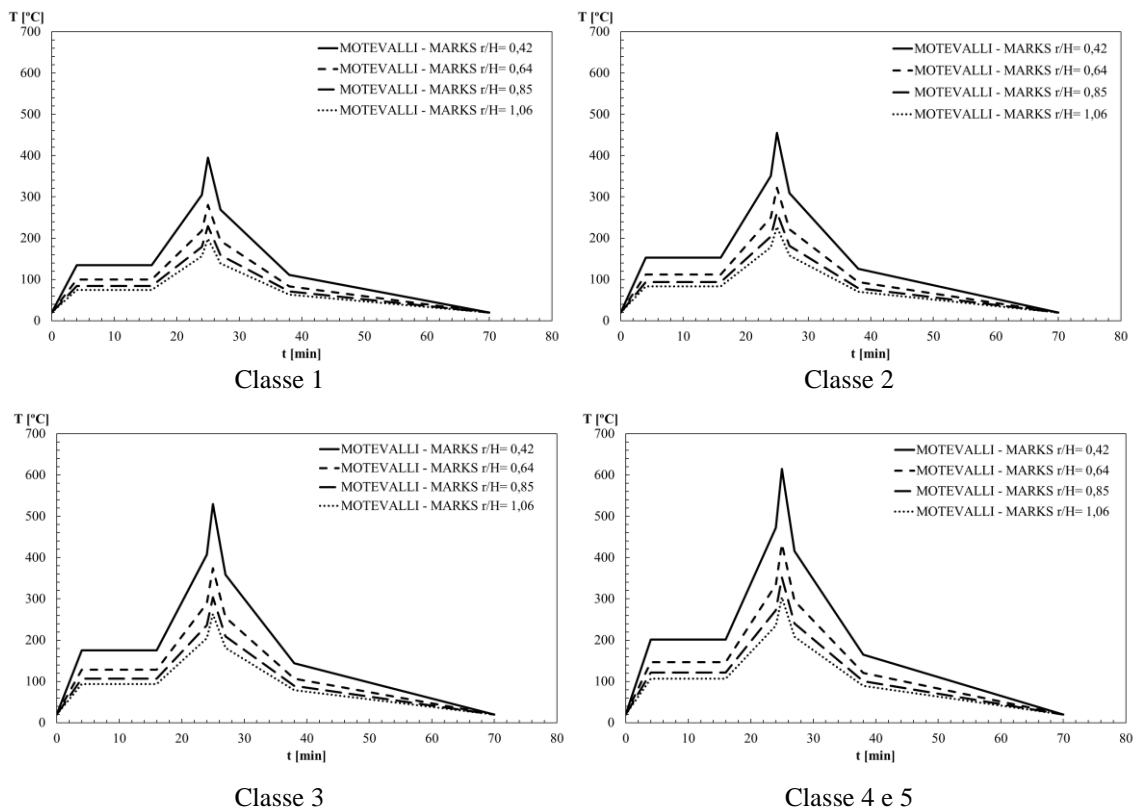


Figura 47. Temperatura perto do teto segundo correlação de Motevalli e Marks para compartimento 2

Importa referir que as equações propostas por Motevalli e Marks atuam entre $0,26 \leq r/H \leq 0,75$ para o cálculo da velocidade e entre $0,26 \leq r/H \leq 2$ para o cálculo da temperatura.

Assim como explicado para outras correlações, a temperatura e velocidade máximas são obtidas no instante de tempo de 25 minutos. As curvas de velocidade e temperatura máximas para compartimento 1 são mostradas na Figura 48 e Figura 49, respectivamente, comparando r/H em posições diferentes posições para classe 1, 2, 3 e 4/5.

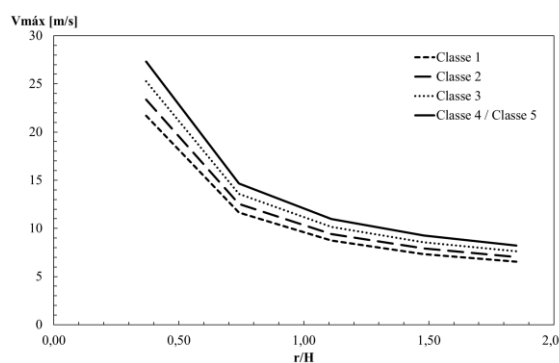


Figura 48. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Motevalli e Marks para compartimento 1

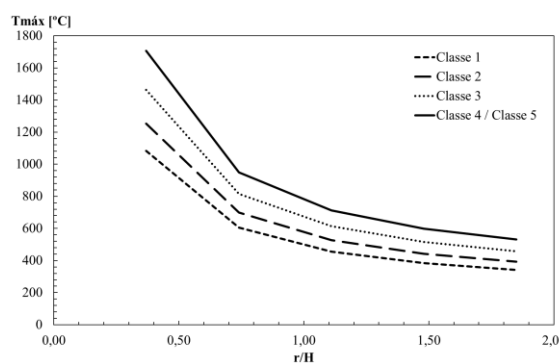


Figura 49. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Motevalli e Marks para compartimento 2

As curvas de velocidade e temperatura máximas para compartimento 2 com os mesmos parâmetros anteriores são mostradas na Figura 50 e Figura 51, respectivamente.

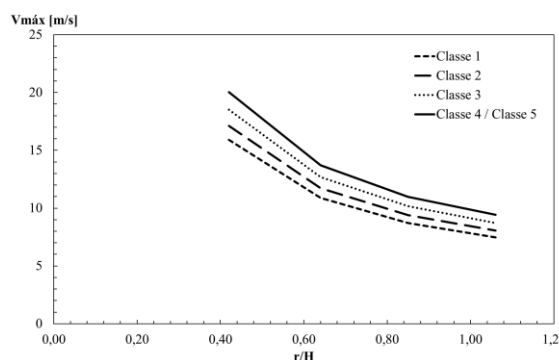


Figura 50. Velocidade máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Motevalli e Marks para compartimento 2

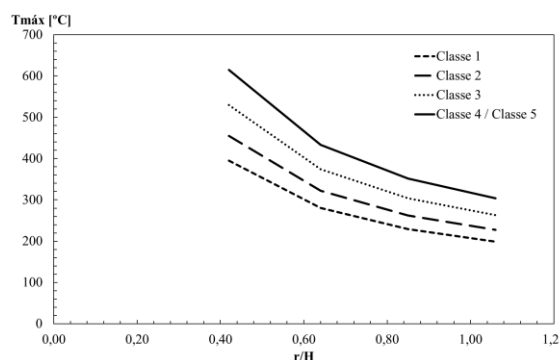


Figura 51. Temperatura máxima para as diferentes classes de automóveis calculadas pela correlação de Motevalli e Marks para compartimento 2

Em todos os casos se verifica que a temperatura e velocidade máximas diminuem com a razão r/H , conforme esperado. Os valores de velocidade e temperatura máximas

aumentam com a classe dos carros. É importante notar que as equações propostas por Motevalli e Marks atuam entre $0,26 \leq r/H \leq 0,75$ para a velocidade e $0,26 \leq r/H \leq 2$ para a temperatura. Os resultados velocidade e temperatura máximas das seis posições radiais estão disponíveis na Tabela 14 para compartimento 1 e Tabela 15 para compartimento 2, do anexo 1.

3.6- Comparação dos modelos correlativos

3.6.1- Velocidade máxima no compartimento 1

A Figura 52 mostra a comparação entre diferentes modelos correlativos para a determinação da velocidade máxima, resultante de incêndios localizados de veículos de todas as classes para o compartimento 1.

A velocidade máxima diminui com a posição radial, sendo que os resultados dos modelos correlativos de Cooper e Alpert 2011 apresentam valores intermédios entre todos os modelos comparados. Os resultados do modelo de Heskestad e Delichatsios se aproximam dos resultados do modelo de Alpert de 1972 quanto maior for o quociente r/H , sendo que a diferença relativa no ponto $r/H=1,85$ para classe 1 é de 35,35%. O modelo de Cooper também se aproxima do modelo de Alpert de 1972 quanto maior for o quociente r/H , sendo que para um valor de $r/H=1,85$ da classe 1 a diferença é de 12,10%. Comparando o modelo proposto por Alpert em 1972 e a revisão de 2011, a diferença mais elevada 38,79% acontece quando $r/H=0,37$, para um veículo de classe 1. O modelo proposto por Motevalli e Marks para todas as posições radiais r/H calculados têm velocidades máximas mais elevadas que as determinadas pelas restantes correlações.

A Tabela 38, Tabela 39, Tabela 40 e Tabela 41, no anexo 1, mostram os valores das diferenças para a velocidade máxima, no caso de incêndios localizados para as quatro classes de veículos, nas seis posições radiais estudadas, tendo em consideração o modelo de Alpert de 1972 com referência.

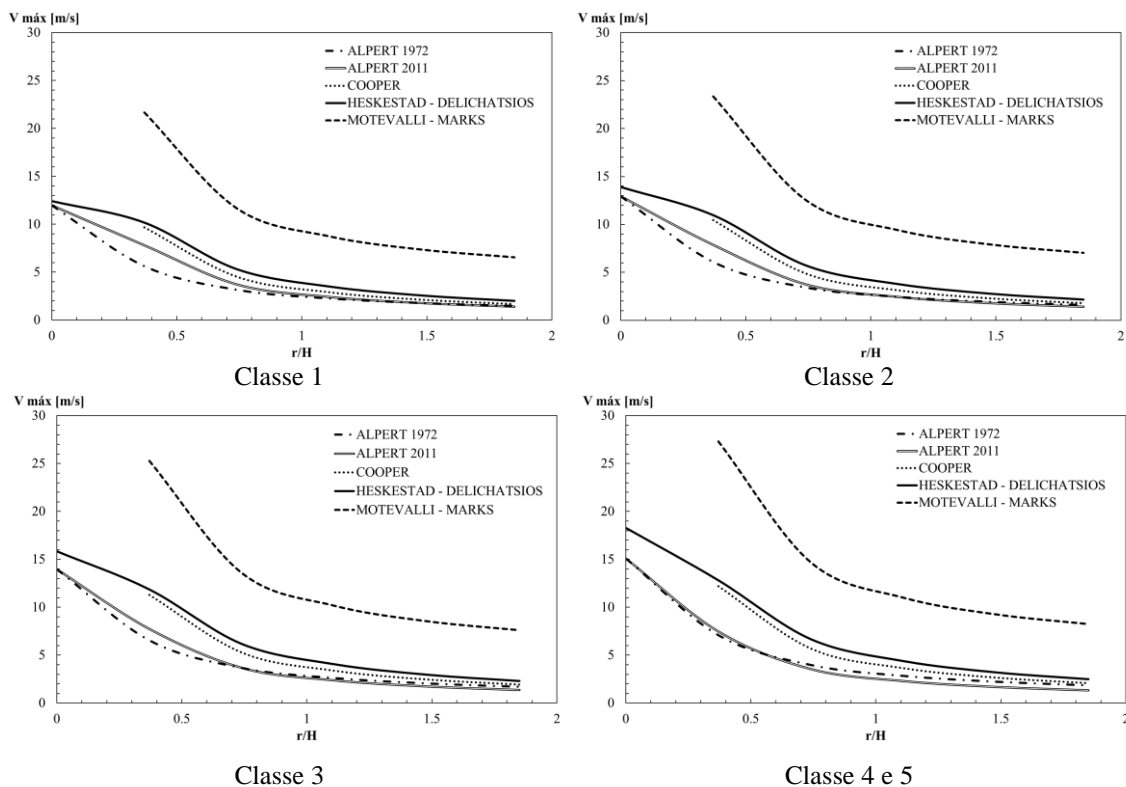


Figura 52. Valores de velocidade máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 1

3.6.2- Velocidade máxima no compartimento 2

O mesmo estudo foi desenvolvido para o compartimento 2, como mostrado na Figura 53. A velocidade máxima diminui com a posição radial, sendo que os resultados dos modelos correlativos de Cooper e de Alpert 2011 ocupam a posição intermédia. Quanto maior for o r/H , os resultados de Heskestad e Delichatsios se aproximam dos resultados de Alpert de 1972, sendo que a diferença relativa no ponto $r/H=1,06$ para o veículo da classe 1 é de 30,34%. O mesmo acontece com o modelo de Cooper, sendo que para a posição $r/H=1,06$ a diferença é de 57,00%, também para a mesma classe de veículo. Para todas as posições relativas r/H , o modelo proposto por Motevalli e Marks têm velocidades máximas mais elevadas. Comparando-se os dois modelos de Alpert, a diferença mais elevada ocorre para a posição relativa $r/H=0,42$ e é igual a 39,36% na classe 1.

Na Tabela 42, Tabela 43, Tabela 44 e Tabela 45 do anexo 1, é possível verificar as diferenças dos resultados dos modelos para o cálculo da velocidade máxima das quatro classes de veículos e para as seis posições radiais consideradas no compartimento 2, sendo utilizado como referência o modelo de Alpert de 1972.

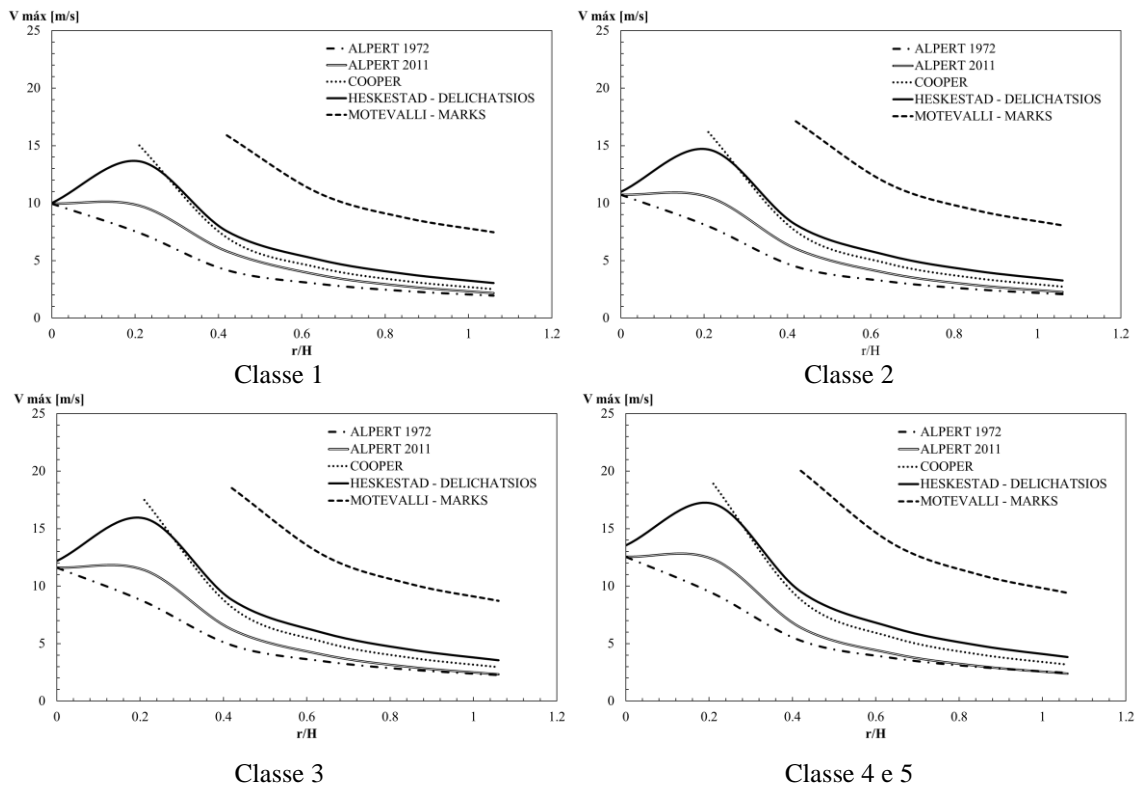


Figura 53. Valores de velocidade máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 2

3.6.3- Temperatura máxima no compartimento 1

A Figura 54 mostra a comparação entre diferentes modelos correlativos e classes de carros a temperatura máxima, sendo que esta diminui com o aumento da razão r/H . Após a razão de $r/H = 0,74$, o modelo correlativo de Heskestad e Delichatsios superestima a temperatura máxima em comparação com os modelos Alpert de 1972 e Cooper. Os resultados de Heskestad e Delichatsios se aproximam dos de Alpert de 1972 quando r/H é maior do que 1,85, sendo que a diferença relativa nesse ponto é de 8,91% para a classe 1. O modelo proposto por Motevalli e Marks para todos os r/H calculados têm temperaturas máximas mais elevadas, chegando uma diferença de 74,24% para classe 1 comparando com o modelo de Alpert de 1972. O modelo de Cooper se correlaciona bem com o modelo de Alpert de 1972 para r/H maiores que 1,11, sendo que a partir desse r/H as diferenças são menores que 4,64% para classe 1. Comparando-se os dois modelos de Alpert, temos que as diferenças aumentam quando r/H é maior, sendo que para $r/H=1,85$, a diferença é de 19,96% para a classe 1.

Tabela 46, Tabela 47, Tabela 48, Tabela 49 mostram os valores de diferença das temperaturas das quatro classes de carros nas seis posições radiais estudadas, levando em consideração o modelo de Alpert de 1972 e estão disponíveis no anexo 1.

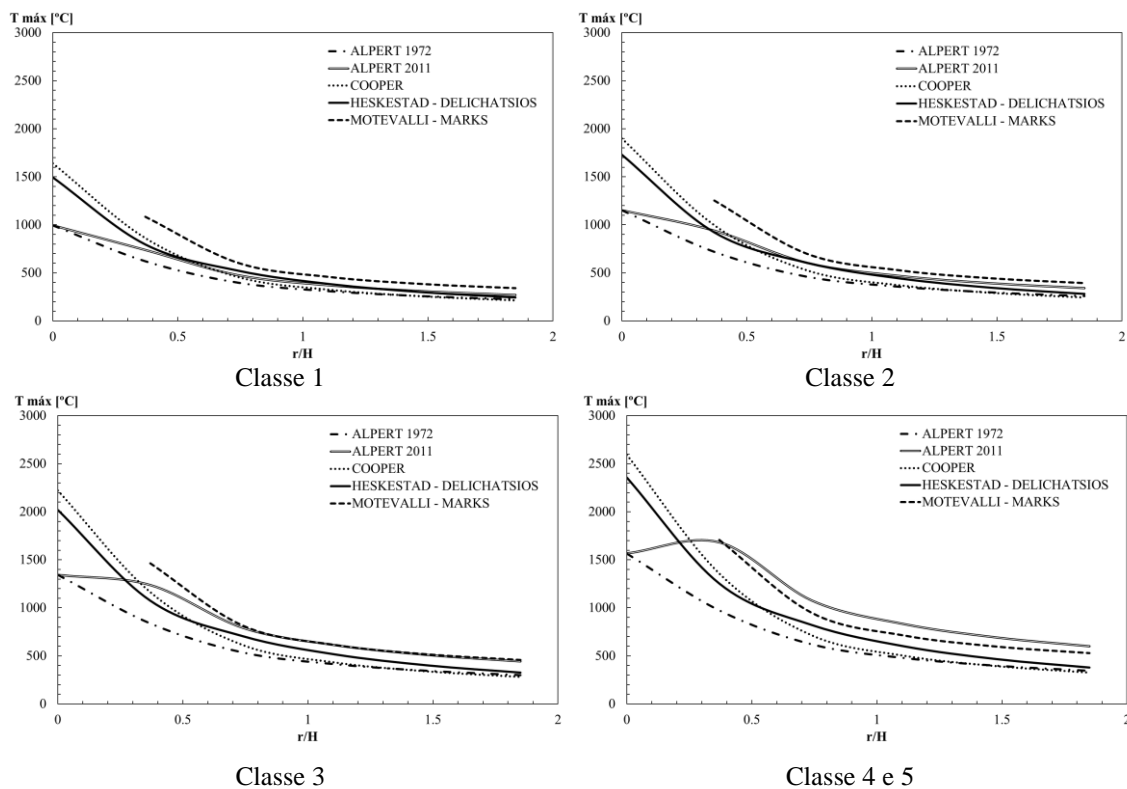


Figura 54. Valores de temperatura máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 1

3.6.4- Temperatura máxima no compartimento 2

A Figura 55 mostra a mesma comparação dos resultados para o valor da temperatura máxima de incêndios localizados de veículos no compartimento 2. Para valores de r/H superiores a 0,64, o modelo correlativo de Heskestad e Delichatsios superestima a temperatura máxima em comparação com os modelos Alpert de 1972 e Cooper. Para valores de r/H inferiores, o modelo de Cooper determina temperaturas máximas maiores que os modelos correlativos de Heskestad e Delichatsios e Alpert de 1972. O modelo de Cooper se correlaciona bem com o modelo de Alpert para r/H maiores que 1,06, sendo que a diferença entre os dois modelos para uma posição relativa r/H é de 5,39%, para o caso de um veículo da classe 1. O modelo proposto por Motevalli e Marks para todas as posições relativas em estudo r/H , proporcionam temperaturas máximas mais elevadas, chegando a uma diferença de 66,21% na classe 1, quando comparando com o modelo de Alpert. Considerando os dois modelos de Alpert, verifica-se que a diferença aumenta com o aumento do quociente r/H , sendo que, para a posição relativa $r/H=1,06$ de um veículo da classe 1, a diferença é de 12,85%.

Na Tabela 42, Tabela 43, Tabela 44 e Tabela 45 do anexo 1 é possível verificar as diferenças para os valores da temperatura máxima para todas as classes de veículos e para

todas as seis posições radiais referentes ao compartimento 2, sendo utilizado como referência o modelo de Alpert de 1972.

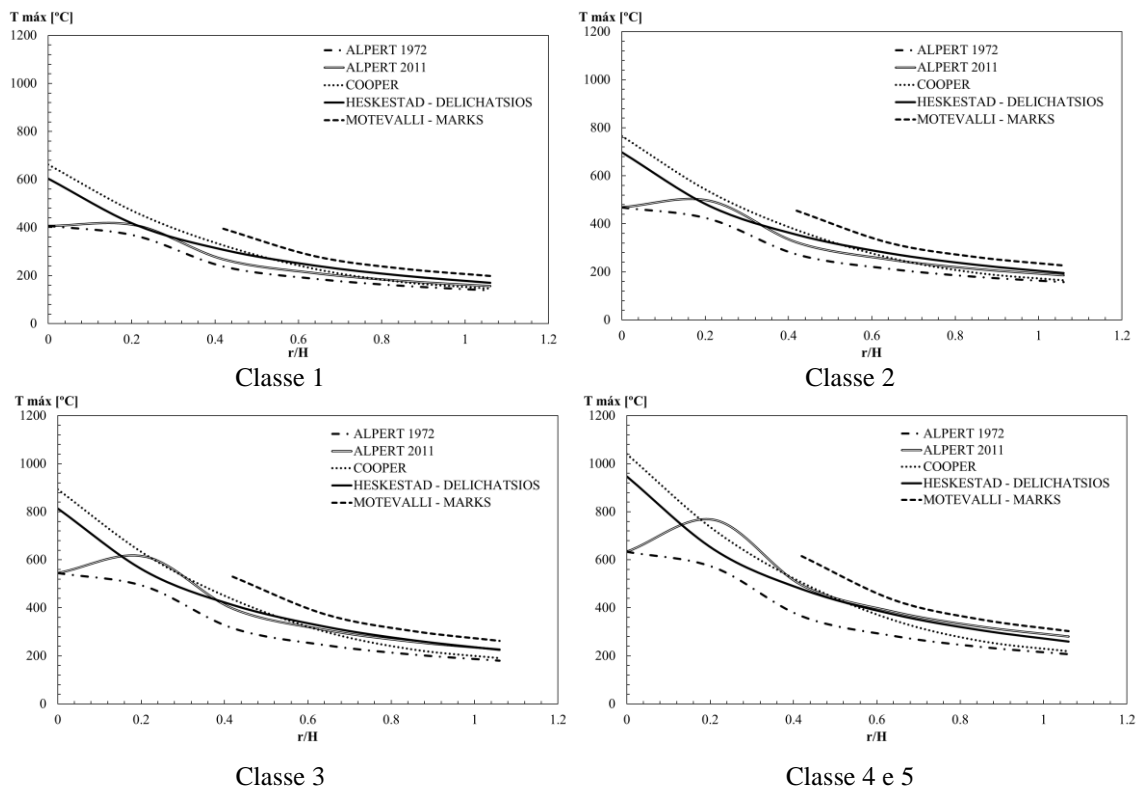


Figura 55. Valores de temperatura máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 2

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

4- CFAST

4.1- Apresentação do CFAST

O CFAST é um programa que possui um modelo de incêndio de duas zonas, que permite caracterizar o ambiente térmico causado por um incêndio dentro de uma estrutura compartimentada. Cada compartimento é dividido em uma camada de gás superior e inferior. Embora as equações que governam o transporte se baseiem nas leis fundamentais de conservação de massa e energia, os algoritmos específicos do CFAST são baseados em correlações empíricas [53].

O programa calcula o desenvolvimento da temperatura dos gases em função do tempo, considerando uma hipótese fundamental de que a temperatura é uniforme em cada camada. Os principais dados que devem ser fornecidos ao programa são: dimensões do compartimento, propriedades do material das paredes e das lajes de cada compartimento, dimensões e posições das aberturas de fluxo horizontal e vertical, como portas, janelas e aberturas de ventilação, especificações de ventilação mecânica, propriedades do incêndio e especificações sobre atuadores *sprinklers* e detectores [53].

Como resultado da simulação, o programa permite determinar as condições térmicas na sala, a transferência de calor para paredes e lajes, a intensidade do fogo e altura da chama, as velocidades dos gases através de aberturas e os tempos de ativação dos detectores e dos atuadores *sprinklers*. A Figura 56 mostra uma representação de um volume de controle de um modelo de duas zonas.

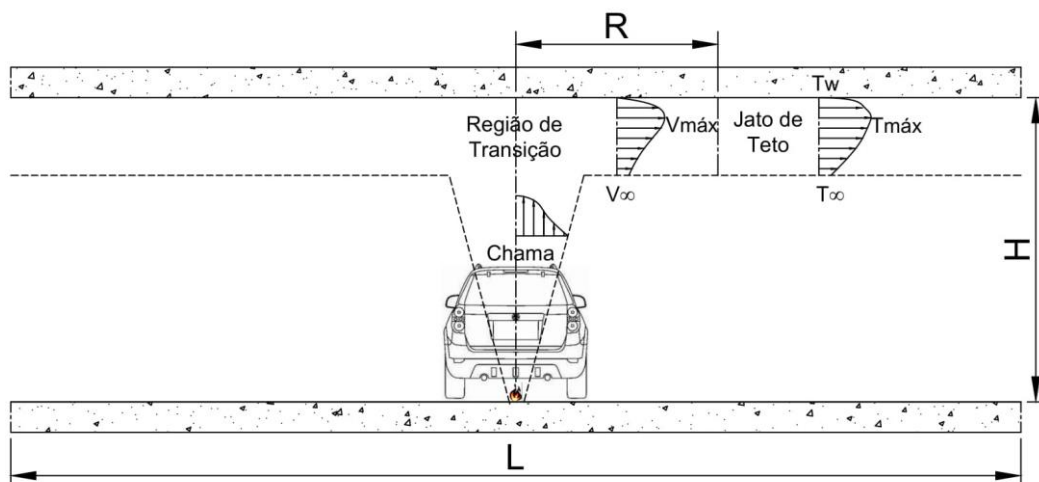


Figura 56. Representação de um volume de controle em um modelo de duas camadas [53]

4.2- Modelo

O modelo proposto é o mesmo utilizado nos modelos correlativos. Para diferentes eventos de incêndio também foram determinadas as temperaturas e velocidades perto do teto de um incêndio de jato. As várias etapas para a simulação são apresentadas em seguida com a especificação de todos os dados para cada parâmetro de entrada.

4.2.1- Simulação do ambiente

O tempo de simulação foi de 4200 s, sendo que o intervalo de saída de texto definido como 50 s e o intervalo de saída de folha de cálculo em 10 s. O passo de tempo máximo foi definido como padrão. A temperatura inicial do ambiente foi definida como 20°C e os valores iniciais para a pressão atmosférica dentro e fora do compartimento foram definidas como 101325 Pa. A umidade dentro do ambiente foi considerada 50% e o incremento de tempo foi mantido o padrão do programa.

4.2.2- Propriedades térmicas

Foram definidos dois materiais no compartimento, o aço foi usado para definição do alvo e o concreto como definição da laje, parede e chão. No CFAST, o calor específico (c_p) e a condutividade térmica (λ) são dadas como constantes, porém estas propriedades são dependentes da temperatura, conforme mostrado na Figura 11. As propriedades desses materiais colocadas no CFAST são dadas na Tabela 5.

Tabela 5. Propriedades térmicas do concreto e aço

Propriedades térmicas	Concreto	Aço
Densidade	2200 kg/m ³	7850 kg/m ³
Condutividade térmica	0,002 kW/(m °C)	0,054 kW/(m °C)
Calor específico	0,9 kJ/ (kg °C)	0,425 kJ/ (kg °C)
Emissividade	0,7	0,7

4.2.3- Compartimento de incêndio

A geometria assumida foi X=10 m de largura (posição absoluta igual a 0m), Y=10 m de comprimento (posição absoluta igual a 0 m) e Z=3 m de altura (posição absoluta

igual a 0 m). Outra simulação foi feita com a altura $Z=5$ m e posição absoluta igual a 0 m. A característica do fluxo foi dada como normal para um modelo de duas zonas.

