

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

CARLOS LINDEMBERG EMERICK NUNES

**ANÁLISE NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS BIAPOIADAS DE AÇO E
CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

VITÓRIA
2022

CARLOS LINDEMBERG EMERICK NUNES

**ANÁLISE NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS BIAPOIADAS DE AÇO E
CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Estruturas.

Orientador: Professor Dr. Macksuel Soares de Azevedo.

VITÓRIA

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

N972a NUNES, CARLOS, 1992-
Análise numérica de vigas mistas biapoiadas de aço e concreto em situação de incêndio / CARLOS NUNES. - 2022. 212 f. : il.

Orientador: MACKSUEL AZEVEDO.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. VIGA MISTA. 2. INCÊNDIO. 3. ANÁLISE NUMÉRICA. 4. ANÁLISE TÉRMICA. 5. ANÁLISE TERMOESTRUTURAL. I. AZEVEDO, MACKSUEL. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

CARLOS LINDEMBERG EMERICK NUNES

**ANÁLISE NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS SIMPLEMENTE
APOIADAS DE AÇO E CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Estruturas.

Aprovado em 11 de Agosto de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA

Professor Dr. Macksuel Soares de Azevedo
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Professor Dr. Walnório Graça Ferreira
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador interno

Professor Dr. Jorge Munaiar Neto
Universidade de São Paulo
Examinador externo

RESUMO

O conhecimento sobre o comportamento de estruturas em situação de incêndio é indispensável em edificações onde a preservação da segurança estrutural e o tempo de desocupação são fatores de grande relevância. Sistemas mistos de aço e concreto apresentam diversas vantagens em relação à solução que utiliza apenas estruturas de aço, entre elas destaca-se o melhor comportamento estrutural em situação de exposição a elevadas temperaturas. A avaliação da capacidade resistente de estruturas em situação de incêndio por meio de ensaios em escala natural tem custo elevado, alta complexidade e requer uma estrutura de teste específica. A alternativa para essas limitações é o desenvolvimento de modelos numéricos computacionais capazes de simular a estrutura real a fim de avaliar seu comportamento. Esta pesquisa tem como objetivo elaborar modelos numéricos tridimensionais de vigas mistas de aço e concreto, simplesmente apoiadas, em situação de incêndio, para realizar análises térmicas e termoestruturais via método dos elementos finitos. As modelagens são realizadas no programa computacional ANSYS (versão 21.1), sendo utilizada a linguagem de programação APDL (*ANSYS Parametric Design Language*). Os modelos numéricos são validados por meio dos resultados encontrados em experimentos realizadas por outros autores e são analisadas as influências de diversos parâmetros no comportamento de vigas mistas em situação de incêndio, como a geometria, vão livre, nível de carregamento e materiais utilizados. Por fim, os resultados térmicos e termoestruturais obtidos por meio dos modelos numéricos são comparados com os valores calculados pelos métodos analíticos propostos pelas normas nacionais e internacionais.

Palavras-chave: Viga mista. Incêndio. Análise numérica. Análise térmica. Análise termoestrutural.

ABSTRACT

The knowledge about the behavior of structures in a fire situation is essential in buildings where the preservation of structural safety and the time of vacancy are factors of great relevance. Composite systems of steel and concrete beam present several advantages in relation to the solution that uses only steel structures, among them the best structural behavior under fire conditions. The evaluation of the resistant capacity of structures in fire situation by tests in full scale is expensive, high complexity and requires a specific test structure. The alternative to these limitations is the development of computational numerical models capable of simulating the real structure in order to evaluate its behavior. This research focuses on development of three-dimensional numerical models of composite steel and concrete beams, simply supported, in a fire situation, to perform thermal and thermostructural analyzes using finite element method. Several models of composite beams are analyzed, changing the following parameters: steel beam, span length, load level, slab thickness, concrete and steel strength and reinforcement bars ratio. The numerical models, validated by experimental results of other authors, were developed using finite element method on software ANSYS and the language APDL. Finally, the thermal and thermostructural results obtained through the numerical models are compared with the values calculated by the analytical methods proposed by national and international standards.

Palavras-chave: Composite beam; Fire; Numerical analysis; Thermal analysis; Thermo structural analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Viga mista de aço e concreto.	22
Figura 2 – Tipos de conectores de cisalhamento, (a) Pino com cabeça e (b) perfil U.	23
Figura 3 – Largura efetiva de uma laje de concreto de uma viga mista.	25
Figura 4 – Fases do incêndio.	26
Figura 5 – Curva do incêndio padrão conforme a ISO 834:1999.	28
Figura 6 – Tempo Requerido de Resistência ao Fogo segundo a ABNT NBR 14432:2001.	28
Figura 7 – Variação da resistência ao escoamento do aço A572-Gr 50 em função da temperatura segundo a EN 1993-1-2:2005.	31
Figura 8 – Variação do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura segundo a EN 1993-1-2:2005.	31
Figura 9 – Variação do calor específico do aço segundo a EN 1993-1-2:2005.	32
Figura 10 – Variação da condutividade térmica do aço segundo a EN 1993-1-2 (2005).	33
Figura 11 – Variação do alongamento específico do aço segundo a EN 1994-1-2:2005.	34
Figura 12 – Redução da resistência à compressão do concreto em elevadas temperaturas segundo a EN 1992-1-2:2004.	36
Figura 13 – Variação do calor específico do concreto segundo a EN 1992-1-2:2004.	37
Figura 14 – Variação da condutividade térmica do concreto segundo a EN 1992-1-2:2004.	38
Figura 15 – Variação da densidade do concreto segundo a EN 1992-1-2:2004.	39
Figura 16 – Variação do alongamento específico do concreto segundo a EN 1992-1-2:2004.	40
Figura 17 – Divisão dos componentes da seção transversal da viga mista.	41
Figura 18 – Caixa hipotética para consideração do efeito de sombreamento	43
Figura 19 – Profundidade da LNP.	48
Figura 20 – LNP na laje de concreto.	49
Figura 21 – LNP na mesa superior do perfil.	50
Figura 22 – LNP na mesa superior do perfil.	51
Figura 23 – Prédio ensaiado no laboratório de Cardington.	53

Figura 24 – Forno utilizado nos experimentos.....	54
Figura 25 – Configuração do experimento de Pak <i>et al.</i> (2018).	54
Figura 26 – Experimento realizado em viga mista em alta temperatura; (a) forno utilizado no experimento; (b) concretagem da laje; (c) instrumentação do elemento estrutural; (d) viga mista dentro do forno.....	55
Figura 27 – Configuração do ensaio realizado por Brunkhorst <i>et al.</i> (2019).....	56
Figura 28 – Configuração dos ensaios realizado por Aziz (2015). (a) Seção longitudinal e (b) Seção transversal.	57
Figura 29 – Deslocamento em milímetros do piso misto calculado após 90 minutos de incêndio por meio do modelo numérico elaborado no software ABAQUS.....	59
Figura 30 – Resultados da análise térmica ao longo do tempo de viga mista em situação de incêndio elaborado no software ANSYS.	60
Figura 31 – Modelo numérico tridimensional da viga mista no software ANSYS.	60
Figura 32 – Modelo numérico e resultado da análise térmica de uma viga mista em situação de incêndio realizado no software ANSYS.....	61
Figura 33 – Modelo numérico elaboradp por Cavalcanti (2010). a) Seção transversal típica. b) Vista superior do modelo numérico elaborado no software DIANA.	61
Figura 34 – Modelo numérico elaborado no software ANSYS.	62
Figura 35 – Modelo numérico elaborado no software ABAQUS.....	63
Figura 36 – Modelo numérico elaborado no software ANSYS.	63
Figura 37 – Modelo numérico elaborado no software ANSYS. (a) Vista isométrica. (b) Resultado estrutural obtido.....	64
Figura 38 – Seção do modelo numérico elaborado no software ABAQUS.	65
Figura 39 – Modelo numérico elaborado no software ABAQUS.....	65
Figura 40 – Resultado da análise termoestrutural obtido através do modelo numérico realizado no software ABAQUS.	66
Figura 41 – Modelo numérico realizado no software ABAQUS para análise termoestrutural.	66
Figura 42 – Modelo numérico realizado no software ABAQUS para análise térmica de viga mista.	67
Figura 43 – Resultado da deformada do modelo numérico de viga mista realizado no software ANSYS.....	67
Figura 44 – Deformada do modelo termoestrutural de laje mista realizado no software ANSYS.....	68

Figura 45 – Esquema da análise térmica da viga mista em situação de incêndio.....	72
Figura 46 – Malha de elementos finitos para o modelo estr com elementos sólidos.	73
Figura 47 - Elemento <i>solid70</i>	74
Figura 48 - Elemento <i>surf152</i>	74
Figura 49 – Superfície de convecção e radiação aplicada às áreas da seção estrutural expostas ao incêndio.....	75
Figura 50 – Modelo tridimensional desenvolvido no ANSYS para análise termoestrutural.	76
Figura 51 – Vista frontal do modelo tridimensional desenvolvido para análise termoestrutural.	76
Figura 52 - Utilização do Elemento Solid185 na laje de concreto. (a) Vista frontal da discretização da malha e (b) detalhe do elemento <i>solid185</i>	77
Figura 53 - Discretização da malha do (a) perfil metálico e (b) o elemento utilizado <i>shell181</i>	78
Figura 54 - Modelagem do par de conectores de cisalhamento. (a) discretização da malha e (b) Elemento <i>beam189</i>	78
Figura 55 - Discretização do conector de cisalhamento com elemento <i>beam189</i>	79
Figura 56 – Acoplamentos realizados no modelo numérico entre conectores, perfil metálico, laje de concreto e armadura positiva.	80
Figura 57 - Modelagem da armadura positiva. (a) disposição da armadura e (b) Elemento <i>link180</i>	81
Figura 58 – Elementos <i>conta174</i> e <i>targe170</i> para simular (a) a interface entre laje de concreto e mesa superior do perfil metálico e (b) superfícies associadas aos elementos de contato.	82
Figura 59 – Par de elementos de contato <i>conta174</i> e <i>targe170</i>	83
Figura 60 – Condições de contorno do modelo numérico da viga mista.	83
Figura 61 – Diagrama de tensão versus deformação em função da temperatura (°C) para o concreto com f_{ck} 30 MPa.....	85
Figura 62 – Diagrama de tensão <i>versus</i> deformação em função da temperatura (°C) para o aço do perfil e conector com $f_y=345$ MPa.	86
Figura 63 – Diagrama de tensão <i>versus</i> deformação em função da temperatura (°C) para o aço da armadura positiva com $f_y=500$ MPa.	86
Figura 64 – Esq uema de exportação dos resultados do modelo térmico para o modelo estrutural.	88

Figura 65 – Carga distribuída ao longo do comprimento da viga. (a) Vista isométrica e (b) Vista frontal.	89
Figura 66 – Fluxograma para determinação do índice de utilização de cada modelo.	92
Figura 67 – Fluxograma para determinação da sobrecarga característica a ser utilizada.	93
Figura 68 – Fluxograma do cálculo analítico dos modelos adotados.	97
Figura 69 – Fluxograma da abordagem metodológica adotada para estudo do comportamento de viga mista em situação de incêndio.	97
Figura 70 – Arranjo geral dos ensaios realizados em vigas mistas em elevadas temperaturas.	98
Figura 71 – Seção transversal do Ensaio 15 de Wainman e Kirby (1988).	99
Figura 72 – Emissividade calculada ao longo do tempo para o Ensaio 15.	101
Figura 73 – Modelo numérico do Ensaio 15 realizado no ANSYS.	101
Figura 74 – Resultados térmicos do Ensaio 15 obtidos através do modelo numérico.	102
Figura 75 – Resultado térmico (°C) obtido no modelo numérico do Ensaio 15 aos 40 minutos.	102
Figura 76 – Comparação dos resultados térmicos da mesa inferior da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 15.	103
Figura 77 – Comparação dos resultados térmicos da alma da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 15.	103
Figura 78 – Comparação dos resultados térmicos da mesa superior da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 15.	104
Figura 79 – Deslocamento vertical (cm) calculada do Ensaio 15 aos 40 minutos. ...	104
Figura 80 – Comparação dos deslocamentos verticais do centro da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 15.	105
Figura 81 – Seção transversal do Ensaio 16 de Wainman e Kirby (1988).	105
Figura 82 – Emissividade calculada ao longo do tempo para o Ensaio 16.	107

Figura 83 – Resultados térmicos do Ensaio 16 obtidos através do modelo numérico.	107
Figura 84 – Resultado térmico (°C) obtido pelo modelo numérico do Ensaio 16 aos 20 minutos.....	108
Figura 85 – Comparação dos resultados térmicos da mesa inferior da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 16.	108
Figura 86 – Comparação dos resultados térmicos da alma da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 16.	109
Figura 87 – Comparação dos resultados térmicos da mesa superior da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 16.	109
Figura 88 – Deslocamento vertical (cm) calculada do Ensaio 16 aos 20 minutos...	110
Figura 89 – Comparação dos deslocamentos verticais do centro da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 16.	110
Figura 90 – Seção longitudinal da Viga G1 ensaiada por Aziz (2015).	111
Figura 91 – Seção transversal da Viga G1 ensaiada por Aziz (2015).	111
Figura 92 – Resultados térmicos do experimento de Aziz (2015) da Viga G1.	112
Figura 93 – Resultado do deslocamento vertical do centro da viga G1 medido por Aziz (2015) durante o experimento.	112
Figura 94 – Emissividade calculada ao longo do tempo para o Ensaio 16.....	113
Figura 95 – Modelo numérico da Viga G1 realizado no ANSYS.	113
Figura 96 – Comparação das temperaturas calculadas pelo modelo numérico para a viga G1 com os resultados obtidos experimentalmente por Aziz (2015).	114
Figura 97 – Resultado térmico (°C) obtido pelo modelo numérico da Viga G1 aos 40 minutos.....	114
Figura 98 – Deslocamento vertical (cm) calculada para Viga G1 aos 25 minutos...	115
Figura 99 – Comparação dos deslocamentos verticais do centro da viga obtidos experimentalmente por Aziz (2015) e pelo modelo numérico da Viga G1.....	115
Figura 100 – Resultado da análise térmica da Modelo 2.	117
Figura 101 – Desenvolvimento da temperatura na seção da viga mista do Modelo 2.	118

Figura 102 – Deslocamento vertical, em cm, do Modelo 1 para o tempo de 16 minutos.....	120
Figura 103 – Deslocamento vertical do Modelo 1 com falha estrutural em 16 minutos.	120
Figura 104 – Comparativo entre resultados térmicos na alma das vigas dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 1 a 7 para o tempo de 30 e 60 minutos.....	123
Figura 105 – Comparativo entre resultados térmicos na mesa inferior das vigas numéricos e analíticos. Modelos 1 a 7 para o tempo de 30 e 60 minutos.....	124
Figura 106 – Comparativo entre resultados térmicos na mesa superior das vigas dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 1 a 7 para o tempo de 30 e 60 minutos.	125
Figura 107 – Comparativo entre resultados térmicos na face inferior da laje dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 16 a 19 para o tempo de 30 e 60 minutos.	127
Figura 108 – Comparativo entre resultados térmicos no meio da espessura da laje dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 16 a 19 para o tempo de 30 e 60 minutos.....	128
Figura 109 – Comparativo entre resultados térmicos no topo das lajes dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 16 a 19 para o tempo de 30 e 60 minutos.....	129
Figura 110 – Comparativo do comportamento térmico da mesa inferior das vigas dos modelos 1 a 7. Espessura da mesa (tf) e largura da mesa (bf).....	130
Figura 111 – Comparativo do comportamento térmico da mesa superior das vigas dos modelos 1 a 7. Espessura da mesa (tf) e largura da mesa (bf).....	131
Figura 112 – Comparativo do comportamento térmico da alma das vigas dos modelos 1 a 7. Espessura da alma: tw	131
Figura 113 –Comportamento térmico do meio da altura da laje de concreto dos modelos 16 a 19 em relação a espessura da laje de concreto (tc).	132
Figura 114 – Comparativo do comportamento térmico do topo da laje de concreto dos modelos 16 a 19 em relação a espessura da laje de concreto (tc).....	133
Figura 115 – Deslocamentos das vigas dos modelos 1 a 4. Parâmetro variado: índice de esbeltez da alma.	136
Figura 116 – Deslocamentos das vigas dos modelos 2, 5, 6 e 7. Parâmetro variado: altura e peso da viga.	138
Figura 117 – Deslocamentos das vigas dos modelos 8 a 11. Parâmetro variado: vão livre.....	139

Figura 118 – Deslocamentos das vigas dos modelos 12 a 15. Parâmetro variado: índice de aproveitamento da seção estrutural.....	140
Figura 119 – Deslocamentos das vigas dos modelos 16 a 19. Parâmetro variado: espessura da laje de concreto.....	141
Figura 120 – Deslocamentos das vigas dos modelos 20 a 23. Parâmetro variado: f_{ck} do concreto.....	142
Figura 121 – Deslocamentos das vigas dos modelos 24 a 27. Parâmetro variado: f_y do aço.....	143
Figura 122 – Deslocamentos das vigas dos modelos 28 a 31. Parâmetro variado: taxa da armadura positiva da laje.....	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de redução das propriedades do aço segundo a EN 1993-1-2:2005.	30
Tabela 2 – Fatores de redução da resistência à compressão do concreto segundo a EN 1992-1-2:2004.	35
Tabela 3 – Distribuição de temperatura na altura das lajes de concreto de densidade normal.	45
Tabela 4 – Coeficientes X_1 a X_5	70
Tabela 5 – Perfis adotados com peso semelhantes e h/t_w diferentes.....	90
Tabela 6 – Perfis adotados com diferentes pesos lineares e h/t_w similares.	90
Tabela 7 – Modelos de vigas mistas a serem analisados com diferentes parâmetros.	94
Tabela 8 – Resultados térmicos medidos na viga mista por Wainman e Kirby (1988) no Ensaio 15.	99
Tabela 9 – Deslocamento vertical medidos no centro da viga mista por Wainman e Kirby (1988) no Ensaio 15.	100
Tabela 10 – Resultados térmicos medidos na viga mista por Wainman e Kirby (1988) no Ensaio 16.	106
Tabela 11 – Deslocamento vertical medidos no centro da viga mista por Wainman e Kirby (1988) no Ensaio 16.	106
Tabela 12 – Parâmetros de entrada dos modelos.....	119
Tabela 13 – Resumo do resultado final da análise paramétrica termoestrutural.	121
Tabela 14 - Comparativo entre resultados térmicos na alma das vigas dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 1 a 7 para o tempo de 30 e 60 minutos.....	123
Tabela 15 - Comparativo entre resultados térmicos na mesa superior das vigas numéricos e analíticos. Modelos 1 a 7 para o tempo de 30 e 60 minutos.....	124
Tabela 16 - Comparativo entre resultados térmicos na mesa superior das vigas dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 1 a 7 para o tempo de 30 e 60 minutos.	125
Tabela 17 - Comparativo entre resultados térmicos na face inferior da laje dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 16 a 19 para o tempo de 30 e 60 minutos.	127

Tabela 18 - Comparativo entre resultados térmicos no meio da espessura da laje dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 16 a 19 para o tempo de 30 e 60 minutos.	128
Tabela 19 - Comparativo entre resultados térmicos no topo das lajes dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 16 a 19 para o tempo de 30 e 60 minutos.....	129
Tabela 20 – Cálculo analítico da capacidade resistente da viga mista em temperatura ambiente e em situação de incêndio.	134
Tabela 21 – Tempos de falha estrutural calculados analiticamente e numericamente dos modelos.	135

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	18
1.2	OBJETIVO GERAL	20
1.3	OBJETIVO ESPECÍFICO	20
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	SISTEMAS ESTRUTURAIS MISTOS DE AÇO E CONCRETO	22
2.2	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE INCÊNDIO	25
2.3	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA....	29
2.3.1	Aço	29
2.3.2	Concreto	34
2.4	DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	40
2.4.1	Temperatura na seção transversal	40
2.4.2	Momento fletor resistente	46
3	ESTADO DA ARTE	53
3.1	PESQUISAS EXPERIMENTAIS.....	53
3.2	PESQUISAS NUMÉRICAS	58
3.3	EMISSIVIDADE EQUIVALENTE	68
4	ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	71
4.1	MODELAGEM NUMÉRICA	71
4.1.1	Modelo térmico	72
4.1.2	Modelo termoestrutural.....	76
4.2	CRITÉRIO DE FALHA.....	89
4.3	PLANEJAMENTO DAS ANÁLISES PARAMÉTRICAS	90
4.4	RESULTADOS A SEREM EXTRAÍDOS	95
4.5	CÁLCULO ANALÍTICO	95

4.6	FLUXOGRAMA GERAL	97
5	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	98
5.1	EXPERIMENTOS DE WAINMAN E KIRBY (1988)	98
5.1.1	Ensaio 15.....	99
5.1.2	Ensaio 16.....	105
5.2	EXPERIMENTO DE AZIZ (2015)	110
5.2.1	Resultados dos experimentos.....	111
5.2.2	Resultados do modelo numérico	112
5.3	CONCLUSÃO SOBRE VALIDAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS	116
6	RESULTADOS.....	117
6.1	ANÁLISE TÉRMICA.....	117
6.2	RESULTADOS DAS ANÁLISES TERMOESTRUTURAIS	118
7	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	122
7.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS TÉRMICOS	122
7.1.1	Comparação entre os modelos analítico e numérico.....	122
7.1.2	Análise paramétrica no comportamento térmico.....	129
7.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS TERMOESTRUTURAIS	133
7.2.1	Comparação entre os modelos analítico e numérico.....	133
7.2.2	Análise paramétrica do comportamento estrutural	136
8	CONCLUSÃO	145
8.1	PRINCIPAIS CONCLUSÕES.....	145
8.2	RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	147
9	REFERÊNCIAS.....	148
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DOS RESULTADOS TÉRMICOS E ESTRUTURAIS.....	153
	APÊNDICE B – CÓDIGOS EM <i>APDL</i> UTILIZADOS PARA ANÁLISES TÉRMICAS E ESTRUTURAIS	176
	B.1 ANÁLISE TÉRMICA DE VIGA MISTA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO COM UTILIZAÇÃO DE ELEMENTOS SÓLIDOS.....	176

B.2 ANÁLISE TERMOESTRUTURAL DE VIGA MISTA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO COM UTILIZAÇÃO DE ELEMENTOS SÓLIDO E DE CASCA.....	187
--	-----

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

As análises das estruturas em situação de incêndio são indispensáveis em edificações de grande porte, locais onde há reunião de público e em ambientes industriais com potencial de incêndio. Em todos esses locais a preservação da segurança estrutural e o tempo de desocupação são fatores de grande relevância. Uma estrutura deve ser capaz de respeitar o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) determinado em função das dimensões e tipo de utilização da edificação, a fim de que seja possível a completa evacuação dos usuários do edifício em caso de incêndio.

Uma desvantagem de estruturas de aço em relação às construções de concreto é o seu comportamento em situação de incêndio, uma vez que as e. os elementos de aço são mais esbeltos e melhores condutores térmicos. Sistemas mistos de aço e concreto têm sido muito utilizados como solução estrutural para vigas, pilares e lajes. Entre as vantagens desse sistema de construção, além da redução do custo final e maior capacidade de carga dos elementos, se comparado com estruturas que utilizam somente aço, pode-se citar a melhor resistência a elevadas temperaturas (KODUR *et al.*, 2013). Uma viga mista é composta por um perfil de aço ligado à laje de concreto por meio de conectores de cisalhamento. Quando esse conjunto é submetido a elevadas temperaturas, desenvolve-se um gradiente térmico na viga, uma vez que o perfil de aço estará com uma temperatura mais elevada que a laje de concreto, o que produz uma curva de temperatura, denominadas isotermas, ao longo do elemento estrutural. Nesse contexto, a laje de concreto restringe a expansão térmica da viga e o aumento da temperatura do conjunto, além de servir como proteção ao fogo da mesa superior do perfil de aço (JIANG; LI; USMANI, 2015). Muitos fatores podem afetar o comportamento de vigas mistas em situação de incêndio, como as restrições de apoio, as propriedades do material e a intensidade do incêndio (KODUR *et al.*, 2013). O comportamento desse tipo de estrutura, em altas temperaturas, tem sido estudado nos últimos anos por meio de experimentos e análises numéricas. A partir dos modelos computacionais, é possível estudar o comportamento dos elementos estruturais em situação de incêndio,

variando-se vários parâmetros, como o comprimento do elemento, a seção do perfil, a espessura da laje, a quantidade e os tipos de conectores de cisalhamento, as ligações entre vigas e pilares, as propriedades dos materiais, os carregamentos e a intensidade do incêndio. Embora as normas nacionais e internacionais tragam alguns princípios para a análise e dimensionamento de estruturas mistas submetidas a altas temperaturas, atualmente é reconhecido que as prescrições normativas conduzem, em geral, a projetos antieconômicos e inflexíveis, conforme afirma Rigobello (2008). Na mesma linha de raciocínio, Bailey *et al.* (2000) destacam que as capacidades de carga medidas nos ensaios experimentais, para os elementos estruturais, são consideravelmente diferentes quando comparadas com aquelas calculadas de acordo com as teorias convencionais. Gillie *et al.* (2001) corroboram com essa ideia, quando afirmam que os efeitos de dilatação térmica e deformações na determinação dos esforços solicitantes das vigas em situação de incêndio são de grande importância e, geralmente, são desprezados pelos métodos simplificados normatizados.