4.2.4- Abertura de parede

A geometria das aberturas foi definida na superfície direita e esquerda do compartimento, usando uma dimensão da soleira igual a 0 m, uma dimensão de ombreira igual a 3 m e uma largura correspondente a 10 m. As paredes laterais do compartimento foram consideradas totalmente abertas durante a simulação. Não foram consideradas ventilação pelo teto/piso e ventilação mecânica no modelo. Para o segundo compartimento, apenas a dimensão de ombreira alterada, sendo considerada de 5m.

4.2.5- Tipo de incêndio

A fonte de incêndio do evento fica no centro do compartimento, acima do solo, com uma altura de 0,3m. Esta posição está relacionada com o cenário de incêndio de um veículo. O critério de ignição foi considerado igual a 0s, sem alvo de ignição. Os valores da taxa de libertação de calor HRR foram definidos para cada classe de carro, conforme estabelecido na Tabela 4.

4.2.6- Alvos para medições de temperatura

Foram definidos seis alvos com intuito de obter a temperatura local dos gases quentes na zona da chama e perto de teto. Esses alvos foram definidos num material de elevada condutividade térmica (aço), usando uma geometria em forma de placa fina (de espessura 0,001m). A disposição de seis alvos é dada conforme Tabela 32 para compartimento 1 e Tabela 33 para compartimento 2, disponíveis no anexo 2.

4.2.7- Detectores de incêndio para medição da velocidade

Seis detectores (alarmes térmicos) foram colocados no teto do compartimento e vão permitir determinar a velocidade máxima dos gases na camada quente. A temperatura de ativação foi definida como sendo de 100 °C. As posições radiais dos detectores são

definidas na Tabela 34 para compartimento 1 e Tabela 35 para compartimento 2, disponíveis no anexo 2.

4.2.8- Resultados

Os compartimentos foram divididos em uma grelha com 50 divisões, conforme representação da Figura 57 e Figura 58. Foi feito um teste de convergência da solução para ambos os compartimentos para decidir sobre o número de divisões. Os resultados obtidos no teste de convergência se encontram no anexo 2, assim como os demais resultados obtidos pelo programa CFAST.

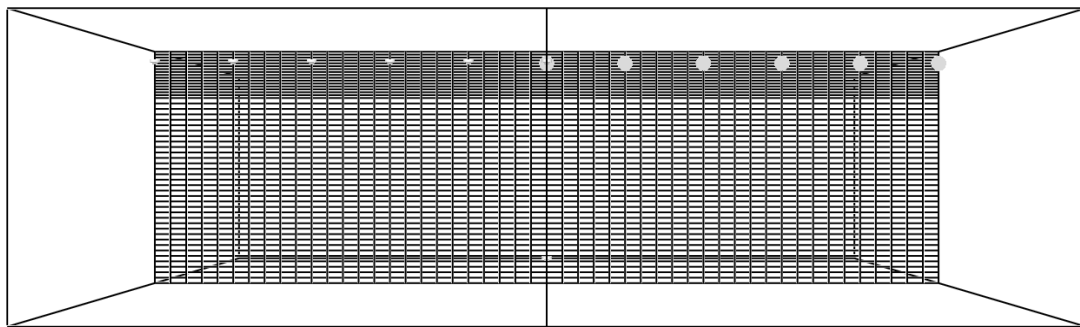


Figura 57. Compartimento 1 (H=3m)

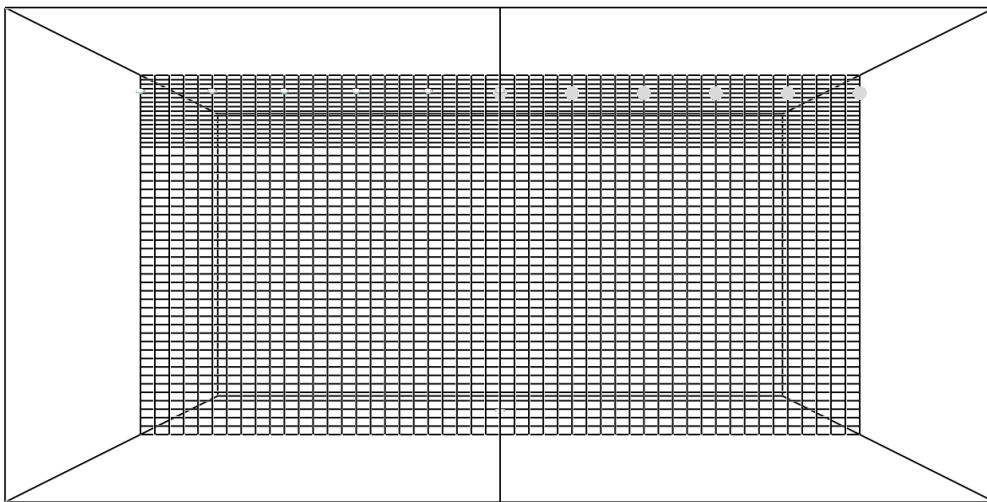


Figura 58. Compartimento 2 (H=5m)

4.2.8.1- Velocidade e temperatura

As condições colocadas no programa CFAST foram as mesmas utilizadas para a comparação dos modelos correlativos ($T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$, $H = 2,7\text{ m}$ e $D = 2\text{ m}$). A velocidade máxima e a temperatura máxima foram determinadas para seis sensores e alvos no teto, para as diferentes classes de veículos, conforme Figura 59 e Figura 61, respectivamente. A Figura 60 e Figura 62 mostram os campos de velocidade e de temperatura para o instante de tempo correspondente aos valores máximos.

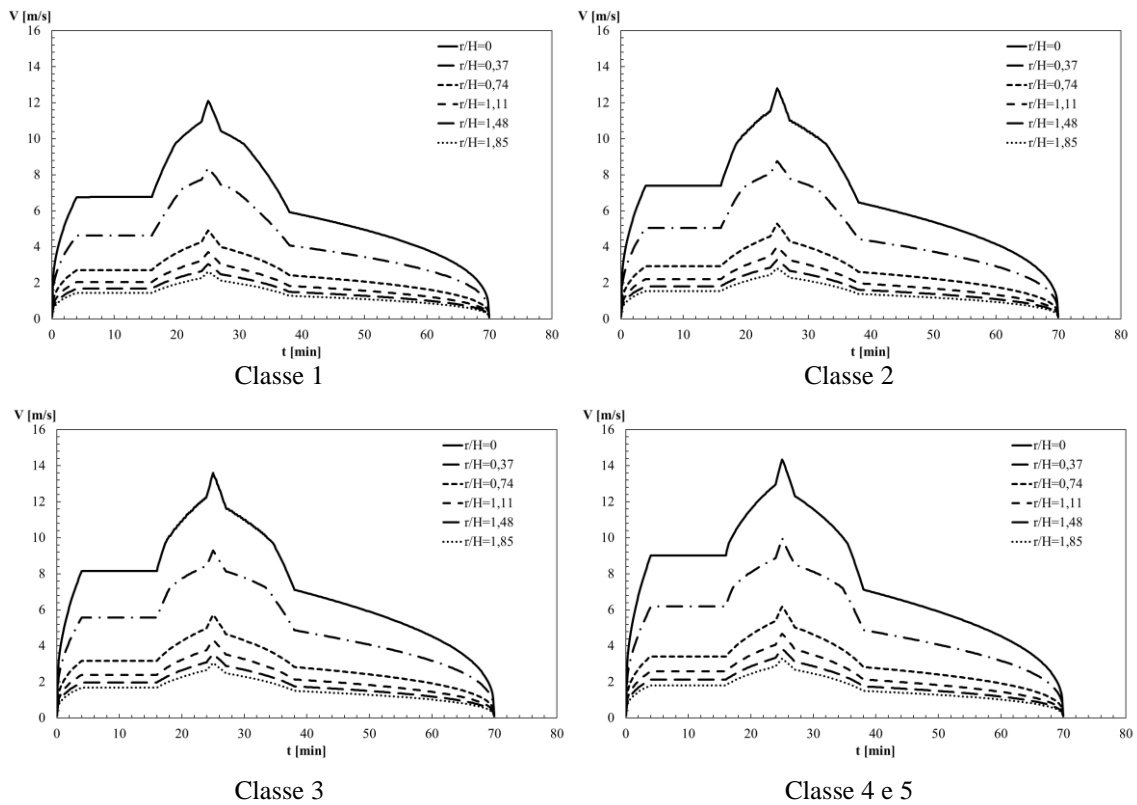


Figura 59. Resultados do CFAST para velocidade perto do teto para compartimento 1

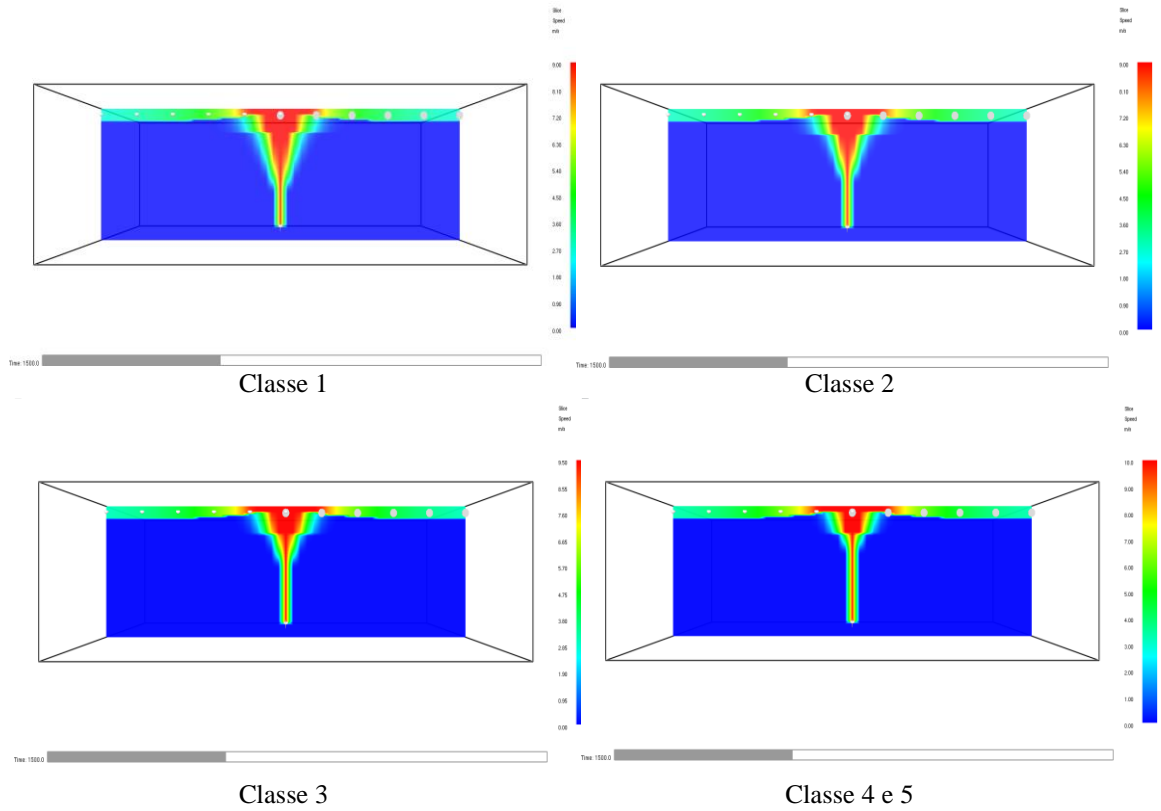


Figura 60. Simulação do CFAST de velocidade máxima para compartimento 1

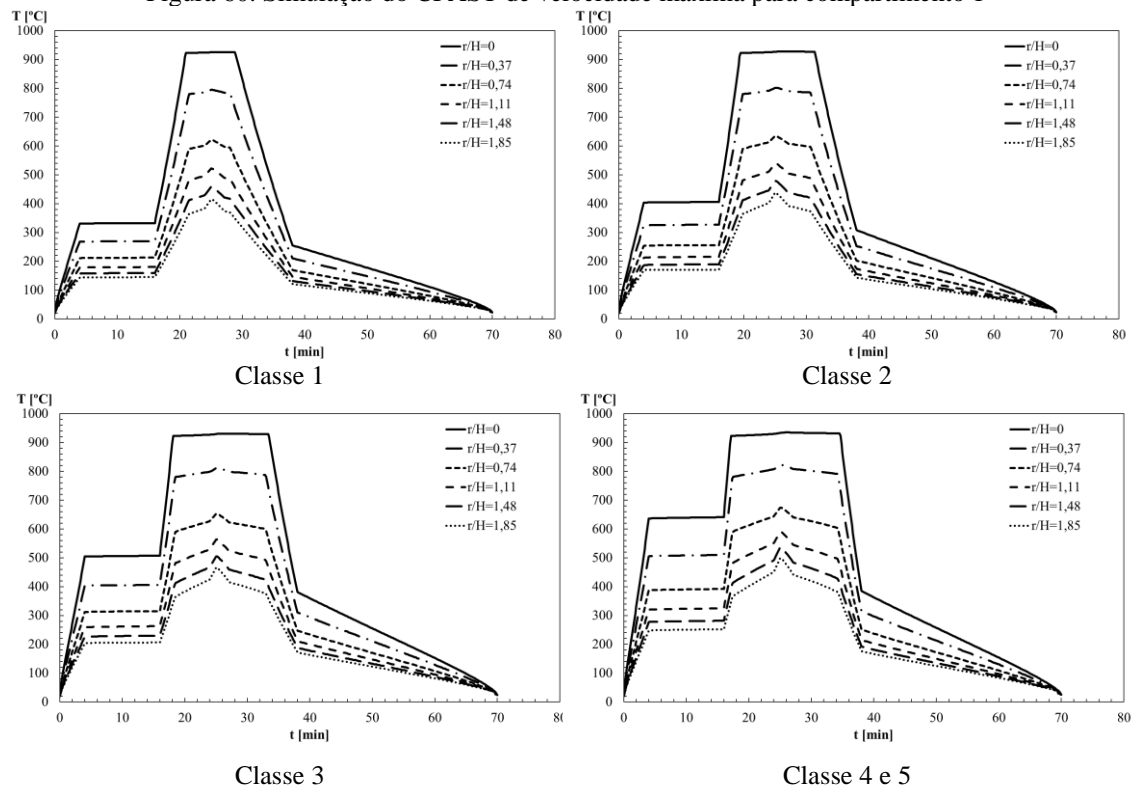


Figura 61. Resultados do CFAST para temperatura perto do teto para compartimento 1

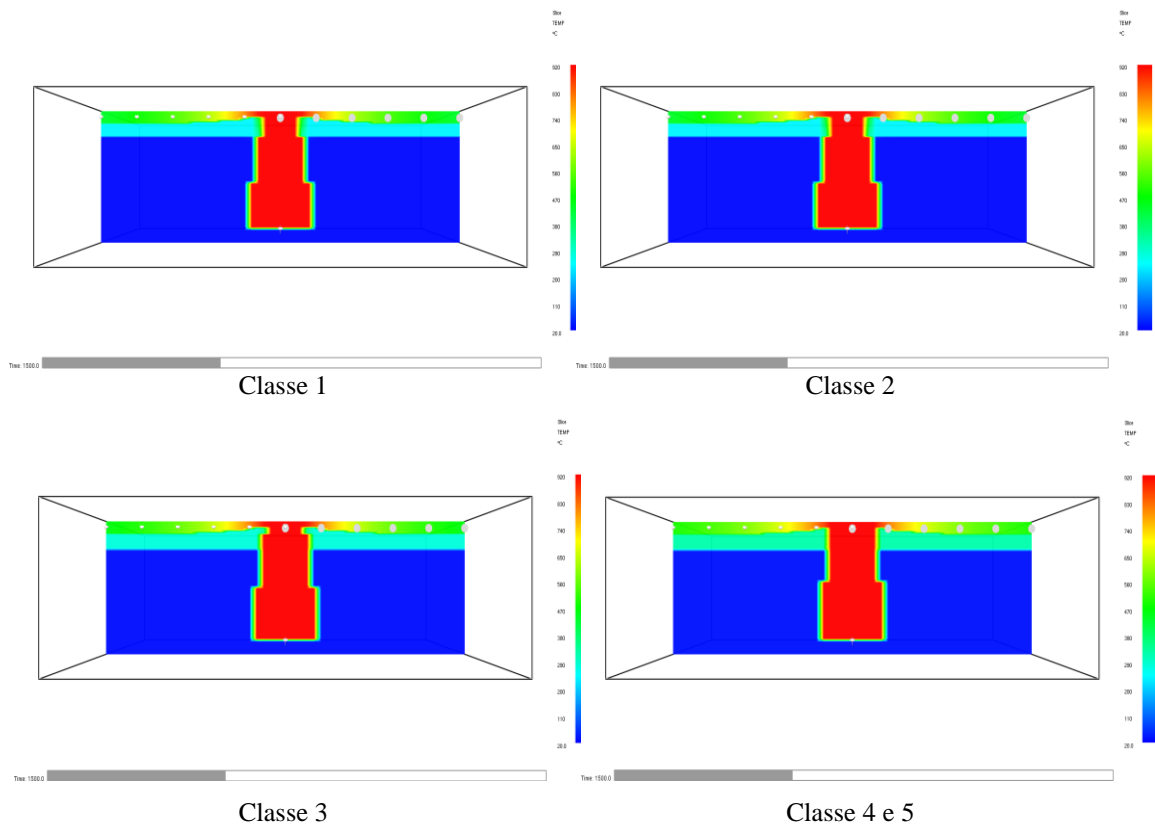


Figura 62. Simulação do CFAST de temperatura máxima, para compartimento 1

Também foram calculados a velocidade e temperatura máximas para seis sensores no teto para estudo de outro cenário, correspondente ao compartimento 2 ($H = 4,7\text{ m}$) para todas as diferentes classes de veículos, conforme Figura 63 e Figura 65, respectivamente. A Figura 64 e Figura 66 mostram os campos de velocidade e de temperatura para o instante mais crítico da simulação CFAST.

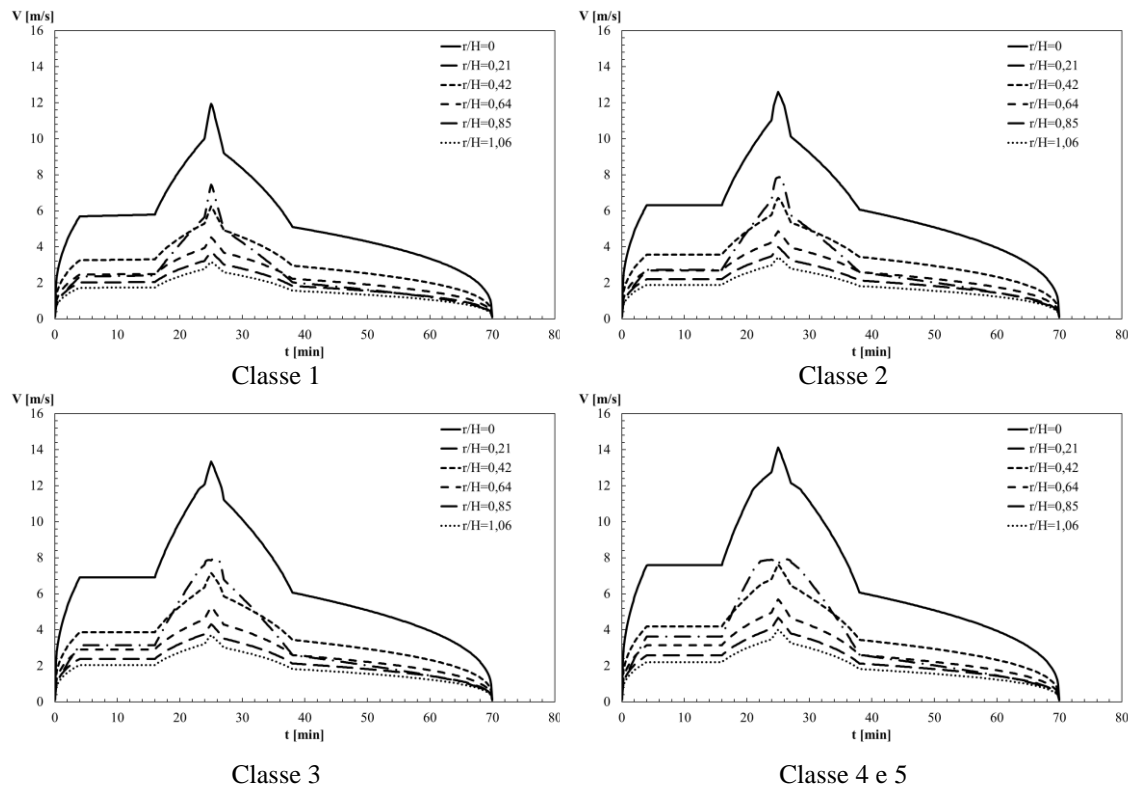


Figura 63. Resultados do CFAST para velocidade perto do teto para compartimento 2

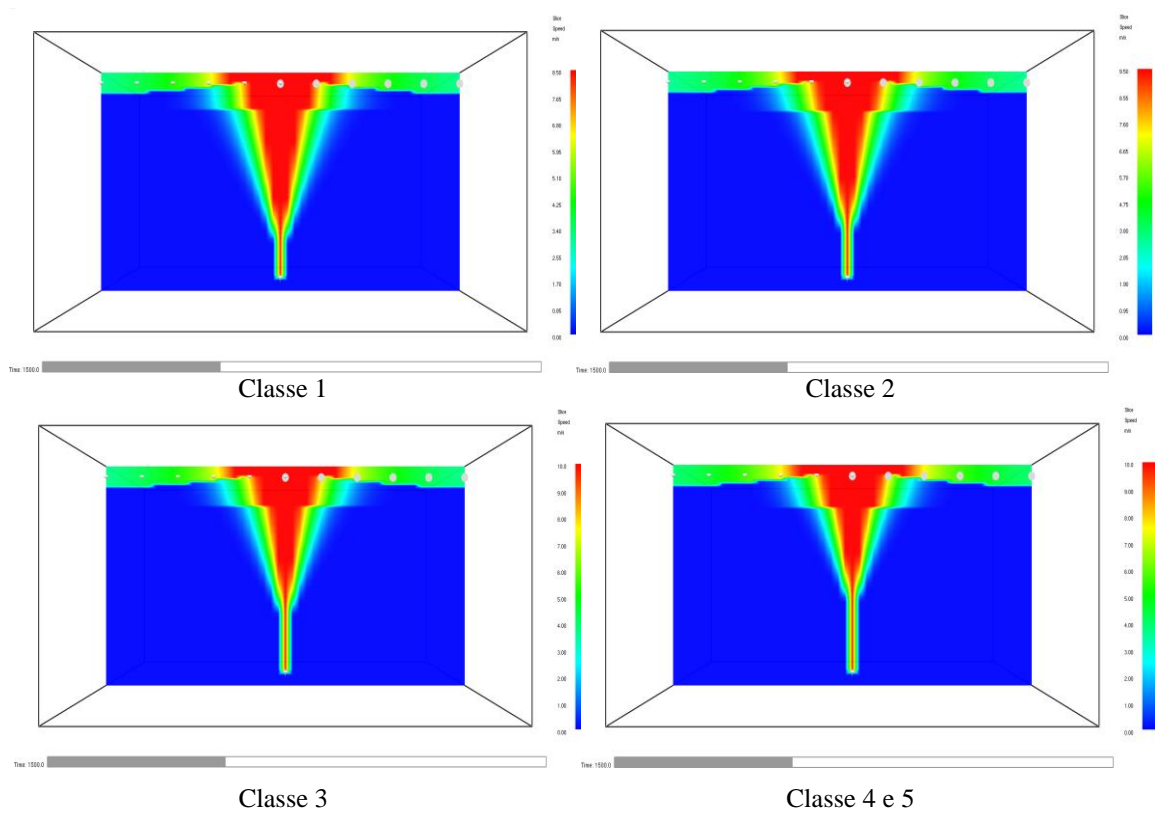


Figura 64. Simulação do CFAST de velocidades máximas para compartimento 2

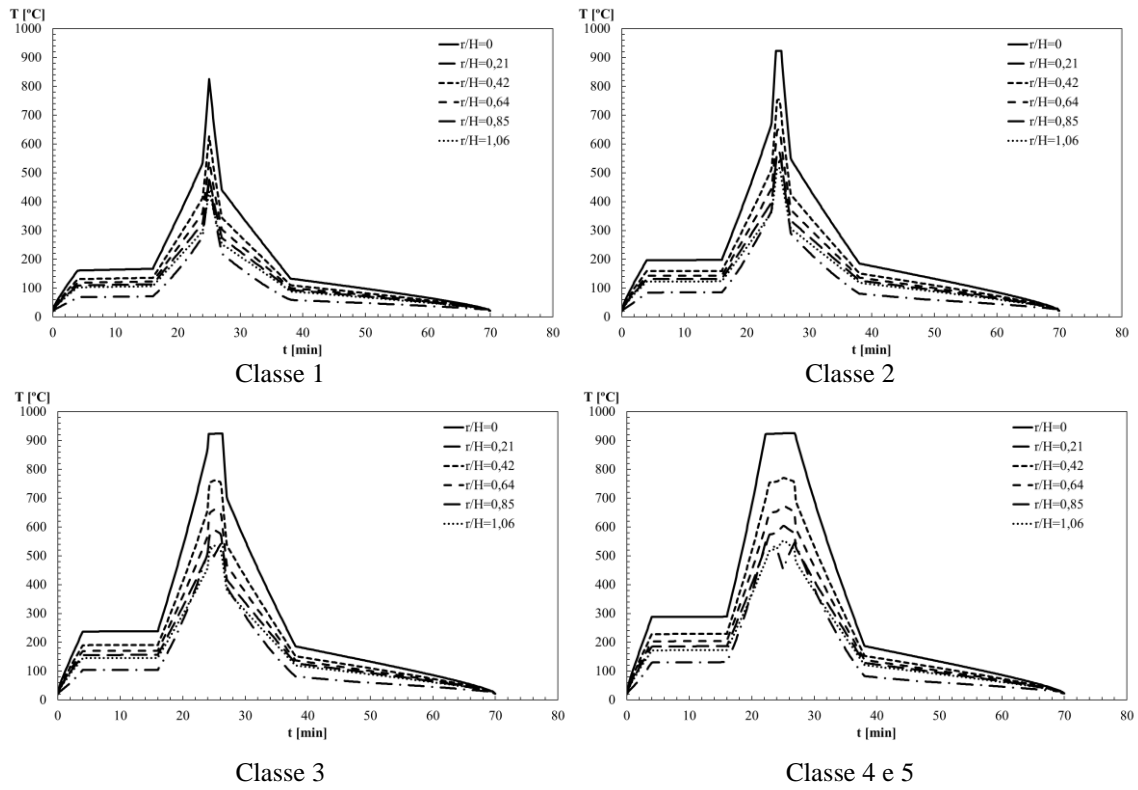


Figura 65. Resultados do CFAST para temperatura perto do teto para compartimento 2

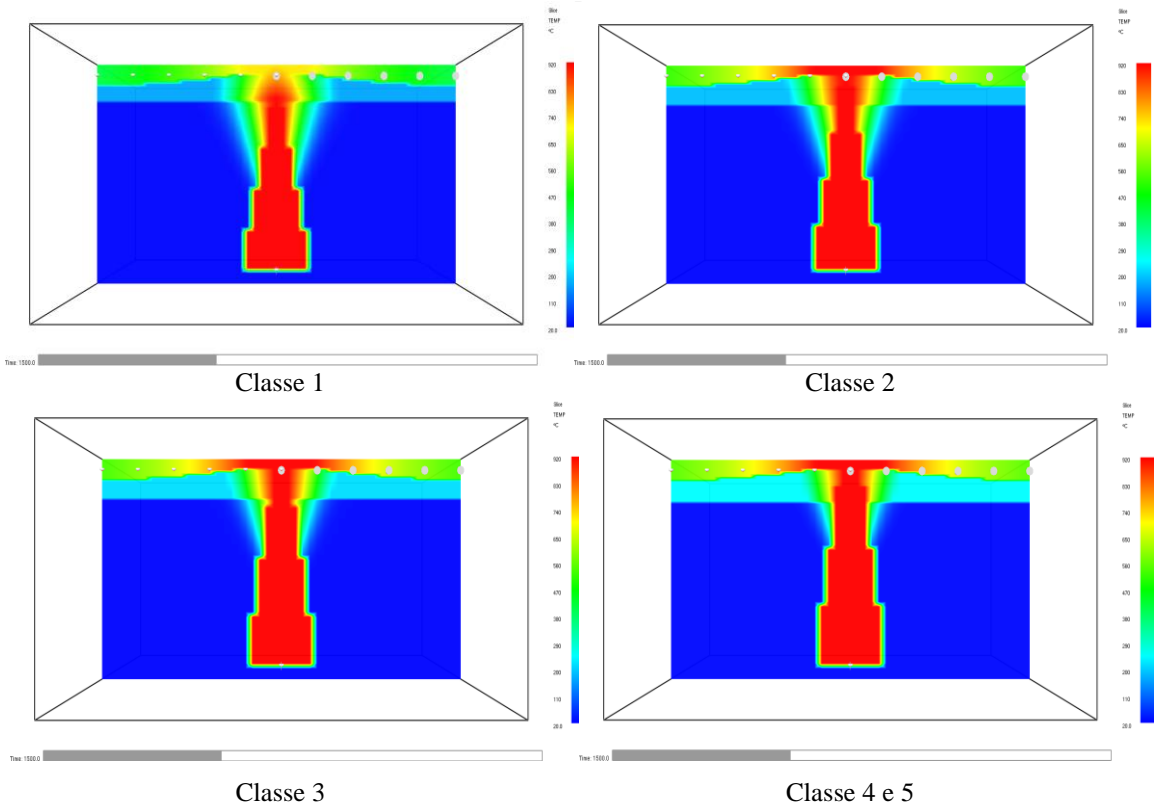


Figura 66. Simulação do CFAST de temperatura máxima para compartimento 2

4.2.8.2- Valores máximos para diferentes posições radiais

A velocidade e a temperatura podem ser determinadas para o instante de tempo igual a 25 minutos (1500s) e comparados com os resultados dos modelos correlativos. As curvas de velocidade máxima para os dois compartimentos estão apresentadas na Figura 67, assim como as curvas de temperatura máximas estão representadas na Figura 68.