Frente ao cenário exposto, nota-se a importância em realizar estudos experimentais e numéricos a fim de aprimorar os conhecimentos sobre o comportamento dos elementos estruturais mistos sob a ação de incêndio. Avaliar a capacidade resistente de estruturas, em elevadas temperaturas, por meio de ensaios em escala real tem custo elevado, é complexo, consome muito tempo e requer uma estrutura de ensaio muito específica (AZIZ, 2015). Além disso, em função dos vários parâmetros que podem influenciar o comportamento de vigas mistas em situação de incêndio, percebe-se a dificuldade de abordar todas as situações por meio de experimentos ou por meio dos métodos normativos. A alternativa para as muitas limitações de experimentos em escala real, em estruturas sob altas temperaturas, é o desenvolvimento de modelos numéricos. Com esse propósito, neste trabalho, é detalhada a metodologia utilizada para modelagem numérica de vigas mistas em situação de incêndio, via método de elementos finitos.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é a análise numérica, via método dos elementos finitos, do comportamento de vigas mistas de aço e concreto, simplesmente apoiadas, em situação de incêndio.

1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- a) Propor modelos numéricos tridimensionais para análise térmica e termoestrutural de vigas mistas em situação de incêndio;
- b) Estudar a influência da variação de diversos parâmetros no comportamento de vigas mistas em situação de incêndio, tais como geometria, vão livre, nível de carregamento e materiais utilizados;
- c) Comparar os resultados térmicos e termoestruturais obtidos numericamente com aqueles calculados por meio dos métodos analíticos propostos pelas normas nacionais e internacionais.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em oito capítulos.

O capítulo 1 aborda a contextualização do trabalho proposto, assim como a justificativa e os objetivos pretendidos com o estudo do comportamento de vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio.

No capítulo 2 são apresentados conceitos importantes usados no estudo, como o funcionamento do sistema de viga mista de aço e concreto, a curva de incêndio a ser considerada nos modelos numéricos e analíticos, tempo requerido de resistência ao fogo a ser admitido para a estrutura, o comportamento dos materiais aço e concreto em situação de incêndio. Adicionalmente, são descritos os métodos analíticos para dimensionamento de vigas mistas em situação de incêndio segundo as normas nacionais e internacionais.

O capítulo 3 é dedicado ao estado da arte, onde são mostradas as principais pesquisas experimentais e numéricas realizadas em âmbito nacional e internacional sobre o tema proposto.

No capítulo 4 é descrita a abordagem metodológica empregada na pesquisa, relatando como foram desenvolvidos os modelos numéricos térmicos e termoestruturais, contemplando os tipos de elementos utilizados, condições de contorno, cargas, materiais utilizados, critérios de falhas adotadas e o detalhamento do plano de estudo numérico.

O capítulo 5 apresenta a validação dos modelos numéricos por meio da comparação dos resultados térmicos e termoestruturais obtidos em experimentos realizados em escala real por outros autores.

O capítulo 6 aborda os principais resultados térmicos e termoestruturais obtidos por meio das análises paramétricas, onde são indicados os tempos de colapso.

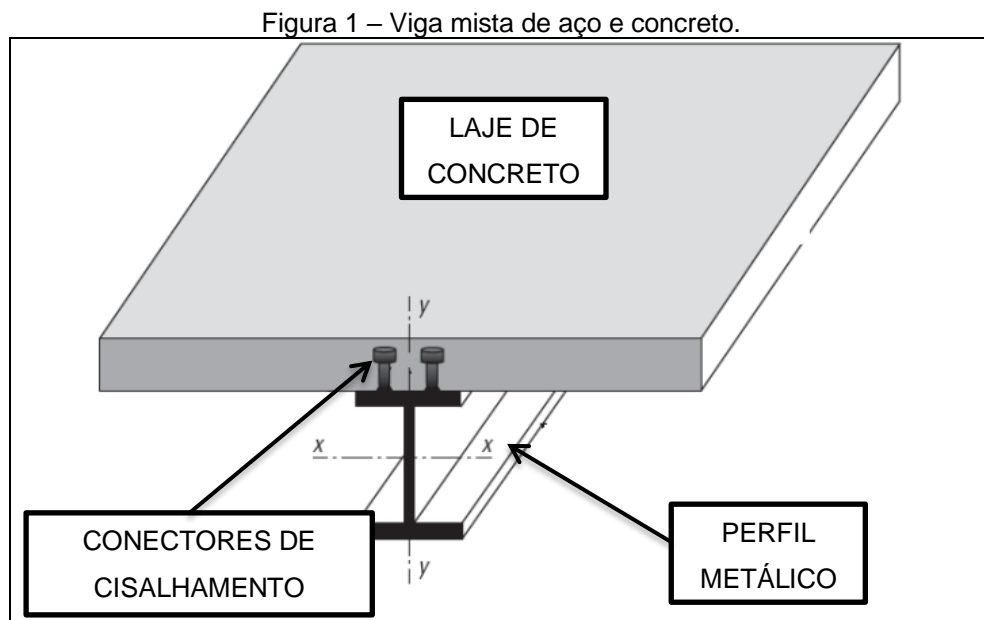
No capítulo 7 são realizadas as discussões dos resultados obtidos a partir do estudo comparativo entre as análises numéricas e analíticas, utilizando o EN 1994-1-2:2005, e das influências dos parâmetros abordados.

As conclusões, as considerações finais e demais observações do trabalho são apresentadas no capítulo 8. Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a realização do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS ESTRUTURAIS MISTOS DE AÇO E CONCRETO

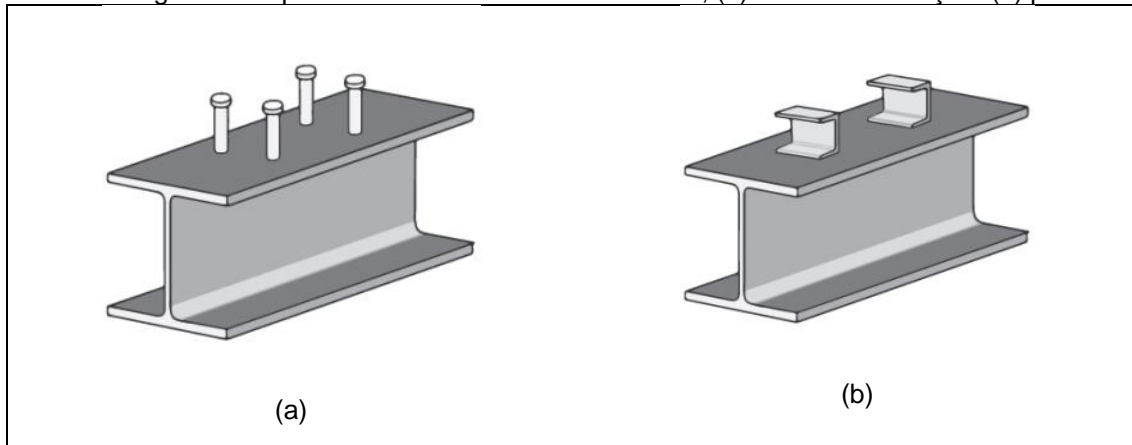
O sistema estrutural misto de aço e concreto parte do princípio de que o elemento de aço é responsável por resistir aos esforços de tração e o de concreto por resistir aos esforços de compressão. Dentre os elementos estruturais mistos de aço e concreto destacam-se as vigas, lajes e pilares. Quando um perfil de aço é ligado mecanicamente a uma laje de concreto, os dois elementos trabalham solidariamente ao momento fletor, caracterizando as vigas mistas (FAKURY, SILVA e CALDAS, 2016). Vigas mistas de aço e concreto são consideradas um dos sistemas estruturais mais eficientes para resistir às cargas gravitacionais de pisos de edifícios, devido, principalmente, à facilidade de construção e à redução de peso da viga de aço. Elas são constituídas de um perfil de aço e uma laje de concreto apoiada na mesa superior, ligados por meio de conectores de cisalhamento, conforme indicado na Figura 1. A laje de concreto pode ser maciça ou com o uso de fôrmas de aço nervuradas.



Fonte: FAKURY *et al.*, 2016. Adaptado pelo autor.

Há diversos tipos de conectores de cisalhamento, sendo os mais utilizados em vigas mistas, os de pino com cabeça (Stud Bolt) e os perfis U laminados ou formados a frio, conforme indicados na Figura 2.

Figura 2 – Tipos de conectores de cisalhamento, (a) Pino com cabeça e (b) perfil U.



Fonte: FAKURY *et al.* (2016).

Os conectores do tipo pinos de cabeça são os mais utilizados atualmente devido à sua velocidade de instalação e eficiência. De acordo com Fakury *et al.* (2016), eles consistem de um fuste projetado para funcionar como eletrodo de solda por arco elétrico e possuem uma cabeça padronizada para cada diâmetro. Usando-se conectores tipo pino com cabeça, devem-se respeitar as regras indicadas nas Equações (2.1), (2.2) e (2.3), relacionadas ao espaçamento entre eles.

$$s_{m\acute{a}x} \leq \begin{cases} 8t_c \\ 915 \text{ mm} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$s_{m\acute{i}n,long} \geq 8d_{cs} \quad (2.2)$$

$$s_{m\acute{i}n,transv} \geq 4d_{cs} \quad (2.3)$$

Onde:

$s_{m\acute{a}x}$ é o espaçamento máximo entre conectores;

$s_{m\acute{i}n,long}$ é o espaçamento longitudinal mínimo entre conectores;

$s_{m\acute{i}n,transv}$ é o espaçamento transversal mínimo entre conectores;

t_c é a altura da laje;

d_{cs} é o diâmetro do conector.

Caso os conectores de cisalhamento não sejam usados, não haverá ligação mecânica entre a laje de concreto e o perfil de aço. Ou seja, quando sujeito a um carregamento, a laje e o perfil deformam-se independentemente, ocorrendo um deslizamento relativo na superfície de contato entre ambos. Os conectores de cisalhamento impedem ou reduzem substancialmente esse deslizamento. Se o número de conectores for suficiente para impedir totalmente o deslizamento relativo entre o perfil de aço e a laje de concreto, entende-se que a viga mista possui uma interação completa. Quando isso não acontece, a interação será parcial ou, até mesmo, inexistente. O grau de interação da viga mista é calculado pela Equação (2.4), conforme a ABNT NBR 8800:2018.

$$\alpha = \frac{\eta Q_{Rd}}{F_{hd}} \quad (2.4)$$

Onde:

α é o grau de interação;

η é o número de conectores;

Q_{Rd} é a força resistente de cálculo de um conector;

F_{hd} é a força horizontal de cálculo.

Para a viga ser considerada mista, o grau de interação deve respeitar um valor mínimo normativo em função das propriedades do aço e do vão da viga, não podendo ser menor que 0,40, sendo que:

- $\alpha \geq 1$: a viga possui interação completa;
- $\alpha_{min} \leq \alpha < 1$: a viga possui interação parcial;
- $\alpha < \alpha_{min}$: considera-se a interação inexistente e a viga não deve ser dimensionada como mista.

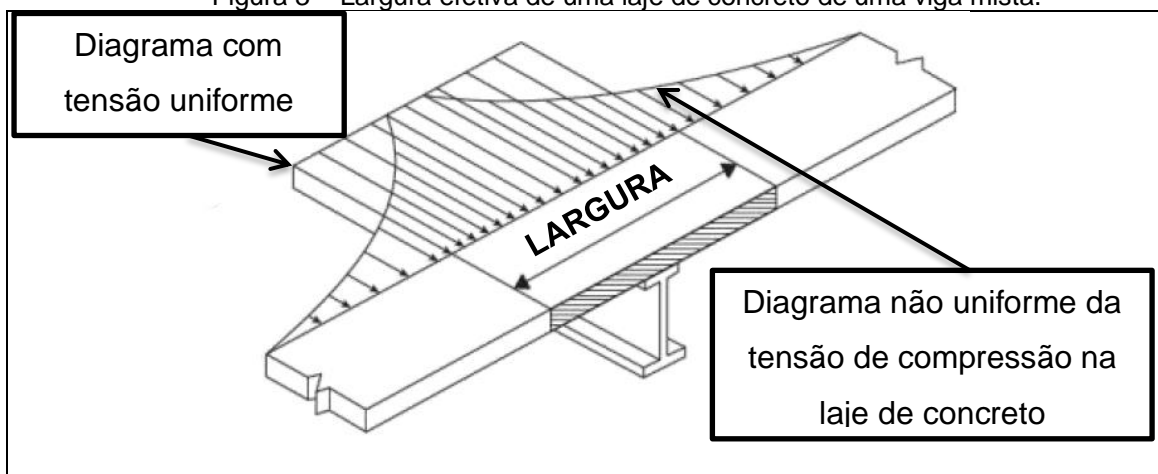
O sistema de laje com vigas mistas consiste essencialmente de uma série de vigas T paralelas com mesa larga e delgada. A associação entre vigas e laje, por meio de

conectores de cisalhamento, ocasiona uma transmissão de tensões de cisalhamento concentradas ao longo da conexão, que diminuem gradativamente para ambos os lados (FAKURY, SILVA e CALDAS, 2016). Para as considerações de cálculo, a distribuição dessas tensões é uniformizada e distribuída em uma largura da laje denominada efetiva, conforme indicado na Figura 3.

Para o cálculo da largura efetiva da laje, a ABNT NBR 8800:2008 afirma que cada lado da linha de centro da viga deve ser menor ou igual aos seguintes valores:

- a) $1/8$ do vão da viga mista;
- b) Metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- c) Para laje em balanço, distância da linha de centro da viga à borda da laje.

Figura 3 – Largura efetiva de uma laje de concreto de uma viga mista.



Fonte: Fakury *et al.* (2016). Adaptado pelo autor.

2.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE INCÊNDIO

As normas nacionais e internacionais tratam de métodos para dimensionamento de elementos estruturais em situação de incêndio, tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) e curvas padrão de incêndio a serem adotadas. A ABNT NBR 14323:2013 traz os princípios de dimensionamentos de estruturas de aço e mistas sob ação de incêndio, levando em consideração a variação das propriedades do aço devido à elevação da temperatura. Seguindo o mesmo conceito, a ABNT NBR

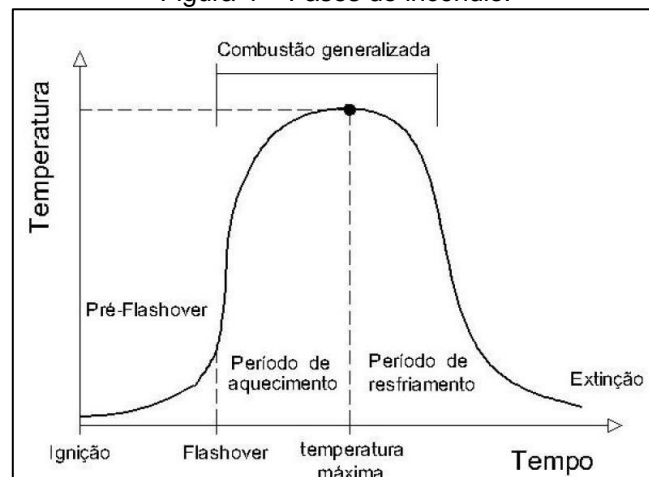
15200:2012 define os critérios de dimensionamento de estruturas de concreto em situação de incêndio.

A ABNT NBR 14432:2001 introduz os critérios para determinação do TRRF em função das geometrias e ocupações das edificações e determina uma elevação padronizada de temperatura em função do tempo, definida como incêndio-padrão. As normas EN 1992-1-2:2004, EN 1993-1-2:2005 e EN 1994-1-2:2005 tratam dos métodos de dimensionamento para seções estruturais de concreto, aço e mistas, respectivamente, em elevadas temperaturas.

O fogo decorre de uma reação termoquímica entre um material combustível e uma substância comburente na presença de calor, iniciando uma reação em cadeia (NATIONAL WILDFIRE COORDINATING GROUP, 2012). Durante um incêndio, segundo Silva (2001), as chamas que ocorrem em um compartimento são responsáveis, por meio do fluxo de calor por convecção e radiação, por provocar uma ação térmica nas faces expostas dos elementos estruturais. O aquecimento interno desses elementos ocorre por condução.

O incêndio real se desenvolve em cinco fases: fase inicial, ignição, período de pré-flashover, flashover e fase de combustão generalizada, conforme a Figura 4.

Figura 4 – Fases do incêndio.



Fonte: Buchanan (2001).

De acordo com Buchanan (2001), a ignição é o início da combustão do material, marcando a transição para o período de crescimento. O incêndio começa a se espalhar lentamente, inicialmente na superfície do combustível, e uma quantidade significativa de fumaça é produzida, indicando o período de pré-flashover. O

flashover é o ponto de transição para o período de combustão mais forte. A partir desse ponto, o incêndio se desenvolve rapidamente, passando de superficial para volumétrico e provoca a ignição espontânea dos materiais combustíveis do ambiente. Esse período é chamado de combustão generalizada, onde as temperaturas no ambiente são elevadas e as taxas de produção de calor são muito altas.

Os primeiros ensaios de resistência ao fogo de elementos estruturais realizados no século XX levaram a uma curva temperatura-tempo característica conhecida como incêndio-padrão. Admite-se que, nesse modelo de incêndio, as temperaturas dos gases do ambiente em chamas seguem as curvas padronizadas para ensaios. Embora não represente o desenvolvimento de um incêndio real, convencionou-se adotar a curva de incêndio-padrão como modelo para análise experimental de estruturas e materiais expostos ao fogo.

A curva de incêndio padrão possui apenas um ramo ascendente, admitindo-se, portanto, que a temperatura dos gases é sempre crescente ao longo do tempo e independente das características do ambiente e da quantidade do material combustível. O EN 1991-1-2:2002 e a ABNT NBR 14432:2013 recomendam a utilização da curva padrão da norma ISO 834:1999 para análise dos elementos estruturais em situação de incêndio, indicada na Equação (2.5).

$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (2.5)$$

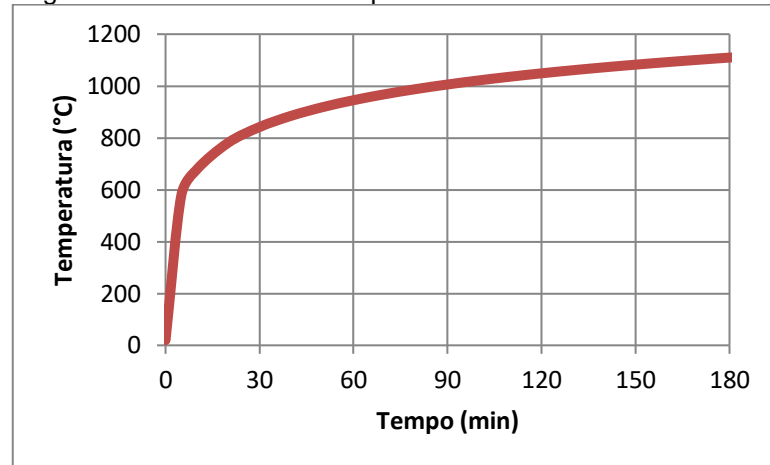
Onde:

θ_g é a temperatura dos gases com o compartimento em chamas (°C);

t é o tempo de incêndio em minutos.

O desenvolvimento da temperatura dos gases no compartimento ao longo do tempo segundo a ISO 834:1999 está exposto na Figura 5.

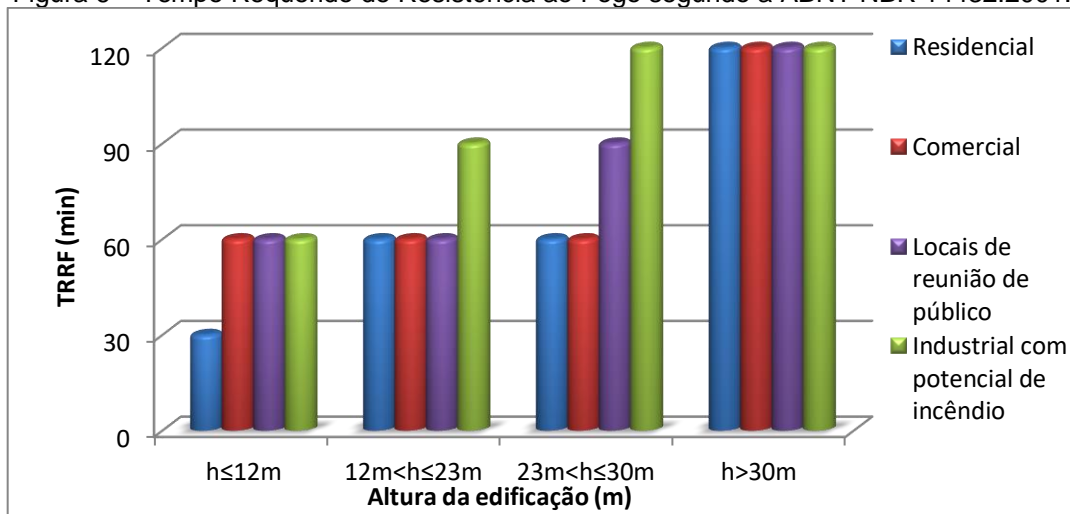
Figura 5 – Curva do incêndio padrão conforme a ISO 834:1999.



Uma vez que a temperatura dos gases no modelo de incêndio-padrão se eleva continuamente, as normas estabelecem o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) como parâmetro de verificação da estrutura de uma edificação. Ou seja, o elemento estrutural da edificação analisada deve resistir aos esforços solicitantes provenientes da curva de temperatura do incêndio-padrão pelo tempo mínimo normativo, o TRRF.

A ABNT NBR 14432:2001 determina a definição do TRRF pelo método tabular em função da ocupação da edificação e de sua altura. Quanto mais alta a estrutura e maior a ocupação, maior o TRRF da edificação. A Figura 6 mostra o TRRF de alguns tipos de edificações em função do uso e de sua altura, segundo a norma brasileira.

Figura 6 – Tempo Requerido de Resistência ao Fogo segundo a ABNT NBR 14432:2001.



2.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

As propriedades térmicas e mecânicas dos materiais expostos a incêndios podem variar devido ao acréscimo de temperatura.

2.3.1 Aço

O aço quando exposto a elevadas temperaturas, apresenta alterações nas suas propriedades mecânicas e térmicas. As normas EN 1993-1-2:2005, EN 1994-1-2:2005 e ABNT NBR 14323:2013 indicam as variações das propriedades do aço em elevadas temperaturas. A resistência ao escoamento do aço reduz com temperaturas acima de 400°C e o módulo de elasticidade a partir de 100°C.

As Equações (2.6) e (2.7) mostram o cálculo das propriedades do aço em função da temperatura do elemento.

$$f_{y,\theta} = k_{y,\theta} * f_y \quad (2.6)$$

$$E_\theta = k_{E,\theta} * E \quad (2.7)$$

Onde:

f_y é a resistência ao escoamento do aço a uma temperatura ambiente;

$f_{y,\theta}$ é a resistência ao escoamento do aço a uma temperatura θ ;

$k_{y,\theta}$ é o fator de redução da resistência ao escoamento a uma temperatura θ ;

E é o módulo de elasticidade do aço a uma temperatura ambiente;

E_θ é o módulo de elasticidade do aço a uma temperatura θ ;

$k_{E,\theta}$ é o fator de redução do módulo de elasticidade a uma temperatura θ .