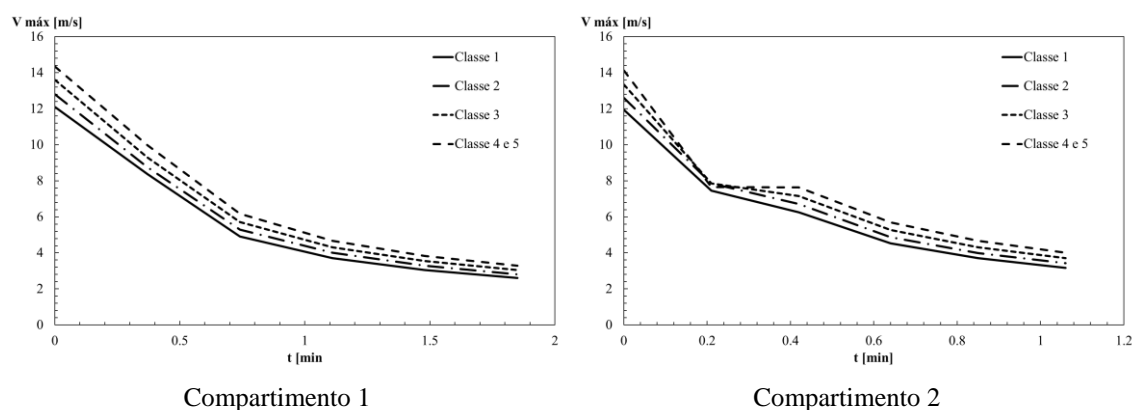


Figura 67. Resultados do CFAST para velocidade máxima nas diferentes classes de automóveis

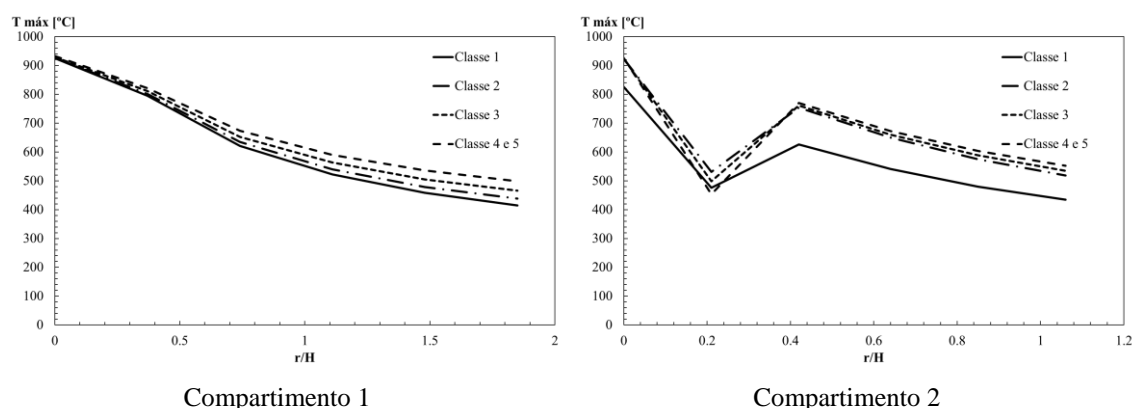


Figura 68. Resultados do CFAST para temperatura máxima nas diferentes classes de automóveis

Nas figuras correspondentes ao compartimento 2, podemos notar uma situação singular para a posição $r/H=0,21$, na qual ocorre uma diminuição dos valores de velocidade e uma ruptura brusca de temperatura. Isso acontece devido ao sensor estar localizado em uma zona de transição, onde o desenvolvimento do incêndio de jato ainda não está bem formado. No compartimento 1 isso não ocorre porque para uma distância radial igual a 1 m, o quociente r/H vale 0,37, de forma que o sensor já está em uma zona bem formada.

Na Tabela 36 e Tabela 37 é possível verificar os resultados de velocidade e temperaturas máximas das quatro classes para as seis posições radiais referentes ao compartimento 1 e 2, respectivamente. As tabelas estão disponíveis no anexo 2.

4.3- Comparação dos resultados

4.3.1- Velocidade máxima no compartimento 1

A Figura 69 mostra a comparação de velocidade máxima entre os diferentes modelos correlativos e os obtidos através do programa CFAST, para as quatro classes de veículo. Assim, como esperado, a velocidade máxima diminui com o aumento da razão r/H . Os resultados obtidos através do CFAST são próximos dos resultados de Alpert de 1972 quando $r=0$. Para valores superiores de r/H , as diferenças também aumentam, sendo que para uma posição de $r/H=1,85$, a diferença é de -43,60 % para o caso de um incêndio de um veículo classe 1. Isso ocorre também com o modelo de Alpert de 2011, sendo que para $r/H=1,85$ na classe 1, a diferença é de -46,85 %. Comparado com o modelo de Cooper, os valores das velocidades começam distantes, se aproximam quando $r/H=0,74$ (diferença de -7,95 % na classe 1) e voltam a se distanciar. O mesmo acontece com o modelo de Heskestad e Delichatsios, sendo que para posições relativas de $r/H=1,11$ a diferença é de -5,92 % para classe 1. A comparação do CFAST com modelo proposto por Motevalli e Marks para todas as posições radiais r/H possuem diferenças mais elevadas, atingindo cerca de 159,14 % para classe 1.

Na Tabela 38, Tabela 39, Tabela 40 e Tabela 41 do anexo 2 é possível verificar as diferenças de velocidade máxima das quatro classes para as seis posições radiais referentes ao compartimento 1, sendo utilizado como referência para os resultados do programa CFAST.

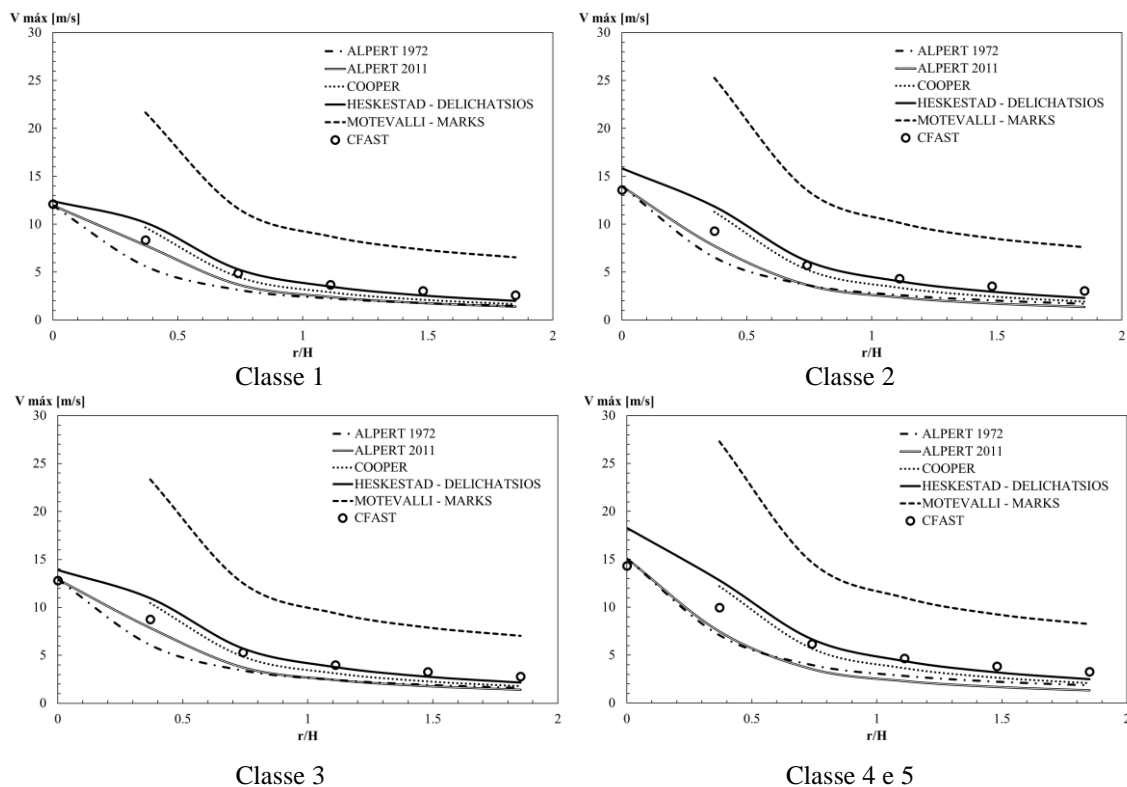


Figura 69. Valores de velocidade máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 1

4.3.2- Velocidade máxima no compartimento 2

A comparação foi efetuada também para o compartimento 2, como se representa na Figura 70. Os resultados obtidos através do programa CFAST começam distante dos modelos de Alpert, se aproximam para a posição radial de $r/H=0,21$ (diferença de -0,42 % na classe 1) no modelo de 1972 e para a posição $r/H=0,42$ (diferença de -7,13 % para classe 1) no modelo de 2011 e voltam a se distanciar. O mesmo acontece com o modelo de Cooper, sendo que para a posição radial $r/H=0,64$ na classe 1 a diferença é de -2,61 %. Em comparação com o modelo de Heskestad e Delichatsios, os valores começam próximo (para $r/H=0$, diferença de -16,18 % para classe 1), se distanciam para a posição radial $r/H=0,21$ (diferença de 82,88 % para classe 1) e depois voltam a se aproximar (para $r/H=1,06$ na classe 1 a diferença é de -4,13 %). A comparação do CFAST com modelo proposto por Motevalli e Marks para todos os r/H calculados apresentam as diferenças mais elevadas, sendo que chegam a atingir 154,43 % para um incêndio de um veículo classe 1.

As diferenças dos resultados para a velocidade máxima das quatro classes para as seis posições radiais referentes ao compartimento 2 estão disponíveis na Tabela 42,

Tabela 43, Tabela 44 e Tabela 45 do anexo 2, sendo utilizado como referência os resultados do programa CFAST.

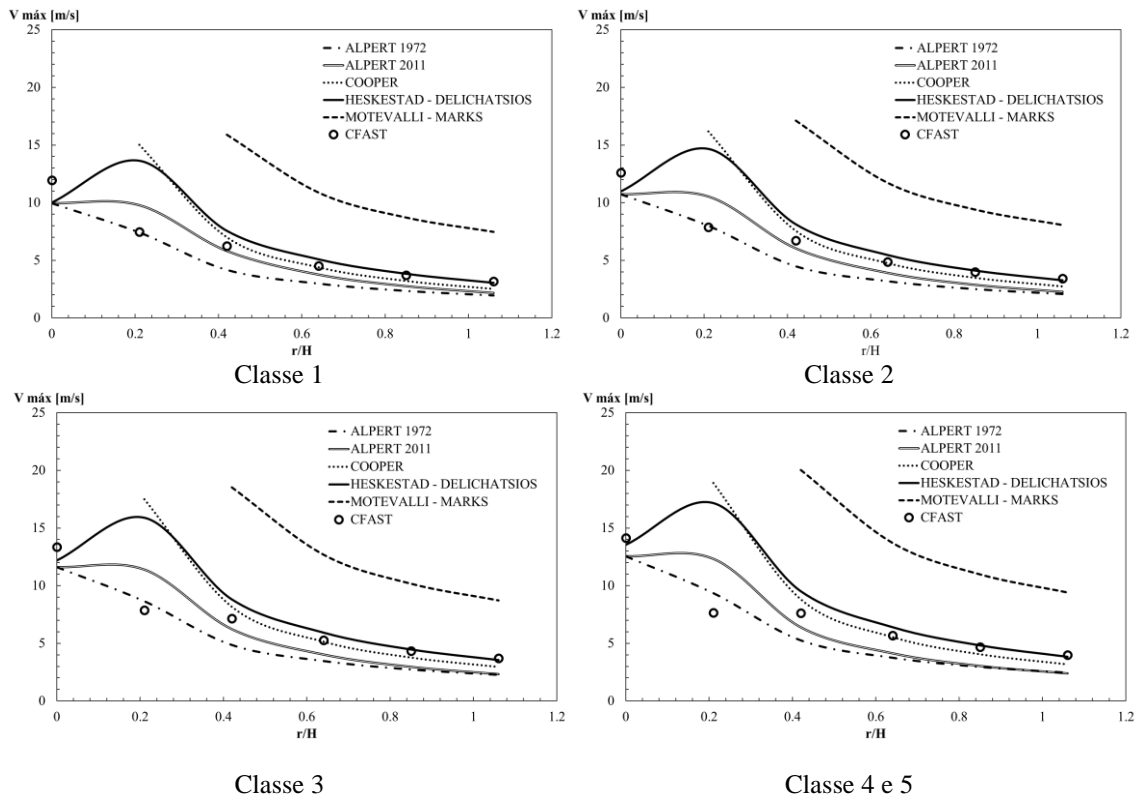


Figura 70. Valores de velocidade máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 2

4.3.3- Temperatura máxima no compartimento 1

A Figura 71 mostra a comparação da temperatura máxima entre os diferentes modelos correlativos e os obtidos pelo programa CFAST, para os incêndios localizados das diferentes classes de veículos para o compartimento 1. A temperatura máxima diminui com o aumento da razão r/H , assim como acontecia com os modelos correlativos. Os resultados obtidos através do CFAST são próximos dos resultados do modelo de Alpert de 1972 quando $r/H=0$ e depois vão aumentando com a posição radial r/H , sendo que a diferença é de -45,65% para uma posição $r/H=1,85$ na classe 1. O mesmo acontece com o modelo de Alpert de 2011, sendo que para a posição radial $r/H=1,85$ na classe 1 a diferença é de -34,80%. Em comparação com o modelo de Cooper, os valores da temperatura máxima começam distantes, se aproximam quando o quociente $r/H=0,37$ (diferença de 8,40% na classe 1), voltando a se distanciar para as restantes posições. O mesmo acontece com o modelo de Heskestad e Delichatsios, sendo que para a posição

radial $r/H=0,37$ a diferença obtida é menor, apenas 0,18% para classe 1. A comparação do CFAST com modelo proposto por Motevalli e Marks também varia da mesma forma, sendo que para uma posição radial de $r/H=0,74$ se obtém uma diferença de -2,59% na classe 1.

As diferenças de temperatura máxima com base nos resultados do programa CFAST para as quatro classes e seis posições radiais, relativas ao compartimento 1 estão disponíveis na Tabela 46, Tabela 47, Tabela 48 e Tabela 49 do anexo 2.

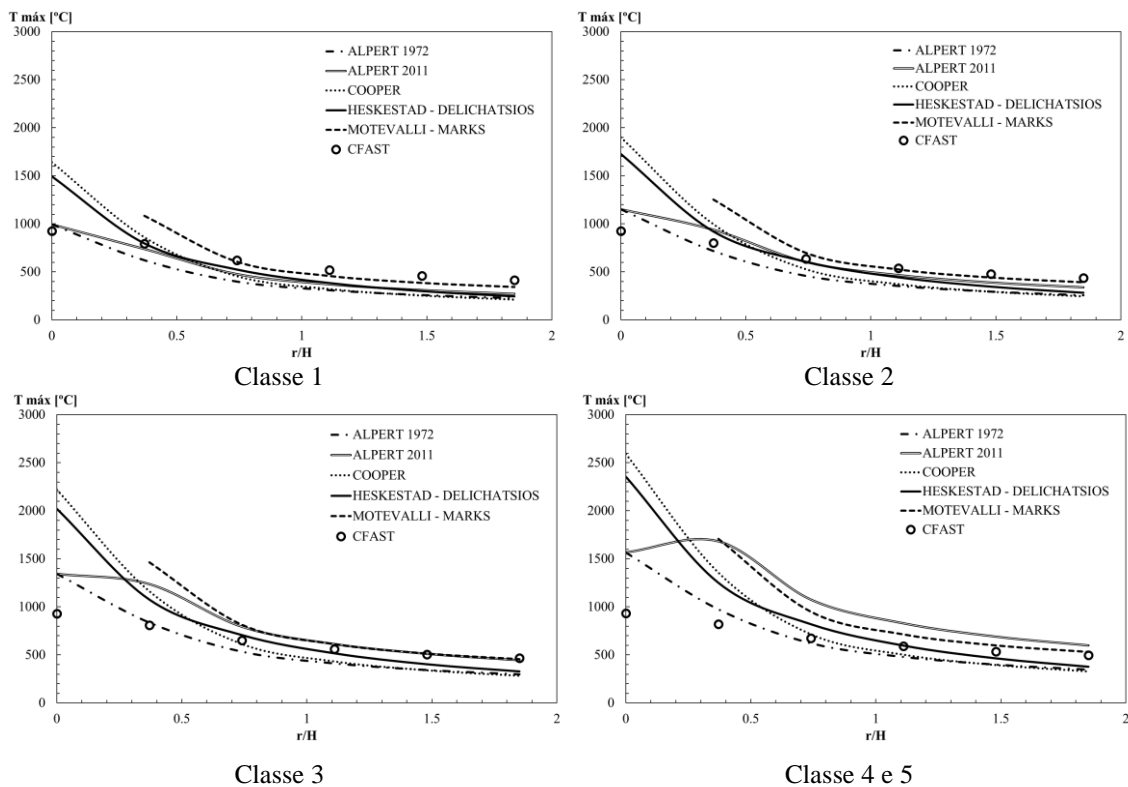


Figura 71. Valores de temperatura máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 1

4.3.4- Temperatura máxima no compartimento 2

A Figura 72 mostra a mesma comparação da temperatura máxima para o compartimento 2. Os resultados obtidos através do CFAST começam distante dos modelos propostos por Alpert, se aproximam para a posição radial $r/H=0,21$ (diferença de -23,31% para o modelo de 1972 e -14,04% para o modelo de 2011, na classe 1) e depois voltam a se distanciar. O mesmo acontece com o modelo de Cooper, sendo que com $r/H=0,21$ a diferença é de -2,75% na classe 1. A comparação com o modelo de Heskestad e Delichatsios permite concluir da mesma forma, sendo que para a posição relativa $r/H=0,21$ e para um incêndio localizado de um veículo da classe 1, a diferença

obtida é de -13,59%. A diferença dos resultados obtidos pelo programa CFAST em comparação com o modelo proposto por Motevalli e Marks aumenta conforme o r/H , sendo que para um $r/H=1,06$ foi obtido uma diferença de -54,31% para o caso de um incêndio de um veículo de classe 1.

A Tabela 50, Tabela 51, Tabela 52 e Tabela 53 do anexo 2 apresentam os valores da diferença da temperatura máxima determinada após um incêndio localizado para todas as classes de veículos e para todas as posições radiais relativas, tendo como referência os resultados obtidos no programa CFAST.

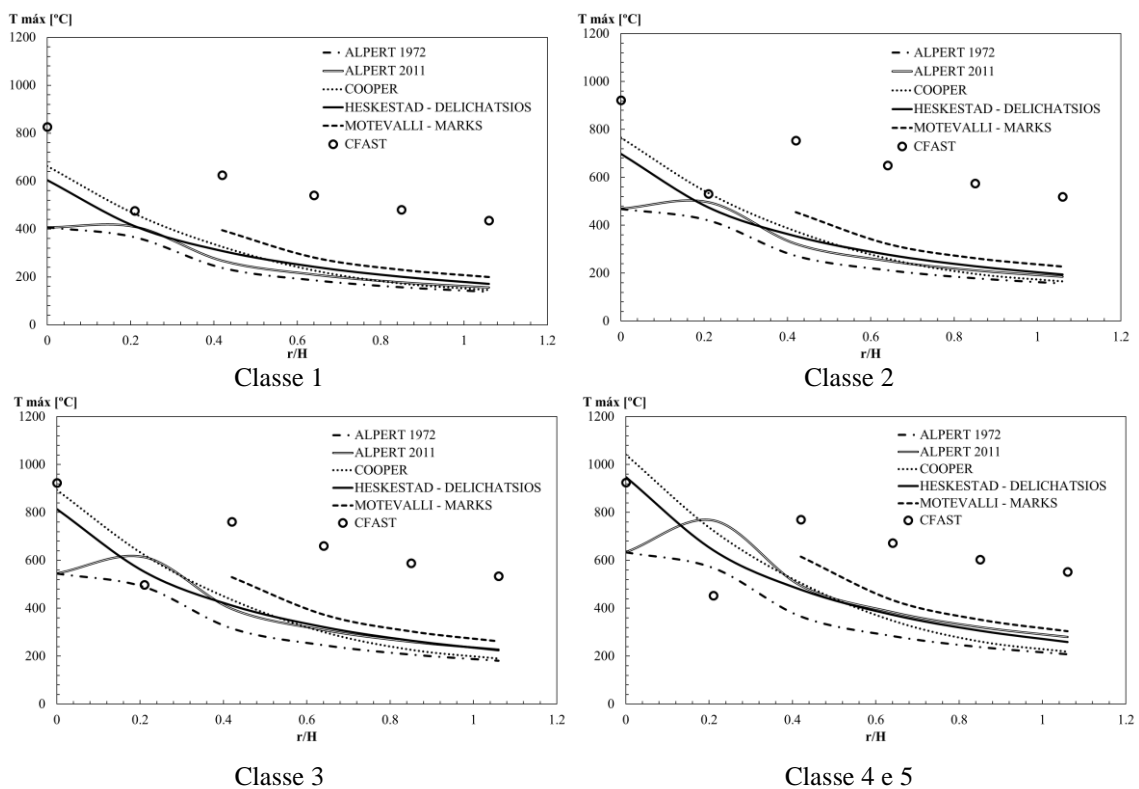


Figura 72. Valores de temperatura máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 2

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

5- ANSYS Fluent

A empresa ANSYS fornece diversos programas de simulação para engenharia. O ANSYS *Computational Fluid Dynamics* (CFD) é uma ferramenta de análise para fluidos que pode ser aplicada a várias áreas da engenharia e com resultados difíceis de determinar com outros métodos de solução. O programa ANSYS Fluent é definido pela empresa como a mais poderosa ferramenta de dinâmica de fluidos computacionais (CFD) disponível, pois inclui recursos de modelagem física bem validados para fornecer resultados rápidos e precisos.

5.1- Equações

O programa usa um conjunto de equações e modelos que são incorporados em um método de volumes finitos para resolução de diferentes tipos de problema. As equações principais para serem resolvidas são: equação de continuidade, equação de Navier-Stokes e equação de energia [24].

5.1.1- Equação de continuidade

A conservação da massa deve ser satisfeita em qualquer sistema fechado, de forma que a massa não é criada nem destruída. A equação da continuidade governa esse princípio e é dada por [24]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad \text{Eq. 39}$$

Onde ρ representa a densidade e t o tempo. Alterando operador nabla (∇) e o vetor velocidade (\mathbf{V}) para a forma expandida, temos que a Eq. 39 pode ser reescrita por [24]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho V_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho V_z}{\partial z} = 0 \quad \text{Eq. 40}$$

5.1.2- Equação de Navier Stokes

As equações de Navier-Stokes garantem que, em qualquer sistema, o momento é conservado. As equações são válidas para qualquer fluido newtoniano, definido como aquele em que as tensões em cada ponto do fluido são linearmente proporcionais às taxas de deformação nesse ponto [54]. A equação de Navier-Stokes para o componente X é fornecida abaixo [24]. A equação pode ser aplicada a outras direções no espaço.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z V_x)}{\partial z} \\ = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) + T_x \end{aligned} \quad \text{Eq. 41}$$

Onde g_x é o componente da aceleração da gravidade, μ_e é a viscosidade efetiva do fluido, a resistência distribuída é dada por R_x e os termos de perda devido a viscosidade por T_x [24].

5.1.3- Equação de conservação de energia

A equação de conservação de energia tridimensional para fluxo de fluido é fornecida pela Eq. 42 [24]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x C_p T) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y C_p T) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z C_p T) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v \end{aligned} \quad \text{Eq. 42}$$

Onde ρ representa a densidade, $v_{x,y,z}$ são as velocidades do fluido nas três direções do espaço x, y e z, C_p representa o calor específico, T representa temperatura, $K_{xx,yy,zz}$ define a condutividade térmica nas direções x, y e z e Q_v é a fonte de calor volumétrica, caso exista [24].

5.2- Modelo

Os modelos dos compartimentos foram semelhantes aos utilizados no programa CFAST. Para o primeiro compartimento as dimensões são de 3 m de altura, 10 m de profundidade e 10 m de largura. No segundo compartimento, 5 m de altura, 10 m de profundidade e 10 m de largura. Em ambos os compartimentos foi considerando um veículo em chamas com um diâmetro de 2 m, localizado no meio deste compartimento, como mostrado na Figura 73. Este compartimento tem aberturas no lado esquerdo e lado direito e uma laje de concreto na parte inferior e superior, com altura de 0,3 m.

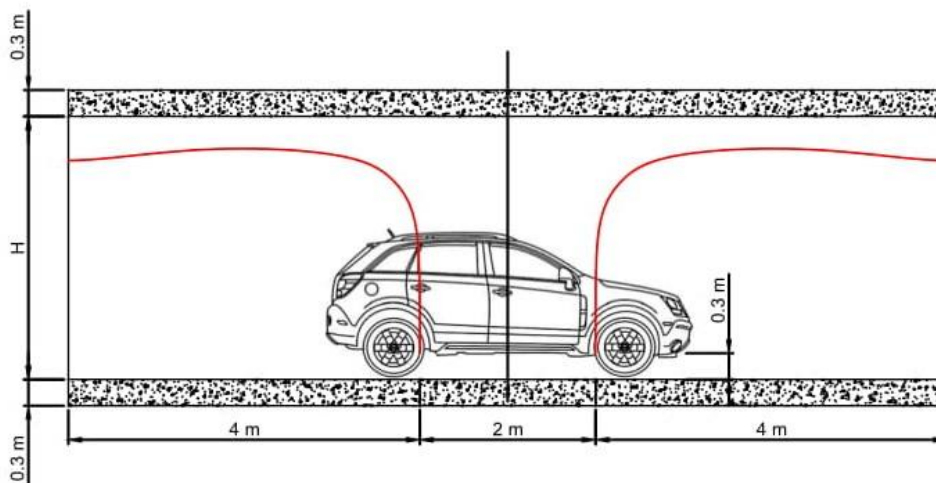


Figura 73. Modelo e compartimento de incêndio

O método de solução monitora os resíduos para todas as variáveis e assume convergência de solução para continuidade (residual inferior a 0,001), componentes de velocidade (residual inferior a 0,001), energia (residual menor que 0,000001), parâmetros de viscosidade (residual inferior a 0,001) e parâmetros de radiação (residual menor que 0,000001).

Foi realizado um teste de convergência (disponível no anexo 3) para verificar a melhor malha para os compartimentos. Tanto para a face quanto para as linhas foi adotado uma malha de 0,05 m com comportamento rígido, conforme se representa na Figura 74 para o caso do compartimento 1 e na Figura 75 para o caso do compartimento 2.