Os fatores de redução das propriedades do aço definido pelo EN 1993-1-2:2005 são apresentados na Tabela 1. A ABNT NBR 14323:2013 apresenta os mesmos valores para os fatores de redução das propriedades mecânicas do aço.

Tabela 1 – Fatores de redução das propriedades do aço segundo a EN 1993-1-2:2005.

Temperatura do Aço (°C)	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$
20	1	1
100	1	1
200	1	0,9
300	1	0,8
400	1	0,7
500	0,78	0,6
600	0,47	0,31
700	0,23	0,13
800	0,11	0,09
900	0,06	0,0675
1000	0,04	0,045
1100	0,02	0,0225
1200	0	0

Para o ASTM A572-Gr 50, por exemplo, com resistência ao escoamento de 345 MPa e módulo de elasticidade de 200 GPa, observam-se na Figura 7 e Figura 8 as reduções das propriedades em função do aumento de temperatura.

Figura 7 – Variação da resistência ao escoamento do aço A572-Gr 50 em função da temperatura segundo a EN 1993-1-2:2005.

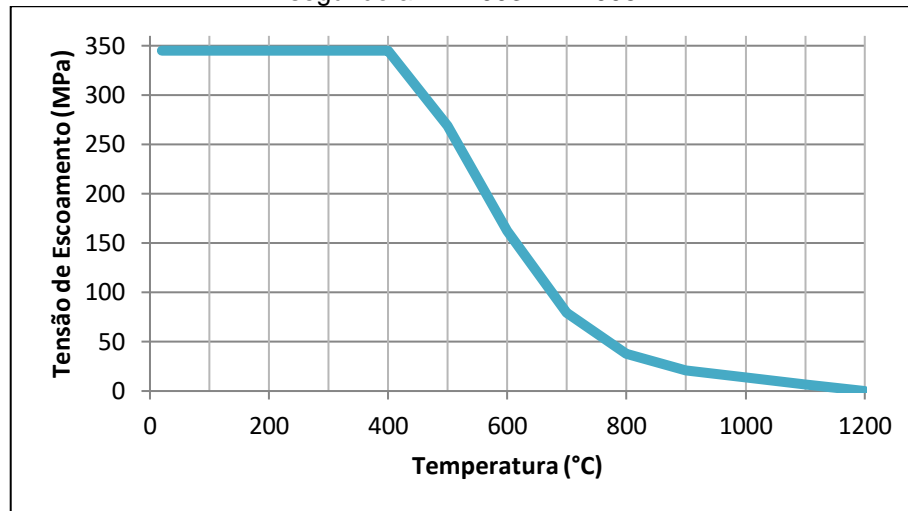
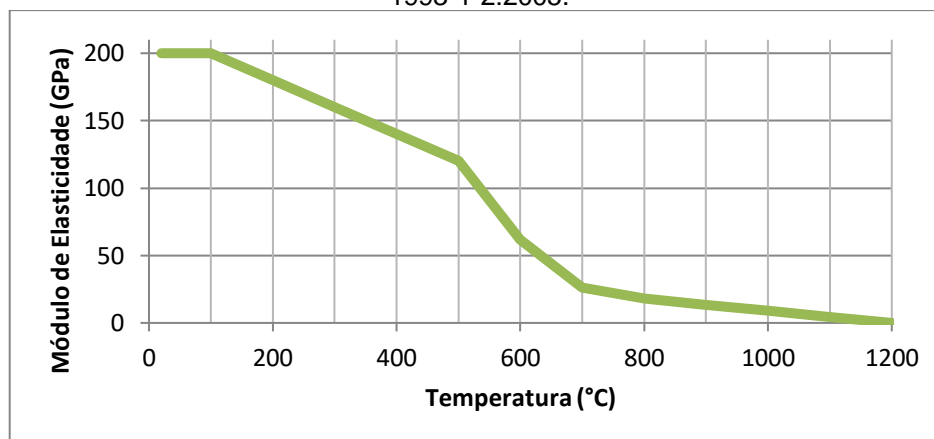


Figura 8 – Variação do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura segundo a EN 1993-1-2:2005.



As normas EN 1993-1-2:2005 e ABNT NBR 14323:2013 consideram o valor da massa específica do aço de 7850 kg/m^3 constante para qualquer temperatura. As propriedades térmicas também são importantes no dimensionamento de vigas mistas em situação de incêndio e sofrem variação com o aumento da temperatura.

O calor específico é a quantidade de calor necessária para elevar em 1°C uma unidade de massa do material. Essa propriedade aumenta mediante o acréscimo de temperatura. As Equações (2.8) a (2.11) mostram a variação do calor específico (c_a) em relação à temperatura do aço (θ_a) segundo a EN 1993-1-2:2005. O calor específico é expresso em $\text{J/kg}^\circ\text{C}$. A Figura 9 mostra a variação do calor específico do aço ao elevar a temperatura.

Para $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 600^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3 \quad (2.8)$$

Para $600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735^{\circ}\text{C}$:

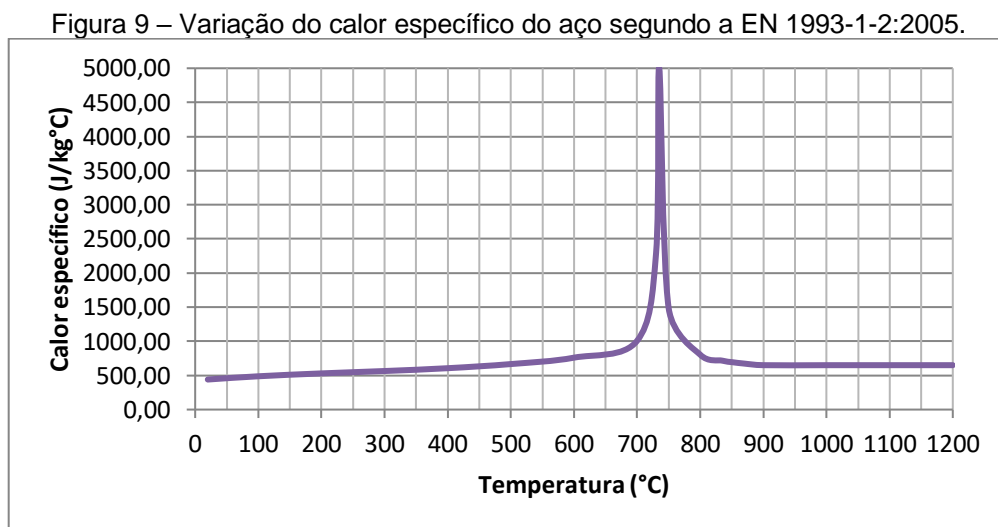
$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (2.9)$$

Para $735^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (2.10)$$

Para $900^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 650 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C} \quad (2.11)$$



A condutividade térmica está associada à capacidade do material em conduzir calor e a sua variação (λ_a) com o aumento da temperatura é expressa em $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$, de acordo com as Equações (2.12) e (2.13), conforme mostra a Figura 10.

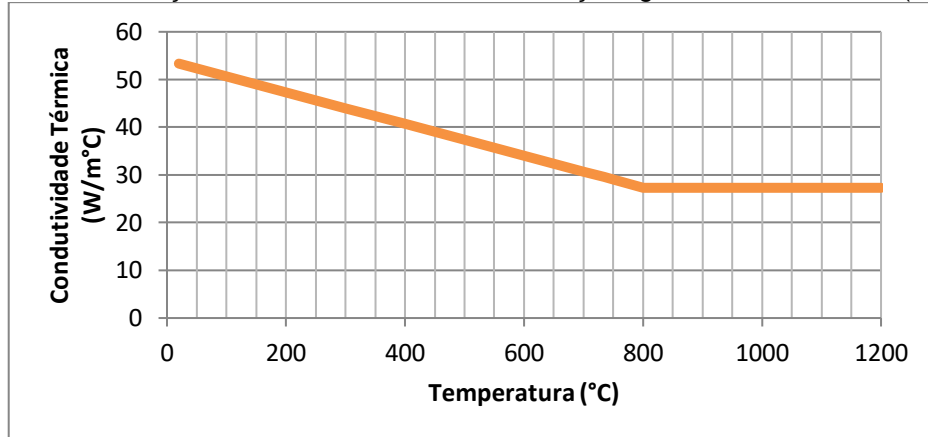
Para $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800^{\circ}\text{C}$:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta_a \quad (2.12)$$

Para $800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200^{\circ}\text{C}$:

$$\lambda_a = 27,3 \quad (2.13)$$

Figura 10 – Variação da condutividade térmica do aço segundo a EN 1993-1-2 (2005).



A variação do alongamento específico do aço (ε_a) em função da temperatura é apresentada nas Equações (2.14) a (2.16) de acordo com o EN1994-1-2:2005.

Para $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 750^{\circ}\text{C}$:

$$\varepsilon_a = -2,416 \cdot 10^{-4} + 1,2 \cdot 10^{-5} \theta_a - 0,4 \cdot 10^{-8} \theta_a^2 \quad (2.14)$$

Para $750^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 860^{\circ}\text{C}$:

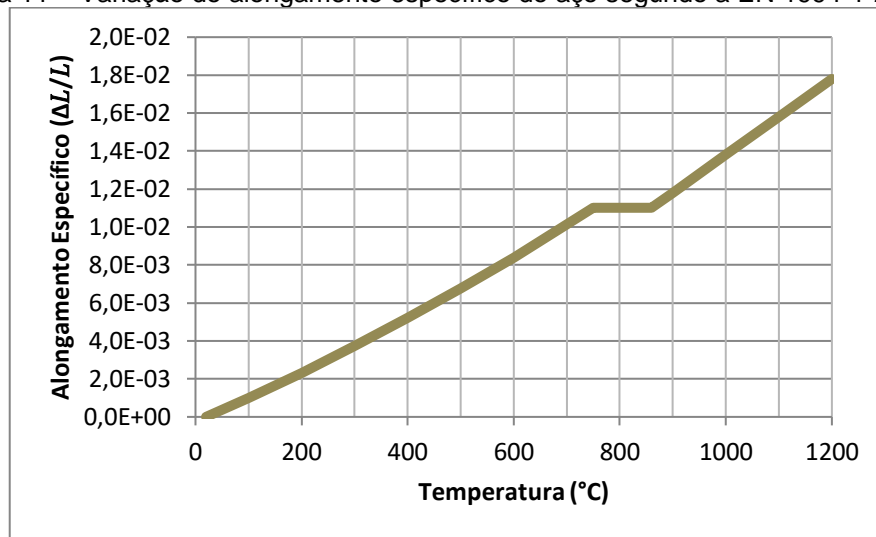
$$\varepsilon_a = -11 \cdot 10^{-3} \quad (2.15)$$

Para $860^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200^{\circ}\text{C}$:

$$\varepsilon_a = -6,2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-5} \theta_a \quad (2.16)$$

A variação do alongamento específico do aço em função de sua temperatura é apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Variação do alongamento específico do aço segundo a EN 1994-1-2:2005.



2.3.2 Concreto

As propriedades mecânicas e térmicas do concreto variam conforme a temperatura do elemento estrutural aumenta. As normas EN 1992-1-2:2004 e ABNT NBR 15200:2012 tratam das variações das propriedades do concreto em altas temperaturas e estabelecem que a resistência à compressão do concreto para elevadas temperaturas é calculada conforme a Equação (2.17).

$$f_{c,\theta} = k_{c,\theta} * f_{ck} \quad (2.17)$$

Onde:

f_{ck} é a resistência à compressão do concreto a temperatura ambiente;

$f_{c,\theta}$ é a resistência à compressão do concreto a uma temperatura θ ;

$k_{c,\theta}$ é o fator de redução da resistência à compressão do concreto a uma temperatura θ .

Os fatores de redução da resistência à compressão do concreto, indicados na Tabela 2, variam conforme a temperatura no elemento e o tipo de agregado utilizado.

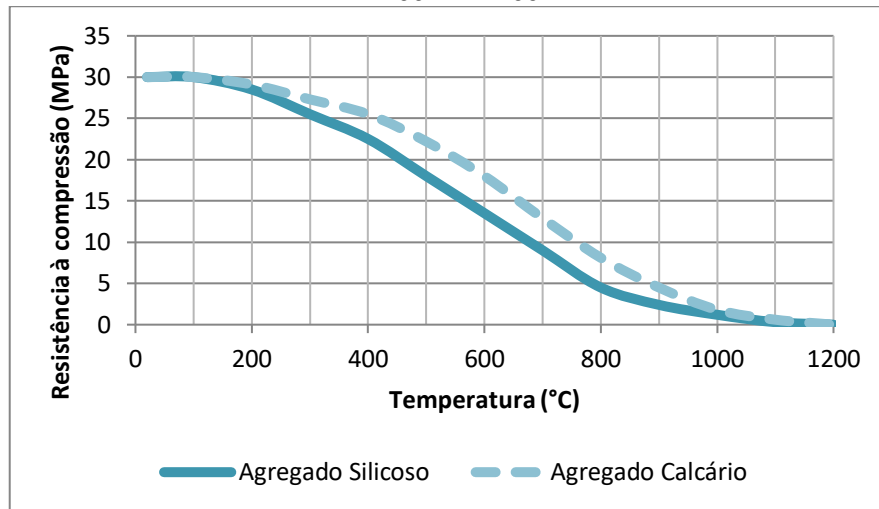
Tabela 2 – Fatores de redução da resistência à compressão do concreto segundo a EN 1992-1-2:2004.

Temperatura do Concreto (°C)	k _{c,θ}	
	Agregado Silicoso	Agregado Calcário
20	1	1
100	1	1
200	0,95	0,97
300	0,85	0,91
400	0,75	0,85
500	0,6	0,74
600	0,45	0,6
700	0,3	0,43
800	0,15	0,27
900	0,08	0,15
1000	0,04	0,06
1100	0,01	0,02
1200	0	0

A ABNT NBR 15200:2012 apresenta os mesmos valores para os fatores de redução da resistência à compressão do concreto preparado predominantemente com agregados silicosos e não estabelece esses fatores para outros tipos de agregados.

Para um concreto com resistência à compressão de 30 MPa em temperatura ambiente, por exemplo, a redução dessa propriedade em elevadas temperaturas é indicada na Figura 12.

Figura 12 – Redução da resistência à compressão do concreto em elevadas temperaturas segundo a EN 1992-1-2:2004.



As propriedades térmicas do concreto também são importantes no dimensionamento de vigas mistas em situação de incêndio e sofrem variação com o aumento da temperatura.

O calor específico do concreto (c_p) varia conforme as Equações (2.18) a (2.21) para o concreto seco ($u=0\%$), segundo a EN 1992-1-2:2014, em função da temperatura do concreto (θ_c), sendo expresso em J/kg°C.

Para $20^\circ\text{C} \leq \theta_c < 100^\circ\text{C}$:

$$c_p = 900 \quad (2.18)$$

Para $100^\circ\text{C} \leq \theta_c < 200^\circ\text{C}$:

$$c_p = 900 + (\theta_c - 100) \quad (2.19)$$

Para $200^\circ\text{C} \leq \theta_c < 400^\circ\text{C}$:

$$c_p = 1000 + \frac{\theta_c - 200}{2} \quad (2.20)$$

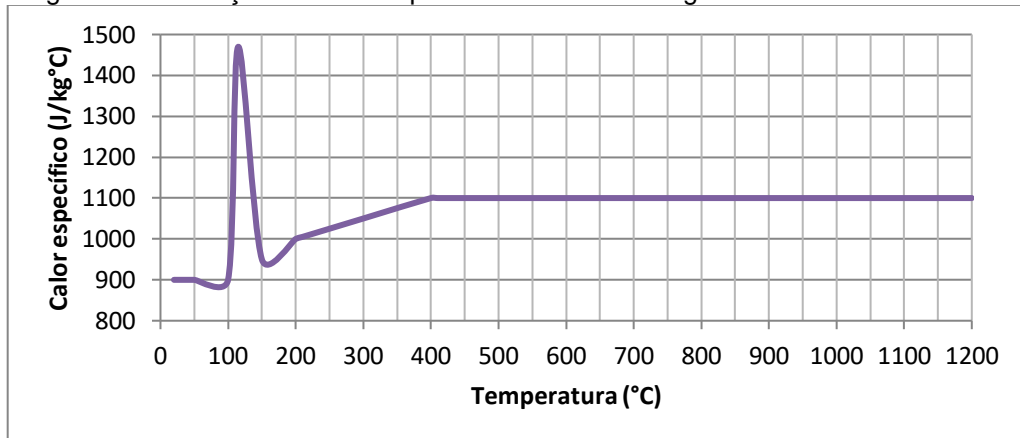
Para $400^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$:

$$c_p = 1100 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \quad (2.21)$$

Entre as temperaturas de 100°C e 115°C, o concreto com umidade de 1,5% em peso apresenta um pico de calor específico de 1470 J/kg°C e, de 2020 J/kg°C para umidade de 3% em peso, segundo a EN 1992-1-2:2014.

Considerando um concreto com umidade de 1,5% em peso, a variação do calor específico em função da temperatura do elemento acontece conforme indicado na Figura 13.

Figura 13 – Variação do calor específico do concreto segundo a EN 1992-1-2:2004.



Fonte: EN 1992-1-2 (2004).

A condutividade térmica do concreto (λ_c) varia em função da temperatura, segundo a EN 1992-1-2:2004, conforme indicado nas Equações (2.22) e (2.23). As equações estabelecem um limite superior e inferior para definição desse parâmetro. A condutividade térmica é dada em W/m°C.

Limite superior, para $20^\circ\text{C} \leq \theta_c < 1200^\circ\text{C}$:

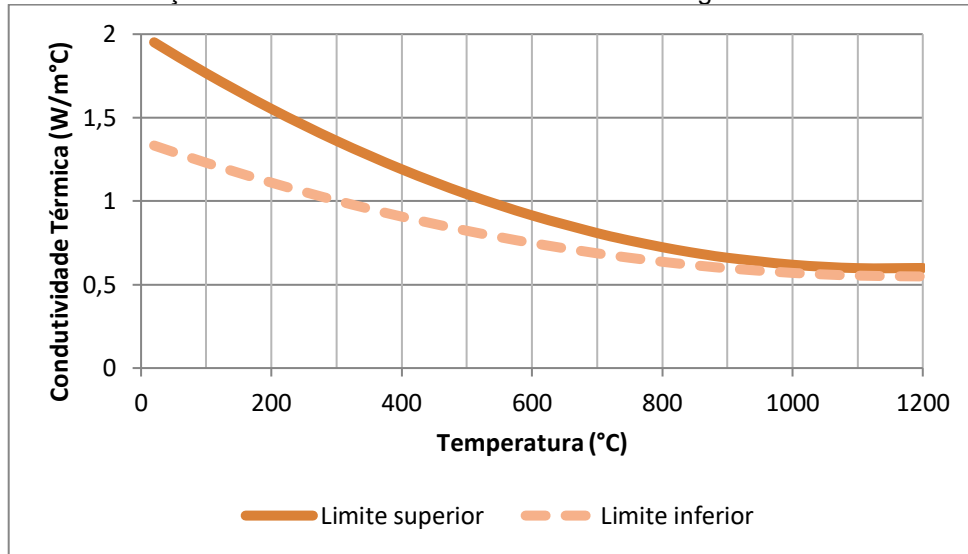
$$\lambda_c = 2 - 0.2451(\theta_c/100) + 0.0107(\theta_c/100)^2 \quad (2.22)$$

Limite inferior, para $20^\circ\text{C} \leq \theta_c < 1200^\circ\text{C}$:

$$\lambda_c = 1.36 - 0.136(\theta_c/100) + 0.0057(\theta_c/100)^2 \quad (2.23)$$

A Figura 14 mostra os limites superior e inferior da variação da condutividade térmica do concreto segundo a EN 1992-1-2:2004. A ABNT NBR 15200:2012 traz a formulação apenas do limite inferior de variação da condutividade térmica do concreto em função da temperatura.

Figura 14 – Variação da condutividade térmica do concreto segundo a EN 1992-1-2:2004.



Fonte: EN 1992-1-2 (2004).

A densidade do concreto varia em função da temperatura devido à evaporação de água. Ela pode ser calculada conforme as Equações (2.24) a (2.27), segundo a EN 1992-1-2:2004.

Para $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 115^{\circ}\text{C}$:

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \quad (2.24)$$

Para $115^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 200^{\circ}\text{C}$:

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}}(1 - 0.02(\theta_c - 115)/85) \quad (2.25)$$

Para $200^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 400^{\circ}\text{C}$:

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}}(0.98 - 0.03(\theta_c - 200)/200) \quad (2.26)$$

Para $400^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 1200^{\circ}\text{C}$:

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}}(0.95 - 0.07(\theta_c - 400)/800) \quad (2.27)$$

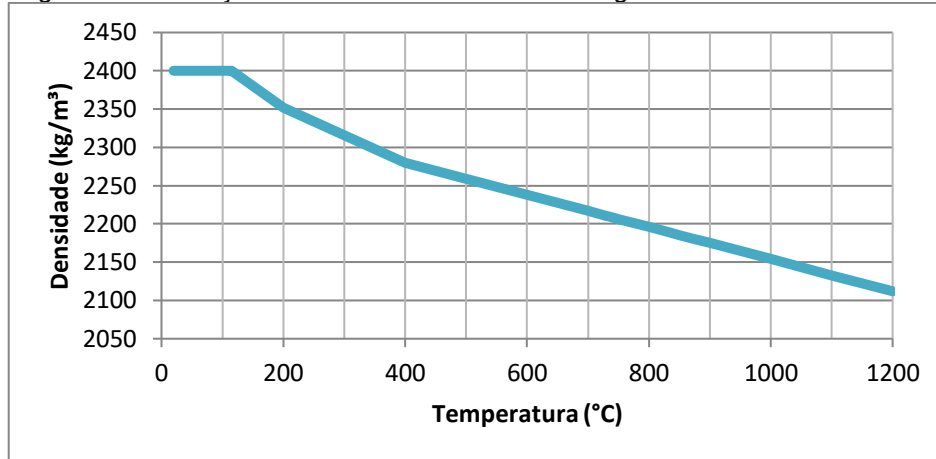
Em que:

$\rho_{20^{\circ}\text{C}}$ é a densidade do concreto na temperatura de 20°C ;

ρ_{θ} é a densidade do concreto na temperatura θ .

Para um concreto com densidade de 2400 kg/m³, a variação dessa propriedade em função da temperatura é indicada na Figura 15.

Figura 15 – Variação da densidade do concreto segundo a EN 1992-1-2:2004.



A variação do alongamento específico do concreto (ε_c) em função da temperatura, conforme a EN-1992-1-2:2004, é indicada nas Equações (2.28) e (2.29) para concreto com predominância de agregado silicoso.

Para $20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 700^\circ\text{C}$:

$$\varepsilon_c = -1,8 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-6} \theta_c + 2,3 \cdot 10^{-11} \theta_c^3 \quad (2.28)$$

Para $700^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$:

$$\varepsilon_c = 14 \cdot 10^{-3} \quad (2.29)$$

Para concreto com predominância de agregado calcário, a EN-1992-1-2:2004 apresenta a variação do alongamento específico do concreto de acordo com as Equações (2.30) e (2.31).