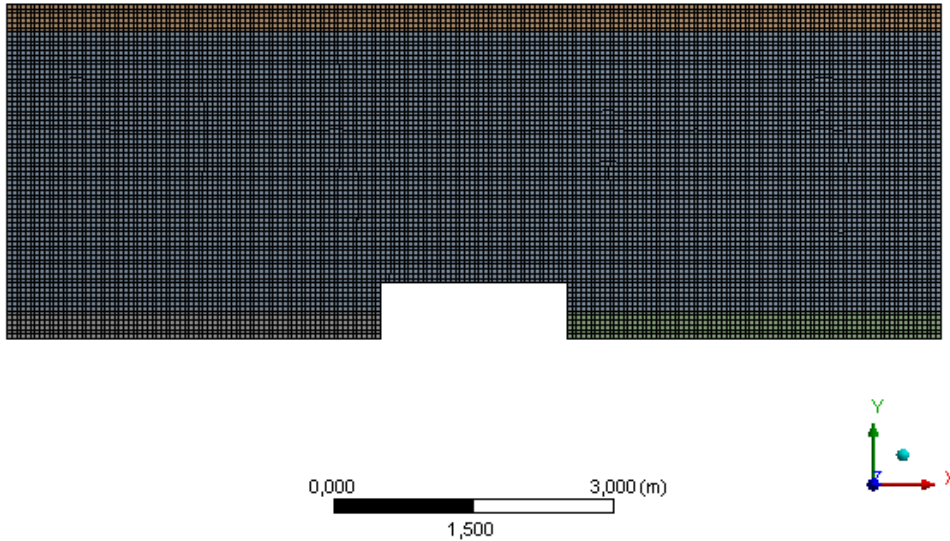


Figura 74. Compartimento 1 (H=3 m)

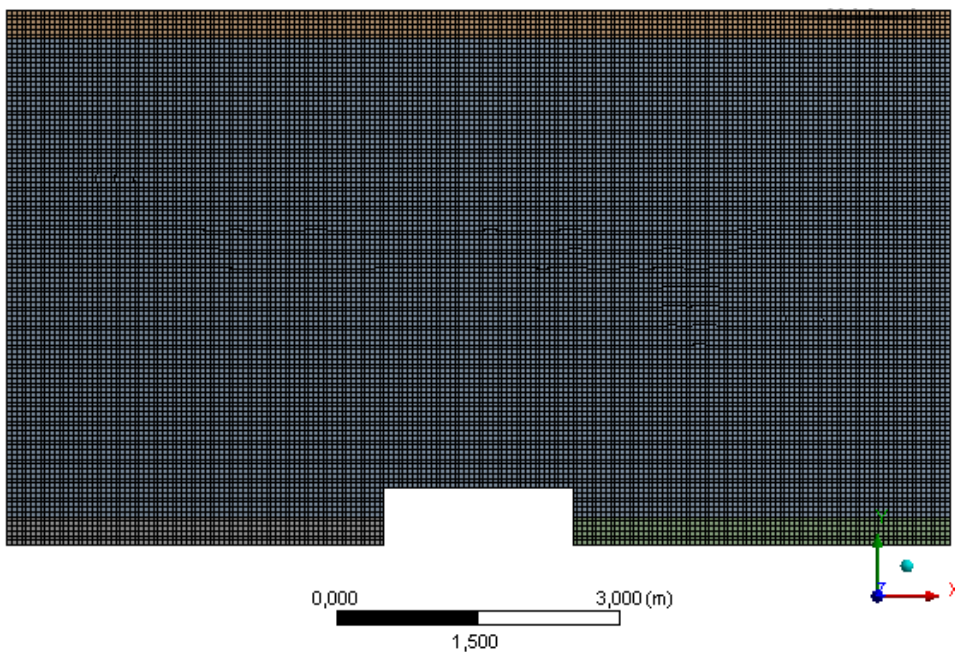


Figura 75. Compartimento 2 (H=5 m)

A norma EN1363-1 de 2012 prevê que a resistência ao fogo (I) de uma laje se determine em função da evolução da temperatura no lado não exposto da laje. De acordo com este documento [55], a resistência ao fogo é caracterizada por um dos dois critérios: a temperatura da superfície não exposta atingir uma temperatura média acima da temperatura média inicial em mais de 140 K ou a temperatura da superfície não exposta

atingir, em qualquer local, um valor máximo acima da temperatura média inicial em mais de 180 K.

Foram realizadas simulações nos dois compartimentos para o caso de um incêndio localizado de um veículo da classe 3 utilizando teto adiabático e não adiabático (considerado transferência de calor por convecção com $\alpha = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $T_\infty = 300 \text{ K}$). Os resultados estão disponíveis no anexo 3 e demonstram que as temperaturas da superfície não exposta, para o tempo de duração da simulação, não atingem os critérios descritos acima, de forma que o teste pode ser realizado até o final dos 70 minutos.

5.2.1- Materiais

Foram definidos dois materiais, sendo o ar para fluido e concreto para o material sólido das lajes. As propriedades do ar são apresentadas na Figura 76. A densidade específica do concreto foi especificada por uma função de definição do usuário (UDF, do inglês *User Defined Function*), sendo as outras propriedades do material sólido definidas por aproximação linear, ver Figura 11.

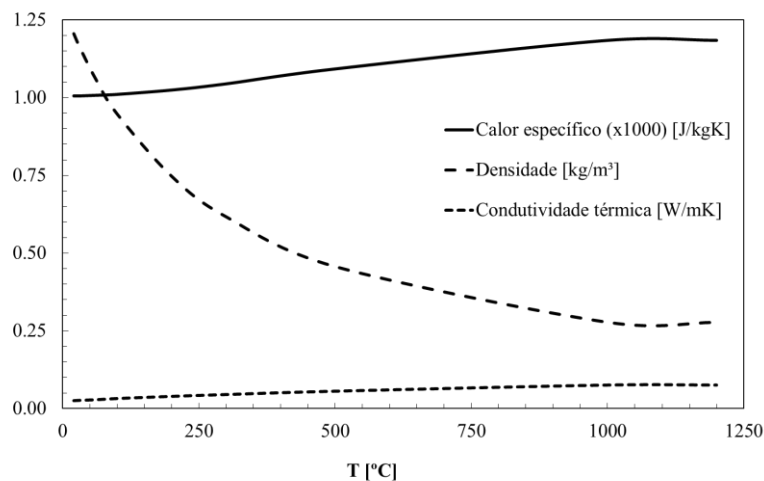


Figura 76. Propriedades do ar

5.2.2- Condições de contorno

Assumindo que existe uma condição de estado estacionário (em que todas as variáveis permaneçam constantes independentemente da variável tempo), uma abertura com pressão $P = 0,1 \text{ MPa}$, $T_\infty = 300 \text{ K}$ e radiação $\varepsilon = 1$. A Figura 77 mostra um

evento de incêndio com um veículo queimando no centro de um compartimento de incêndio e as quatro condições de contorno necessárias. Foram admitidas lajes com uma espessura de 0,3 m.

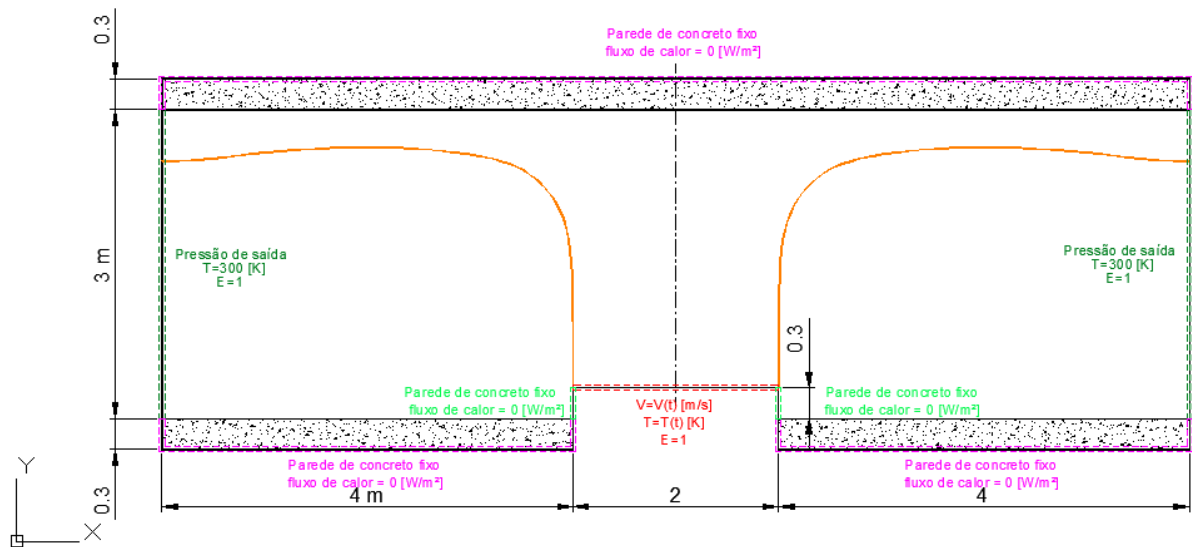


Figura 77. O modelo de um estacionamento aberto

A Figura 78 e Figura 79 mostram as condições de contorno para simulação da combustão do veículo. Estas condições foram determinadas utilizando os resultados de velocidade e temperatura do programa CFAST, respectivamente, para as 4 classes de veículos e para ambos os compartimentos, determinadas para a posição vertical de 0.3 m. Através desses dados foi possível desenvolver as expressões analíticas das condições de contorno, que estão disponíveis no anexo 3. É preferível essa simplificação em comparação com a taxa de liberação de calor, utilizada no programa CFAST [56].

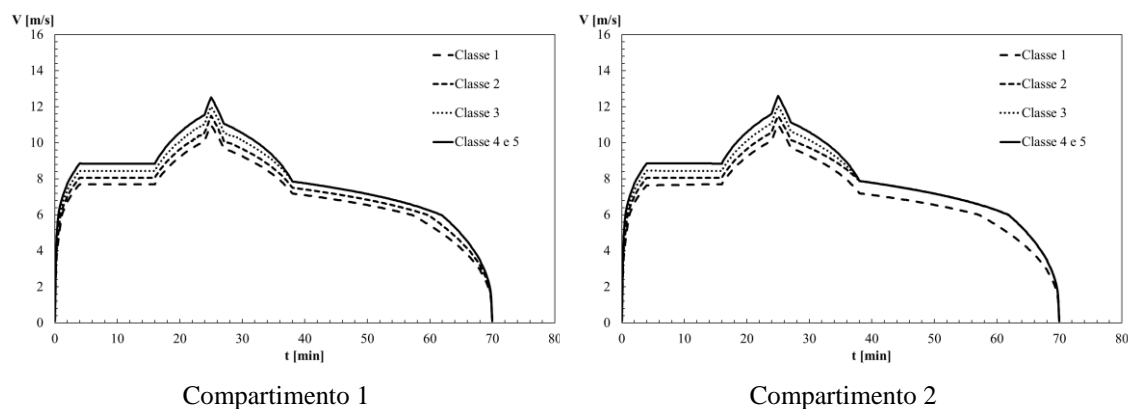


Figura 78. Velocidade para as classes de carros

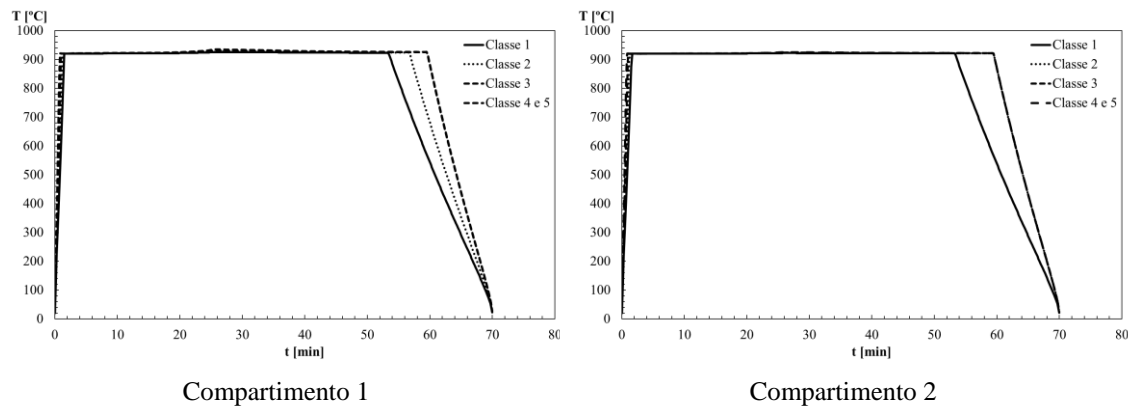


Figura 79. Temperatura para as classes de carros

5.3- Resultados

5.3.1- Resultados de velocidade e temperatura das diferentes classes

A máxima velocidade e a temperatura foram calculadas nas diferentes classes de carros e posições radiais no compartimento 1, conforme Figura 80 e Figura 82, respectivamente. A Figura 81 e Figura 83 mostram as simulações do ANSYS Fluent para velocidade e temperatura máximas no compartimento 1, respectivamente, para tempo igual a 1500 s. Os resultados obtidos para a temperatura permanecem quase constantes no tempo e nas posições radiais. As velocidades quando $r/H=0$ são próximas a zero devido a área de baixa pressão que se forma perto do teto.

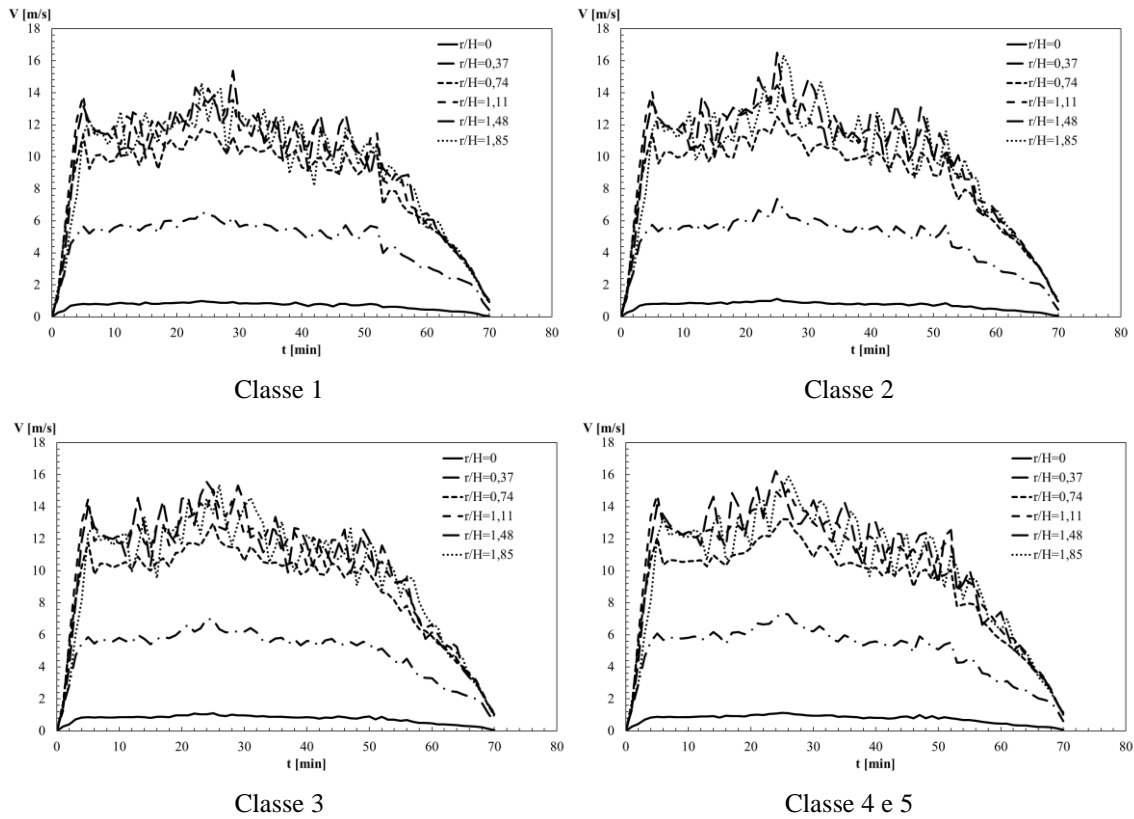


Figura 80. Resultados do ANSYS Fluent para velocidade perto do teto, para compartimento 1

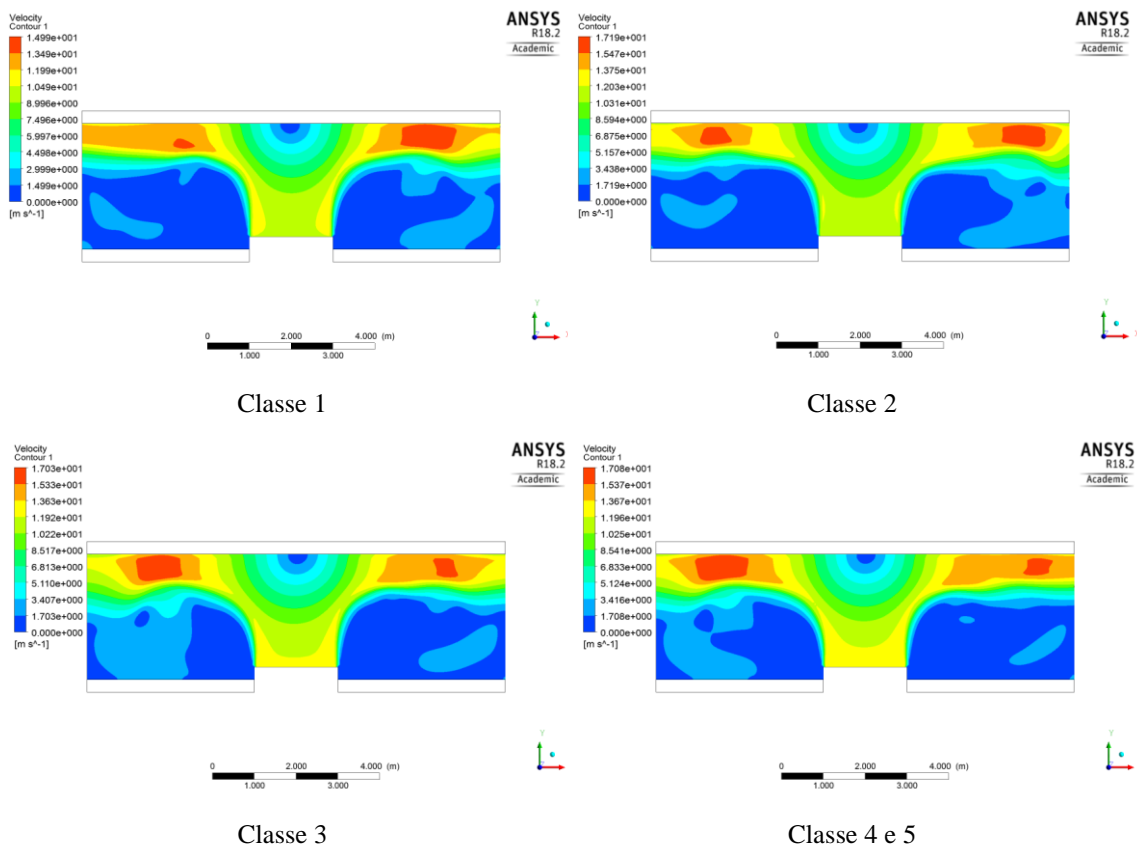


Figura 81. Simulação do ANSYS Fluent de velocidade máxima no tempo igual a 1500 s, para compartimento 1

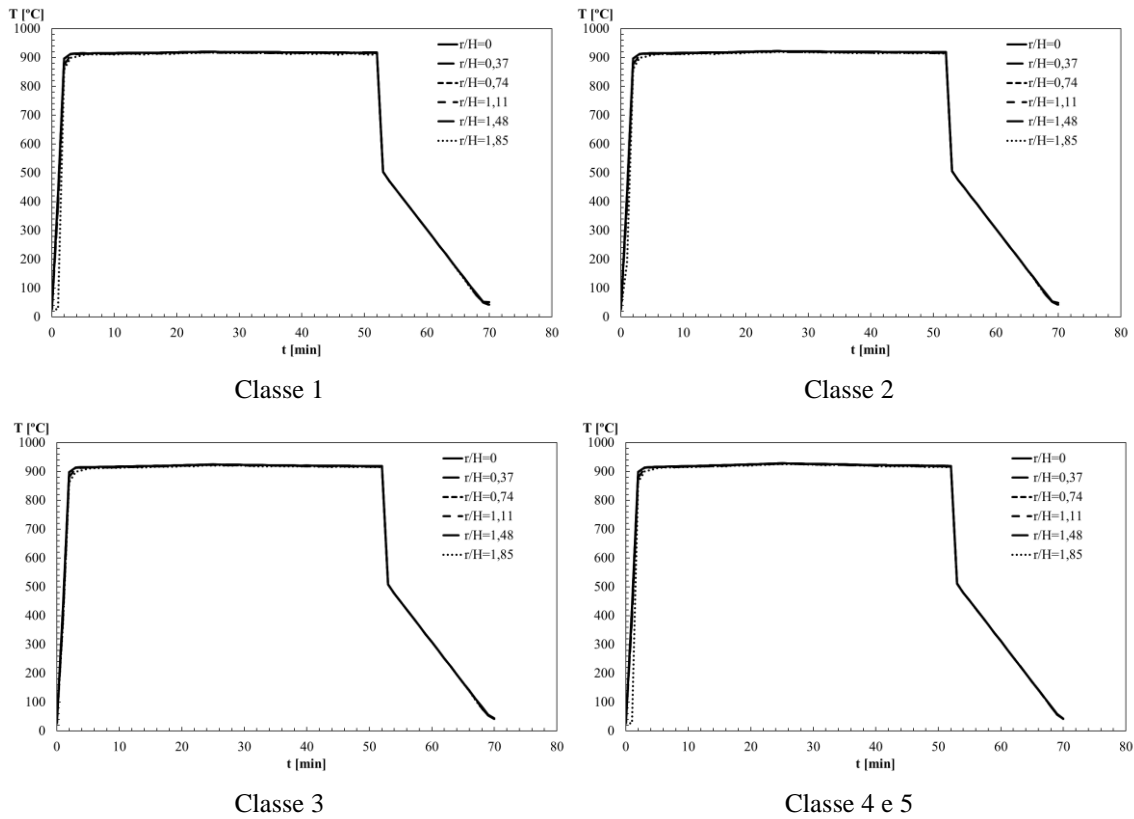


Figura 82. Resultados do ANSYS Fluent para temperatura perto do teto, para compartimento 1

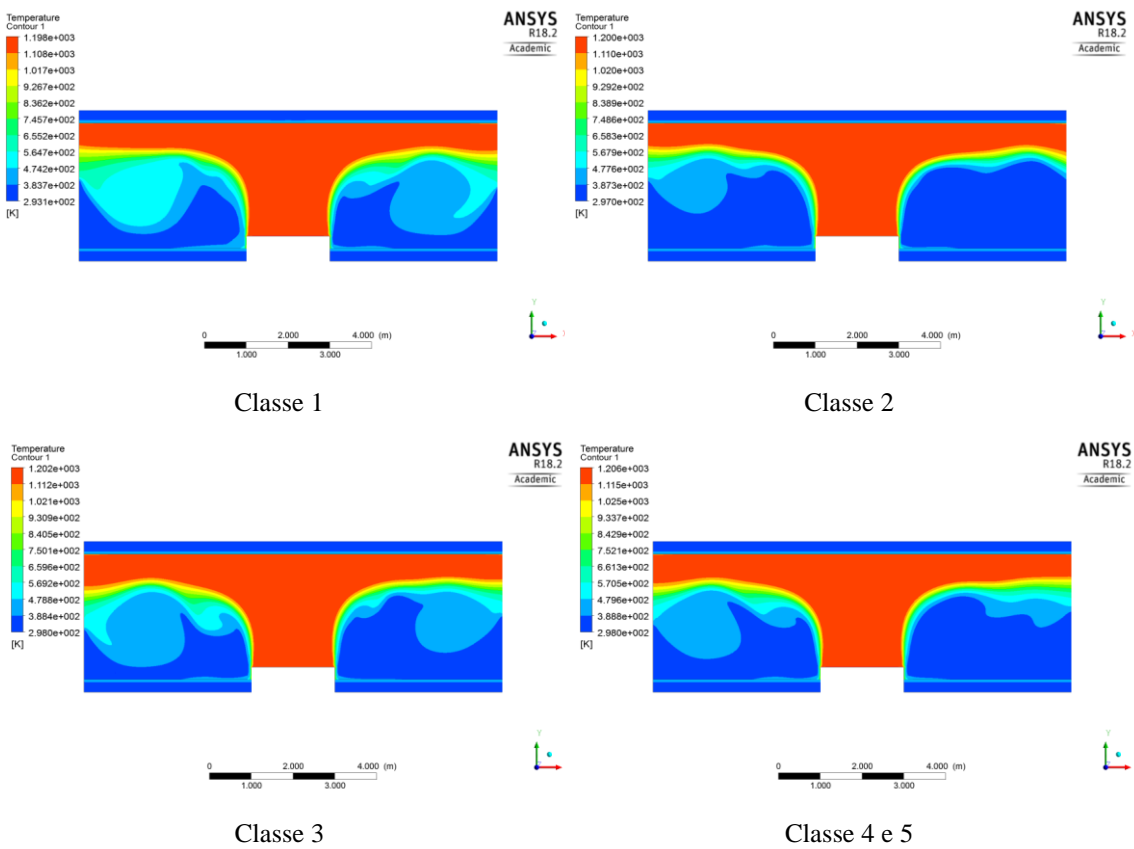


Figura 83. Simulação do ANSYS Fluent de temperatura máxima no tempo igual a 1500 s, para compartimento 1

Também foram calculadas a velocidade e temperatura máximas para o compartimento 2, no caso de incêndios localizados para as diferentes classes de veículos, conforme Figura 84 e Figura 86, respectivamente. A Figura 85 e Figura 87 mostram as simulações do ANSYS Fluent para velocidade e temperatura máximas, respectivamente, correspondentes ao instante de tempo 1500 s. Assim como no compartimento 1, as velocidades de $r/H=0$ são baixas devido a área de baixa pressão perto do teto.

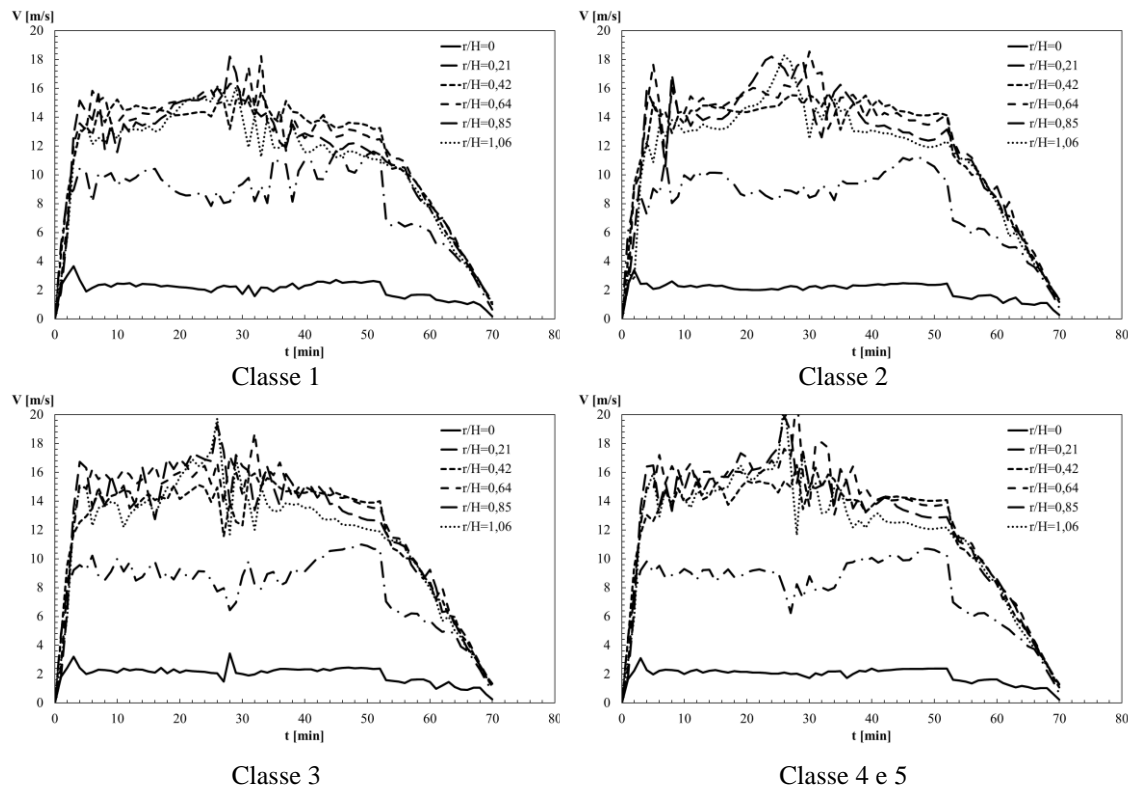


Figura 84. Resultados do ANSYS Fluent para velocidade perto do teto, para compartimento 2

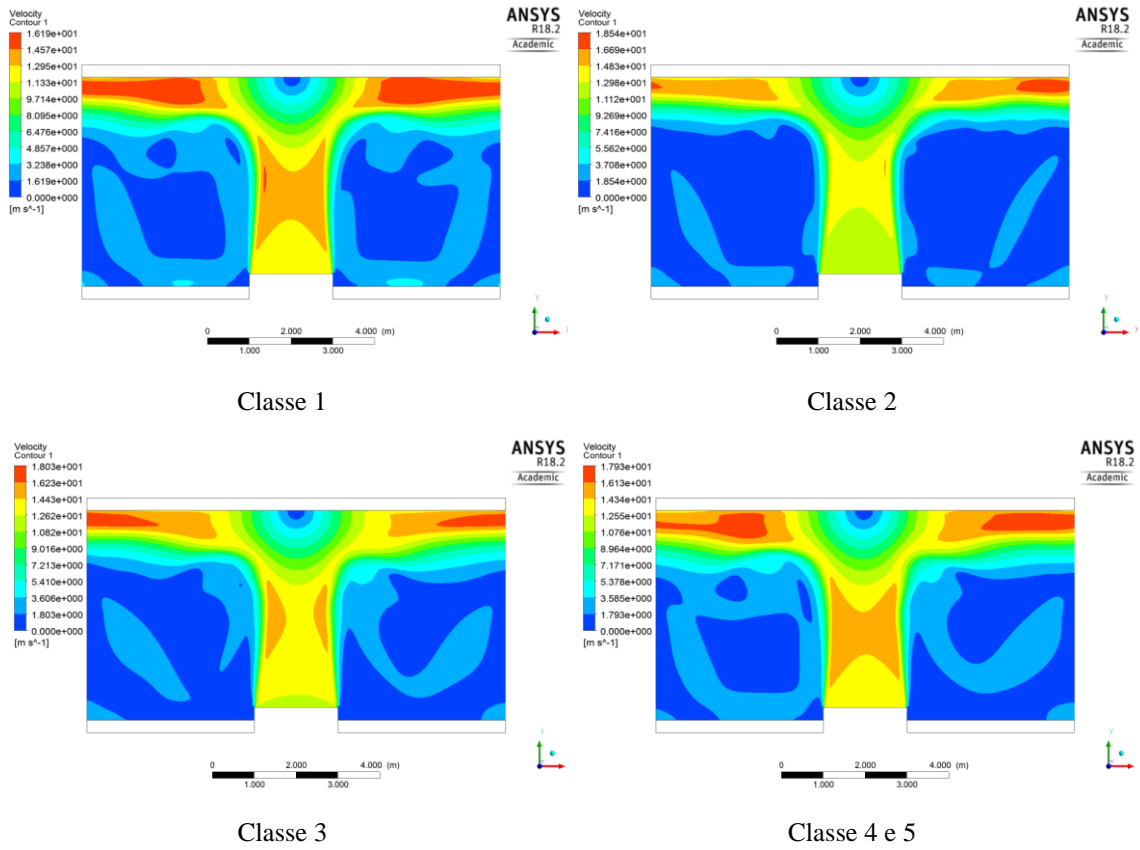


Figura 85. Simulação do ANSYS Fluent de velocidade máxima no tempo igual a 1500 s, para compartimento 2