Para $20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 805^\circ\text{C}$:

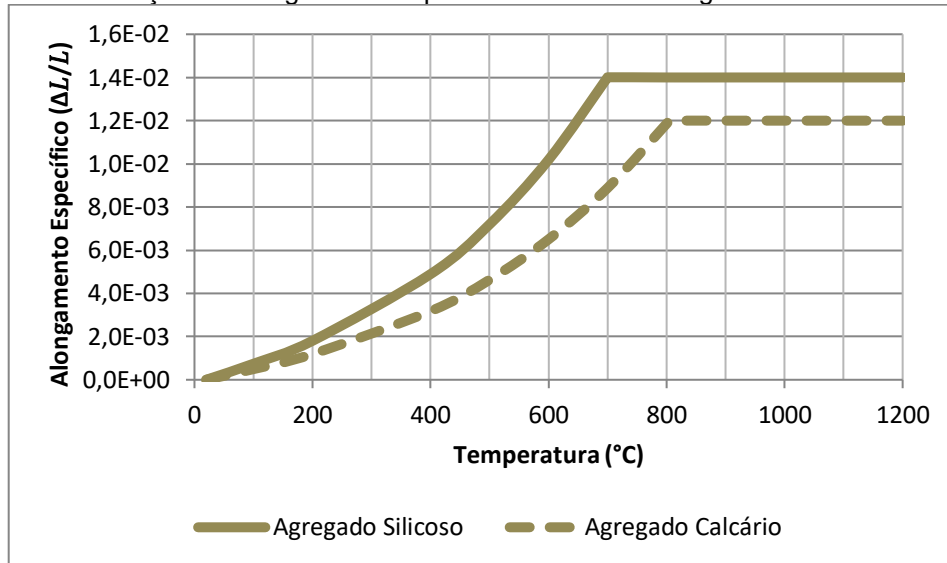
$$\varepsilon_c = -1,2 \cdot 10^{-4} + 6 \cdot 10^{-6} \theta_c + 1,4 \cdot 10^{-11} \theta_c^3 \quad (2.30)$$

Para $805^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$:

$$\varepsilon_c = 12 \cdot 10^{-3} \quad (2.31)$$

A variação do alongamento específico do concreto em função de sua temperatura é apresentada na Figura 16. A ABNT NBR 15200:2012 apresenta os mesmos valores para a variação do alongamento específico do concreto preparado predominantemente com agregados silicosos, não apresentando resultados para outros tipos de agregados.

Figura 16 – Variação do alongamento específico do concreto segundo a EN 1992-1-2:2004.



Fonte: EN 1992-1-2 (2004).

2.4 DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

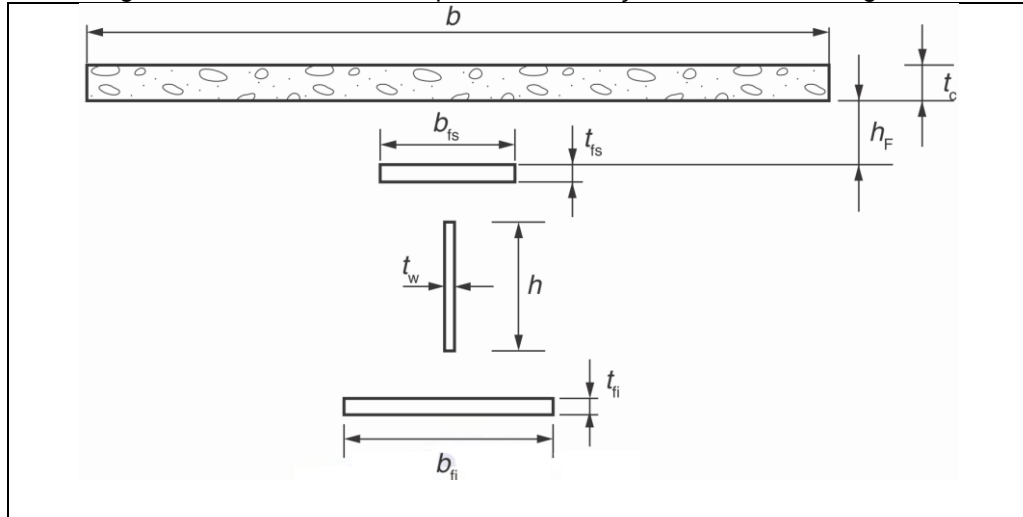
Os critérios de dimensionamentos de vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio obedecem às normas internacionais EN 1992-1-2:2004, EN 1993-1-2:2005 e EN 1994-1-2:2005, além das normas nacionais ABNT NBR 14323:2013 e NBR 8800:2008.

2.4.1 Temperatura na seção transversal

A fim de analisar a capacidade resistente da viga mista de aço e concreto em situação de incêndio, deve-se determinar a temperatura dos componentes da seção transversal. A ABNT NBR 14323:2013 e o EN 1994-1-2:2005 recomendam dividir a seção transversal em componentes: laje de concreto, mesa superior, alma e mesa

inferior do perfil. A divisão é indicada na Figura 17 e adota-se a hipótese que não ocorre transferência de calor entre os componentes.

Figura 17 – Divisão dos componentes da seção transversal da viga mista.



Fonte: ABNT NBR 14323:2013. Adaptado pelo autor.

2.4.1.1 Temperatura no Perfil de Aço

A variação de temperatura nos componentes do perfil de aço pode ser calculada pela Equação (2.32).

$$\Delta\theta_a = k_{sh} \frac{\left(\frac{u}{A_g}\right)}{c_a \rho_a} \varphi \Delta t \quad (2.32)$$

Onde:

$\Delta\theta_a$ é a variação de temperatura do aço;

k_{sh} é o fator de correção para o efeito de sombreamento;

$\frac{u}{A_g}$ é o fator de massividade, sendo u e A_g o perímetro e área expostos ao fogo;

ρ_a é a densidade do aço;

c_a é o calor específico do aço;

φ é o fluxo de calor por unidade de área;

Δt é o intervalo de tempo.

O fator de massividade dos componentes pode ser calculado por meio das Equações (2.33) a (2.35).

Para mesa inferior:

$$u/A_g = \frac{2(b_{fi} + t_{fi})}{b_{fi}t_{fi}} \quad (2.33)$$

Para mesa superior sobreposta por laje maciça:

$$u/A_g = \frac{2(b_{fs} + t_{fs})}{b_{fs}t_{fs}} \quad (2.34)$$

Para alma:

$$u/A_g = \frac{2h}{t_w} \quad (2.35)$$

Para o cálculo do fluxo de calor total, somam-se a parcelas referentes à radiação e à convecção.

O fluxo de calor devido à radiação (φ_r) é calculado conforme a Equação (2.36).

$$\varphi_r = \sigma \varepsilon \left((\theta_g(t) + 273)^4 - (\theta_a(t - \Delta t) + 273)^4 \right) \quad (2.36)$$

Onde:

σ é a constante de Stefan-Boltzmann e vale $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$;

ε é a emissividade resultante que pode possuir valor de 0 a 1. A norma recomenda um adotar um valor de 0,7;

$\theta_g(t)$ é a temperatura da curva de incêndio padrão em um tempo t ;

$\theta_a(t - \Delta t)$ é a temperatura do aço em um instante $t - \Delta t$.

O fluxo de calor devido à convecção (φ_c) é calculado conforme a Equação (2.37).

$$\varphi_c = \alpha_c \left(\theta_g(t) - \theta_a(t - \Delta t) \right) \quad (2.37)$$

Onde:

α_c é o coeficiente de condutividade térmica e vale 25 W/(m²K).

O fluxo de calor é calculado pela Equação (2.38).

$$\varphi = \varphi_r + \varphi_c \quad (2.38)$$

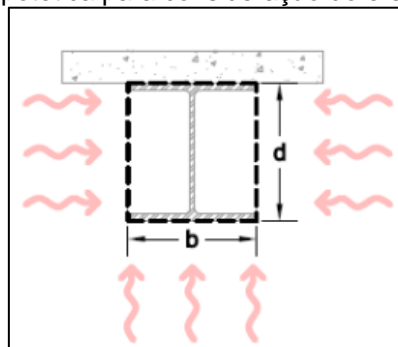
O fator de correção da temperatura para o efeito de sombreamento (k_{sh}) observado em seções I e H é calculado pela Equação (2.39).

$$k_{sh} = 0,9 \frac{\left(\frac{u}{A_g} \right)_b}{\left(\frac{u}{A_g} \right)} \quad (2.39)$$

Onde:

$\left(\frac{u}{A_g} \right)_b$ é o fator de massividade definido como relação entre o perímetro exposto ao incêndio de uma caixa hipotética envolvendo o perfil e a área total da seção transversal do perfil. Para o caso indicado na Figura 18, o perímetro seria de $2d+b$.

Figura 18 – Caixa hipotética para consideração do efeito de sombreamento



Fonte: Romagnoli (2018).

A temperatura final do componente do perfil de aço é dada pela Equação (2.40).

$$\theta(t) = \theta_a(t - \Delta t) + \Delta\theta_a \quad (2.40)$$

Nota-se que o cálculo da temperatura no elemento de aço é iterativo e será dependente do intervalo de tempo (Δt) adotado. A EN 1994-1-2:2005 não permite adotar intervalo superior a 5 segundos e valores de massividade menor que 10 m^{-1} .

Como sequência de cálculo para determinação da temperatura do componente do perfil de aço, cita-se:

- i. Admite-se a temperatura no ambiente e no aço, em $t = 0$, como 20°C ;
- ii. Adota-se o intervalo $\Delta t = 5/60$ minutos;
- iii. Calculam-se os fatores de massividade para cada componente do perfil de aço;
- iv. Determina-se a temperatura do ambiente conforme a curva de incêndio-padrão definida pela Equação (2.5);
- v. Calcula-se o fluxo de calor por radiação e convecção pela Equação (2.36) e (2.37);
- vi. Calcula-se o fluxo de calor total pela Equação (2.38);
- vii. Determina-se a variação da temperatura do aço para $\Delta t = 5$ segundos pela Equação (2.32);
- viii. Determina-se o valor da temperatura do aço pela Equação (2.40);
- ix. Repete-se o procedimento a partir do item *iv* adotando o instante $t + \Delta t$.

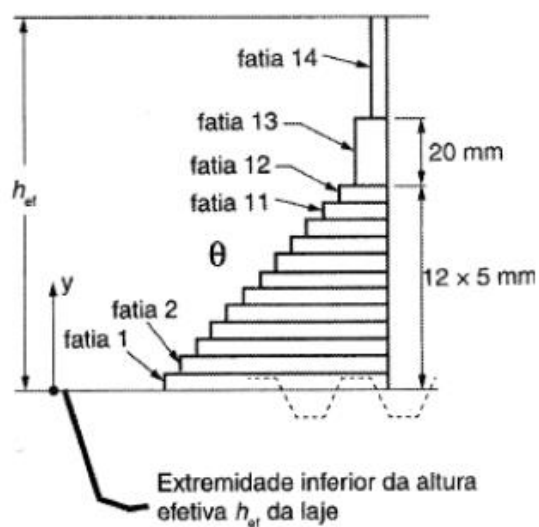
2.4.1.2 Temperatura na laje de concreto

Para o cálculo da temperatura na laje de concreto em situação de incêndio, a ABNT NBR 14323:2013 recomenda discretizar a altura da laje em 14 fatias e atribuir uma temperatura para cada faixa de acordo com o TRRF da edificação, conforme

indicado na Tabela 3. A EN 1994-1-2:2005 apresenta a mesma distribuição de temperatura ao longo da altura da laje em função do tempo de duração do incêndio.

Tabela 3 – Distribuição de temperatura na altura das lajes de concreto de densidade normal.

Fatia	Altura y (mm)	TRRF (minutos)				
		30	60	90	120	180
1	0-5	535	705	-	-	-
2	5-10	470	642	738	-	-
3	10-15	415	581	681	754	-
4	15-20	350	525	627	697	-
5	20-25	300	469	571	642	738
6	25-30	250	421	519	591	689
7	30-35	210	374	473	542	635
8	35-40	180	327	428	493	590
9	40-45	160	289	387	454	549
10	45-50	140	250	345	415	508
11	50-55	125	200	294	369	469
12	55-60	110	175	271	342	430
13	60-80	80	140	220	270	330
14	≥ 80	60	100	160	210	260



Fonte: ABNT NBR 14323:2013.

Para o caso de lajes maciças de concreto, a altura efetiva (h_{ef}) é a altura total da laje.

A temperatura ao longo da altura da laje de concreto pode ser, simplificada, suposta como uniforme e calculada conforme a Equação (2.41).

$$\theta_c = \frac{1}{h_{ef}} \sum_1^n \theta_{c,j} e_j \quad (2.41)$$

Onde:

n é o número de fatias em que a laje foi dividida;

$\theta_{c,j}$ é a temperatura da fatia j ;

e_j é a espessura da fatia j .

2.4.2 Momento fletor resistente

A determinação do momento fletor resistente de cálculo de viga mista em situação de incêndio obedece aos critérios da ABNT NBR 14323:2013, tendo como base as equações da ABNT NBR 8800:2008. No presente trabalho, é abordada a situação de viga mista com interação total e alma compacta, devendo ser respeitada a relação indicada na Equação (2.42). Adotaram-se perfis com alma compacta a fim de evitar instabilidades locais na alma.

O fator de 0,85 é adicionado ao cálculo da esbelteza da alma devido à variação das propriedades estruturais do aço em altas temperaturas, de acordo com a Equação 2.42.

$$\frac{h}{t_w} \leq 0,85 * 3,76 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}} \quad (2.42)$$

Onde:

h é a altura da alma do perfil;

t_w é a espessura da alma do perfil;

E_a é o módulo de elasticidade do aço em temperatura ambiente;

f_y é a resistência ao escoamento do aço em temperatura ambiente.

Os procedimentos de cálculo para definição do momento fletor positivo resistente da viga mista em situação de incêndio é semelhante ao feito em temperatura ambiente, porém utilizam-se coeficientes de ponderação das resistências igual a 1,00 e reduz-se a resistência do concreto e do aço pelos fatores abordados no item 2.3, em função da temperatura de cada elemento.

Para definição da força máxima de compressão admissível na laje de concreto para um determinado TRRF ($C_{c,\theta,máx}$), utiliza-se a Equação (2.43).

$$C_{c,\theta,máx} = b f_{ck} \sum e_j k_{c,\theta,j} \quad (2.43)$$

Onde:

b é a largura efetiva da laje;

e_j é a espessura da fatia j da laje;

$k_{c,\theta,j}$ é o fator de redução da resistência à compressão do concreto a uma temperatura θ da fatia j .

A força máxima de tração do perfil de aço para um determinado TRRF ($T_{a,\theta,máx}$) é determinada pela Equação (2.44).

$$T_{a,\theta,máx} = f_y (A_w k_{y,\theta,w} + A_{fs} k_{y,\theta,fs} + A_{fi} k_{y,\theta,fi}) \quad (2.44)$$

Onde:

A_w é a área da alma do perfil;

A_{fs} é a área da mesa superior;

A_{fi} é a área da mesa inferior;

$k_{y,\theta,w}$ é o fator de redução da resistência ao escoamento do aço a uma temperatura θ da alma;

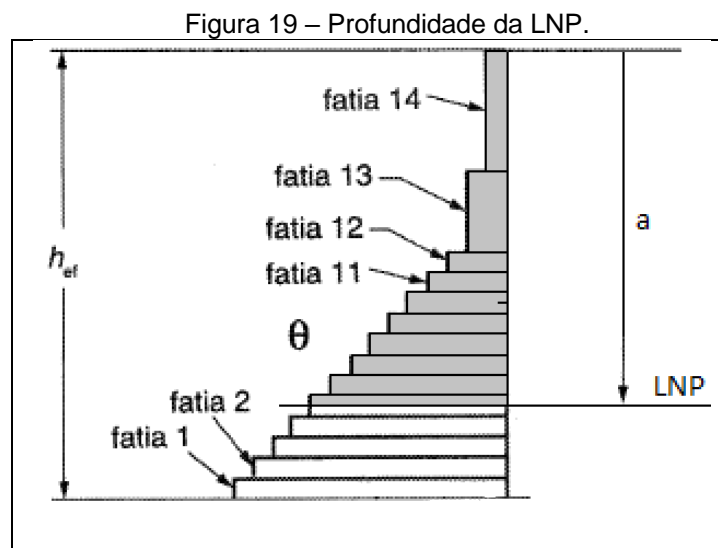
$k_{y,\theta,fs}$ é o fator de redução da resistência ao escoamento do aço a uma temperatura θ da mesa superior;

$k_{y,\theta,fi}$ é o fator de redução da resistência ao escoamento do aço a uma temperatura θ da mesa inferior.

2.4.2.1 Linha neutra plástica na laje de concreto

Se $C_{c,\theta,máx} \geq T_{a,\theta,máx}$, a linha neutra plástica (LNP) deve estar, por equilíbrio, na laje de concreto. Dessa forma, a força de tração no perfil de aço em determinada temperatura ($T_{a,\theta}$) é igual a $T_{a,\theta,máx}$.

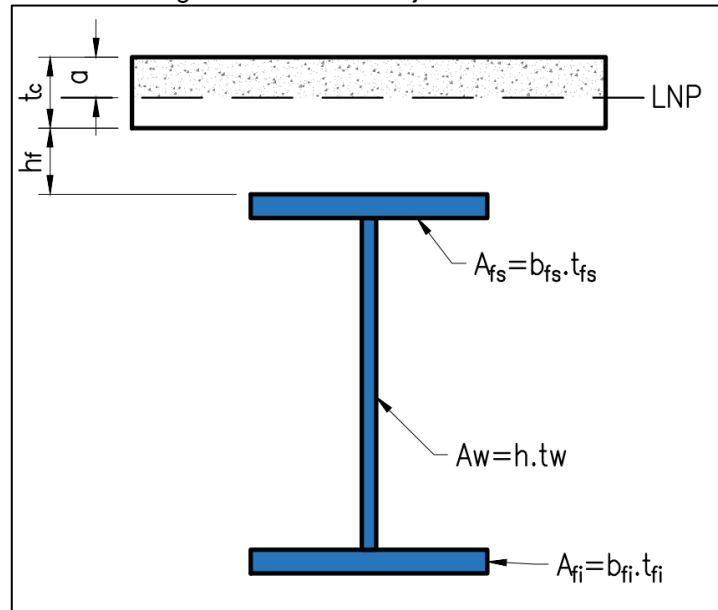
Para o cálculo da força de compressão na laje a uma determinada temperatura ($C_{c,\theta}$), deve-se tomar um número de fatias da laje, a partir do topo, de modo que $C_{c,\theta} = T_{a,\theta}$. Ao encontrar a igualdade, define-se a profundidade da LNP (a) conforme indicado na Figura 19.



Fonte: ABNT NBR 14323:2013. Adaptado pelo autor.

O momento fletor positivo resistente é calculado pela soma dos momentos de cada elemento da seção da viga mista. A Figura 20 representa a situação da LNP na laje de concreto.

Figura 20 – LNP na laje de concreto.



As Equações (2.45) a (2.48) demonstram o cálculo do momento resistente de cada elemento da seção.

$$M_{Rd,fs} = f_y A_{fs} k_{y,\theta,fs} \left(\frac{t_{fs}}{2} + h_f + t_c - a \right) \quad (2.45)$$

$$M_{Rd,fi} = f_y A_{fi} k_{y,\theta,fi} \left(\frac{t_{fi}}{2} + h + t_{fs} + h_f + t_c - a \right) \quad (2.46)$$

$$M_{Rd,w} = f_y A_w k_{y,\theta,w} \left(\frac{h}{2} + t_{fs} + h_f + t_c - a \right) \quad (2.47)$$

$$M_{Rd,c} = b f_{ck} \sum e_j k_{c,\theta,j} (a - d_j) \quad (2.48)$$

Os parâmetros de geometria estão especificados na Figura 17. O parâmetro d_j representa a distância do centro de cada fatia comprimida ao topo da laje. A Equação (2.49) calcula o momento fletor positivo resistente total da viga mista.

$$M_{Rd} = M_{Rd,fs} + M_{Rd,fi} + M_{Rd,w} + M_{Rd,c} \quad (2.49)$$

2.4.2.2 Linha neutra plástica no perfil de aço

Se $C_{c,\theta,máx} < T_{a,\theta,máx}$, a linha neutra plástica (LNP) deve estar, por equilíbrio, passando pelo perfil de aço. Dessa forma, a força de compressão do concreto

determinada temperatura ($C_{c,\theta}$) é igual a $C_{c,\theta,máx}$. A parcela de compressão do perfil de aço para determinada temperatura ($C_{a,\theta}$) é dado pela Equação (2.50).

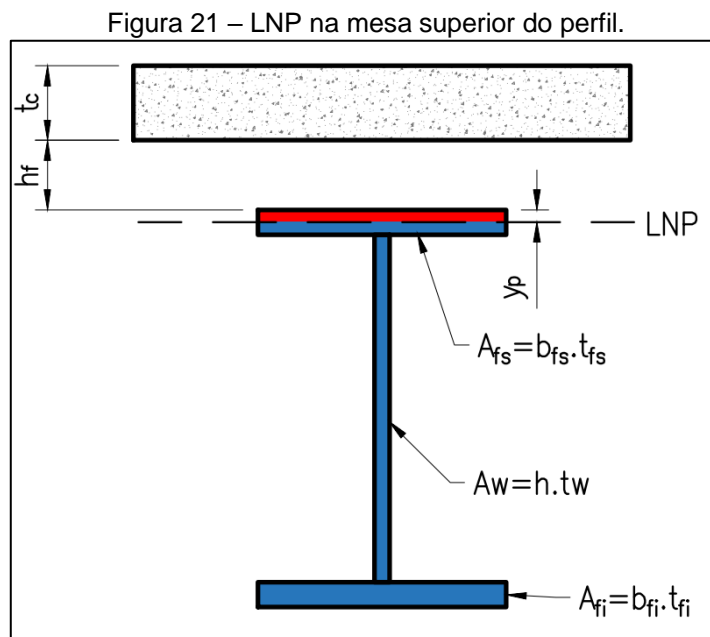
$$C_{a,\theta} = 0,5 * (T_{a,\theta,máx} - C_{c,\theta}) \quad (2.50)$$

Se a Equação (2.51) for verdadeira, a LNP passa pela mesa superior do perfil. Nesse caso, sua distância até a face superior do perfil (y_p) é dado pela Equação (2.52).

$$C_{a,\theta} \leq f_y A_{fs} k_{y,\theta,fs} \quad (2.51)$$

$$y_p = \frac{C_{a,\theta}}{f_y A_{fs} k_{y,\theta,fs}} t_{fs} \quad (2.52)$$

A Figura 21 representa a situação da LNP na mesa superior do perfil.



Nessas condições, o cálculo dos momentos resistentes de cada elemento da seção é calculado pela Equação (2.53) a (2.56).

$$M_{Rd,fs} = \frac{f_y A_{fs} k_{y,\theta,fs}}{2 t_{fs}} (y_p^2 + (t_{fs} - y_p)^2) \quad (2.53)$$

$$M_{Rd,fi} = f_y A_{fi} k_{y,\theta,fi} \left(\frac{t_{fi}}{2} + h + t_{fs} - y_p \right) \quad (2.54)$$

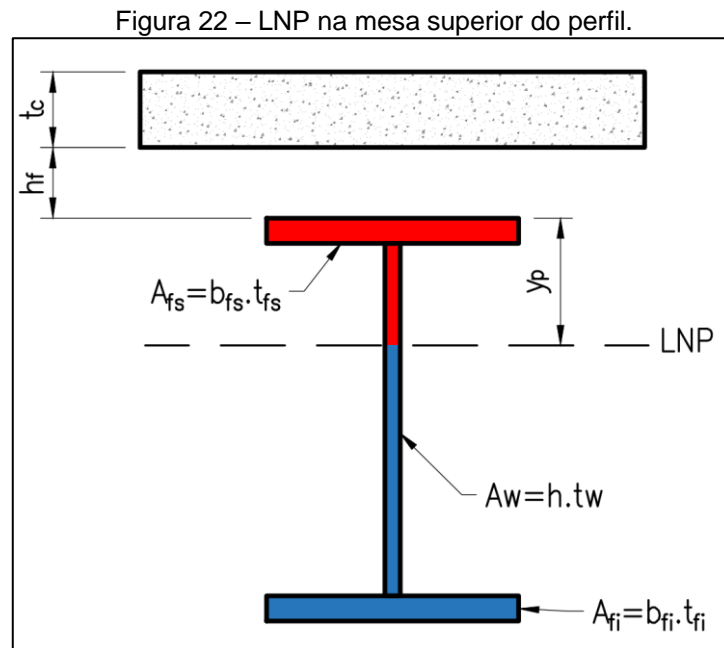
$$M_{Rd,w} = f_y A_w k_{y,\theta,w} \left(\frac{h}{2} + t_{fs} - y_p \right) \quad (2.55)$$

$$M_{Rd,c} = b f_{ck} \sum e_j k_{c,\theta,j} (t_c + h_f + y_p - d_j) \quad (2.56)$$

Se a Equação (2.51) não for verdadeira, a LNP passa pela alma do perfil. Nesse caso, sua distância até a face superior do perfil (y_p) é dado pela Equação (2.57).

$$y_p = t_{fs} + h_w \left(\frac{C_{a,\theta} - f_{yd} A_{fs} k_{y,\theta,fs}}{f_{yd} A_w k_{y,\theta,w}} \right) \quad (2.57)$$

A Figura 22 representa a situação da LNP está localizada na alma do perfil de aço.



Nessas condições, o cálculo dos momentos resistentes de cada elemento da seção é calculado pela Equação (2.58) a (2.61).

$$M_{Rd,fs} = f_y A_{fs} k_{y,\theta,fs} (y_p - 0,5 t_{fs}) \quad (2.58)$$

$$M_{Rd,fi} = f_y A_{fi} k_{y,\theta,fi} \left(\frac{t_{fi}}{2} + h + t_{fs} - y_p \right) \quad (2.59)$$

$$M_{Rd,w} = \frac{f_y A_w k_{y,\theta,w}}{2h} \left((y_p - t_{fs})^2 + (h + t_{fs} - y_p)^2 \right) \quad (2.60)$$

$$M_{Rd,c} = b f_{ck} \sum e_j k_{c,\theta,j} (t_c + h_f + y_p - d_j) \quad (2.61)$$

O momento fletor resistente de cálculo total em situação de incêndio da viga mista, para qualquer posição da LNP, é calculado pela Equação (2.49).

3 ESTADO DA ARTE

Nesta sessão serão abordadas as principais pesquisas experimentais e numéricas referentes ao comportamento de vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio.

3.1 PESQUISAS EXPERIMENTAIS

Para estudar o comportamento de uma estrutura completa de um edifício misto sob ação de incêndio, uma série de ensaios em escala real foi realizada em um edifício de oito andares no laboratório de Cardington, Reino Unido, entre 1994 e 1997. Gillie *et al.* (2001) constatam, por meio desses ensaios, uma grande reserva de capacidade resistente na estrutura se comparado com as recomendações normativas. A Figura 23 mostra a estrutura do prédio que foi submetida ao ensaio.

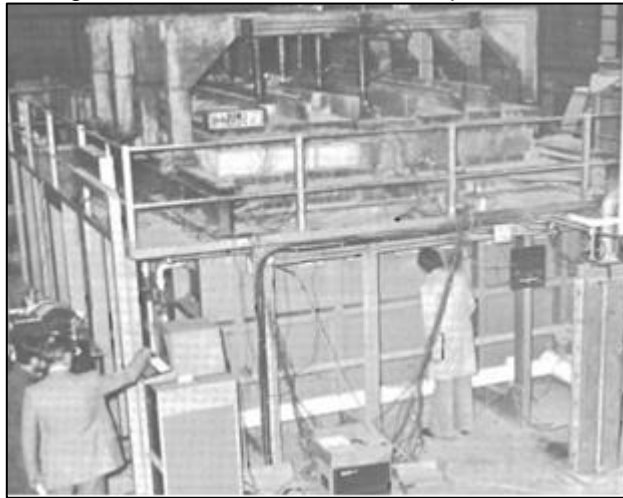
Figura 23 – Prédio ensaiado no laboratório de Cardington.



Fonte: BRE Cardington Steel Framed Building Fire Tests (1998).

Wainman e Kirby (1988) compilaram resultados de vários experimentos que obtiveram dados do comportamento de vigas de aço e mistas de aço e concreto submetidas a altas temperaturas no Reino Unido. A Figura 24 mostra o forno utilizado nos experimentos e uma das vigas após o ensaio.

Figura 24 – Forno utilizado nos experimentos.

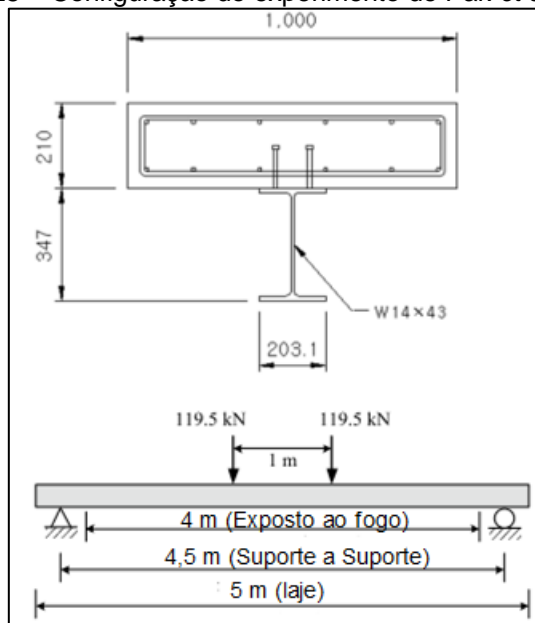


Fonte: Wainman e Kirby (1988).

Os autores descrevem vários ensaios realizados, informam os resultados térmicos e os deslocamentos medidos ao longo do tempo. Os ensaios 15 e 16 feitos por Wainman e Kirby (1988) são descritos no item 5.1 e utilizados como referência para validação do modelo numérico desenvolvido no presente trabalho.

Pak *et al.* (2018) realizaram experimentos em vigas mistas de aço e concreto submetidas a altas temperaturas na Coreia do Sul. A Figura 25 e a Figura 26 mostram a configuração da montagem do experimento realizado.

Figura 25 – Configuração do experimento de Pak *et al.* (2018).



Fonte: Pak *et al.* (2018). Adaptado pelo autor.

Figura 26 – Experimento realizado em viga mista em alta temperatura; (a) forno utilizado no experimento; (b) concretagem da laje; (c) instrumentação do elemento estrutural; (d) viga mista dentro do forno.

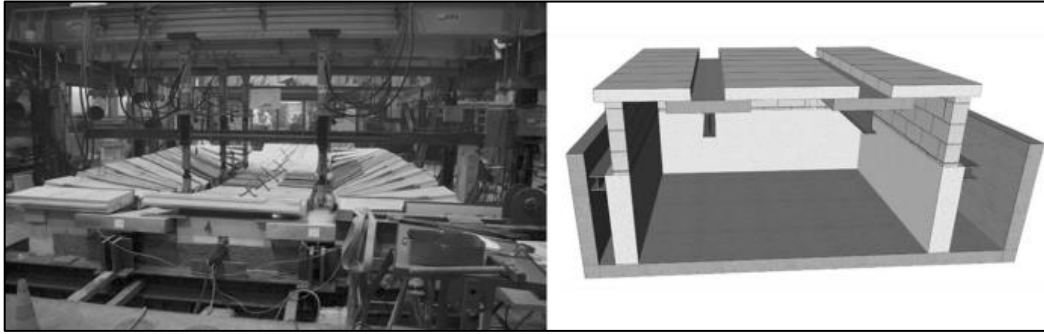


Fonte: Pak *et al.* (2018).

Como resultado, os autores divulgaram a deformação e o deslocamento em diversos pontos da estrutura ao longo do tempo. A partir desses valores, eles validaram um modelo numérico capaz de simular o comportamento térmico e mecânico da viga mista em situação de incêndio. O modelo numérico desenvolvido é detalhado no item 3.2.

Brunkhorst *et al.* (2019) realizaram experimentos no conjunto de dois perfis de aço conectados a laje submetidos a elevadas temperaturas na Alemanha. O objetivo era estudar o comportamento da viga mista calculada com a interação parcial. Foram utilizados conectores de cisalhamento que proporcionam esse grau de interação entre o perfil de aço e o concreto. A Figura 27 mostra o ensaio das vigas mistas e a sua configuração.

Figura 27 – Configuração do ensaio realizado por Brunkhorst *et al.* (2019).



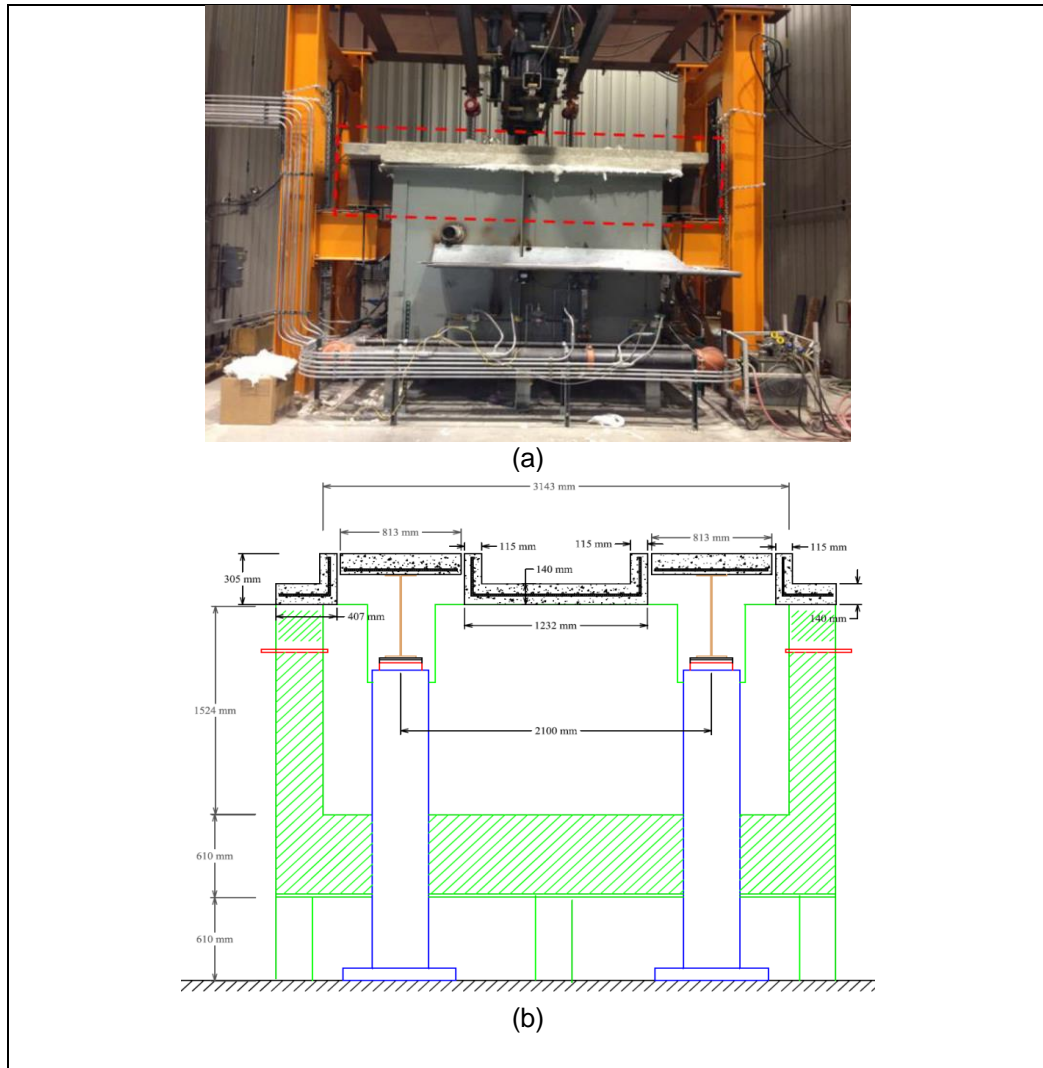
Fonte: Brunkhorst *et al.*, 2019.

Como resultados, os autores divulgaram a temperatura do forno e dos elementos estruturais ao longo do tempo de ensaio, o escorregamento entre a viga e a laje e o deslocamento do centro do elemento.

Os autores observaram três efeitos importantes que ocorrem na ligação entre o perfil e a laje de concreto de vigas mistas com interação parcial sujeitas a altas temperaturas: escorregamento devido ao alongamento da seção da viga de aço; escorregamento devido ao gradiente térmico da seção da viga mista e o escorregamento devido à atuação das cargas mecânicas. Além disso, eles concluíram que o grau de interação entre o perfil e a laje aumenta devido à perda da capacidade resistente dos elementos estruturais em altas temperaturas.

Aziz (2015) realizou um estudo experimental nos EUA com três vigas mistas típicas de ponte sob alta temperatura a fim de estudar o comportamento da estrutura em situação de incêndio, conforme indicado na Figura 28.

Figura 28 – Configuração dos ensaios realizado por Aziz (2015). (a) Seção longitudinal e (b) Seção transversal.



Fonte: Aziz (2015).

Como resultado do experimento, o autor obteve a temperatura de vários pontos da seção transversal da viga de aço e da laje de concreto ao longo do tempo de exposição ao forno aquecido, conforme a curva de incêndio padrão da ASTM E119:2008. Além disso, como resposta estrutural, é informado o deslocamento vertical do centro da viga, deslocamento para fora do plano da alma da viga e deslocamento axial.

O ensaio realizado por Aziz (2015), na viga denominada "G1", está descrito no item 5.2 e é utilizado para validação do modelo numérico a ser desenvolvido no presente trabalho.

3.2 PESQUISAS NUMÉRICAS

A partir dos resultados obtidos nos experimentos em escala real, vários autores desenvolveram modelos numéricos capazes de simular as condições de carregamento térmico e estrutural, de estruturas mistas em situação de incêndio, e obter um comportamento similar àqueles observados nos experimentos.

A norma britânica BS 476-Part 20:1987 estabelece critérios para definir o momento em que ocorre o colapso estrutural em testes de estruturas em situação de incêndio. Segundo a norma, admite-se que o colapso seja caracterizado pela ocorrência de uma das condições descritas nas Equações (3.1) e (3.2), prevalecendo aquele que ocorrer primeiro.

$$\delta \geq \frac{L}{20} \quad (3.1)$$

$$\delta \geq \frac{L}{30} \quad \text{e} \quad \frac{d\delta}{dt} \geq \frac{L^2}{9000d} \quad (3.2)$$

Onde:

δ é o deslocamento máximo da viga;

L é o vão livre da viga;

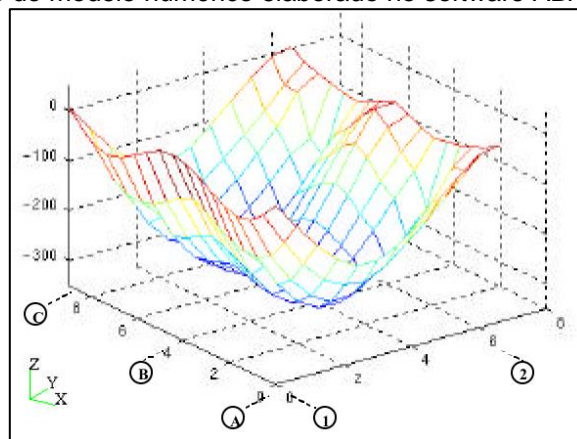
d é a altura da viga;

$\frac{d\delta}{dt}$ é a taxa de variação do deslocamento da viga em mm/min, calculado em intervalos de 1 minuto a partir do primeiro minuto do período de aquecimento.

Mäkeläinen e Ma (2000) apresentaram um modelo numérico tridimensional para avaliação de pisos mistos, em que a viga de aço se encontra parcialmente embutida na laje de concreto, com finalidade de estudar seu comportamento estrutural e térmico em situação de incêndio. Os autores desenvolveram um programa

computacional para realizar a análise térmica e, para análise estrutural, foi utilizado o software ABAQUS. As variações das propriedades térmicas e estruturais ao longo do tempo foram adotadas conforme a EN 1994-1-2:2005. Os resultados obtidos demonstraram que sistema do piso é capaz de resistir a 60 minutos de exposição à curva de incêndio ISO, sem proteção adicional contra o fogo, se o fator de utilização da estrutura for inferior a 50%. Por fim, constatou-se que o colapso estrutural foi causado pela redução da capacidade resistente à flexão da viga quando exposta ao incêndio. A Figura 29 mostra o deslocamento da estrutura calculada pelos autores após 90 minutos do início do incêndio.

Figura 29 – Deslocamento em milímetros do piso misto calculado após 90 minutos de incêndio por meio do modelo numérico elaborado no software ABAQUS.



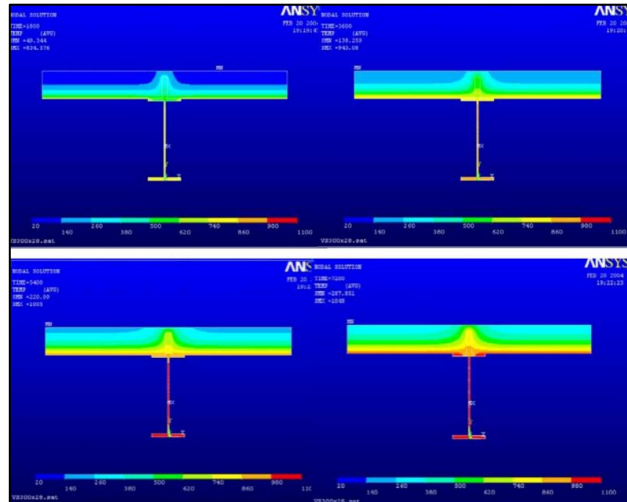
Fonte: Mäkeläinen e Ma (2000).

Pitanga (2004) estudou o comportamento térmico de vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio, por meio de modelos bidimensionais elaborados no software ANSYS. Foram estudadas vigas com diferentes tamanhos com e sem proteção passiva contra incêndio. Os resultados da análise térmica pelo método dos elementos finitos (Figura 30) foram comparados com aqueles obtidos pelos métodos simplificados recomendados pela ABNT NBR 14323:2013. Foi observado que os resultados das temperaturas nos elementos estruturais convergem para a mesa inferior da viga, porém divergem para a alma e mesa superior. A maior discrepância foi observada para a viga mista com proteção do tipo caixa.

Pitanga (2004) observou a grande eficiência do material de proteção passiva contra fogo e a importância do fator de massividade da seção. O autor ainda destacou que a laje de concreto desempenha um papel importante quanto ao comportamento estrutural das vigas mistas, uma vez que ela contribui com uma parcela significativa

do momento resistente de cálculo da seção. A Figura 30 mostra alguns resultados da análise térmica do modelo numérico.

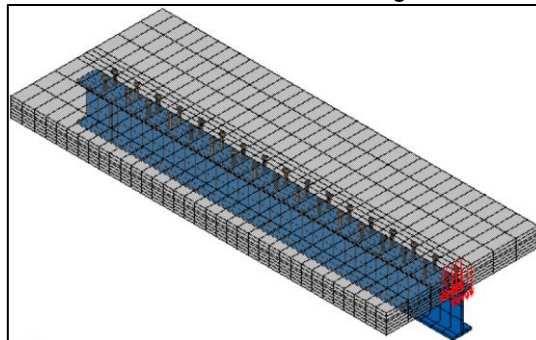
Figura 30 – Resultados da análise térmica ao longo do tempo de viga mista em situação de incêndio elaborado no software ANSYS.



Fonte: Pitanga (2004).

Kotinda (2006) desenvolveu modelos numéricos tridimensionais de vigas mistas (Figura 31) a fim de simular o seu comportamento estrutural, principalmente no referente à interface entre a viga de aço e a laje de concreto. Os modelos foram desenvolvidos no programa computacional ANSYS e os resultados comparados com valores experimentais. Os resultados obtidos foram satisfatórios e o modelo proposto simulou o comportamento da estrutura de forma eficaz. A autora apresentou o código na linguagem APDL (*ANSYS Parametric Design Language*) utilizado para a modelagem da viga mista em elementos finitos.

Figura 31 – Modelo numérico tridimensional da viga mista no software ANSYS.

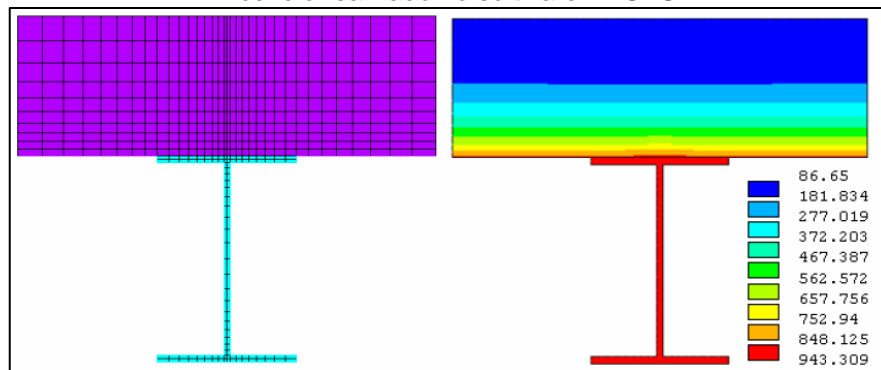


Fonte: Kotinda (2006).

Rigobello (2007) estudou, por meio de modelo numérico elaborado no programa computacional ANSYS, a elevação de temperatura ao longo do tempo, em seções transversais de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto. A Figura

32 mostra a malha do modelo numérico e o resultado da análise térmica feita pelo autor. O autor comparou os resultados obtidos com o método simplificado apresentado da ABNT NBR 14323:1999. Concluiu-se que a determinação dos níveis de temperaturas em seções transversais de elementos estruturais, obtidas com base nas prescrições normativas, conduz a resultados satisfatórios. Porém, foram observados que muitos casos usuais não estão contemplados nos métodos simplificados sugeridos pelas normas, o que indica a necessidade de emprego de modelos avançados de cálculo.

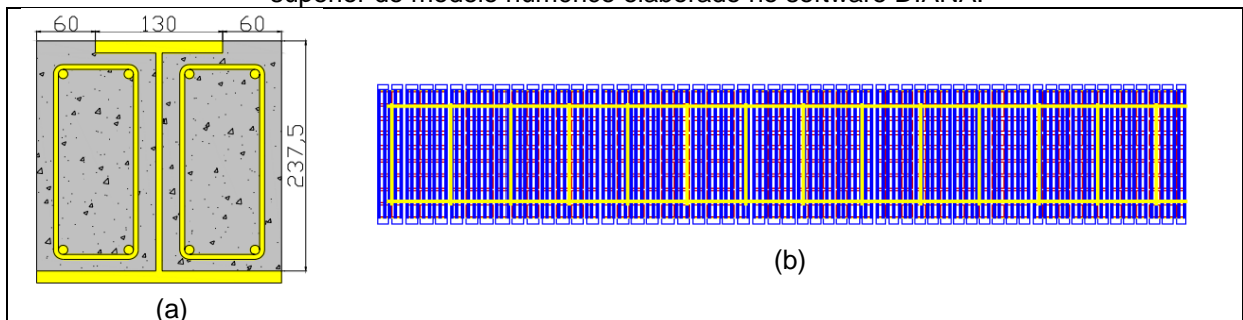
Figura 32 – Modelo numérico e resultado da análise térmica de uma viga mista em situação de incêndio realizado no software ANSYS.



Fonte: Rigobello (2007).

Cavalcanti (2010) analisou numericamente vigas mistas parcialmente revestidas, por meio do programa computacional DIANA e comparou os resultados com os obtidos em experimento. Seu objetivo foi investigar o efeito da armadura na capacidade resistente dessas vigas submetidas a elevadas temperaturas. O modelo numérico proposto pelo autor encontra-se na Figura 33.

Figura 33 – Modelo numérico elaborado por Cavalcanti (2010). a) Seção transversal típica. b) Vista superior do modelo numérico elaborado no software DIANA.



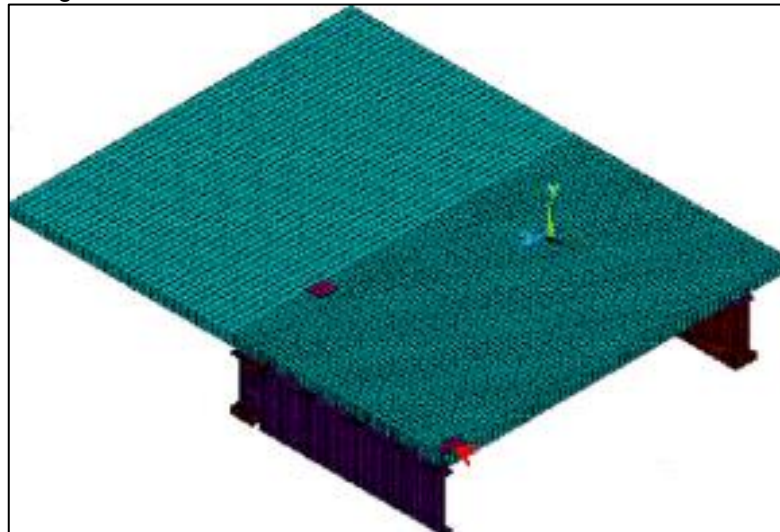
Fonte: Cavalcanti, 2010.