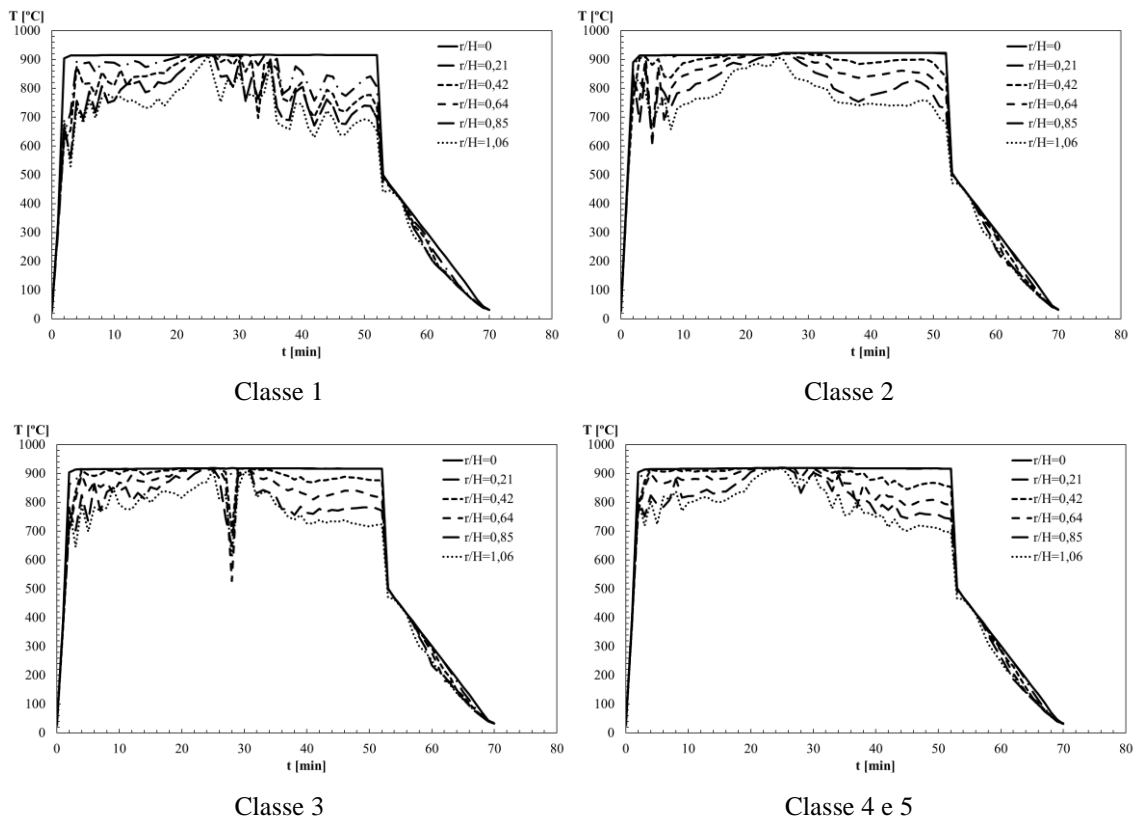


Figura 86. Resultados do ANSYS Fluent para temperatura perto do teto, para compartimento 2

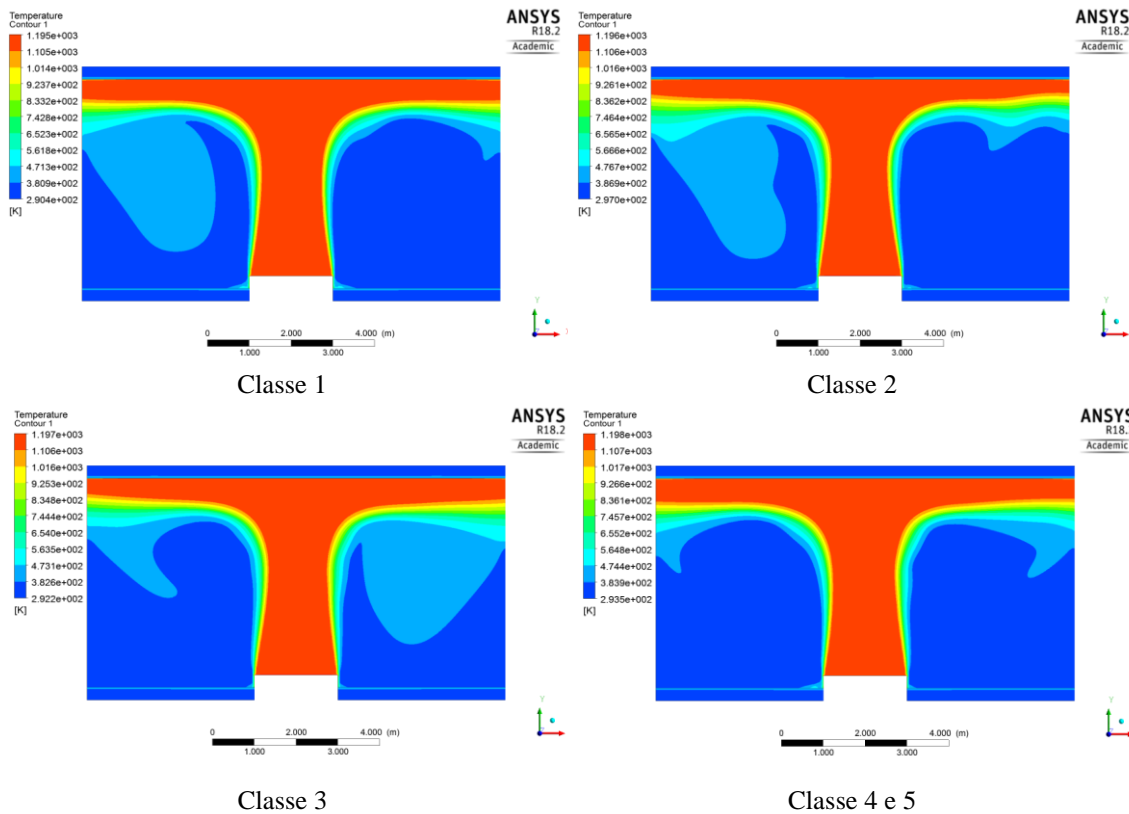


Figura 87. Simulação do ANSYS Fluent de temperatura máxima no tempo igual a 1500 s, para compartimento 2

5.3.2- Valores máximos para diferentes posições radiais

Assim como nos modelos correlativos e o programa CFAST, a velocidade e a temperatura máxima foram tratadas para o tempo de simulação correspondente a 25 minutos (1500s). As curvas de velocidade máxima para os dois compartimentos estão apresentadas na Figura 88, assim como as curvas de temperatura máximas estão na Figura 89. Como é possível observar na Figura 81 e Figura 85, as velocidades são menores na região perto do teto quando $r/H=0$ e vão aumentando quando r/H aumenta e posteriormente ficando estável. Na curva de temperatura máxima podemos observar que as temperaturas são quase constantes perto do teto, como pode ser notado também na Figura 83 e Figura 87.

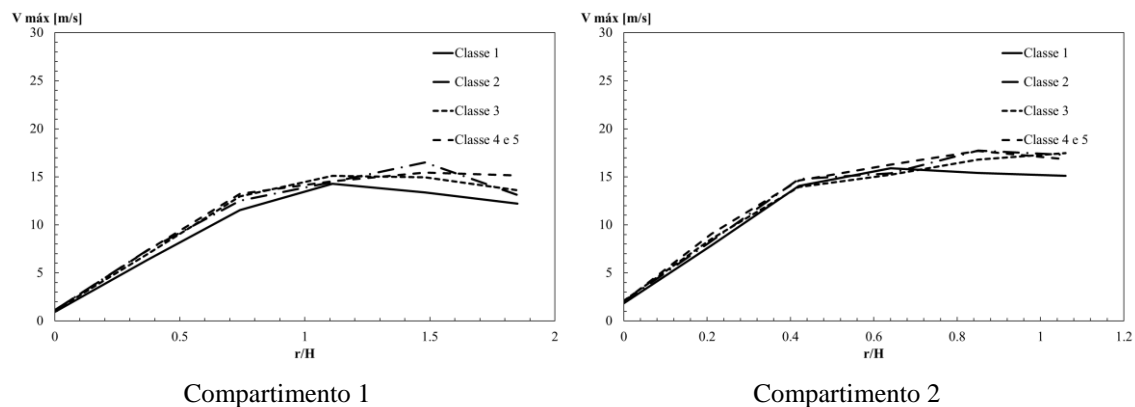


Figura 88. Resultados do ANSYS Fluent para velocidade máxima nas diferentes classes de automóveis

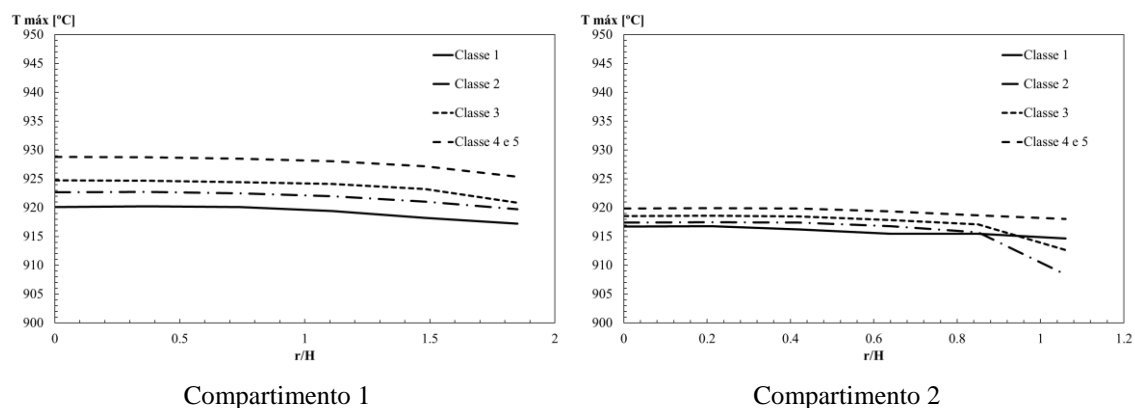


Figura 89. Resultados do ANSYS Fluent para temperatura máxima nas diferentes classes de automóveis

5.4 - Comparação dos resultados

5.4.1- Velocidade máxima no compartimento 1

A Figura 90 mostra a comparação de velocidade máxima entre os diferentes modelos correlativos e os obtidos através do programa CFAST e ANSYS Fluent nas diferentes classes de carros para o compartimento 1.

No modelo avançado de cálculo, a tendência de variação da velocidade máxima com a posição radial é contrária aquela que se obtém com os modelos correlativos e com o programa CFAST. A velocidade máxima aumenta com o aumento da razão r/H . Os resultados obtidos através do ANSYS Fluent são distantes dos resultados do CFAST e dos modelos correlativos de Alpert quando $r/H=0$, sendo que as diferenças são de, respectivamente 1176,14 % e 1161,90 % para a classe 1. Quando a posição radial corresponde a $r/H=0,37$, foram encontradas as menores diferenças na classe 1, sendo que para o CFAST a diferença é de 31,32 %, para o modelo de Alpert 1972 a diferença é -

11,75 % e para o modelo de 2011 é 22,47 %. A partir desta posição radial r/H , as diferenças também aumentam com a posição radial. Para um quociente $r/H=1,85$ e para evento da classe 1, a diferença é de 78,63 % para o CFAST, -87,95 % para o modelo de Alpert de 1972 e -88,64 % para o modelo de 2011. O modelo de Heskestad e Delichatsios tem um comportamento parecido. Para a posição $r/H=0$ a diferença é grande (1208,84% para um evento da classe 1). A menor diferença é encontrada para a posição radial $r/H=0,74$ (-54,08 % na classe 1) e depois esta diferença volta a aumenta com o aumento de r/H , sendo que para $r/H=1,85$ é de -83,64 % para um evento de classe 1. Comparando os resultados com o modelo de Cooper, quando $r/H=0,37$ o valor da diferença é de 51,95 % na classe 1, sendo que as diferenças aumentam com o aumento de r/H . A comparação do ANSYS Fluent com modelo proposto por Motevalli e Marks apresenta as menores diferenças, sendo 0,91 % para classe 1 quando $r/H=0,74$, a partir desse r/H os valores aumentam com o aumento de r/H .

Os valores das diferenças para a velocidade máxima para as diferentes classes e posições radiais estão disponíveis no anexo 3, na Tabela 56, Tabela 57, Tabela 58 e Tabela 59. Foram utilizados como valores de referência os resultados obtidos através do programa ANSYS Fluent.

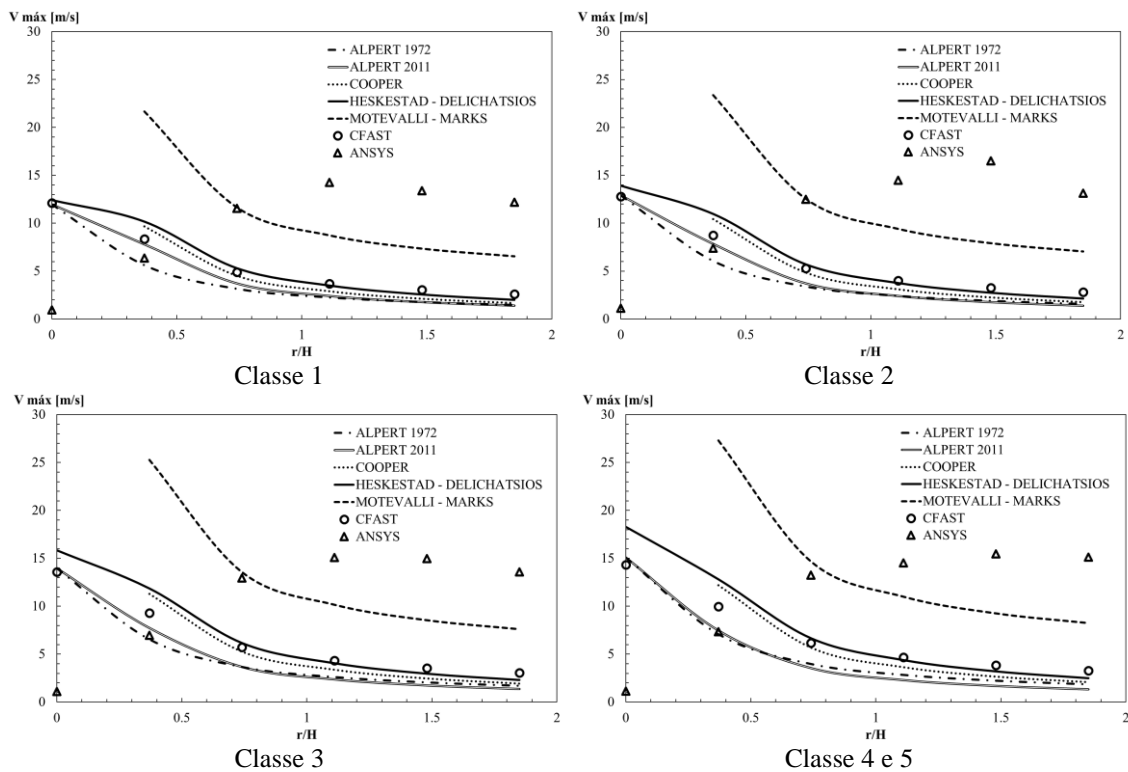


Figura 90. Valores de velocidade máximos obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 1

5.4.2- Velocidade máxima no compartimento 2

O mesmo estudo comparativo é apresentado para o compartimento 2, como se representa na Figura 91. Os resultados obtidos através do ANSYS Fluent quando $r/H=0$ são bastante diferentes dos resultados obtidos com o programa CFAST (diferença de 541,02% na classe 1) e dos modelos correlativos de Alpert (diferença de 434,70% na classe 1). As menores diferenças na comparação entre os modelos e o programa são obtidos quando o $r/H=0,21$, sendo que para o CFAST a diferença na classe 1 é de -4,97 %, para o modelo de Alpert 1972 é -5,36 % e para o de 2011 é 24,68 %. Quando o r/H aumenta, a diferença também aumenta, sendo que para um $r/H=1,06$, na classe 1 a diferença é de -78,94 % para o CFAST, -87,14 % para o modelo de Alpert de 1972 e -85,62 % para o modelo de Alpert de 2011. A comparação do ANSYS Fluent com o modelo de Heskestad e Delichatsios tem um comportamento parecido: quando $r/H=0$ a diferença é de 437,32 % para classe 1, sendo que a menor diferença ocorre quando $r/H=0,42$ (-46,26 % na classe 1) e depois a diferença volta a aumentar com o aumento de r/H , chegando a -79,81 % na classe 1. A diferença para o modelo de Cooper, quando $r/H=0,42$ é de -50,17 % para um evento da classe 1, a partir dessa posição r/H , as diferenças aumentam com o aumento de r/H . A comparação do modelo proposto por Motevalli e Marks tem a menor diferença quando $r/H=0,42$ (diferença de 13,14 % na classe 1), sendo que a diferença também aumenta com o aumento de r/H .

As diferenças para a velocidade máxima dos gases, determinadas através dos incêndios localizados das quatro classes de veículos para as seis posições radiais, referentes ao compartimento 2, estão disponíveis na Tabela 60, Tabela 61, Tabela 62 e Tabela 63 (anexo 2), sendo utilizado como base os resultados do programa ANSYS Fluent.

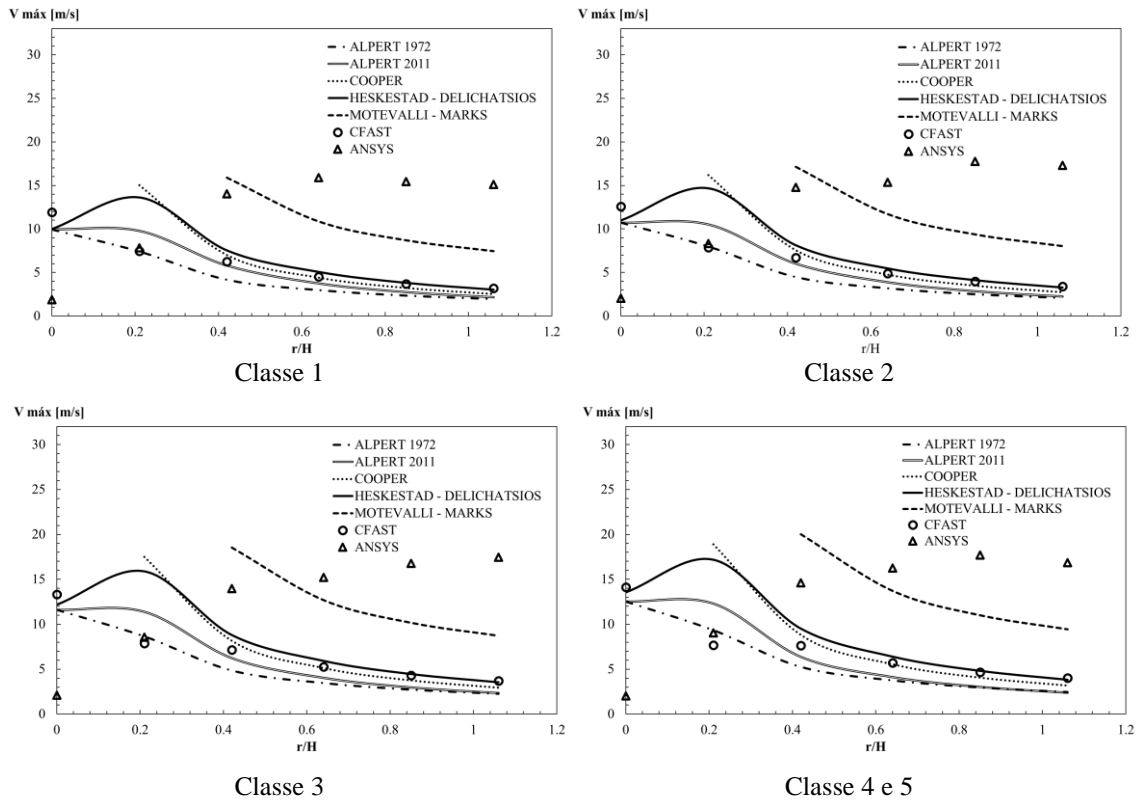


Figura 91. Valores de velocidade máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 2

5.4.3- Temperatura máxima no compartimento 1

A Figura 92 apresenta um estudo comparativo da temperatura máxima dos gases desenvolvidos por incêndios localizados ($t=1500$ s) entre os diferentes modelos correlativos e os obtidos pelo programa CFAST e ANSYS Fluent nas diferentes classes para o compartimento 1. Os resultados obtidos através do ANSYS Fluent são próximos ao do CFAST quando $r/H=0$ (diferença de 0,53 % na classe 1) e depois vão aumentando com o aumento da posição relativa r/H , sendo que a diferença é de -54,74 % na classe 1 para um $r/H=1,85$. O mesmo acontece com os modelos propostos por Alpert, sendo que para $r/H=0$ a diferença é de 8,04 % na classe 1 e quando $r/H=1,85$ a diferença é de -75,40 % para o modelo de Alpert de 1972 e -70,49 % para o modelo de Alpert de 2011 na classe 1. Em comparação com o modelo de Cooper e Heskestad e Delichatsios, os valores começam bem diferentes (diferença de 78,20 % para o modelo de Cooper e 62,13 % para o de Heskestad e Delichatsios, na classe 1), reduzindo quando a posição radial $r/H=0,37$ (diferença de -6,39 % para o primeiro e 13,49 % para o segundo, na classe 1). Os resultados voltam a aumentar a diferença com o aumento de r/H . A comparação do ANSYS Fluent com modelo proposto por Motevalli e Marks tem a menor diferença

quando $r/H=0,37$ (diferença de 17,64 % na classe 1) que aumenta que com o aumento da posição relativa r/H .

A Tabela 64, Tabela 65, Tabela 66 e Tabela 67 (anexo 2) mostram os valores de diferença de temperatura máxima para as quatro classes de veículos, nas seis posições radiais estudadas para compartimento 1, tendo em consideração os resultados obtidos no programa ANSYS Fluent.

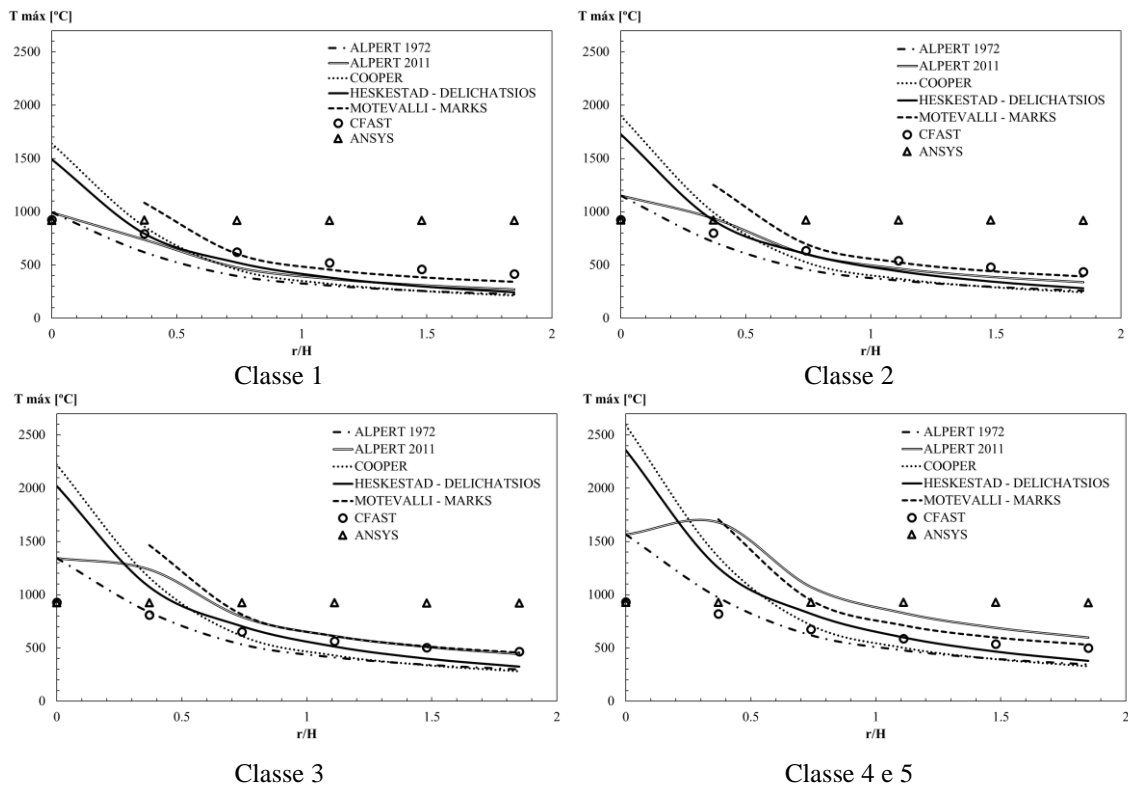


Figura 92. Valores de temperatura máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 1

5.4.4- Temperatura máxima no compartimento 2

A Figura 93 mostra a mesma comparação para o compartimento 2. O resultado obtido através do ANSYS Fluent começa próximo do obtido pelo CFAST (diferença de -9,92 % na classe 1) e se distanciam à medida que ocorre o aumento de r/H , sendo que para $r/H=1,06$, a diferença é de -52,44 % na classe 1. Os modelos de Alpert variam dessa mesma forma, analisando a classe 1, quando $r/H=0$, a diferença é de -55,63 % e para $r/H=1,06$ é de -84,90 % para o modelo de Alpert de 1972 e -82,96 % para o modelo de Alpert de 2011. O mesmo sucede com o modelo de Cooper, sendo que com $r/H=0$ a diferença é de -27,68 % e para $r/H=1,06$ é de -84,10 % na classe 1. A comparação com o modelo de Heskestad e Delichatsios é semelhante, sendo que para o $r/H=0$ a diferença

obtido é de -34,08 % e para $r/H=1,06$ é de -81,35 % na classe 1. A diferença entre os resultados obtidos pelo programa e os resultados obtidos com o modelo proposto por Motevalli e Marks aumenta conforme o r/H , sendo que para um $r/H=1,06$ na classe 1, apresenta uma diferença de -78,27 %.

As diferenças de temperatura máxima com base nos resultados do programa ANSYS Fluent, para as quatro classes de veículos e para as seis posições radiais referentes ao compartimento 2 estão disponíveis na Tabela 68, Tabela 69, Tabela 70 e Tabela 71 (anexo 2).

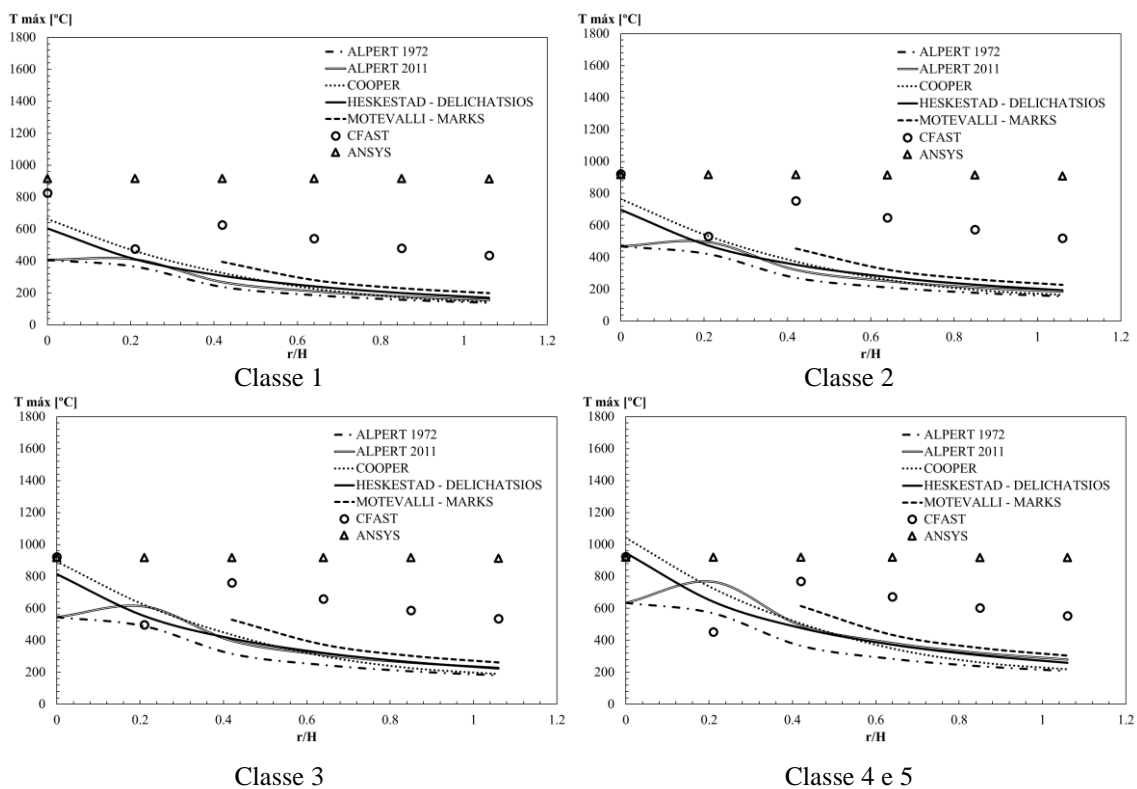


Figura 93. Valores de temperatura máxima obtidos pelos modelos correlativos para compartimento 2

6- CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo sobre as características térmicas e dinâmicas de um incêndio de jato induzido por incêndio localizados em parques de estacionamento abertos. Os resultados foram calculados com modelos correlativos simples (Alpert, Cooper, Heskestad e Delichatsios, Motevalli e Marks) e dois programas distintos, um com método de cálculo fundamentado no modelo duas zonas (CFAST) e outro baseado no método de volumes finitos (ANSYS Fluent). Para isso, foram consideradas para análise quatro classes de veículos em dois parques de estacionamento aberto distintos, um com de 3 m de altura e outro com 5 m de altura.