O autor concluiu que o conjunto, armadura e conector, mostrou eficiência para o aumento da capacidade resistente à flexão e da interação aço-concreto. Além disso

notou-se uma concordância satisfatória entre os resultados obtidos numericamente com os experimentais.

Kodur *et al.* (2013) modelaram, no software ANSYS, vigas mistas de aço e concreto submetidas a elevadas temperaturas. Os autores variaram os tipos de conexões entre vigas e pilares a fim de estudar a influência desse parâmetro no comportamento estrutural. O modelo proposto (Figura 34) foi validado, por meio dos resultados obtidos nos experimentos de Wellman *et al.* (2011). Os autores concluíram que os tipos de conexões entre vigas e pilares não têm influência significativa na resistência da seção mista em situação de incêndio.

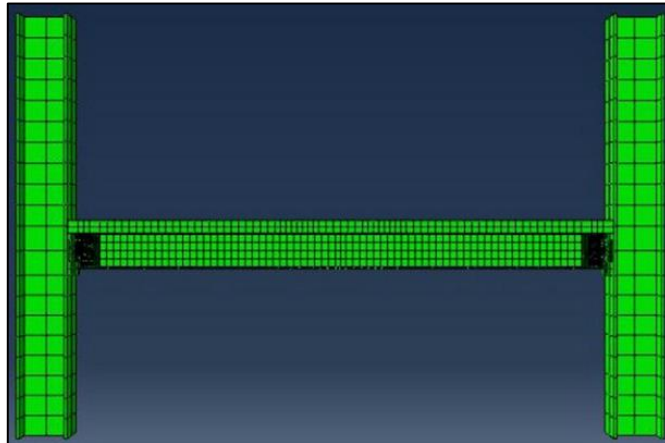
Figura 34 – Modelo numérico elaborado no software ANSYS.



Fonte: Kodur *et al.* (2013).

Fischer (2015) analisou, numericamente, o comportamento das vigas mistas em situação de incêndio considerando ligações com os pilares que transmitem apenas os esforços cortantes e axiais. Todos os elementos de conexões foram modelados utilizando o programa computacional ABAQUS. O modelo proposto pelo autor (Figura 35) gerou resultados muito próximos aos obtidos por meio dos experimentos realizados por Selden *et al.* (2016). A partir dos resultados obtidos, o autor concluiu que o modelo numérico proposto é apto para realizar estudos paramétricos para complementar as investigações experimentais do comportamento de vigas mistas e suas conexões em situação de incêndio.

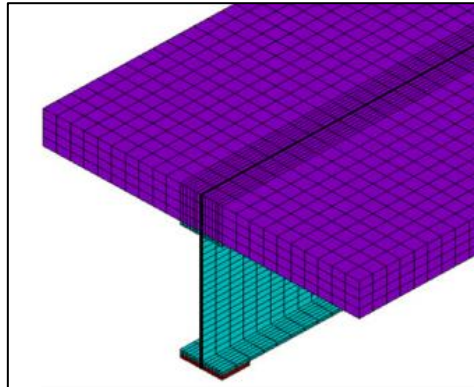
Figura 35 – Modelo numérico elaborado no software ABAQUS.



Fonte: Fischer (2015).

Kodur *et al.* (2015) elaboraram um modelo numérico, via programa computacional ANSYS (Figura 36), para verificar a influência da instabilidade local, em vigas mistas em situação de incêndio, em relação à capacidade resistente ao momento fletor e ao esforço cortante. Os autores validaram os resultados obtidos por meio dos experimentos realizados por Wainman e Kirby (1988).

Figura 36 – Modelo numérico elaborado no software ANSYS.



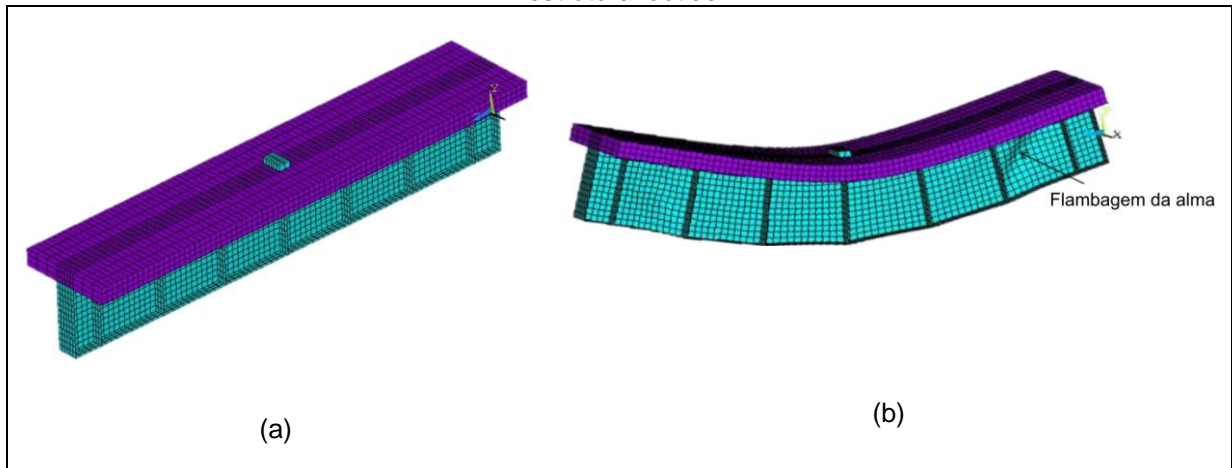
Fonte: Kodur e Naser (2015).

Os autores concluíram que a redução da capacidade resistente à flexão e ao cisalhamento das vigas, ao longo do incêndio, está relacionada com o decréscimo das propriedades dos materiais e pode ser agravado com a instabilidade local do perfil de aço.

Por meio do mesmo modelo numérico, método de validação e software utilizados por Kodur e Naser (2015), Naser *et al.* (2016) afirmaram que o início da instabilidade local da alma ou da mesa do perfil de aço ao longo do incêndio pode acelerar a falha da estrutura devido ao esforço cortante.

Aziz (2015) desenvolveu um modelo numérico, no software ANSYS (Figura 37), capaz de simular satisfatoriamente os resultados obtidos por meio dos experimentos térmicos e termoestruturais realizados pelo mesmo. O autor realizou um estudo paramétrico em vigas típicas de pontes, variando o tipo de incêndio, o nível de carga, o comprimento da viga, o índice de esbeltez da alma, o número de enrijecedores e o grau de restrição axial. Como resultado, constatou-se que uma viga de ponte pode entrar em colapso, com menos de 20 minutos, se exposta a circunstâncias severas. Além disso, o autor observou que o modo de falha que mais se repetiu no estudo foi a instabilidade da alma, quando seu índice de esbeltez é maior que 50.

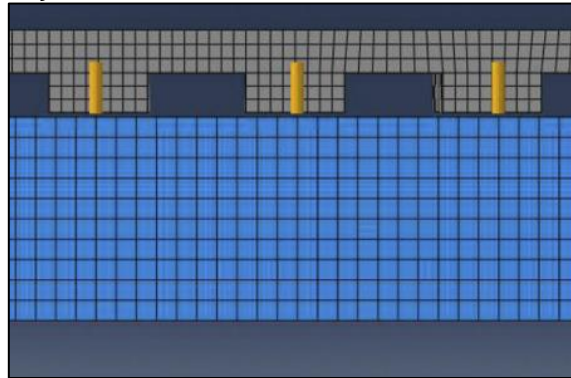
Figura 37 – Modelo numérico elaborado no software ANSYS. (a) Vista isométrica. (b) Resultado estrutural obtido.



Fonte: Aziz (2015).

Selden *et al.* (2016) elaboraram um modelo numérico de viga mista em situação de incêndios no programa computacional ABAQUS (Figura 38) e validaram os resultados por meio de experimentos realizados pelos próprios autores. Eles concluíram que é possível prever o deslocamento da viga mista em situação de incêndio em função da temperatura da mesa inferior e associar os modos de falha da estrutura à redução das propriedades mecânicas do aço do perfil ou a ruptura dos conectores de cisalhamento.

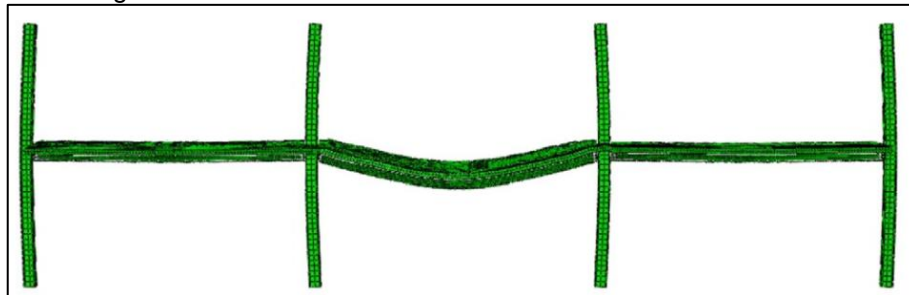
Figura 38 – Seção do modelo numérico elaborado no software ABAQUS.



Fonte: Selden *et al.* (2016).

Fischer *et al.* (2017) realizaram estudos paramétricos, por meio de modelos tridimensionais em elementos finitos (Figura 39), utilizando o software ABAQUS para estudar o comportamento das ligações entre os pilares e as vigas mistas em situação de incêndio. Variaram-se diversos parâmetros do estudo, como: tipos de conexões, posição das nervuras da laje, parâmetros do aço e tempo de exposição ao fogo. Os autores concluíram que não há ruptura prematura nas ligações da viga com o pilar e, ao considerar a continuidade da laje sobre as vigas secundárias tem-se um grande impacto no desempenho da conexão.

Figura 39 – Modelo numérico elaborado no software ABAQUS.



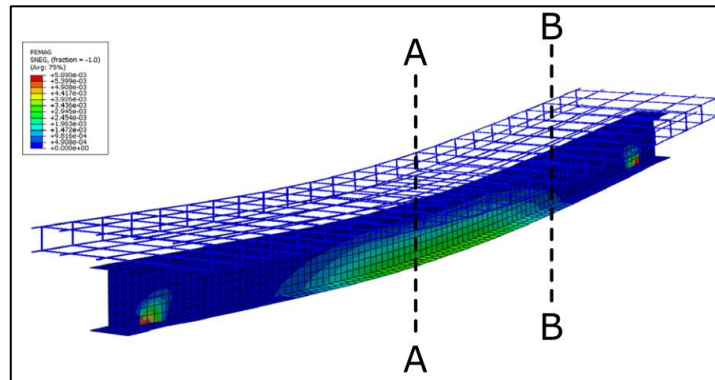
Fonte: Fischer *et al.* (2017).

Pak *et al.* (2018) validaram modelo numérico, realizado por meio do software ABAQUS, que gerou resultados térmicos e termoestruturais (Figura 40) próximos aos obtidos no experimento. Os autores utilizaram os resultados dos ensaios feitos por eles, em escala real, de vigas mistas expostas a altas temperaturas para validar o modelo.

Por meio dos estudos realizados, eles concluíram que, devido ao comportamento inelástico dos materiais em altas temperaturas, a deformação da estrutura em situação de incêndio é muito superior se comparada com a deformação em

temperatura ambiente. Além disso, os autores perceberam que o deslocamento no centro da viga, encontrado pelo modelo numérico, é mais próximo daquele obtido no experimento real quando, em vez de utilizar as variações das propriedades dos materiais propostas pelas normas e literatura, usar os resultados obtidos durante o experimento.

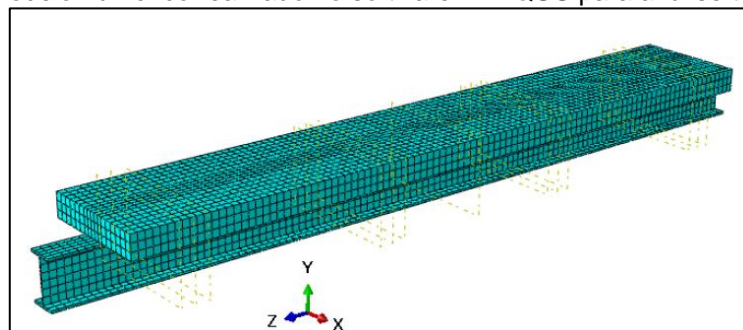
Figura 40 – Resultado da análise termomecânica obtido através do modelo numérico realizado no software ABAQUS.



Fonte: Pak *et al.* (2018).

Romagnoli (2018) estudou a reserva de capacidade resistente da viga mista ao longo do incêndio, proveniente da continuidade da armadura negativa longitudinal da laje de concreto. O modelo foi elaborado no programa computacional ABAQUS, conforme Figura 41, e validado com os resultados experimentais de Wainman e Kirby (1988). O autor concluiu que a reserva de capacidade resistente existente na estrutura não é suficiente para justificar a ausência de revestimento contra fogo para tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) superior a 21 minutos.

Figura 41 – Modelo numérico realizado no software ABAQUS para análise termomecânica.

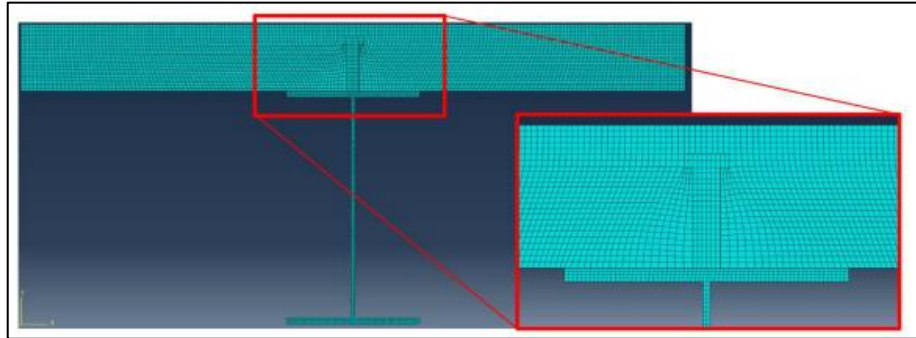


Fonte: Romagnoli (2018).

Dias (2018) estudou, por meio de modelos numéricos em elementos finitos realizados no ABAQUS (Figura 42), o comportamento térmico de vigas mistas em situação de incêndio com e sem material de proteção contra fogo dos tipos contorno

e caixa. Os resultados obtidos foram comparados com aqueles obtidos por meio dos métodos de análise prescritos na ABNT NBR 14323:2013. O autor concluiu a partir dessa comparação que, para certo tipo de proteção e tempo de duração de incêndio, as temperaturas previstas pela norma brasileira podem diferir substancialmente daquelas obtidas pela simulação numérica.

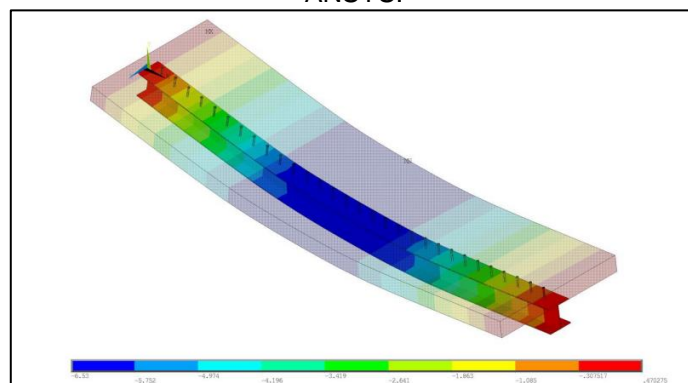
Figura 42 – Modelo numérico realizado no software ABAQUS para análise térmica de viga mista.



Fonte: Dias, 2018.

Morais (2018) realizou estudo de vigas mistas de aço e concreto utilizando lajes alveolares via métodos dos elementos finitos. Para isso o autor utilizou o programa computacional ANSYS (Figura 43). Para modelar os elementos estruturais, foram utilizados diferentes tipos de elementos: planos de casca para simular os perfis metálicos, sólidos tridimensionais para simular a laje alveolar e elementos de barra para simular os conectores de cisalhamento e armaduras. Os resultados obtidos foram validados por experimentos realizados em escala real.

Figura 43 – Resultado da deformada do modelo numérico de viga mista realizado no software ANSYS.

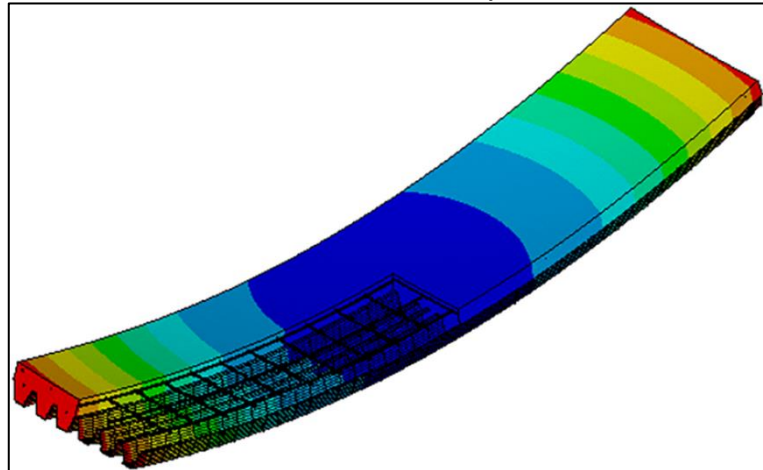


Fonte: Moraes (2018).

Piloto *et al.* (2020) estudou os efeitos do nível de carga na capacidade resistente de lajes mistas em situação de incêndio. Os autores utilizaram o programa computacional ANSYS para realizar a modelagem do elemento estrutural via método

dos elementos finitos (Figura 44). Os resultados foram validados a partir de resultados experimentais. De posse do modelo numérico validado, foram realizados estudos paramétricos variando o nível de carga de 10% a 75% e foi proposto um novo método simplificado para cálculo de lajes mistas em situação de incêndio.

Figura 44 – Deformada do modelo termoestrutural de laje mista realizado no software ANSYS.



Fonte: Piloto *et al.* (2020).

3.3 EMISSIVIDADE EQUIVALENTE

Wong (2005) realizou estudo sobre a influência da geometria e dimensão dos fornos utilizados em experimentos térmicos. O autor concluiu que as variações dessas grandezas alteram os resultados das temperaturas lidas no elemento de aço ensaiado ao longo do experimento, ainda que os demais parâmetros sejam mantidos constantes. As diferenças nos resultados dos experimentos térmicos encontradas são devidas ao fato dos gases dentro do compartimento transferirem o calor para o elemento estrutural através da radiação por diferentes caminhos. Para considerar essa diferença, Wong (2005) desenvolveu uma formulação para o cálculo de uma emissividade equivalente que considera as condições e características do forno durante as análises. Essa emissividade depende da temperatura dos gases e do elemento estrutural medidas durante o ensaio, ou seja, é variável ao longo do tempo do experimento.

A emissividade equivalente proposta por Wong (2005) é calculada pela Equação (3.3).

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\varepsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_s^4}{T_g^4 - T_s^4} \quad (3.3)$$

Onde:

T_g é a temperatura dos gases do forno medidas, em Kelvin;

T_s é a temperatura do elemento metálico medidas, em Kelvin.

Os coeficientes ε_g (emissividade total dos gases) e α_g (absorção total dos gases) são calculados pela Equação (3.4) e (3.5).

$$\varepsilon_g = X_4 + X_5 T_g \quad (3.4)$$

$$\alpha_g = X_1 T_s^{X_2} + T_s^{X_3} \quad (3.5)$$

Os coeficientes X_1 a X_5 (Tabela 4) são definidos empiricamente por WONG (2005) em função do comprimento L_m calculado pela Equação (3.6) para fornos retangulares.

$$L_m = \frac{1,8hw}{h + w + hw/L} \quad (3.6)$$

Onde:

h é a altura do forno, em metros. $1 \leq h \leq 4$;

w é a largura do forno, em metros. $1 \leq w \leq 22$;

L é o comprimento do forno, em metros. $1 \leq L \leq 22$.

Tabela 4 – Coeficientes X_1 a X_5 .

L_m (m)	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
0.5	6,432499	-1,02349	0,499770	0,302	-0,000118
1	4,249018	-0,91824	0,496256	0,373	-0,000135
2	2,578352	-0,77310	0,457589	0,443	-0,000140
3	1,845211	-0,68851	0,441610	0,479	-0,000133
4	1,448499	-0,63266	0,434033	0,501	-0,000124
5	1,202279	-0,59368	0,431480	0,517	-0,000115
6	1,036789	-0,56531	0,431575	0,527	-0,000106

Fonte: Wong, 2005.

As análises numéricas de Cedeno *et al.* (2011) em vigas mistas mostram que as expressões de Wong (2005) são adequadas para estimar a emissividade equivalente no forno. No entanto, destaca-se a necessidade de estudos aprofundados do cálculo da emissividade equivalente com outros tipos de materiais ensaiados no forno, como concreto, madeira e alvenaria.

Romagnoli (2018) constatou que, durante a calibragem do modelo numérico, houve uma grande diferença entre adotar a emissividade constante de 0,7 proposto pelas normas e a emissividade equivalente variável para simular o efeito das características do forno utilizado nos ensaios. Segundo o autor, a emissividade constante leva a temperaturas muito superiores às observadas nos experimentos.

4 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Para realização das análises térmicas e termoestruturais, são adotadas diferentes combinações de diversos parâmetros de vigas mistas. Por meio de análises paramétricas é possível verificar a influência desses parâmetros no comportamento térmico e estrutural dessas estruturas em situação de incêndio.

Para realização do estudo, são elaborados modelos numéricos tridimensionais em elementos finitos para análise térmica e termoestrutural de vigas mistas em situação de incêndio.

4.1 MODELAGEM NUMÉRICA

Modelos numéricos utilizando método dos elementos finitos são necessários a fim de estudar o comportamento das vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio. Esses modelos são desenvolvidos utilizando o programa computacional ANSYS, versão Mechanical APDL 2021 R1.

A geometria dos modelos, a definição e variação das propriedades, as cargas, os apoios e demais variáveis foram realizadas utilizando códigos na linguagem APDL (*ANSYS Parametric Design Language*). Por meio dessa ferramenta, é possível realizar a modelagem numérica de forma rápida e automática, viabilizando a realização dos estudos paramétricos contendo diversos modelos. Os códigos desenvolvidos e utilizados nesse trabalho são apresentados no Apêndice B.

A princípio, é realizado um modelo numérico a fim de executar a análise térmica da viga mista, ou seja, calcular a temperatura da estrutura ao longo do tempo, a partir de diversos parâmetros adotados. O item 4.1.1 explica quais foram os procedimentos realizados para a elaboração do modelo térmico.

A partir dos resultados obtidos na análise térmica, elaborase um modelo para realização da análise termoestrutural, a fim de obter o comportamento estrutural da viga mista ao longo do tempo, em função das temperaturas alcançadas, das cargas aplicadas, das condições de contorno e dos materiais adotados. O item 4.1.2 explica

como é realizado o modelo termoestructural e detalha todas as considerações adotadas.

Os modelos térmicos e termoestruturais foram validados a partir de resultados experimentais realizados por Wainman e Kirby (1988) e Aziz (2015), de acordo com os procedimentos descritos no item 5.

4.1.1 Modelo térmico

Para realizar a análise térmica da viga mista em situação de incêndio, considera-se o fogo atingindo diretamente a mesa inferior, alma, parte da mesa superior do perfil e face inferior da laje, conforme indicado na Figura 45. Não é considerada nenhuma proteção contra incêndio aplicada aos elementos estruturais. A malha de elementos finitos adotada pelo ANSYS é indicada na Figura 46.

Figura 45 – Esquema da análise térmica da viga mista em situação de incêndio.