A comparação dos resultados entre os modelos correlativos, CFAST e ANSYS Fluent mostrou uma proximidade entre esses resultados em posições radiais específicas, sempre tendo em consideração que cada um dos programas tem uma forma específica de resolver eventos deste tipo.

O modelo proposto por Motevalli e Marks apresenta temperaturas máximas mais elevadas para todos os cenários r/H calculados. Quando a relação r/H aumenta, os resultados para as temperaturas máximas dos outros modelos correlativos (Heskestad e Delichatsios, Cooper e Alpert) se aproximam.

O modelo de Alpert de 2011 e de Cooper apresentam resultados para a velocidade entre os resultados de Alpert 1972 e os resultados de Heskestad e Delichatsios. À medida que r/H aumenta, os resultados de Cooper e Heskestad e Delichatsios se aproximam dos resultados de Alpert em 1972. O modelo proposto por Motevalli e Marks propõe maior velocidade máxima para todos as posições relativas r/H calculados.

Os valores de velocidade obtidos pelo software CFAST são consistentes com os resultados dos modelos correlativos. Os resultados de temperatura do CFAST no primeiro compartimento também estão próximos dos resultados dos modelos correlativos. É possível notar que com o aumento das classes dos veículos, os resultados dos modelos correlativos se tornam mais elevados em comparação com os valores obtidos pelo CFAST. Os resultados de temperatura do CFAST no compartimento 2 são geralmente superiores aos resultados dos modelos correlativos. A temperatura máxima diminui quando $r=1$, pelo fato desta posição radial se encontrar numa região de transição, para a qual o movimento horizontal da camada quente superior ainda não está bem estabelecido.

Os resultados obtidos pelo programa ANSYS Fluent divergem dos modelos correlativos e do CFAST. A velocidade determinada para a posição radial $r=0$, é próxima

de zero e vai aumentando com o aumento das posições radiais, contrariando o que acontece com os modelos correlativos e CFAST. Isso ocorre devido a uma área de baixa pressão que se forma próximo ao teto. As temperaturas, por sua vez, permanecem quase constantes no tempo e nas posições radiais e, normalmente, são mais elevadas que as obtidas nos modelos correlativos e CFAST.

O confronto entre modelos correlativos, modelo de duas zonas e ferramenta de dinâmica de fluidos computacionais pode melhorar o estado do conhecimento dos jatos de teto induzidos por incêndios localizados e ajudar os engenheiros a melhorar o desempenho dos dispositivos de proteção contra incêndio.

REFERÊNCIAS

- [1] Alpert, Ronald L., "Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors," *Fire Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 181-195, 1972.
- [2] Heskestad, Gunnar; Delichatsios, Michael A., "The Initial Convective Flow In Fire," *Fire Safety Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 1113-1123, 1979.
- [3] Babrauskas, Vytenis, "Flame Lengths Under Ceilings," *Fire and Materials*, vol. 4, no. 3, pp. 119-126, 1980.
- [4] Heskestad, Gunnar, "Virtual Origins of Fire Plumes," *Fire Safety Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 109-114, 1983.
- [5] Evans, David D., "Calculating Sprinkler Actuation Time in Compartments," *Fire Safety Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 147-155, 1985.
- [6] Cooper, L. Y.; Woodhouse, A., "The Buoyant Plume-Driven Adiabatic Ceiling Temperature Revisited," *Journal of Heat Transfer*, vol. 108, no. 4, pp. 822-826, 1986.
- [7] Beyler, C. L. , "Fire Plumes and Ceiling Jets," *Fire Safety Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 54-75, 1986.
- [8] Cooper, L. Y.; Stroup, D. W., "Thermal Response of Unconfined Ceilings Above Growing Fires and the Importance of Convective Heat Transfer," *Heat Transfer Journal*, vol. 109, no. 1, pp. 172-178, 1987.
- [9] Motevalli, Vahid; Marks, Colin H., "Characterizing the Unconfined Ceiling Jet under Steady-State Conditions: A Reassessment," *Fire Safety Science*, vol. 3, no. 1, pp. 301-312, 1991.
- [10] Heskestad, G.; Hamada, T., "Ceiling Jets of Strong Fire Plumes," *Fire Safety Journal*, vol. 21, no. 1, pp. 69-82, 1993.
- [11] L. Y. Cooper, "Fire-Plume-Generated Ceiling Jet Characteristics And Convective Heat Transfer To Ceiling And Wall Surfaces In A Two-Layer Fire Environment: Uniform Temperature Ceiling And Walls," *Fire Science & Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 1-17, 1993.
- [12] Joyex, Daniel; Kruppa, Joël; Cajot, Louis-Guy; Schleich, Jean-Baptiste; Van De Leur, Peter; Twilt, Leen, "Demonstration Of Real Fire Tests In Car Parks And High Buildings," 2001.

- [13] Weng, W. G.; Hasemi, Y., “Heat Transfer To An Unconfined Ceiling From An Impinging Buoyant Diffusion Flame,” *Heat Mass Transfer*, vol. 42, no. 1, pp. 652-659, 2006.
- [14] V. Motevalli and Z. P. Yuan, “Steady State Ceiling Jet Behavior under an Unconfined Ceiling with Beams,” *Fire Technology*, vol. 44, no. 2, pp. 97-112, 2008.
- [15] Oka, Yasushi; Imazeki, Osamu; Sugawa, Osami, “Temperature profile of ceiling jet flow along an inclined unconfined ceiling,” *Fire Safety Journal*, vol. 45, no. 4, p. 221–227, 2010.
- [16] Johansson, Nils; Wahlqvist, Jonathan; Hees, Patrick van, “Simple Ceiling Jet Correlation Derived From Numerical Experiments,” in *Proceedings of the 13th International Interflam Conference*, Interflam, 2013.
- [17] Oka, Yasushi; Yamaguchi, Jun-ichi; Muraoka, Ko, “Decrease Of Carbon Dioxide Concentration And Entrainment Of Horizontally Spreading Ceiling Jet,” *Fire Safety Journal*, vol. 63, no. 1, pp. 37-42, 2014.
- [18] Alpert, Ronald L., “The Fire-Induced Ceiling-Jet Revisited,” *FireSeat*, 2011.
- [19] Johansson, Nils; Wahlqvist, Jonathan; Hees, Patrick van, “Numerical Experiments In Fire Science: A Study Of Ceiling Jets,” *Fire and Materials*, vol. 39, no. 5, pp. 533-544, 2015.
- [20] Zhao, Weifeng; Zong, Ruowen; Wei, Tao; Zhao, Xuejuan; Liao, Guangxuan, “The Physical Model And Validation Study Of Ceiling-Jet Flow In Near-Field,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 88, no. 1, pp. 91-100, 2015.
- [21] Oka, Yasushi; Oka, Hideyuki; Imazeki, Osamu, “Ceiling-Jet Thickness And Vertical Distribution Along Flat-Ceilinged Horizontal Tunnel With Natural Ventilation,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 53, no. 1, pp. 68-77, 2016.
- [22] Zhang, Xiaochun; Guo, Zunmeng; Tao, Haowen; Liu, Jingyong; Chen, Yufang; Liu, Aihua; Xu, Wenbin, “Maximum Temperature Of Thermal Plume Beneath An Unconfined Ceiling With Different Inclination Angles Induced By Rectangular Fire Sources,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 120, no. 1, pp. 239-246, 2017.
- [23] Hidalgo, J. P.; Cowlarda, A.; Abecassis-Empisa, C.; Maluka, C.; Majdalanía, A. H.; Kahrmanna, S.; Hilditcha, R.; Krajcovicá, M.; Toreroa, J.L., “An Experimental

- Study Of Full-Scale Open Floor Plan Enclosure Fires,” *Fire Safety Journal*, vol. 89, no. 1, pp. 22-40, 2017.
- [24] Knop, Nathaniel Michael, *Thermal Analysis Of A Fireplace Using ANSYS*, 2009.
- [25] Karlsson, Björn; Quintiere, James G., *Enclosure Fire Dynamics*, Boca Raton: CRC Press LLC, 2000.
- [26] Incropera, Frank P.; Dewitt, David P.; Bergman, Theodore L.; Lavine, Adrienne S., *Fundamentos Da Transferência De Calor e Massa*, Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008.
- [27] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Termodinâmica*, Mc Graw Hill.
- [28] Flo, Mats, *Flame Extension For Pool Fires Under Ceiling At Various Heights*, 2015.
- [29] Oka, Yasushi; Ando, Masaki, “Temperature And Velocity Properties Of A Ceiling Jet Impinging,” *Fire Safety Journal*, vol. 55, no. 1, pp. 97-105, 2013.
- [30] Evans, David D., “Ceiling Jet Flows,” in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, New York, Springer, 2016, pp. 32-39.
- [31] Y. Z. Li and H. Ingason, "Position of maximum ceiling temperature in a tunnel Fire," *Fire Technology*, vol. 50, no. 4, p. 889–905, 2014.
- [32] Ingason, Haukur; Li, Ying Zhen; Lönnemark; Anders, "Runehamar Tunnel Fire Tests," *Fire Safety Journal*, vol. 71, no. 1, p. 134–149, 2015.
- [33] Ingason, Haukur; Li, Ying Zhen, "Model Scale Tunnel Fire Tests With Point Extraction Ventilation.," *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 21, no. 1, pp. 5-36, 2011.
- [34] Yao, Wei; Lu, Shouxiang; Wang, Jian, “Numerical Prediction of Effects of Gravity on the Centerline Temperature and Velocity of Axi-symmetric Fire Plumes,” *Journal of Fire Sciences*, vol. 25, no. 5, pp. 403-423, 2007.
- [35] Zukoski, E. E.; Kubota, Toshi; Cetegen, Baki, "Entrainment in Fire Plumes," *Fire Safety Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 107-121, 1981.
- [36] Heskestad, Gunnar, *Fire Plumes*, National Fire Protection Association, 1995.
- [37] MacCaffrey, Bernard J., “Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results,” National Bureau of Standards, 1979.
- [38] Thomas, P. H.; Theobald, C. R.; Simms, D.L., *Investigations into the Flow of Hot Gases in Roof Venting*, vol. 7, Londres: HSMO, 1963.

- [39] ECCS, “Fire Safety in Open Car Parks,” *Modern Fire Engineering*, no. 75, 1993.
- [40] BBC, 1 Janeiro 2018. [Online]. Available: <http://www.bbc.com/news/uk-england-merseyside-42533830>. [Accessed 4 Junho 2018].
- [41] Haremza, C.; Santiago, A.; Silva, L. S., “Design of Steel and Composite open car parks under fire,” *Advanced Steel Construction*, vol. 9, no. 4, pp. 350-368, 2013.
- [42] Schleich, J.B.; Cajot, L.G.; Pierre, M.; Brasseur, M.; Franssen, J.M.; Kruppa, J.; Joyeux, D.; Twilt, L.; Van Oerle, J.; Aurtenetxe, G., Development Of Design Rules For Steel Structures Subjected To Natural Fires In Closed Car Parks, European Commission, 1999.
- [43] P. C. R. Collier, “Car Parks – Fires Involving Modern Cars and Stacking Systems,” BRANZ Study Report, Judgeford, 2011.
- [44] Vassart, O.; Zhao, B.; Cajot, L.G.; Robert, F.; Meyer, U., "Background & Applications Structural Fire Design," M.Poljanšek, B.Nikolova, L.Sousa, S.Dimova, A.Pinto, Institute for the Protection and Security of the Citizen, 2014.
- [45] Ferraz, Gonçalo; Santiago, Aldina; Rodrigues, João Paulo; Barata, Pedro, “Thermal Analysis of Hollow Steel Exposed to Localised Fires,” *Fire Technology*, vol. 52, no. 3, pp. 633-681, 2015.
- [46] EN 1991-1-2, Eurocode 1—basis of design and actions on structures—part 1—2:actions on structures exposed to fire, European Committee For Standardization, 2002.
- [47] Khetata; Seddik, Mohamed, Numerical Prediction Of Thermal And Dynamic Characteristics Of A Fire Induced Ceiling Jet, 2016.
- [48] Walton, W.D. and Thomas, P.H., “Estimating Temperatures in Compartment Fires,” in *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed.*, Quincy, National Fire Protection Association, 1995, pp. 134-147.
- [49] Waterman, T. E., “Room Flashover - Criteria and Synthesis,” *Fire technology*, vol. 4, no. 1, pp. 25-31, 1968.
- [50] Iqbal, Naeem; Salley; Mark Henry , “Fire Dynamics Tools (FDT) - Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program,” Washington, 2004.

- [51] Cooper, L.Y, “Heat Transfer From a Buoyant Plume to an Unconfined Ceiling,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 104, no. 3, pp. 446-451, 1982.
- [52] Mehaffey, Jim, *Fire Dynamics II - Ceiling Jets & Ceiling Flames*, Ottawa, 2003.
- [53] Peacock, Richard D.; McGrattan, Kevin B.; Forney, Glenn P.; Reneke; Paul A., *CFAST - Consolidated Fire and Smoke Transport*, NIST- National Institute of Standards and Technology, 2017, p. 55.
- [54] Fox, Robert W.; McDonald, Alan T.; Pritchard, Philip J., *Introdução a Mecânica dos Fluídos*, 6ª ed., Rio de Janeiro: LTC Editora, 2006.
- [55] EN 1363-1, Fire resistance tests. Part 1: General Requirements, European Committee For Standardization, 2012.
- [56] Viall, Robert; Wiegand, Karl, *Fire Modeling in Fluent*, Worcester: Worcester Polytechnic Institute, 2008.
- [57] Nechab, Khadouma, *Dynamics In Fire-Induced Ceiling-Jet*, 2017.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexo 1– Resultados dos Modelos Correlativo

1- Resultados de Alpert 1972

Tabela 6. Valores máximos para a correlação de Alpert de 1972, compartimento 1

r/H	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4 e 5	
	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]
0	994.132	11.976	1150.379	12.901	1343.323	13.959	1566.337	15.089
0.37	621.297	5.623	717.743	6.057	836.840	6.554	974.499	7.085
0.74	398.793	3.156	459.551	3.400	534.577	3.678	621.297	3.976
1.11	309.073	2.251	355.440	2.425	412.696	2.624	478.875	2.836
1.48	258.625	1.771	296.900	1.908	344.163	2.064	398.793	2.232
1.85	225.641	1.471	258.625	1.584	299.356	1.714	346.434	1.853

Tabela 7. Valores máximos para a correlação de Alpert de 1972, compartimento 2

r/H	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4 e 5	
	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]
0	406.718	9.956	468.746	10.725	545.342	11.604	633.876	12.543
0.21	365.426	7.419	420.831	7.992	489.249	8.647	568.329	9.347
0.42	237.605	4.164	272.508	4.485	315.608	4.853	365.426	5.246
0.64	186.063	2.970	212.700	3.199	245.591	3.462	283.609	3.742
0.85	157.082	2.337	179.070	2.517	206.221	2.724	237.605	2.944
1.06	138.134	1.940	157.082	2.090	180.481	2.262	207.526	2.445

2- Resultados de Alpert 2011

Tabela 8. Valores máximos para a correlação de Alpert de 2011, compartimento 1

r/H	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4 e 5	
	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]
0	994.132	11.976	1150.379	12.901	1343.323	13.959	1566.337	15.089
0.37	738.751	7.804	938.162	7.836	1237.294	7.741	1680.949	7.470
0.74	476.619	3.707	603.305	3.722	793.341	3.677	1075.194	3.549
1.11	370.189	2.399	467.346	2.408	613.088	2.379	829.246	2.296
1.48	310.088	1.761	390.571	1.768	511.300	1.747	690.360	1.686
1.85	270.670	1.386	340.216	1.391	444.541	1.375	599.269	1.327

Tabela 9. Valores máximos para a correlação de Alpert de 2011, compartimento 2

r/H	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4 e 5	
	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]
0	406.718	9.956	468.746	10.725	545.342	11.604	633.876	12.543
0.21	409.606	9.774	495.915	10.528	613.433	11.391	766.154	12.314
0.42	267.515	5.803	322.347	6.020	397.005	6.220	494.028	6.373
0.64	209.823	3.754	251.875	3.895	309.132	4.024	383.540	4.123
0.85	177.245	2.757	212.080	2.860	259.510	2.955	321.148	3.027
1.06	155.878	2.169	185.979	2.251	226.964	2.325	280.227	2.382

3- Resultados de Cooper

Tabela 10. Valores máximos para a correlação de Cooper, compartimento 1

r/H	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4 e 5	
	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]
0	1639.710		1899.507		2220.318		2591.129	
0.37	861.430	9.683	996.392	10.430	1163.052	11.286	1355.686	12.200
0.74	457.118	4.517	527.230	4.866	613.809	5.265	713.881	5.691
1.11	323.405	2.892	372.070	3.115	432.165	3.370	501.625	3.643
1.48	255.546	2.107	293.327	2.270	339.981	2.456	393.907	2.655
1.85	213.551	1.649	244.596	1.776	282.932	1.922	327.243	2.077

Tabela 11. Valores máximos para a correlação de Cooper, compartimento 2

r/H	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4 e 5	
	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]
0	663.004		766.140		893.498		1040.705	
0.21	463.391	15.008	534.509	16.167	622.330	17.493	723.839	18.909
0.42	325.745	7.002	374.786	7.542	435.344	8.161	505.340	8.822
0.64	227.131	4.405	260.354	4.745	301.380	5.135	348.800	5.550
0.85	172.333	3.224	196.767	3.473	226.939	3.758	261.814	4.062
1.06	145.434	2.529	165.553	2.724	190.397	2.948	219.114	3.186

4- Resultados de Heskestad e Delichatsios

Tabela 12. Valores máximos para a correlação de Heskestad e Delichatsios, compartimento 1

r/H	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4 e 5	
	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]
0	1491.811	12.422	1727.886	13.905	2019.403	15.833	2356.355	18.282
0.37	796.118	10.174	920.605	10.959	1074.328	11.858	1252.010	12.818
0.74	524.571	5.301	605.502	5.710	705.441	6.178	820.956	6.678
1.11	384.580	3.490	443.058	3.759	515.269	4.068	598.735	4.397
1.48	300.808	2.555	345.848	2.752	401.467	2.978	465.754	3.219
1.85	245.752	1.991	281.962	2.144	326.676	2.320	378.359	2.508

Tabela 13. Valores máximos para a correlação de Heskestad e Delichatsios, compartimento 2

r/H	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4 e 5	
	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]
0	604.290	10.005	766.140	10.990	813.737	12.182	947.503	13.548
0.21	411.752	13.626	534.509	14.678	552.181	15.881	641.867	17.167
0.42	308.150	7.551	374.786	8.134	411.441	8.801	477.409	9.514
0.64	242.120	5.085	260.354	5.477	321.742	5.926	372.593	6.406
0.85	200.316	3.831	196.767	4.127	264.953	4.465	306.234	4.827
1.06	170.573	3.046	165.553	3.282	224.548	3.551	259.020	3.838

5- Resultados de Motevalli e Marks

Tabela 14. Valores máximos para a correlação de Motevalli e Marks, compartimento 1

r/H	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4 e 5	
	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]
0.37	1082.559	21.684	1252.991	23.359	1463.449	25.274	1706.708	27.321
0.74	604.885	11.649	698.699	12.549	814.545	13.578	948.447	14.677
1.11	456.420	8.725	526.421	9.398	612.861	10.169	712.774	10.992
1.48	384.205	7.341	442.623	7.908	514.760	8.556	598.140	9.249
1.85	341.522	6.536	393.093	7.041	456.776	7.618	530.384	8.235

Tabela 15. Valores máximos para a correlação de Motevalli e Marks, compartimento 2

r/H	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4 e 5	
	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]
0.42	394.929	15.897	455.066	17.125	529.327	18.529	615.162	20.029
0.64	280.554	10.884	322.347	11.724	373.954	12.686	433.604	13.713
0.85	229.056	8.719	262.588	9.393	303.995	10.163	351.856	10.986
1.06	198.722	7.475	227.389	8.052	262.788	8.712	303.704	9.418

6– Comparação dos resultados de velocidade máxima

As tabelas abaixo mostram a porcentagem de diferença entre os resultados de velocidade máxima dos modelos correlativos, levando em consideração os resultados de Alpert de 1972 como referência.

6.1– Compartimento 1

Tabela 16. Comparação de velocidade máxima para classe 1

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0	11.98	11.98	0.00%			12.42	3.72%		
0.37	5.62	7.80	38.79%	9.68	72.19%	10.17	80.92%	21.68	285.62%
0.74	3.16	3.71	17.47%	4.52	43.13%	5.30	67.96%	11.65	269.13%
1.11	2.25	2.40	6.55%	2.89	28.46%	3.49	55.04%	8.72	287.59%
1.48	1.77	1.76	-0.57%	2.11	18.98%	2.56	44.26%	7.34	314.47%
1.85	1.47	1.39	-5.77%	1.65	12.10%	1.99	35.35%	6.54	344.44%

Tabela 17. Comparação de velocidade máxima para classe 2

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0.00	12.90	12.90	0.00%			13.91	7.78%		
0.37	6.06	7.84	29.36%	10.43	72.19%	10.96	80.92%	23.36	285.62%
0.74	3.40	3.72	9.49%	4.87	43.13%	5.71	67.96%	12.55	269.13%
1.11	2.42	2.41	-0.68%	3.12	28.46%	3.76	55.04%	9.40	287.59%
1.48	1.91	1.77	-7.32%	2.27	18.98%	2.75	44.26%	7.91	314.47%
1.85	1.58	1.39	-12.17%	1.78	12.10%	2.14	35.35%	7.04	344.44%

Tabela 18. Comparação de velocidade máxima para classe 3

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0	13.96	13.96	0.00%			15.83	13.43%		
0.37	6.55	7.74	18.11%	11.29	72.19%	11.86	80.92%	25.27	285.62%
0.74	3.68	3.68	-0.03%	5.26	43.13%	6.18	67.96%	13.58	269.13%
1.11	2.62	2.38	-9.32%	3.37	28.46%	4.07	55.04%	10.17	287.59%
1.48	2.06	1.75	-15.39%	2.46	18.98%	2.98	44.26%	8.56	314.47%
1.85	1.71	1.37	-19.81%	1.92	12.10%	2.32	35.35%	7.62	344.44%

Tabela 19. Comparação de velocidade máxima para classe 4 e 5

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0	15.09	15.09	0.00%			18.28	21.16%		
0.37	7.08	7.47	5.44%	12.20	72.19%	12.82	80.92%	27.32	285.62%
0.74	3.98	3.55	-10.75%	5.69	43.13%	6.68	67.96%	14.68	269.13%
1.11	2.84	2.30	-19.05%	3.64	28.46%	4.40	55.04%	10.99	287.59%
1.48	2.23	1.69	-24.46%	2.66	18.98%	3.22	44.26%	9.25	314.47%
1.85	1.85	1.33	-28.41%	2.08	12.10%	2.51	35.35%	8.24	344.44%

6.2– Compartimento 2

Tabela 20. Comparação de velocidade máxima para classe 1

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0	9.96	9.96	0.00%			10.00	0.49%		
0.21	7.42	9.77	31.74%	15.01	102.29%	13.63	83.66%		
0.42	4.16	5.80	39.36%	7.00	68.15%	7.55	81.35%	15.90	114.28%
0.64	2.97	3.75	26.41%	4.41	48.33%	5.08	71.20%	10.88	161.39%
0.85	2.34	2.76	17.96%	3.22	37.97%	3.83	63.95%	8.72	193.59%
1.06	1.94	2.17	11.79%	2.53	30.34%	3.05	57.00%	7.47	219.86%

Tabela 21. Comparação de velocidade máxima para classe 2

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0.00	10.72	10.72	0.00%			10.99	2.47%		
0.21	7.99	10.53	31.74%	16.17	102.29%	14.68	83.66%		
0.42	4.49	6.02	34.23%	7.54	68.15%	8.13	81.35%	17.12	114.28%
0.64	3.20	3.90	21.75%	4.75	48.33%	5.48	71.20%	11.72	161.39%
0.85	2.52	2.86	13.61%	3.47	37.97%	4.13	63.95%	9.39	193.59%
1.06	2.09	2.25	7.67%	2.72	30.34%	3.28	57.00%	8.05	219.86%

Tabela 22. Comparação de velocidade máxima para classe 3

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0	11.60	11.60	0.00%			12.18	4.98%		
0.21	8.65	11.39	31.74%	17.49	102.29%	15.88	83.66%		
0.42	4.85	6.22	28.17%	8.16	68.15%	8.80	81.35%	18.53	114.28%
0.64	3.46	4.02	16.26%	5.13	48.33%	5.93	71.20%	12.69	161.39%
0.85	2.72	2.95	8.48%	3.76	37.97%	4.47	63.95%	10.16	193.59%
1.06	2.26	2.33	2.81%	2.95	30.34%	3.55	57.00%	8.71	219.86%

Tabela 23. Comparação de velocidade máxima para classe 4 e 5

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0	12.54	12.54	0.00%			13.55	8.01%		
0.21	9.35	12.31	31.74%	18.91	102.29%	17.17	83.66%		
0.42	5.25	6.37	21.48%	8.82	68.15%	9.51	81.35%	20.03	114.28%
0.64	3.74	4.12	10.19%	5.55	48.33%	6.41	71.20%	13.71	161.39%
0.85	2.94	3.03	2.82%	4.06	37.97%	4.83	63.95%	10.99	193.59%
1.06	2.44	2.38	-2.55%	3.19	30.34%	3.84	57.00%	9.42	219.86%

7- Comparação dos resultados de temperatura máxima

As tabelas abaixo mostram a porcentagem de diferença entre os resultados de temperatura máxima dos modelos correlativos, sendo que os resultados de Alpert de 1972 foram utilizados como referência.