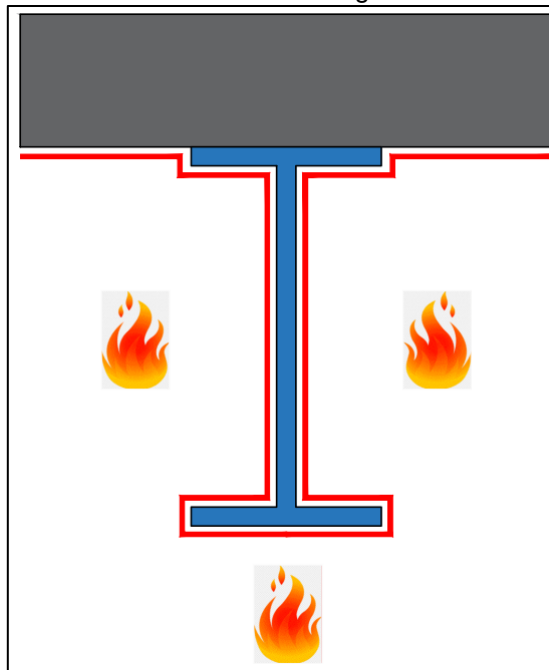
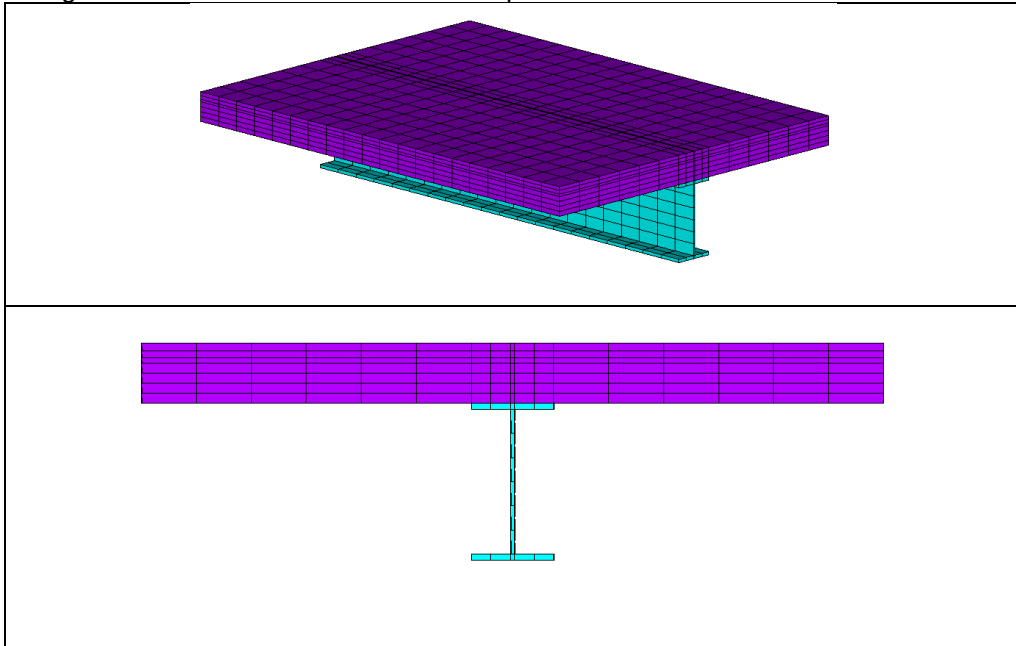


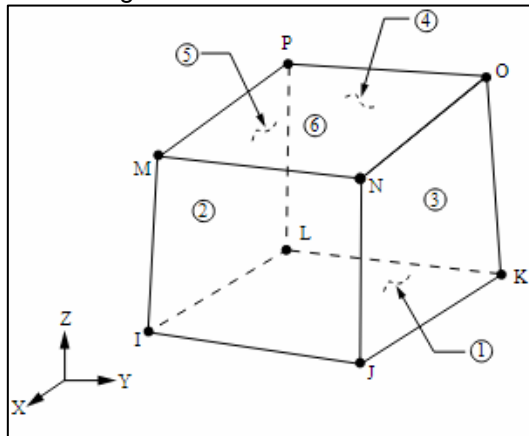
Figura 46 – Malha de elementos finitos para o modelo térmico com elementos sólidos.



Por simplificação e pelo fato de serem estudadas vigas mistas com interação total entre o aço e o concreto, os conectores de cisalhamento não foram modelados para realizar a análise térmica.

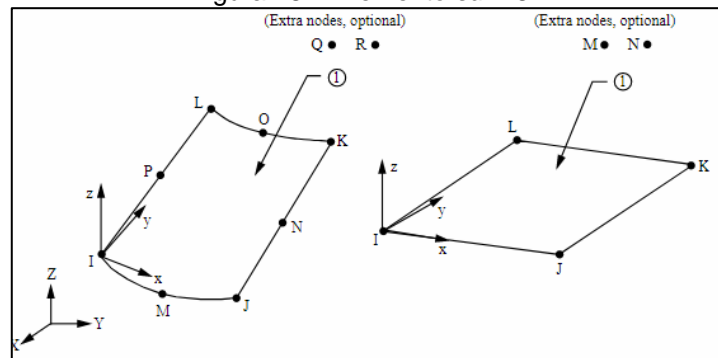
4.1.1.1 Tipos de elementos finitos

Os modelos numéricos são desenvolvidos utilizando elementos finitos disponibilizados na biblioteca do ANSYS. A malha de elementos finitos foi definida de modo a compatibilizar o contato entre os nós dos elementos da viga e da laje. Para modelagem da laje de concreto e do perfil da viga, utilizou-se o elemento *solid70* (Figura 47) na fase de análise térmica.

Figura 47 - Elemento *solid70*.

Fonte: ANSYS (2021)

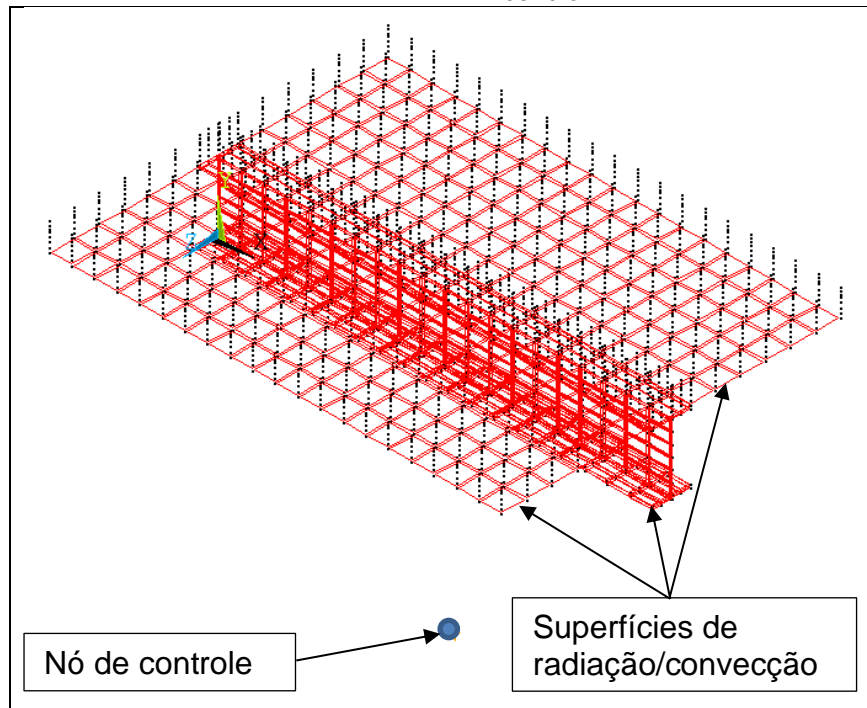
O *solid70* é um elemento capaz de simular a condução térmica nas três direções. Ele possui oito nós com um grau de liberdade em cada nó, a temperatura. No contorno do *solid70*, aplica-se o elemento *surf152* (Figura 48) que tem a função de simular os efeitos da radiação e da convecção entre a seção estrutural exposta ao incêndio e o ambiente.

Figura 48 - Elemento *surf152*.

Fonte: ANSYS (2021).

Ao modelar as superfícies de convecção e radiação, estabelece-se um nó externo de controle onde é aplicada a curva de temperatura *versus* tempo do incêndio descrita no item 4.1.1.3. A Figura 49 apresenta as superfícies de convecção/radiação e o nó de controle adotado.

Figura 49 – Superfície de convecção e radiação aplicada às áreas da seção estrutural expostas ao incêndio.



4.1.1.2 Propriedades Térmicas

As variações das propriedades térmicas dos materiais da viga mista em função da temperatura foram adotadas de acordo com as prescrições das normas EN 1992-1-2:2004, EN 1993-1-2:2005 e EN 1994-1-2:2005 e estão descritas no item 2.3.

O concreto foi considerado com umidade de 1,5% para o cálculo da variação do calor específico. Para a variação da condutividade térmica, adotou-se o limite inferior prescrito na EN 1992-1-2:2004. A constante de Stefan-Boltzmann foi definida como $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$, de acordo com a EN 1993-1-2:2005. O valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, α_c , foi adotado como $25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ conforme especificação da EN 1992-1-2:2004, sendo a emissividade equivalente adotada constante com valor de 0,7, conforme prescrição da EN 1994-1-2:2005.

4.1.1.3 Curva de Incêndio

Aplica-se a curva de incêndio padrão ISO 834:1999, de acordo com o descrito no item 2.2, sendo a carga térmica dessa curva aplicada ao nó de controle da superfície de radiação/convecção dos elementos como indicado na Figura 49.

4.1.2 Modelo termomecânico

Um modelo tridimensional foi desenvolvido, em elementos finitos, no programa computacional ANSYS para realizar análise numérica termomecânica de vigas mistas de aço e concreto. Foram modelados o perfil de aço, a laje de concreto, o conector de cisalhamento, a armadura positiva e o contato entre o perfil e a laje, conforme mostram a Figura 50 e Figura 51.

Figura 50 – Modelo tridimensional desenvolvido no ANSYS para análise termomecânica.

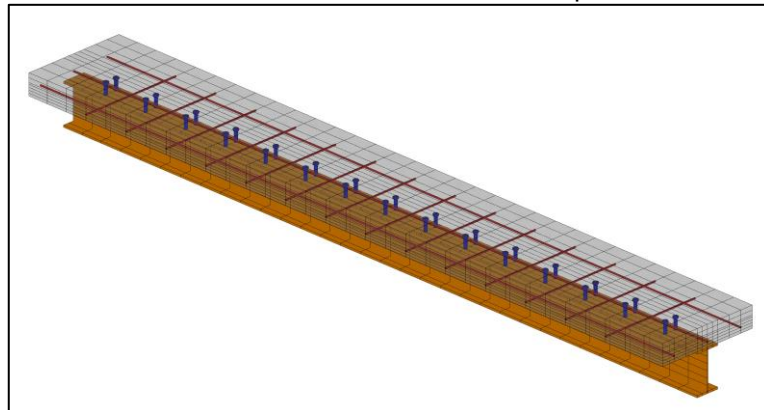
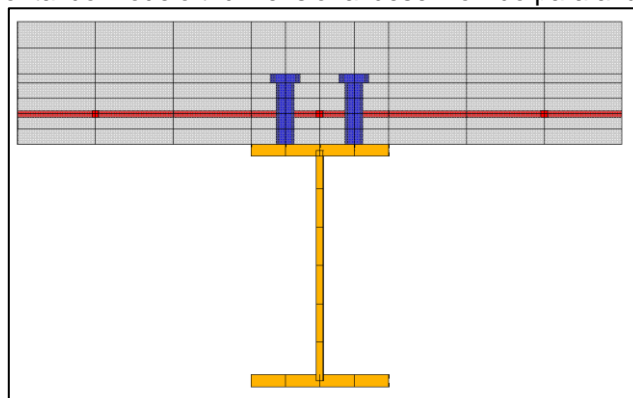


Figura 51 – Vista frontal do modelo tridimensional desenvolvido para análise termomecânica.



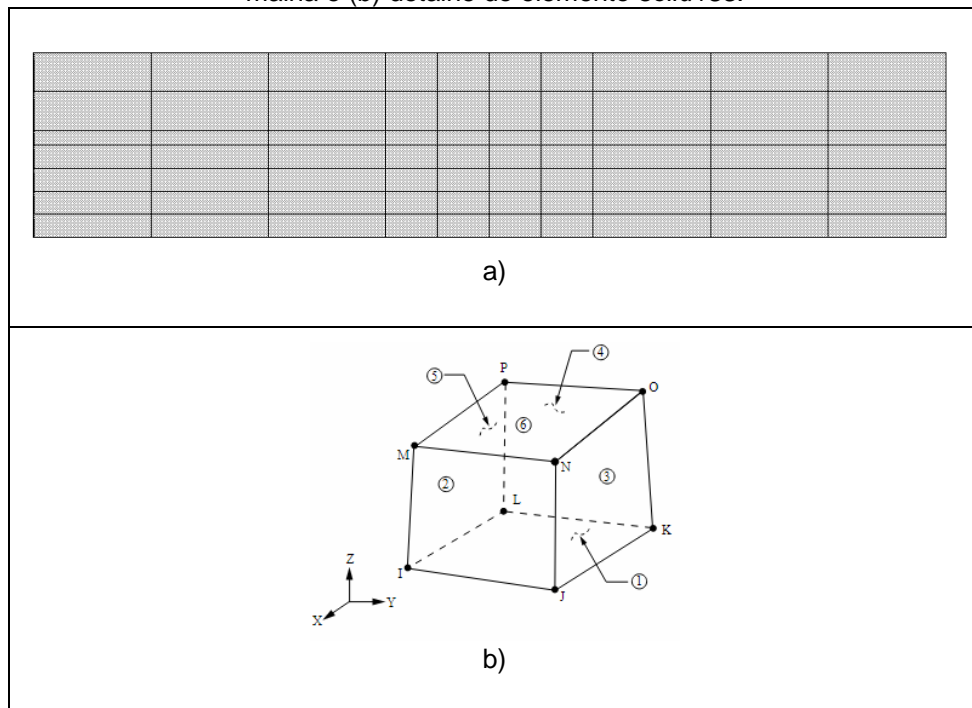
4.1.2.1 Tipos de elementos finitos utilizados

Os tipos de elementos finitos utilizados foram disponibilizados na biblioteca do ANSYS. A escolha de cada tipo foi feita observando alguns critérios, tais como o

número de graus de liberdade, o esforço computacional e a representatividade em relação ao comportamento a ser simulado.

A malha de elementos finitos foi definida de modo a compatibilizar o contato entre os nós de todos os elementos da viga mista: laje, perfil de aço, conectores e armadura positiva. Para modelagem da laje de concreto, utilizou-se o elemento *solid185* (Figura 52).

Figura 52 - Utilização do Elemento Solid185 na laje de concreto. (a) Vista frontal da discretização da malha e (b) detalhe do elemento *solid185*.

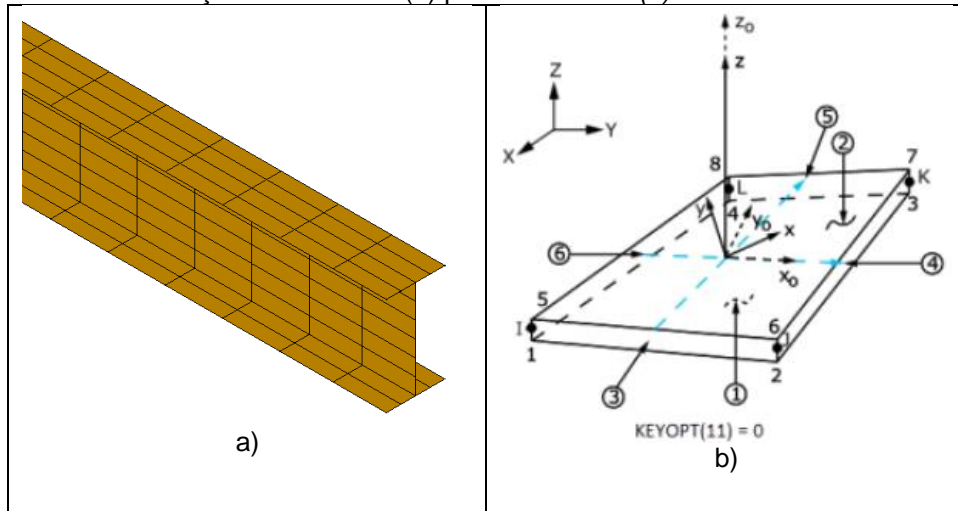


Fonte: ANSYS (2021).

O elemento *solid185* possui oito nós com três graus de liberdade em cada nó, que são translações em x , y e z . Esse elemento simula a propagação das fissurações do concreto para tensões de tração e compressão. Por isso ele é utilizado em modelagens para análise estrutural de componentes tridimensionais sólidos de concreto.

O elemento *solid185* possui a capacidade de incluir a presença de armaduras que resistam apenas a esforços axiais. Muitos autores utilizaram o elemento *solid65* para esse tipo de modelagem, porém o ANSYS recomenda atualmente substituí-lo pelo elemento *solid185*. Para modelagem do perfil de aço, utilizou-se o elemento *shell181* (Figura 53).

Figura 53 - Discretização da malha do (a) perfil metálico e (b) o elemento utilizado *shell181*.

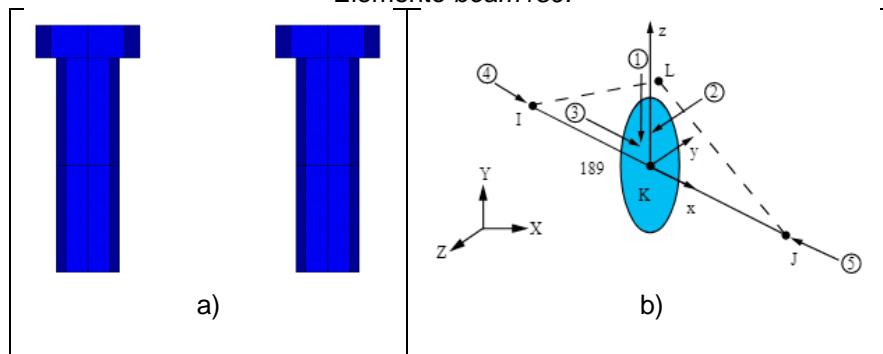


Fonte: ANSYS (2021).

Esse elemento simula o comportamento de estruturas com formato de elementos de casca e possui quatro nós, com seis graus de liberdade por nó: translação nas direções x , y e z e rotação em torno dos eixos x , y e z . O *shell181* é capaz de indicar a ocorrência de instabilidade local na seção. Ele ainda permite a consideração da não linearidade do material.

Para modelar o conector de cisalhamento, utilizou-se o elemento *beam189* (Figura 54), sendo considerado barra quadrática de 3 nós, onde cada nó possui seis graus de liberdade: translação nas direções x , y e z e rotação em torno dos eixos x , y e z . Este elemento responde a esforços axiais e de flexão e permite configurar a forma da seção transversal.

Figura 54 - Modelagem do par de conectores de cisalhamento. (a) discretização da malha e (b) Elemento *beam189*.

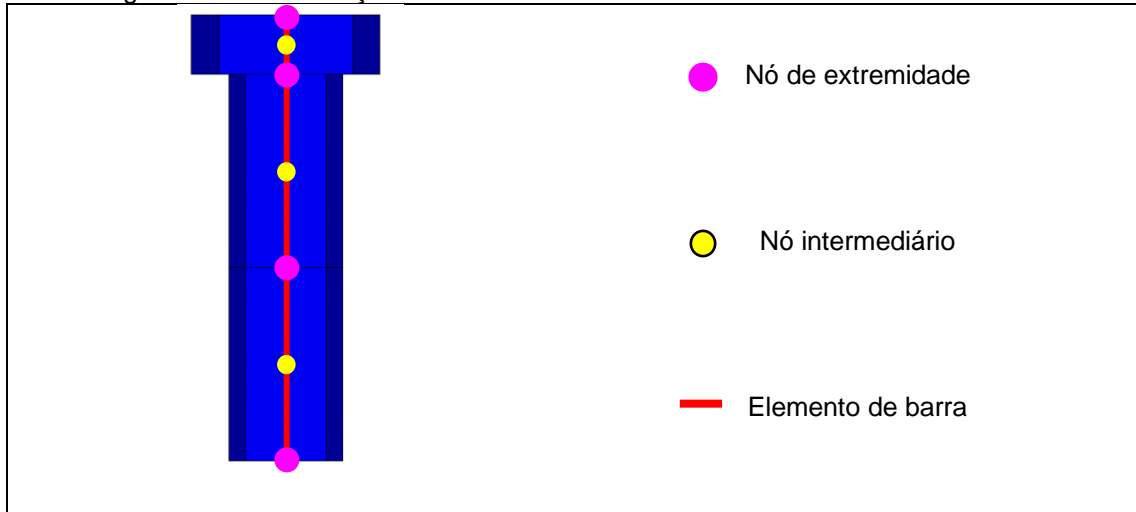


Fonte: ANSYS (2021).

Cada conector é formado por três elementos *beam189*, sendo dois elementos para o corpo e um elemento para a cabeça do conector. Cada elemento possui 3 nós: dois

nós de extremidade e um nó intermediário, conforme indicado na Figura 55. Embora se trate de um elemento unifilar, a plotagem do elemento é feita indicando a seção transversal de cada trecho do conector para facilitar entendimento.

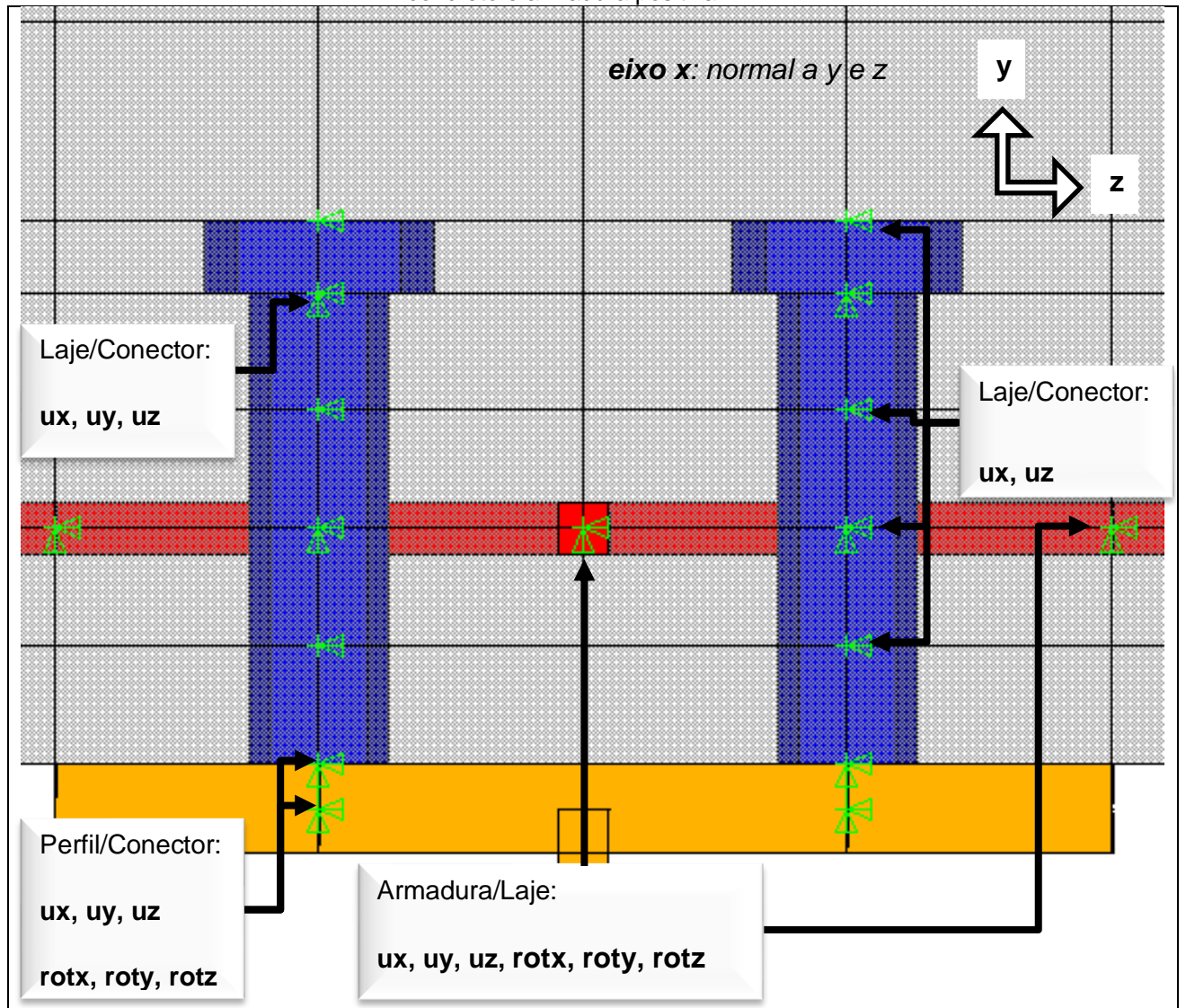
Figura 55 - Discretização do conector de cisalhamento com elemento *beam189*.