7.1- Compartimento 1

Tabela 24. Comparação de temperatura máxima para classe 1

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0	994.13	994.13	0.00%	1639.71	64.94%	1491.81	50.06%		
0.37	621.30	738.75	18.90%	861.43	38.65%	796.12	28.14%	1082.56	74.24%
0.74	398.79	476.62	19.52%	457.12	14.63%	524.57	31.54%	604.88	51.68%
1.11	309.07	370.19	19.77%	323.40	4.64%	384.58	24.43%	456.42	47.67%
1.48	258.62	310.09	19.90%	255.55	-1.19%	300.81	16.31%	384.21	48.56%
1.85	225.64	270.67	19.96%	213.55	-5.36%	245.75	8.91%	341.52	51.36%

Tabela 25. Comparação de temperatura máxima para classe 2

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0.00	1150.38	1150.38	0.00%	1899.51	65.12%	1727.89	50.20%		
0.37	717.74	938.16	30.71%	996.39	38.82%	920.60	28.26%	1252.99	74.57%
0.74	459.55	603.30	31.28%	527.23	14.73%	605.50	31.76%	698.70	52.04%
1.11	355.44	467.35	31.48%	372.07	4.68%	443.06	24.65%	526.42	48.10%
1.48	296.90	390.57	31.55%	293.33	-1.20%	345.85	16.49%	442.62	49.08%
1.85	258.62	340.22	31.55%	244.60	-5.42%	281.96	9.02%	393.09	51.99%

Tabela 26. Comparação de temperatura máxima para classe 3

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0	1343.32	1343.32	0.00%	2220.32	65.29%	2019.40	50.33%		
0.37	836.84	1237.29	47.85%	1163.05	38.98%	1074.33	28.38%	1463.45	74.88%
0.74	534.58	793.34	48.41%	613.81	14.82%	705.44	31.96%	814.55	52.37%
1.11	412.70	613.09	48.56%	432.16	4.72%	515.27	24.85%	612.86	48.50%
1.48	344.16	511.30	48.56%	339.98	-1.22%	401.47	16.65%	514.76	49.57%
1.85	299.36	444.54	48.50%	282.93	-5.49%	326.68	9.13%	456.78	52.59%

Tabela 27. Comparação de temperatura máxima para classe 4 e 5

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0	1566.34	1566.34	0.00%	2591.13	65.43%	2356.35	50.44%		
0.37	974.50	1680.95	72.49%	1355.69	39.12%	1252.01	28.48%	1706.71	75.14%
0.74	621.30	1075.19	73.06%	713.88	14.90%	820.96	32.14%	948.45	52.66%
1.11	478.88	829.25	73.17%	501.63	4.75%	598.74	25.03%	712.77	48.84%
1.48	398.79	690.36	73.11%	393.91	-1.23%	465.75	16.79%	598.14	49.99%
1.85	346.43	599.27	72.98%	327.24	-5.54%	378.36	9.22%	530.38	53.10%

7.2– Compartimento 2

Tabela 28. Comparação de temperatura máxima para classe 1

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0	406.72	406.72	0.00%	663.00	63.01%	604.29	48.58%		
0.21	365.43	409.61	12.09%	463.39	26.81%	411.75	12.68%		
0.42	237.60	267.52	12.59%	325.74	37.10%	308.15	29.69%	394.93	66.21%
0.64	186.06	209.82	12.77%	227.13	22.07%	242.12	30.13%	280.55	50.78%
0.85	157.08	177.25	12.84%	172.33	9.71%	200.32	27.52%	229.06	45.82%
1.06	138.13	155.88	12.85%	145.43	5.28%	170.57	23.48%	198.72	43.86%

Tabela 29. Comparação de temperatura máxima para classe 2

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0.00	468.75	468.75	0.00%	766.14	63.44%	698.01	48.91%		
0.21	420.83	495.92	17.84%	534.51	27.01%	474.59	12.77%		
0.42	272.51	322.35	18.29%	374.79	37.53%	354.37	30.04%	455.07	66.99%
0.64	212.70	251.88	18.42%	260.35	22.40%	277.75	30.58%	322.35	51.55%
0.85	179.07	212.08	18.43%	196.77	9.88%	229.24	28.02%	262.59	46.64%
1.06	157.08	185.98	18.40%	165.55	5.39%	194.72	23.96%	227.39	44.76%

Tabela 30. Comparação de temperatura máxima para classe 3

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0	545.34	545.34	0.00%	893.50	63.84%	813.74	49.22%		
0.21	489.25	613.43	25.38%	622.33	27.20%	552.18	12.86%		
0.42	315.61	397.01	25.79%	435.34	37.94%	411.44	30.36%	529.33	67.72%
0.64	245.59	309.13	25.87%	301.38	22.72%	321.74	31.01%	373.95	52.27%
0.85	206.22	259.51	25.84%	226.94	10.05%	264.95	28.48%	304.00	47.41%
1.06	180.48	226.96	25.76%	190.40	5.49%	224.55	24.42%	262.79	45.60%

Tabela 31. Comparação de temperatura máxima para classe 4 e 5

r/H	Alpert 1972	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	Heskestad e Delichatsios	Diferença	Motevalli e Marks	Diferença
0	633.88	633.88	0.00%	1040.71	64.18%	947.50	49.48%		
0.21	568.33	766.15	34.81%	723.84	27.36%	641.87	12.94%		
0.42	365.43	494.03	35.19%	505.34	38.29%	477.41	30.64%	615.16	68.34%
0.64	283.61	383.54	35.24%	348.80	22.99%	372.59	31.38%	433.60	52.89%
0.85	237.60	321.15	35.16%	261.81	10.19%	306.23	28.88%	351.86	48.08%
1.06	207.53	280.23	35.03%	219.11	5.58%	259.02	24.81%	303.70	46.34%

Anexo 2– Programa CFAST

1– Posição dos alvos e detectores de incêndio na simulação do CFAST

As tabelas a seguir mostram a posição de cada um dos seis alvos e detectores de incêndio que estão situados próximos ao teto.

Tabela 32. Alvos para o compartimento 1

Número do alvo	Posição em X [m]	Posição em Y [m]	Posição em Z [m]
Alvo 1	5	5	2.85
Alvo 2	6	5	2.85
Alvo 3	7	5	2.85
Alvo 4	8	5	2.85
Alvo 5	9	5	2.85
Alvo 6	10	5	2.85

Tabela 33. Alvos para o compartimento 2

Número do alvo	Posição em X [m]	Posição em Y [m]	Posição em Z [m]
Alvo 1	5	5	4.75
Alvo 2	6	5	4.75
Alvo 3	7	5	4.75
Alvo 4	8	5	4.75
Alvo 5	9	5	4.75
Alvo 6	10	5	4.75

Tabela 34. Detectores de incêndio para o compartimento 1

Número do detector de incêndio	Posição em X [m]	Posição em Y [m]	Posição em Z [m]
Detector de incêndio 1	5	5	2.85
Detector de incêndio 2	4	5	2.85
Detector de incêndio 3	3	5	2.85
Detector de incêndio 4	2	5	2.85
Detector de incêndio 5	1	5	2.85
Detector de incêndio 6	0	5	2.85

Tabela 35. Detectores de incêndio para o compartimento 2

Número do detector de incêndio	Posição em X [m]	Posição em Y [m]	Posição em Z [m]
Detector de incêndio 1	5	5	4.75
Detector de incêndio 2	4	5	4.75
Detector de incêndio 3	3	5	4.75
Detector de incêndio 4	2	5	4.75
Detector de incêndio 5	1	5	4.75
Detector de incêndio 6	0	5	4.75

2– Teste de convergência

O número de divisões utilizado para o primeiro compartimento foi 50, devido ao teste de convergência feito em outra tese para um compartimento de mesma dimensão [57]. O teste de convergência para compartimento 2 foi realizado com 3 malhas diferentes (25, 50 e 75). Os resultados de temperatura e velocidade para classe 1 estão dispostos nas figuras abaixo.

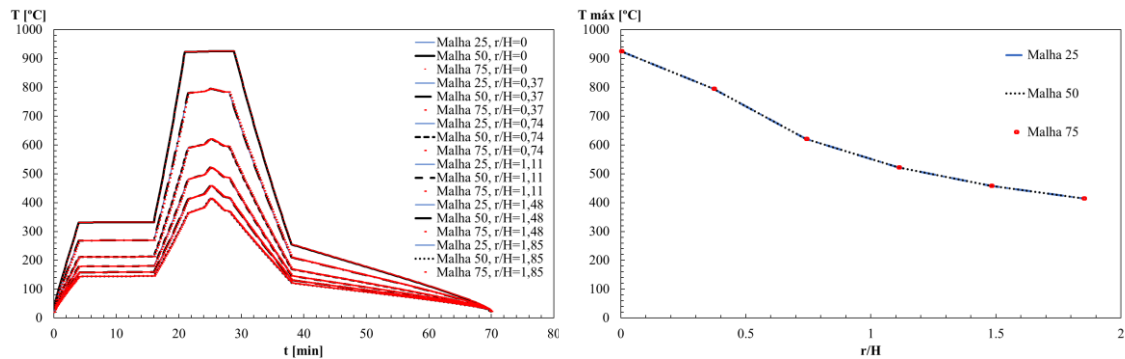


Figura 94. Temperatura por tempo e Temperatura máxima por r/H da classe 1 para diferentes malhas

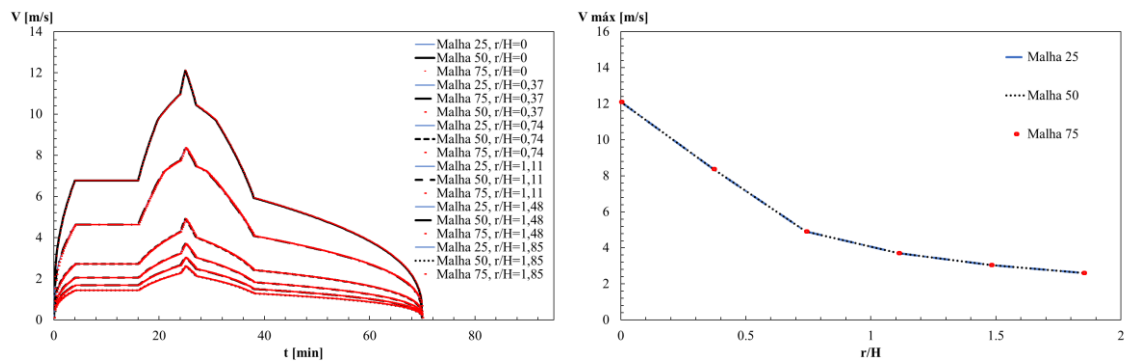


Figura 95. Velocidade por tempo e Velocidade máxima por r/H da classe 1 para diferentes malhas

Como pode-se notar, independentemente da malha, os resultados obtidos foram iguais. Foi escolhido a malha de 50 para realizar as simulações das outras classes de carro, de forma que ambos os compartimentos foram simulados com a mesma malha.

3– Resultados de temperatura e velocidade máxima obtidos no CFAST

Nas tabelas abaixo estão os resultados de temperatura e velocidade máxima obtidos no programa CFAST, para todas as classes de carros.

Tabela 36. Valores máximos obtidos no CFAST, compartimento 1

r/H	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4 e 5	
	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]
0	994.132	11.976	1150.379	12.901	1343.323	13.959	1566.337	15.089
0.37	738.751	7.804	938.162	7.836	1237.294	7.741	1680.949	7.470
0.74	476.619	3.707	603.305	3.722	793.341	3.677	1075.194	3.549
1.11	370.189	2.399	467.346	2.408	613.088	2.379	829.246	2.296
1.48	310.088	1.761	390.571	1.768	511.300	1.747	690.360	1.686
1.85	270.670	1.386	340.216	1.391	444.541	1.375	599.269	1.327

Tabela 37. Valores máximos obtidos no CFAST, compartimento 2

r/H	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4 e 5	
	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]
0.00	825.830	11.935	922.580	12.595	923.471	13.340	924.735	14.126
0.21	476.488	7.450	531.407	7.861	498.298	7.864	453.475	7.654
0.42	625.605	6.248	754.396	6.719	761.455	7.153	769.691	7.632
0.64	540.542	4.524	649.413	4.873	660.322	5.270	672.909	5.696
0.85	479.993	3.707	574.683	3.993	588.334	4.320	604.018	4.670
1.06	434.977	3.178	519.126	3.423	534.814	3.704	552.801	4.003

4– Comparação dos resultados de velocidade máxima

As tabelas abaixo mostram a diferença entre os resultados de velocidade máxima dos modelos correlativos e as obtidas através do programa, levando em consideração os resultados do CFAST como referência.

4.1– Compartimento 1

Tabela 38. Comparação de velocidade máxima para classe 1

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	12.1	12.0	-1.1%	12.0	-1.1%			12.4	2.6%		
0.37	8.4	5.6	-32.8%	7.8	-6.7%	9.7	15.7%	10.2	21.6%	21.7	159.1%
0.74	4.9	3.2	-35.7%	3.7	-24.5%	4.5	-7.9%	5.3	8.0%	11.6	137.4%
1.11	3.7	2.3	-39.3%	2.4	-35.3%	2.9	-22.0%	3.5	-5.9%	8.7	135.2%
1.48	3.0	1.8	-41.8%	1.8	-42.1%	2.1	-30.7%	2.6	-16.0%	7.3	141.4%
1.85	2.6	1.5	-43.6%	1.4	-46.9%	1.6	-36.8%	2.0	-23.7%	6.5	150.7%

Tabela 39. Comparação de velocidade máxima para classe 2

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	12.8	12.9	0.8%	12.9	0.8%			13.9	8.6%		
0.37	8.8	6.1	-30.9%	7.8	-10.5%	10.4	19.1%	11.0	25.1%	23.4	166.7%
0.74	5.3	3.4	-35.7%	3.7	-29.6%	4.9	-8.0%	5.7	7.9%	12.5	137.2%
1.11	4.0	2.4	-39.4%	2.4	-39.8%	3.1	-22.1%	3.8	-6.0%	9.4	135.0%
1.48	3.3	1.9	-41.8%	1.8	-46.1%	2.3	-30.8%	2.8	-16.1%	7.9	141.1%
1.85	2.8	1.6	-43.6%	1.4	-50.5%	1.8	-36.8%	2.1	-23.7%	7.0	150.6%

Tabela 40. Comparação de velocidade máxima para classe 3

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	13.6	14.0	2.6%	14.0	2.6%			15.8	16.4%		
0.37	9.3	6.6	-29.5%	7.7	-16.7%	11.3	21.5%	11.9	27.6%	25.3	172.1%
0.74	5.7	3.7	-35.7%	3.7	-35.7%	5.3	-8.0%	6.2	8.0%	13.6	137.4%
1.11	4.3	2.6	-39.3%	2.4	-44.9%	3.4	-22.0%	4.1	-5.8%	10.2	135.4%
1.48	3.6	2.1	-41.8%	1.7	-50.8%	2.5	-30.8%	3.0	-16.1%	8.6	141.0%
1.85	3.0	1.7	-43.6%	1.4	-54.8%	1.9	-36.8%	2.3	-23.7%	7.6	150.6%

Tabela 41. Comparação de velocidade máxima para classes 4 e 5

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	14.4	15.1	5.1%	15.1	5.1%			18.3	27.4%		
0.37	10.0	7.1	-29.0%	7.5	-25.1%	12.2	22.3%	12.8	28.5%	27.3	173.8%
0.74	6.2	4.0	-35.7%	3.5	-42.6%	5.7	-7.9%	6.7	8.0%	14.7	137.4%
1.11	4.7	2.8	-39.3%	2.3	-50.9%	3.6	-22.0%	4.4	-5.9%	11.0	135.2%
1.48	3.8	2.2	-41.8%	1.7	-56.0%	2.7	-30.7%	3.2	-16.0%	9.2	141.4%
1.85	3.3	1.9	-43.6%	1.3	-59.6%	2.1	-36.8%	2.5	-23.7%	8.2	150.7%

4.2– Compartimento 2

Tabela 42. Comparação de velocidade máxima para classe 1

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	11.9	10.0	-16.6%	10.0	-16.6%			10.0	-16.2%		
0.21	7.5	7.4	-0.4%	9.8	31.2%	15.0	101.4%	13.6	82.9%		
0.42	6.2	4.2	-33.4%	5.8	-7.1%	7.0	12.1%	7.6	20.9%	15.9	154.4%
0.64	4.5	3.0	-34.3%	3.8	-17.0%	4.4	-2.6%	5.1	12.4%	10.9	140.6%
0.85	3.7	2.3	-37.0%	2.8	-25.6%	3.2	-13.0%	3.8	3.4%	8.7	135.2%
1.06	3.2	1.9	-38.9%	2.2	-31.7%	2.5	-20.4%	3.0	-4.1%	7.5	135.2%

Tabela 43. Comparação de velocidade máxima para classe 2

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	12.6	10.7	-14.8%	10.7	-14.8%			11.0	-12.7%		
0.21	7.9	8.0	1.7%	10.5	33.9%	16.2	105.7%	14.7	86.7%		
0.42	6.7	4.5	-33.2%	6.0	-10.4%	7.5	12.3%	8.1	21.1%	17.1	154.9%
0.64	4.9	3.2	-34.3%	3.9	-20.1%	4.7	-2.6%	5.5	12.4%	11.7	140.6%
0.85	4.0	2.5	-37.0%	2.9	-28.4%	3.5	-13.0%	4.1	3.4%	9.4	135.2%
1.06	3.4	2.1	-38.9%	2.3	-34.3%	2.7	-20.4%	3.3	-4.1%	8.1	135.2%

Tabela 44. Comparação de velocidade máxima para classe 3

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	13.3	11.6	-13.0%	11.6	-13.0%			12.2	-8.7%		
0.21	7.9	8.6	10.0%	11.4	44.9%	17.5	122.4%	15.9	101.9%		
0.42	7.2	4.9	-32.2%	6.2	-13.0%	8.2	14.1%	8.8	23.0%	18.5	159.0%
0.64	5.3	3.5	-34.3%	4.0	-23.6%	5.1	-2.6%	5.9	12.5%	12.7	140.7%
0.85	4.3	2.7	-37.0%	3.0	-31.6%	3.8	-13.0%	4.5	3.4%	10.2	135.2%
1.06	3.7	2.3	-38.9%	2.3	-37.2%	2.9	-20.4%	3.6	-4.1%	8.7	135.2%

Tabela 45. Comparação de velocidade máxima para classes 4 e 5

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	14.1	12.5	-11.2%	12.5	-11.2%			13.5	-4.1%		
0.21	7.7	9.3	22.1%	12.3	60.9%	18.9	147.1%	17.2	124.3%		
0.42	7.6	5.2	-31.3%	6.4	-16.5%	8.8	15.6%	9.5	24.7%	20.0	162.5%
0.64	5.7	3.7	-34.3%	4.1	-27.6%	5.6	-2.5%	6.4	12.5%	13.7	140.8%
0.85	4.7	2.9	-37.0%	3.0	-35.2%	4.1	-13.0%	4.8	3.4%	11.0	135.2%
1.06	4.0	2.4	-38.9%	2.4	-40.5%	3.2	-20.4%	3.8	-4.1%	9.4	135.2%

5– Comparação dos resultados de temperatura máxima

As tabelas abaixo mostram a porcentagem de Diferença entre os resultados de temperatura máxima dos modelos correlativos e as obtidas através do programa, que são utilizados como referência.

5.1– Compartimento 1

Tabela 46. Comparação de temperatura máxima para classe 1

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	925.0	994.1	7.5%	994.1	7.5%	1639.7	77.3%	1491.8	61.3%		
0.37	794.7	621.3	-21.8%	738.8	-7.0%	861.4	8.4%	796.1	0.2%	1082.6	36.2%
0.74	620.9	398.8	-35.8%	476.6	-23.2%	457.1	-26.4%	524.6	-15.5%	604.9	-2.6%
1.11	521.8	309.1	-40.8%	370.2	-29.0%	323.4	-38.0%	384.6	-26.3%	456.4	-12.5%
1.48	458.5	258.6	-43.6%	310.1	-32.4%	255.5	-44.3%	300.8	-34.4%	384.2	-16.2%
1.85	415.2	225.6	-45.6%	270.7	-34.8%	213.6	-48.6%	245.8	-40.8%	341.5	-17.7%

Tabela 47. Comparação de temperatura máxima para classe 2

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	926.7	1150.4	24.1%	1150.4	24.1%	1899.5	105.0%	1727.9	86.4%		
0.37	802.0	717.7	-10.5%	938.2	17.0%	996.4	24.2%	920.6	14.8%	1253.0	56.2%
0.74	635.0	459.6	-27.6%	603.3	-5.0%	527.2	-17.0%	605.5	-4.6%	698.7	10.0%
1.11	540.0	355.4	-34.2%	467.3	-13.5%	372.1	-31.1%	443.1	-18.0%	526.4	-2.5%
1.48	479.0	296.9	-38.0%	390.6	-18.5%	293.3	-38.8%	345.8	-27.8%	442.6	-7.6%
1.85	438.0	258.6	-41.0%	340.2	-22.3%	244.6	-44.2%	282.0	-35.6%	393.1	-10.3%

Tabela 48. Comparação de temperatura máxima para classe 3

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	929.3	1343.3	44.5%	1343.3	44.5%	2220.3	138.9%	2019.4	117.3%		
0.37	811.0	836.8	3.2%	1237.3	52.6%	1163.1	43.4%	1074.3	32.5%	1463.4	80.4%
0.74	653.0	534.6	-18.1%	793.3	21.5%	613.8	-6.0%	705.4	8.0%	814.5	24.7%
1.11	563.0	412.7	-26.7%	613.1	8.9%	432.2	-23.2%	515.3	-8.5%	612.9	8.9%
1.48	505.0	344.2	-31.8%	511.3	1.2%	340.0	-32.7%	401.5	-20.5%	514.8	1.9%
1.85	466.0	299.4	-35.8%	444.5	-4.6%	282.9	-39.3%	326.7	-29.9%	456.8	-2.0%

Tabela 49. Comparação de temperatura máxima classes 4 e 5

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	933.0	1566.3	67.9%	1566.3	67.9%	2591.1	177.7%	2356.4	152.5%		
0.37	822.1	974.5	18.5%	1680.9	104.5%	1355.7	64.9%	1252.0	52.3%	1706.7	107.6%
0.74	674.2	621.3	-7.8%	1075.2	59.5%	713.9	5.9%	821.0	21.8%	948.4	40.7%
1.11	589.8	478.9	-18.8%	829.2	40.6%	501.6	-14.9%	598.7	1.5%	712.8	20.9%
1.48	536.0	398.8	-25.6%	690.4	28.8%	393.9	-26.5%	465.8	-13.1%	598.1	11.6%
1.85	499.1	346.4	-30.6%	599.3	20.1%	327.2	-34.4%	378.4	-24.2%	530.4	6.3%

5.2– Compartimento 2

Tabela 50. Comparação de temperatura máxima para classe 1

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	825.8	406.7	-50.8%	406.7	-50.8%	663.0	-19.7%	604.3	-26.8%		
0.21	476.5	365.4	-23.3%	409.6	-14.0%	463.4	-2.7%	411.8	-13.6%		
0.42	625.6	237.6	-62.0%	267.5	-57.2%	325.7	-47.9%	308.1	-50.7%	394.9	-36.9%
0.64	540.5	186.1	-65.6%	209.8	-61.2%	227.1	-58.0%	242.1	-55.2%	280.6	-48.1%
0.85	480.0	157.1	-67.3%	177.2	-63.1%	172.3	-64.1%	200.3	-58.3%	229.1	-52.3%
1.06	435.0	138.1	-68.2%	155.9	-64.2%	145.4	-66.6%	170.6	-60.8%	198.7	-54.3%

Tabela 51. Comparação de temperatura máxima para classe 2

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	922.6	468.7	-49.2%	468.7	-49.2%	766.1	-17.0%	698.0	-24.3%		
0.21	531.4	420.8	-20.8%	495.9	-6.7%	534.5	0.6%	474.6	-10.7%		
0.42	754.4	272.5	-63.9%	322.3	-57.3%	374.8	-50.3%	354.4	-53.0%	455.1	-39.7%
0.64	649.4	212.7	-67.2%	251.9	-61.2%	260.4	-59.9%	277.7	-57.2%	322.3	-50.4%
0.85	574.7	179.1	-68.8%	212.1	-63.1%	196.8	-65.8%	229.2	-60.1%	262.6	-54.3%
1.06	519.1	157.1	-69.7%	186.0	-64.2%	165.6	-68.1%	194.7	-62.5%	227.4	-56.2%

Tabela 52. Comparação de temperatura máxima para classe 3

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	923.5	545.3	-40.9%	545.3	-40.9%	893.5	-3.2%	813.7	-11.9%		
0.21	498.3	489.2	-1.8%	613.4	23.1%	622.3	24.9%	552.2	10.8%		
0.42	761.5	315.6	-58.6%	397.0	-47.9%	435.3	-42.8%	411.4	-46.0%	529.3	-30.5%
0.64	660.3	245.6	-62.8%	309.1	-53.2%	301.4	-54.4%	321.7	-51.3%	374.0	-43.4%
0.85	588.3	206.2	-64.9%	259.5	-55.9%	226.9	-61.4%	265.0	-55.0%	304.0	-48.3%
1.06	534.8	180.5	-66.3%	227.0	-57.6%	190.4	-64.4%	224.5	-58.0%	262.8	-50.9%

Tabela 53. Comparação de temperatura máxima para classes 4 e 5

r/H	CFAST	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0.00	924.7	633.9	-31.5%	633.9	-31.5%	1040.7	12.5%	947.5	2.5%		
0.21	453.5	568.3	25.3%	766.2	69.0%	723.8	59.6%	641.9	41.5%		
0.42	769.7	365.4	-52.5%	494.0	-35.8%	505.3	-34.3%	477.4	-38.0%	615.2	-20.1%
0.64	672.9	283.6	-57.9%	383.5	-43.0%	348.8	-48.2%	372.6	-44.6%	433.6	-35.6%
0.85	604.0	237.6	-60.7%	321.1	-46.8%	261.8	-56.7%	306.2	-49.3%	351.9	-41.7%
1.06	552.8	207.5	-62.5%	280.2	-49.3%	219.1	-60.4%	259.0	-53.1%	303.7	-45.1%

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexo 3– Programa ANSYS Fluent

1- Condições de contorno utilizadas no ANSYS Fluent

Com base na Figura 78 e Figura 79, foram encontradas as equações da reta da temperatura do gás e da velocidade do gás para as diferentes classes de carros, disponíveis abaixo.

1.1- Classe 1

1.1.1- Temperatura do gás no compartimento 1

$$0 \leq tim \leq 120 [s] \quad T = 7,50 \times tim + 293,15 \quad \text{Eq. 43}$$

$$120 < tim \leq 1500 [s] \quad T = 3,47 \times 10^{-3} \times tim + 1192,96 \quad \text{Eq. 44}$$

$$1500 < tim \leq 2880 [s] \quad T = -8,85 \times 10^{-4} \times tim + 1199,51 \quad \text{Eq. 45}$$

$$2880 < tim \leq 4200 [s] \quad T = -0,47 \times tim + 2268,14 \quad \text{Eq. 46}$$

1.1.2- Velocidade do gás no compartimento 1

$$0 \leq tim \leq 240 [s] \quad V = 0,032 \times tim + 0,1 \quad \text{Eq. 47}$$

$$240 < tim \leq 960 [s] \quad V = 7,7 \quad \text{Eq. 48}$$

$$960 < tim \leq 1440 [s] \quad V = 5,02 \times 10^{-3} \times tim + 2,88 \quad \text{Eq. 49}$$

$$1440 < tim \leq 1500 [s] \quad V = 0,014 \times tim - 10,53 \quad \text{Eq. 50}$$

$$1500 < tim \leq 1620 [s] \quad V = -0,011 \times tim + 26,85 \quad \text{Eq. 51}$$

$$1620 < tim \leq 2280 [s] \quad V = -3,82 \times 10^{-3} \times tim + 15,89 \quad \text{Eq. 52}$$

$$2280 < tim \leq 3180 [s] \quad V = -9,33 \times 10^{-4} \times tim + 9,31 \quad \text{Eq. 53}$$

$$3180 < tim \leq 4200 [s] \quad V = -6,12 \times 10^{-3} \times tim + 25,79 \quad \text{Eq. 54}$$

1.1.3- Temperatura do gás no compartimento 2

$$0 \leq tim \leq 120 [s] \quad T = 7,50 \times tim + 293,15 \quad \text{Eq. 55}$$

$$120 < tim \leq 1500 [s] \quad T = 1,35 \times 10^{-3} \times tim + 1193,11 \quad \text{Eq. 56}$$

$$1500 < tim \leq 2880 [s] \quad T = -2,31 \times 10^{-4} \times tim + 1195,48 \quad \text{Eq. 57}$$

$$2880 < tim \leq 4200 [s] \quad T = -0,47 \times tim + 2264,38 \quad \text{Eq. 58}$$

1.1.4- Velocidade do gás no compartimento 2

$$0 \leq tim \leq 240 [s] \quad V = 0,031 \times tim + 0,1 \quad \text{Eq. 59}$$

$$240 < tim \leq 960 [s] \quad V = 7,64 \quad \text{Eq. 60}$$

$$960 < tim \leq 1440 [s] \quad V = 5,17 \times 10^{-3} \times tim + 2,68 \quad \text{Eq. 61}$$

$$1440 < tim \leq 1500 [s] \quad V = 0,015 \times tim - 10,76 \quad \text{Eq. 62}$$

$$1500 < tim \leq 1620 [s] \quad V = -0,011 \times tim + 26,87 \quad \text{Eq. 63}$$

$$1620 < tim \leq 2280 [s] \quad V = -3,82 \times 10^{-3} \times tim + 15,91 \quad \text{Eq. 64}$$

$$2280 < tim \leq 3180 [s] \quad V = -9,55 \times 10^{-4} \times tim + 9,38 \quad \text{Eq. 65}$$

$$3180 < tim \leq 4200 [s] \quad V = -6,12 \times 10^{-3} \times tim + 25,79 \quad \text{Eq. 66}$$

1.2- Classe 2

1.2.1- Temperatura do gás no compartimento 1

$$0 \leq tim \leq 120 [s] \quad T = 7,50 \times tim + 293,15 \quad \text{Eq. 67}$$

$$120 < tim \leq 1500 [s] \quad T = 5,07 \times 10^{-3} \times tim + 1192,54 \quad \text{Eq. 68}$$

$$1500 < tim \leq 3120 [s] \quad T = -1,28 \times 10^{-3} \times tim + 1202,07 \quad \text{Eq. 69}$$

$$3120 < tim \leq 4200 [s] \quad T = -0,47 \times tim + 2270,99 \quad \text{Eq. 70}$$

1.2.2- Velocidade do gás no compartimento 1

$$0 \leq tim \leq 240 [s] \quad V = 0,033 \times tim + 0,1 \quad \text{Eq. 71}$$

$$240 < tim \leq 960 [s] \quad V = 8,06 \quad \text{Eq. 72}$$

$$960 < tim \leq 1440 [s] \quad V = 5,29 \times 10^{-3} \times tim + 2,98 \quad \text{Eq. 73}$$

$$1440 < tim \leq 1500 [s] \quad V = 0,015 \times tim - 11 \quad \text{Eq. 74}$$

$$1500 < tim \leq 1620 [s] \quad V = -0,012 \times tim + 29,54 \quad \text{Eq. 75}$$

$$1620 < tim \leq 2280 [s] \quad V = -3,92 \times 10^{-3} \times tim + 16,46 \quad \text{Eq. 76}$$

$$2280 < tim \leq 3360 [s] \quad V = -9,88 \times 10^{-4} \times tim + 9,77 \quad \text{Eq. 77}$$

$$3180 < tim \leq 4200 [s] \quad V = -6,39 \times 10^{-3} \times tim + 26,95 \quad \text{Eq. 78}$$

1.2.3- Temperatura do gás no compartimento 2

$$0 \leq tim \leq 120 [s] \quad T = 7,50 \times tim + 293,15 \quad \text{Eq. 79}$$

$$120 < tim \leq 1500 [s] \quad T = 1,77 \times 10^{-3} \times tim + 1193,08 \quad \text{Eq. 80}$$

$$1500 < tim \leq 3120 [s] \quad T = -2,56 \times 10^{-4} \times tim + 1202,07 \quad \text{Eq. 81}$$

$$3120 < tim \leq 4200 [s] \quad T = -0,47 \times tim + 2270,99 \quad \text{Eq. 82}$$

1.2.4- Velocidade do gás no compartimento 2

$$0 \leq tim \leq 240 [s] \quad V = 0,033 \times tim + 0,1 \quad \text{Eq. 83}$$

$$240 < tim \leq 960 [s] \quad V = 8,06 \quad \text{Eq. 84}$$

$$960 < tim \leq 1440 [s] \quad V = 5,25 \times 10^{-3} \times tim + 3,02 \quad \text{Eq. 85}$$

$$1440 < tim \leq 1500 [s] \quad V = 0,015 \times tim - 11,26 \quad \text{Eq. 86}$$

$$1500 < tim \leq 1620 [s] \quad V = -0,011 \times tim + 28,12 \quad \text{Eq. 87}$$

$$1620 < tim \leq 2280 [s] \quad V = -3,44 \times 10^{-3} \times tim + 15,73 \quad \text{Eq. 88}$$

$$2280 < tim \leq 3360 [s] \quad V = -1,04 \times 10^{-3} \times tim + 10,27 \quad \text{Eq. 89}$$

$$3180 < tim \leq 4200 [s] \quad V = -6,72 \times 10^{-3} \times tim + 28,31 \quad \text{Eq. 90}$$

1.3- Classe 3

1.3.1- Temperatura do gás no compartimento 1

$$0 \leq tim \leq 120 [s] \quad T = 7,50 \times tim + 293,15 \quad \text{Eq. 91}$$

$$120 < tim \leq 1500 [s] \quad T = 6,52 \times 10^{-3} \times tim + 1192,37 \quad \text{Eq. 92}$$

$$1500 < tim \leq 3360 [s] \quad T = -2,56 \times 10^{-3} \times tim + 1206 \quad \text{Eq. 93}$$

$$3360 < tim \leq 4200 [s] \quad T = -0,47 \times tim + 2272,99 \quad \text{Eq. 94}$$

1.3.2- Velocidade do gás no compartimento 1

$$0 \leq tim \leq 240 [s] \quad V = 0,035 \times tim + 0,1 \quad \text{Eq. 95}$$

$240 < tim \leq 960$ [s]	$V = 8,44$	Eq. 96
$960 < tim \leq 1440$ [s]	$V = 5,54 \times 10^{-3} \times tim + 3,12$	Eq. 97
$1440 < tim \leq 1500$ [s]	$V = 0,015 \times tim - 10,50$	Eq. 98
$1500 < tim \leq 1620$ [s]	$V = -0,012 \times tim + 29,50$	Eq. 99
$1620 < tim \leq 2280$ [s]	$V = -4,15 \times 10^{-3} \times tim + 17,33$	Eq. 100
$2280 < tim \leq 3540$ [s]	$V = -1,02 \times 10^{-3} \times tim + 10,19$	Eq. 101
$3540 < tim \leq 4200$ [s]	$V = -6,71 \times 10^{-3} \times tim + 28,27$	Eq. 102

1.3.3- Temperatura do gás no compartimento 2

$0 \leq tim \leq 120$ [s]	$T = 7,50 \times tim + 293,15$	Eq. 103
$120 < tim \leq 1500$ [s]	$T = 2,39 \times 10^{-3} \times tim + 1193,03$	Eq. 104
$1500 < tim \leq 3360$ [s]	$T = -6,03 \times 10^{-4} \times tim + 1197,52$	Eq. 105
$3360 < tim \leq 4200$ [s]	$T = -0,47 \times tim + 2266,19$	Eq. 106

1.3.4- Velocidade do gás no compartimento 2

$0 \leq tim \leq 240$ [s]	$V = 0,035 \times tim + 0,1$	Eq. 107
$240 < tim \leq 960$ [s]	$V = 8,45$	Eq. 108
$960 < tim \leq 1440$ [s]	$V = 5,5 \times 10^{-3} \times tim + 3,17$	Eq. 109
$1440 < tim \leq 1500$ [s]	$V = 0,016 \times tim - 11,47$	Eq. 110
$1500 < tim \leq 1620$ [s]	$V = -0,012 \times tim + 29,41$	Eq. 111
$1620 < tim \leq 2280$ [s]	$V = -4,18 \times 10^{-3} \times tim + 17,42$	Eq. 112
$2280 < tim \leq 3540$ [s]	$V = -1,03 \times 10^{-3} \times tim + 10,27$	Eq. 113
$3540 < tim \leq 4200$ [s]	$V = -6,72 \times 10^{-3} \times tim + 28,31$	Eq. 114

1.4- Classe 4 e 5

1.4.1- Temperatura do gás no compartimento 1

$0 \leq tim \leq 60$ [°C]	$T = 7,50 \times tim + 293,15$	Eq. 115
$60 < tim \leq 1500$ [°C]	$T = 9,15 \times 10^{-3} \times tim + 1192,45$	Eq. 116

$$1500 < tim \leq 3540 [^{\circ}\text{C}] \quad T = -4,68 \times 10^{-3} \times tim + 1213,21 \quad \text{Eq. 117}$$

$$3540 < tim \leq 4200 [^{\circ}\text{C}] \quad T = -0,47 \times tim + 2276,42 \quad \text{Eq. 118}$$

1.4.2- Velocidade do gás no compartimento 1

$$0 \leq tim \leq 240 [s] \quad V = 0,036 \times tim + 0,1 \quad \text{Eq. 119}$$

$$240 < tim \leq 960 [s] \quad V = 8,85 \quad \text{Eq. 120}$$

$$960 < tim \leq 1440 [s] \quad V = 5,65 \times 10^{-3} \times tim + 3,43 \quad \text{Eq. 121}$$

$$1440 < tim \leq 1500 [s] \quad V = 0,016 \times tim - 11,72 \quad \text{Eq. 122}$$

$$1500 < tim \leq 1620 [s] \quad V = -0,012 \times tim + 30,66 \quad \text{Eq. 123}$$

$$1620 < tim \leq 2280 [s] \quad V = -4,89 \times 10^{-3} \times tim + 19,01 \quad \text{Eq. 124}$$

$$2280 < tim \leq 3600 [s] \quad V = -1,02 \times 10^{-3} \times tim + 10,18 \quad \text{Eq. 125}$$

$$3600 < tim \leq 4200 [s] \quad V = -6,70 \times 10^{-3} \times tim + 28,22 \quad \text{Eq. 126}$$

1.4.3- Temperatura do gás no compartimento 2

$$0 \leq tim \leq 60 [^{\circ}\text{C}] \quad T = 7,50 \times tim + 293,15 \quad \text{Eq. 127}$$

$$60 < tim \leq 1500 [^{\circ}\text{C}] \quad T = 3,28 \times 10^{-3} \times tim + 1192,96 \quad \text{Eq. 128}$$

$$1500 < tim \leq 3540 [^{\circ}\text{C}] \quad T = -1,19 \times 10^{-3} \times tim + 1199,67 \quad \text{Eq. 129}$$

$$3540 < tim \leq 4200 [^{\circ}\text{C}] \quad T = -0,47 \times tim + 2267,49 \quad \text{Eq. 130}$$

1.4.4- Velocidade do gás no compartimento 2

$$0 \leq tim \leq 240 [s] \quad V = 0,036 \times tim + 0,1 \quad \text{Eq. 131}$$

$$240 < tim \leq 960 [s] \quad V = 8,85 \quad \text{Eq. 132}$$

$$960 < tim \leq 1440 [s] \quad V = 5,75 \times 10^{-3} \times tim + 3,33 \quad \text{Eq. 133}$$

$$1440 < tim \leq 1500 [s] \quad V = 0,017 \times tim - 12,15 \quad \text{Eq. 134}$$

$$1500 < tim \leq 1620 [s] \quad V = -0,012 \times tim + 30,85 \quad \text{Eq. 135}$$

$$1620 < tim \leq 2280 [s] \quad V = -4,94 \times 10^{-3} \times tim + 19,14 \quad \text{Eq. 136}$$

$$2280 < tim \leq 3600 [s] \quad V = -1,03 \times 10^{-3} \times tim + 10,24 \quad \text{Eq. 137}$$

$$3600 < tim \leq 4200 [s] \quad V = -6,72 \times 10^{-3} \times tim + 28,31 \quad \text{Eq. 138}$$

2– Teste de convergência

Para verificar qual malha era ideal para a simulação foi realizado um teste de convergência com os seguintes tamanhos de malha para ambos os compartimentos: 0,02 m, 0,05 m, 0,075 m e 0,1 m. A simulação foi feita utilizando a classe 3 de carros e a análise foi feita em um ponto onde o fogo está numa região desenvolvida ($r/H= 1,11$ no primeiro compartimento e $r/H=0,64$ no segundo). Abaixo temos os gráficos obtidos na simulação:

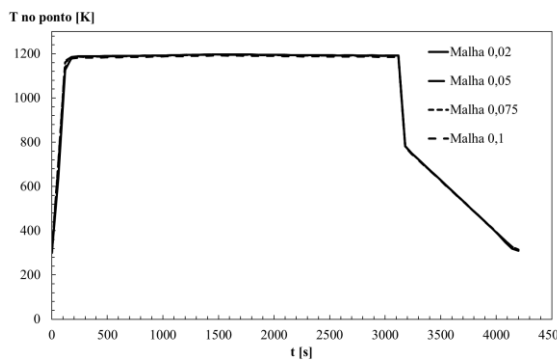


Figura 96. Variação da temperatura no ponto escolhido no tempo para compartimento 1

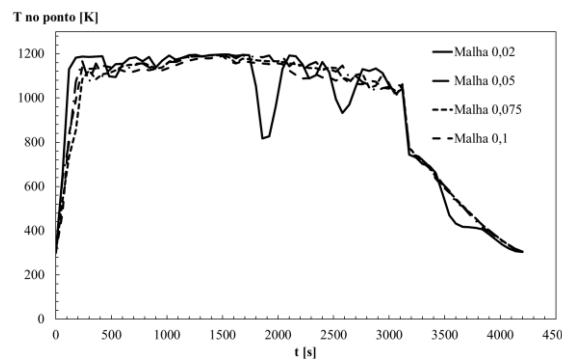


Figura 97. Variação da temperatura no ponto escolhido no tempo para compartimento 2

A partir dos dados obtidos foi escolhido utilizar a malha de 0,05 para ambos os compartimentos.

3– Verificação do tempo de teste com base no isolamento

Foram realizadas 2 simulações de classe 3 para cada um dos compartimentos, alterando apenas o teto adiabático ou não (transferência de calor por convecção, $\alpha = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $T_\infty = 300 \text{ K}$). Em cada simulação foi retirado os valores de temperatura em 3 pontos escolhidos em $r=0$: um na superfície exposta (ponto 1, verde), um na metade do concreto (ponto 2, azul) e outro na superfície não exposta (ponto 3, vermelha), conforme Figura 98. A variação de temperatura pode ser vista na Figura 99 e Figura 100.

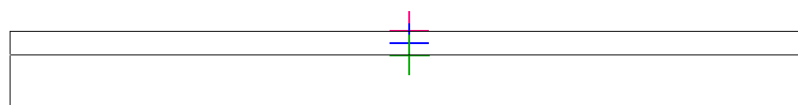


Figura 98. Pontos selecionados no concreto dos compartimentos 1 e 2

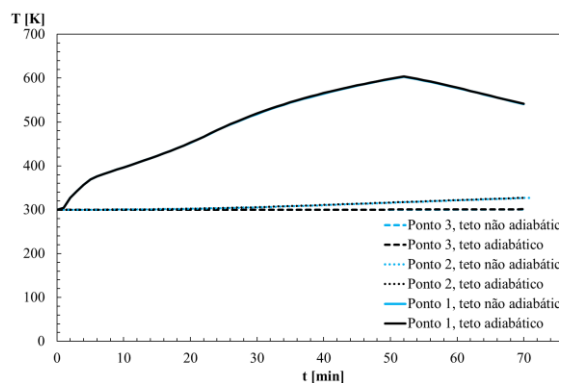


Figura 99. Variação da temperatura no tempo dos 3 pontos para compartimento 1

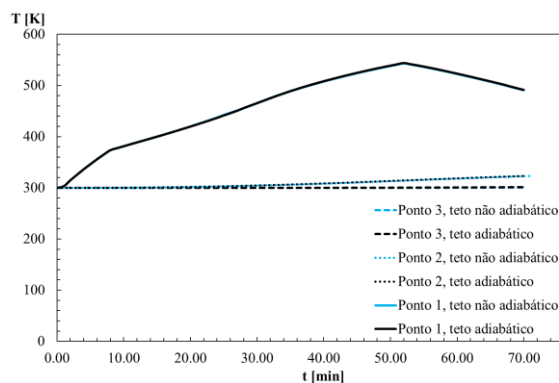


Figura 100. Variação da temperatura no tempo dos 3 pontos para compartimento 2

Como pode-se notar, a temperatura na superfície não exposta permanece próximo a 300 K em ambos os casos (teto adiabático e não adiabático) e compartimentos por todo o período do teste.

4– Resultados de temperatura e velocidade máxima obtidos no ANSYS Fluent

Nas tabelas abaixo estão os resultados de temperatura e velocidade máxima obtidos no programa ANSYS Fluent, para todas as classes de carros.

Tabela 54. Máxima temperatura e velocidade obtidos no ANSYS Fluent, compartimento 1

r/H	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4 e 5	
	T _{máx} [°C]	V _{máx} [m/s]	T _{máx} [°C]	V _{máx} [m/s]	T _{máx} [°C]	V _{máx} [m/s]	T _{máx} [°C]	V _{máx} [m/s]
0	920.135	0.949	922.701	1.138	924.748	1.102	928.802	1.123
0.37	920.241	6.372	922.706	7.372	924.647	6.972	928.723	7.338
0.74	920.131	11.544	922.476	12.504	924.408	12.957	928.510	13.234
1.11	919.423	14.260	921.958	14.471	924.086	15.089	928.078	14.541
1.48	918.202	13.394	921.059	16.506	923.217	14.960	927.190	15.458
1.85	917.252	12.204	919.737	13.114	920.841	13.588	925.364	15.126

Tabela 55. Máxima temperatura e velocidade obtidos no ANSYS Fluent, compartimento 2

r/H	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4 e 5	
	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]	Tmáx [°C]	Vmáx [m/s]
0	916.730	1.862	917.410	2.024	918.557	2.094	919.881	2.024
0.21	916.760	7.839	917.460	8.307	918.621	8.536	919.923	9.046
0.42	916.224	14.051	917.384	14.778	918.459	13.952	919.838	14.602
0.64	915.470	15.883	916.782	15.361	917.833	15.213	919.381	16.255
0.85	915.470	15.421	915.751	17.749	917.089	16.787	918.653	17.701
1.06	914.654	15.089	908.377	17.300	912.632	17.470	918.019	16.837

5– Comparação dos resultados de velocidade máxima

As tabelas abaixo mostram a diferença entre os resultados de velocidade máxima dos modelos correlativos e as obtidas através do programa ANSYS Fluent, que são utilizados como referência.

5.1– Compartimento 1

Tabela 56. Comparação de velocidade máxima para classe 1

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	0.9	12.1	1176%	12.0	1162%	12.0	1162%			12.4	1209%		
0.37	6.4	8.4	31%	5.6	-12%	7.8	22%	9.7	52%	10.2	60%	21.7	240%
0.74	11.5	4.9	-57%	3.2	-73%	3.7	-68%	4.5	-61%	5.3	-54%	11.6	1%
1.11	14.3	3.7	-74%	2.3	-84%	2.4	-83%	2.9	-80%	3.5	-76%	8.7	-39%
1.48	13.4	3.0	-77%	1.8	-87%	1.8	-87%	2.1	-84%	2.6	-81%	7.3	-45%
1.85	12.2	2.6	-79%	1.5	-88%	1.4	-89%	1.6	-86%	2.0	-84%	6.5	-46%

Tabela 57. Comparação de velocidade máxima para classe 2

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	1.1	12.8	1025%	12.9	1034%	12.9	1034%			13.9	1122%		
0.37	7.4	8.8	19%	6.1	-18%	7.8	6%	10.4	41%	11.0	49%	23.4	217%
0.74	12.5	5.3	-58%	3.4	-73%	3.7	-70%	4.9	-61%	5.7	-54%	12.5	0%
1.11	14.5	4.0	-72%	2.4	-83%	2.4	-83%	3.1	-78%	3.8	-74%	9.4	-35%
1.48	16.5	3.3	-80%	1.9	-88%	1.8	-89%	2.3	-86%	2.8	-83%	7.9	-52%
1.85	13.1	2.8	-79%	1.6	-88%	1.4	-89%	1.8	-86%	2.1	-84%	7.0	-46%

Tabela 58. Comparação de velocidade máxima para classe 3

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	1.1	13.6	1134%	14.0	1167%	14.0	1167%			15.8	1337%		
0.37	7.0	9.3	33%	6.6	-6%	7.7	11%	11.3	62%	11.9	70%	25.3	263%
0.74	13.0	5.7	-56%	3.7	-72%	3.7	-72%	5.3	-59%	6.2	-52%	13.6	5%
1.11	15.1	4.3	-71%	2.6	-83%	2.4	-84%	3.4	-78%	4.1	-73%	10.2	-33%
1.48	15.0	3.6	-76%	2.1	-86%	1.7	-88%	2.5	-84%	3.0	-80%	8.6	-43%
1.85	13.6	3.0	-78%	1.7	-87%	1.4	-90%	1.9	-86%	2.3	-83%	7.6	-44%

Tabela 59. Comparação de velocidade máxima para classes 4 e 5

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	1.1	14.4	1178%	15.1	1243%	15.1	1243%			18.3	1527%		
0.37	7.3	10.0	36%	7.1	-3%	7.5	2%	12.2	66%	12.8	75%	27.3	272%
0.74	13.2	6.2	-53%	4.0	-70%	3.5	-73%	5.7	-57%	6.7	-50%	14.7	11%
1.11	14.5	4.7	-68%	2.8	-80%	2.3	-84%	3.6	-75%	4.4	-70%	11.0	-24%
1.48	15.5	3.8	-75%	2.2	-86%	1.7	-89%	2.7	-83%	3.2	-79%	9.2	-40%
1.85	15.1	3.3	-78%	1.9	-88%	1.3	-91%	2.1	-86%	2.5	-83%	8.2	-46%

5.2– Compartimento 2

Tabela 60. Comparação de velocidade máxima para classe 1

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	1.9	11.9	541%	10.0	435%	10.0	435%			10.0	437%		
0.21	7.8	7.5	-5%	7.4	-5%	9.8	25%	15.0	91%	13.6	74%		
0.42	14.1	6.2	-56%	4.2	-70%	5.8	-59%	7.0	-50%	7.6	-46%	15.9	13%
0.64	15.9	4.5	-72%	3.0	-81%	3.8	-76%	4.4	-72%	5.1	-68%	10.9	-31%
0.85	15.4	3.7	-76%	2.3	-85%	2.8	-82%	3.2	-79%	3.8	-75%	8.7	-43%
1.06	15.1	3.2	-79%	1.9	-87%	2.2	-86%	2.5	-83%	3.0	-80%	7.5	-50%

Tabela 61. Comparação de velocidade máxima para classe 2

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	2.0	12.6	522%	10.7	430%	10.7	430%			11.0	443%		
0.21	8.3	7.9	-5%	8.0	-4%	10.5	27%	16.2	95%	14.7	77%		
0.42	14.8	6.7	-55%	4.5	-70%	6.0	-59%	7.5	-49%	8.1	-45%	17.1	16%
0.64	15.4	4.9	-68%	3.2	-79%	3.9	-75%	4.7	-69%	5.5	-64%	11.7	-24%
0.85	17.7	4.0	-78%	2.5	-86%	2.9	-84%	3.5	-80%	4.1	-77%	9.4	-47%
1.06	17.3	3.4	-80%	2.1	-88%	2.3	-87%	2.7	-84%	3.3	-81%	8.1	-53%

Tabela 62. Comparação de velocidade máxima para classe 3

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	2.1	13.3	537%	11.6	454%	11.6	454%			12.2	482%		
0.21	8.5	7.9	-8%	8.6	1%	11.4	33%	17.5	105%	15.9	86%		
0.42	14.0	7.2	-49%	4.9	-65%	6.2	-55%	8.2	-42%	8.8	-37%	18.5	33%
0.64	15.2	5.3	-65%	3.5	-77%	4.0	-74%	5.1	-66%	5.9	-61%	12.7	-17%
0.85	16.8	4.3	-74%	2.7	-84%	3.0	-82%	3.8	-78%	4.5	-73%	10.2	-39%
1.06	17.5	3.7	-79%	2.3	-87%	2.3	-87%	2.9	-83%	3.6	-80%	8.7	-50%

Tabela 63. Comparação de velocidade máxima para classes 4 e 5

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	2.0	14.1	598%	12.5	520%	12.5	520%			13.5	569%		
0.21	9.0	7.7	-15%	9.3	3%	12.3	36%	18.9	109%	17.2	90%		
0.42	14.6	7.6	-48%	5.2	-64%	6.4	-56%	8.8	-40%	9.5	-35%	20.0	37%
0.64	16.3	5.7	-65%	3.7	-77%	4.1	-75%	5.6	-66%	6.4	-61%	13.7	-16%
0.85	17.7	4.7	-74%	2.9	-83%	3.0	-83%	4.1	-77%	4.8	-73%	11.0	-38%
1.06	16.8	4.0	-76%	2.4	-85%	2.4	-86%	3.2	-81%	3.8	-77%	9.4	-44%

6– Comparação dos resultados de temperatura máxima

As tabelas abaixo mostram a diferença entre os resultados de temperatura máxima dos modelos correlativos e as obtidas através do programa, levando em consideração os resultados do ANSYS Fluent como referência.

6.1– Compartimento 1

Tabela 64. Comparação de temperatura máxima para classe 1

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	920.1	925.0	1%	994.1	8%	994.1	8%	1639.7	78%	1491.8	62%		
0.37	920.2	794.7	-14%	621.3	-32%	738.8	-20%	861.4	-6%	796.1	-13%	1082.6	18%
0.74	920.1	620.9	-33%	398.8	-57%	476.6	-48%	457.1	-50%	524.6	-43%	604.9	-34%
1.11	919.4	521.8	-43%	309.1	-66%	370.2	-60%	323.4	-65%	384.6	-58%	456.4	-50%
1.48	918.2	458.5	-50%	258.6	-72%	310.1	-66%	255.5	-72%	300.8	-67%	384.2	-58%
1.85	917.3	415.2	-55%	225.6	-75%	270.7	-70%	213.6	-77%	245.8	-73%	341.5	-63%

Tabela 65. Comparação de temperatura máxima para classe 2

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	922.7	926.7	0%	1150.4	25%	1150.4	25%	1899.5	106%	1727.9	87%		
0.37	922.7	802.0	-13%	717.7	-22%	938.2	2%	996.4	8%	920.6	0%	1253.0	36%
0.74	922.5	635.0	-31%	459.6	-50%	603.3	-35%	527.2	-43%	605.5	-34%	698.7	-24%
1.11	922.0	540.0	-41%	355.4	-61%	467.3	-49%	372.1	-60%	443.1	-52%	526.4	-43%
1.48	921.1	479.0	-48%	296.9	-68%	390.6	-58%	293.3	-68%	345.8	-62%	442.6	-52%
1.85	919.7	438.0	-52%	258.6	-72%	340.2	-63%	244.6	-73%	282.0	-69%	393.1	-57%

Tabela 66. Comparação de temperatura máxima para classe 3

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	924.7	929.3	0%	1343.3	45%	1343.3	45%	2220.3	140%	2019.4	118%		
0.37	924.6	811.0	-12%	836.8	-9%	1237.3	34%	1163.1	26%	1074.3	16%	1463.4	58%
0.74	924.4	653.0	-29%	534.6	-42%	793.3	-14%	613.8	-34%	705.4	-24%	814.5	-12%
1.11	924.1	563.0	-39%	412.7	-55%	613.1	-34%	432.2	-53%	515.3	-44%	612.9	-34%
1.48	923.2	505.0	-45%	344.2	-63%	511.3	-45%	340.0	-63%	401.5	-57%	514.8	-44%
1.85	920.8	466.0	-49%	299.4	-67%	444.5	-52%	282.9	-69%	326.7	-65%	456.8	-50%

Tabela 67. Comparação de temperatura máxima para classes 4 e 5

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	928.8	933.0	0%	1566.3	69%	1566.3	69%	2591.1	179%	2356.4	154%		
0.37	928.7	822.1	-11%	974.5	5%	1680.9	81%	1355.7	46%	1252.0	35%	1706.7	84%
0.74	928.5	674.2	-27%	621.3	-33%	1075.2	16%	713.9	-23%	821.0	-12%	948.4	2%
1.11	928.1	589.8	-36%	478.9	-48%	829.2	-11%	501.6	-46%	598.7	-35%	712.8	-23%
1.48	927.2	536.0	-42%	398.8	-57%	690.4	-26%	393.9	-58%	465.8	-50%	598.1	-35%
1.85	925.4	499.1	-46%	346.4	-63%	599.3	-35%	327.2	-65%	378.4	-59%	530.4	-43%

6.2– Compartimento 2

Tabela 68. Comparação de temperatura máxima para classe 1

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	916.7	825.8	-10%	406.7	-56%	406.7	-56%	663.0	-28%	604.3	-34%		
0.21	916.8	476.5	-48%	365.4	-60%	409.6	-55%	463.4	-49%	411.8	-55%		
0.42	916.2	625.6	-32%	237.6	-74%	267.5	-71%	325.7	-64%	308.1	-66%	394.9	-57%
0.64	915.5	540.5	-41%	186.1	-80%	209.8	-77%	227.1	-75%	242.1	-74%	280.6	-69%
0.85	915.5	480.0	-48%	157.1	-83%	177.2	-81%	172.3	-81%	200.3	-78%	229.1	-75%
1.06	914.7	435.0	-52%	138.1	-85%	155.9	-83%	145.4	-84%	170.6	-81%	198.7	-78%

Tabela 69. Comparação de temperatura máxima para classe 2

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	917.4	922.6	1%	468.7	-49%	468.7	-49%	766.1	-16%	698.0	-24%		
0.21	917.5	531.4	-42%	420.8	-54%	495.9	-46%	534.5	-42%	474.6	-48%		
0.42	917.4	754.4	-18%	272.5	-70%	322.3	-65%	374.8	-59%	354.4	-61%	455.1	-50%
0.64	916.8	649.4	-29%	212.7	-77%	251.9	-73%	260.4	-72%	277.7	-70%	322.3	-65%
0.85	915.8	574.7	-37%	179.1	-80%	212.1	-77%	196.8	-79%	229.2	-75%	262.6	-71%
1.06	908.4	519.1	-43%	157.1	-83%	186.0	-80%	165.6	-82%	194.7	-79%	227.4	-75%

Tabela 70. Comparação de temperatura máxima para classe 3

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	918.6	923.5	1%	545.3	-41%	545.3	-41%	893.5	-3%	813.7	-11%		
0.21	918.6	498.3	-46%	489.2	-47%	613.4	-33%	622.3	-32%	552.2	-40%		
0.42	918.5	761.5	-17%	315.6	-66%	397.0	-57%	435.3	-53%	411.4	-55%	529.3	-42%
0.64	917.8	660.3	-28%	245.6	-73%	309.1	-66%	301.4	-67%	321.7	-65%	374.0	-59%
0.85	917.1	588.3	-36%	206.2	-78%	259.5	-72%	226.9	-75%	265.0	-71%	304.0	-67%
1.06	912.6	534.8	-41%	180.5	-80%	227.0	-75%	190.4	-79%	224.5	-75%	262.8	-71%

Tabela 71. Comparação de temperatura máxima para classes 4 e 5

r/H	ANSYS	CFAST	Diferença	Alpert 1972	Diferença	Alpert 2011	Diferença	Cooper	Diferença	H&D	Diferença	M&M	Diferença
0	919.9	924.7	1%	633.9	-31%	633.9	-31%	1040.7	13%	947.5	3%		
0.21	919.9	453.5	-51%	568.3	-38%	766.2	-17%	723.8	-21%	641.9	-30%		
0.42	919.8	769.7	-16%	365.4	-60%	494.0	-46%	505.3	-45%	477.4	-48%	615.2	-33%
0.64	919.4	672.9	-27%	283.6	-69%	383.5	-58%	348.8	-62%	372.6	-59%	433.6	-53%
0.85	918.7	604.0	-34%	237.6	-74%	321.1	-65%	261.8	-72%	306.2	-67%	351.9	-62%
1.06	918.0	552.8	-40%	207.5	-77%	280.2	-69%	219.1	-76%	259.0	-72%	303.7	-67%