Para modelar a vinculação do conector com o perfil de aço e a laje de concreto, foram acoplados nós coincidentes ou próximos, restringido os graus de liberdade para cada trecho (Figura 56).

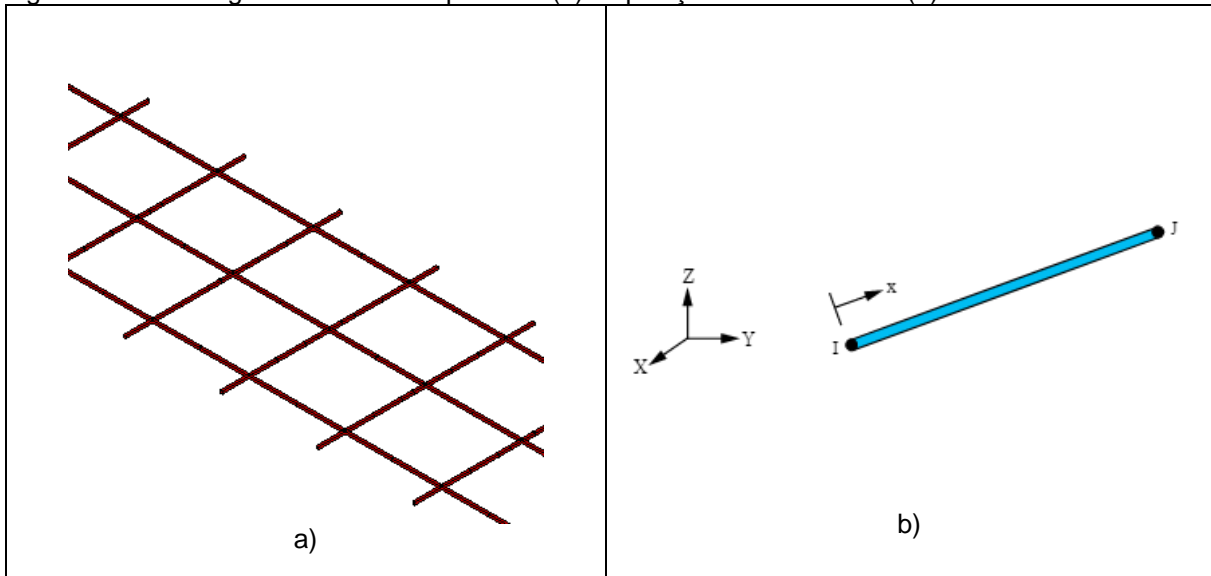
- Entre a mesa superior do perfil de aço e os conectores: o nó da base de cada conector é acoplado ao nó correspondente da mesa superior do perfil, compatibilizando todas as rotações e translações dos nós. Assim, modela-se o engaste entre o conector e a mesa superior.
- Entre a laje e os conectores: os nós do corpo e da cabeça do conector foram acoplados aos nós coincidentes da laje, compatibilizando as translações nas direções dos eixos x e z. Ao nó inferior da cabeça do pino do conector, adicionalmente compatibiliza-se a translação na direção do eixo y. Modela-se, assim, a ancoragem mecânica entre o conector de cisalhamento e a laje de concreto.

Figura 56 – Acoplamentos realizados no modelo numérico entre conectores, perfil metálico, laje de concreto e armadura positiva.



Utilizou-se o elemento *link180* para modelar a armadura positiva da laje (Figura 57), sendo uniaxial com dois nós e cada nó possui três graus de liberdade: translação nas direções x, y e z. Esse elemento responde a esforços axiais de tração e compressão e permite configurar a área da seção transversal.

Figura 57 - Modelagem da armadura positiva. (a) disposição da armadura e (b) Elemento *link180*.



Fonte: ANSYS (2021).

Para modelar a vinculação da armadura e a laje de concreto, cada nó da armadura foi acoplado ao nó coincidente da laje, compatibilizando-se todas as rotações e translações. A Figura 56 indica todos os acoplamentos considerados no modelo.

Para simular o contato existente entre a laje de concreto e a mesa superior do perfil metálico, utilizaram-se os elementos *conta174* e *targe170* (Figura 58 e Figura 59). Esses elementos são utilizados para modelar contato entre superfícies e são capazes de simular a existência de pressão e atrito entre as partes quando há contato entre elas e a separação dos elementos quando não há contato.

O elemento *conta174* foi atribuído à mesa superior do perfil de aço, que é a superfície mais deformável, sendo responsável por modelar o contato e o deslizamento entre as superfícies. O elemento *targe170* foi atribuído à face inferior do concreto em contato com o perfil de aço e representa a superfície alvo, que, nesse caso foi definida como a superfície mais rígida. O contato entre as superfícies passa a ocorrer quando o elemento *conta174* tenta penetrar um dos elementos alvo *targe170*.

Figura 58 – Elementos *conta174* e *targe170* para simular (a) a interface entre laje de concreto e mesa superior do perfil metálico e (b) superfícies associadas aos elementos de contato.

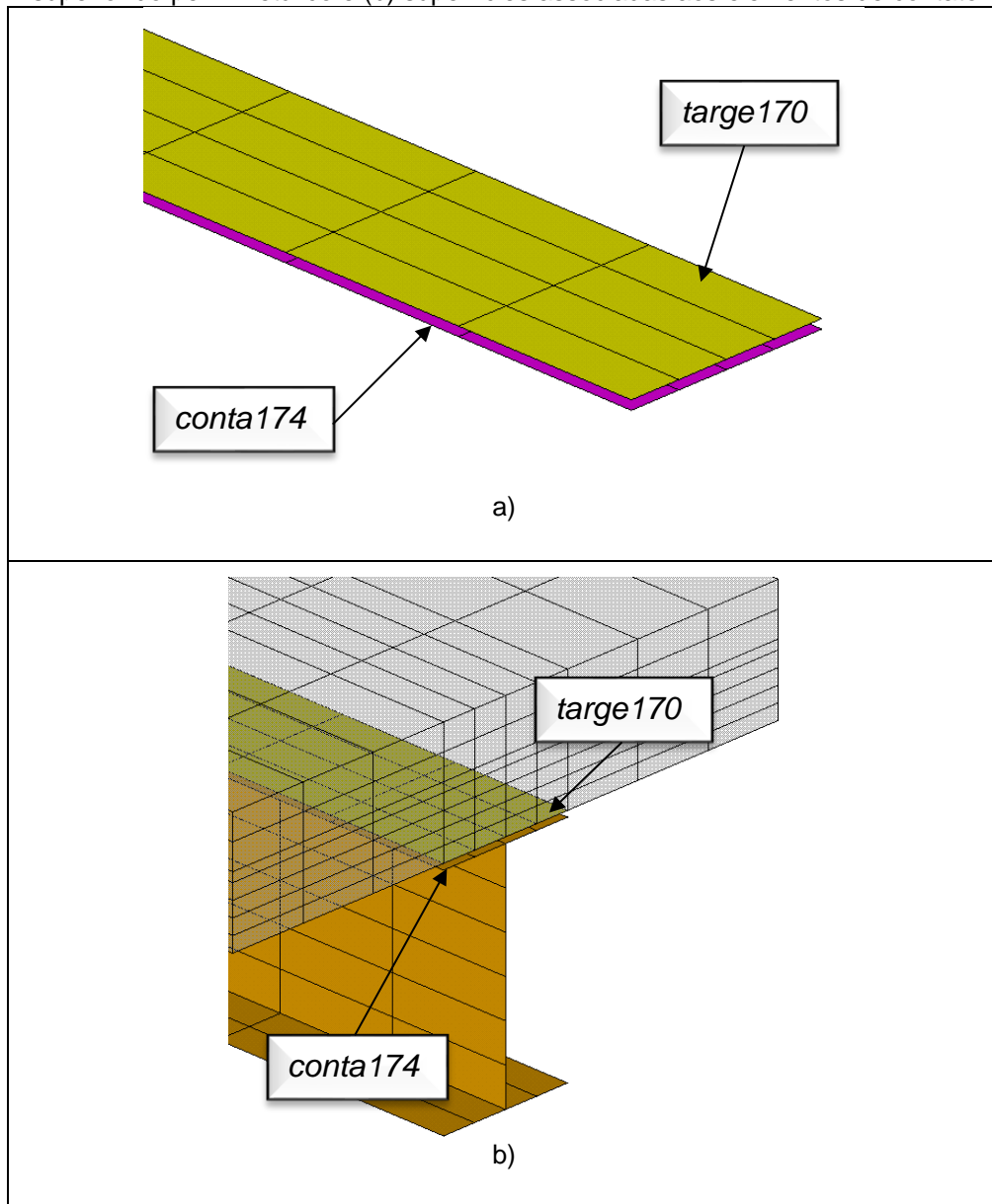
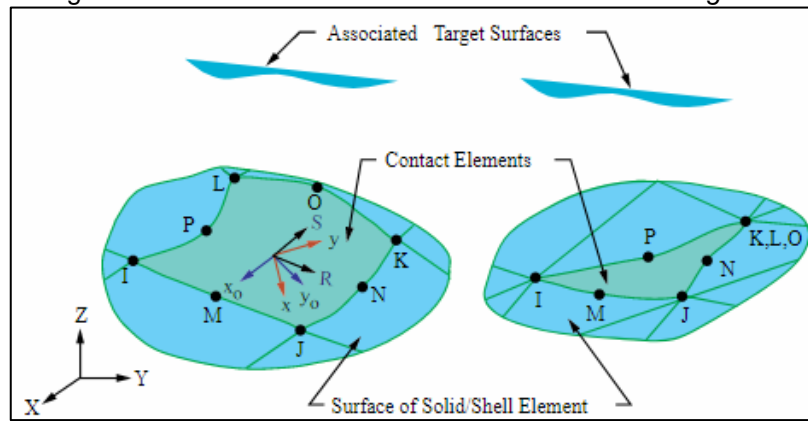


Figura 59 – Par de elementos de contato *conta174* e *targe170*.

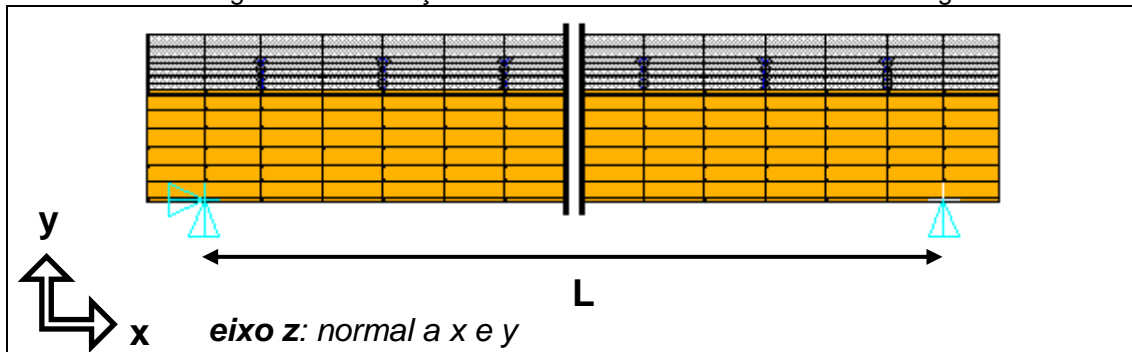


Fonte: ANSYS (2021).

4.1.2.2 Condições de Contorno

A fim de simular o comportamento de uma viga mista simplesmente apoiada, as translações dos nós da esquerda da viga foram restringidas nas direções dos eixos x , y e z (apoio de 2º gênero) e as translações dos nós da direita foram restringidas na direção do eixo y (apoio de 1º gênero). A Figura 60 mostra as condições de contorno aplicadas ao modelo numérico e indica o comprimento livre L considerado da viga.

Figura 60 – Condições de contorno do modelo numérico da viga mista.



4.1.2.3 Características do contato entre laje e viga

O deslizamento entre a mesa superior da viga e a face inferior da laje de concreto é governado pela Lei de Coulomb, conforme as Equações (4.1) e (4.2), modelado com par de contato *conta174* e *targe170*.

$$\tau_{lim} = \mu P + c \quad (4.1)$$

$$|\tau| \leq \tau_{lim} \quad (4.2)$$

Onde:

τ_{lim} é a tensão de cisalhamento limite;

τ é a tensão de cisalhamento equivalente;

μ é o coeficiente de atrito;

P é a pressão normal;

c é a coesão.

Quando a tensão de cisalhamento limite é excedida, passa a acontecer o deslizamento entre o perfil de aço e a laje de concreto. A coesão entre os elementos é a resistência ao deslizamento, mesmo se não houver pressão normal entre as partes. Os valores para coesão e coeficiente de atrito foram adotados conforme utilizados por Morais (2018) e Kotinda (2006). O coeficiente de atrito entre laje e a viga adotado foi de 0,40 e a coesão foi de 0,18 kN/cm².

4.1.2.4 Propriedades Estruturais

As variações das propriedades dos materiais da viga mista em função da temperatura foram adotadas de acordo com as prescrições das normas EN 1992-1-2:2004, EN 1993-1-2:2005 e EN 1994-1-2:2005 e são descritas no item 2.3.

Para o concreto da laje, consideraram-se as variações das seguintes propriedades mecânicas e térmicas no modelo termoestrutural: densidade, módulo de elasticidade, alongamento específico e resistência à compressão. O concreto considerado é constituído por agregado calcário, sendo o módulo de Poisson adotado 0,2. Para o aço do perfil da viga, do conector de cisalhamento e da armadura positiva consideraram-se as variações das seguintes propriedades mecânicas e térmicas no modelo termoestrutural: módulo de elasticidade,

alongamento específico e resistência ao escoamento. Considerou-se o módulo de Poisson 0,3 e a densidade de 7,7 tf/m³, ambos constantes.

Para o concreto, os modelos constitutivos adotados foram do tipo multilinear conforme as prescrições da EN 1994-1-2:2005, apresentado na Figura 61. Para o aço do perfil, conectores e armaduras, adotaram-se modelos constitutivos elasto-plásticos multilineares, apresentado na Figura 62 e Figura 63, conforme as prescrições da EN 1994-1-2:2005. A fim de evitar problemas numéricos, considerou-se uma pequena inclinação positiva no último trecho dos modelos constitutivos dos aços.

Figura 61 – Diagrama de tensão versus deformação em função da temperatura (°C) para o concreto com fck 30 MPa.

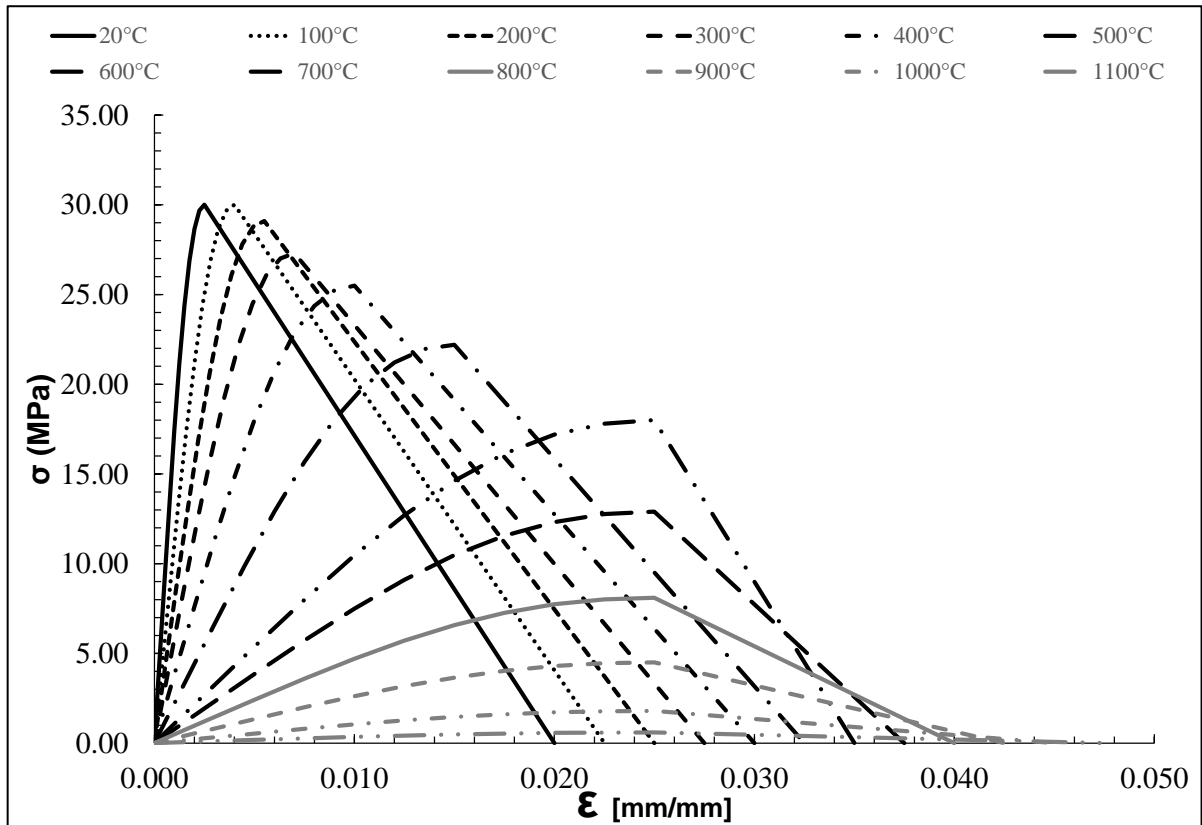


Figura 62 – Diagrama de tensão *versus* deformação em função da temperatura (°C) para o aço do perfil e conector com $f_y=345$ MPa.

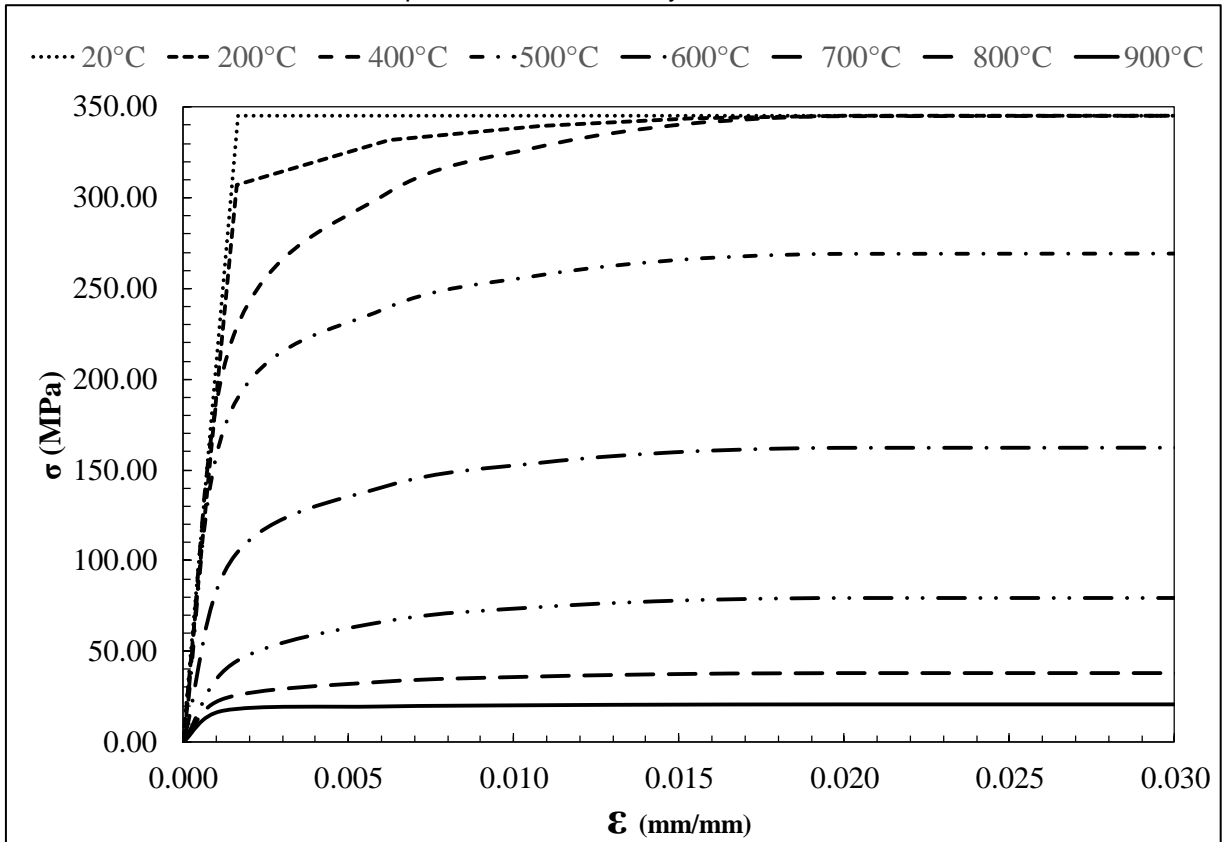
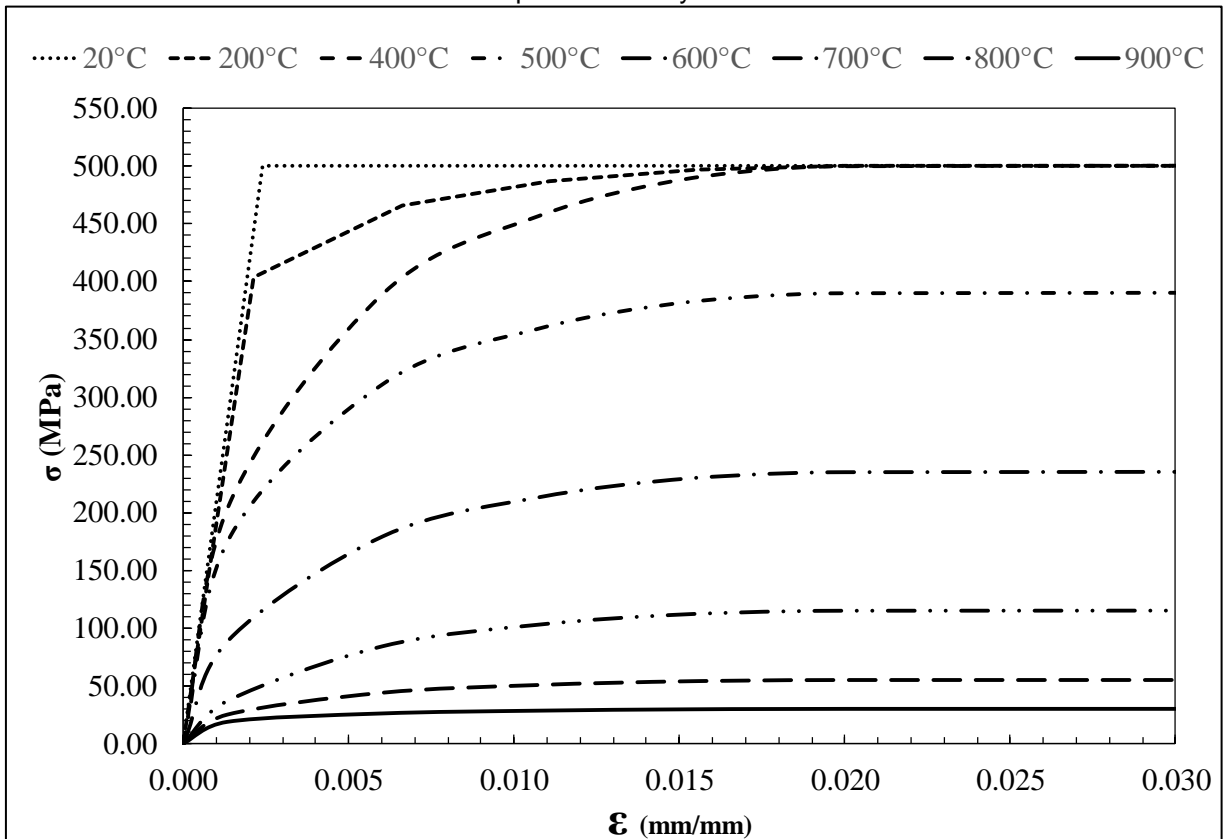


Figura 63 – Diagrama de tensão *versus* deformação em função da temperatura (°C) para o aço da armadura positiva com $f_y=500$ MPa.

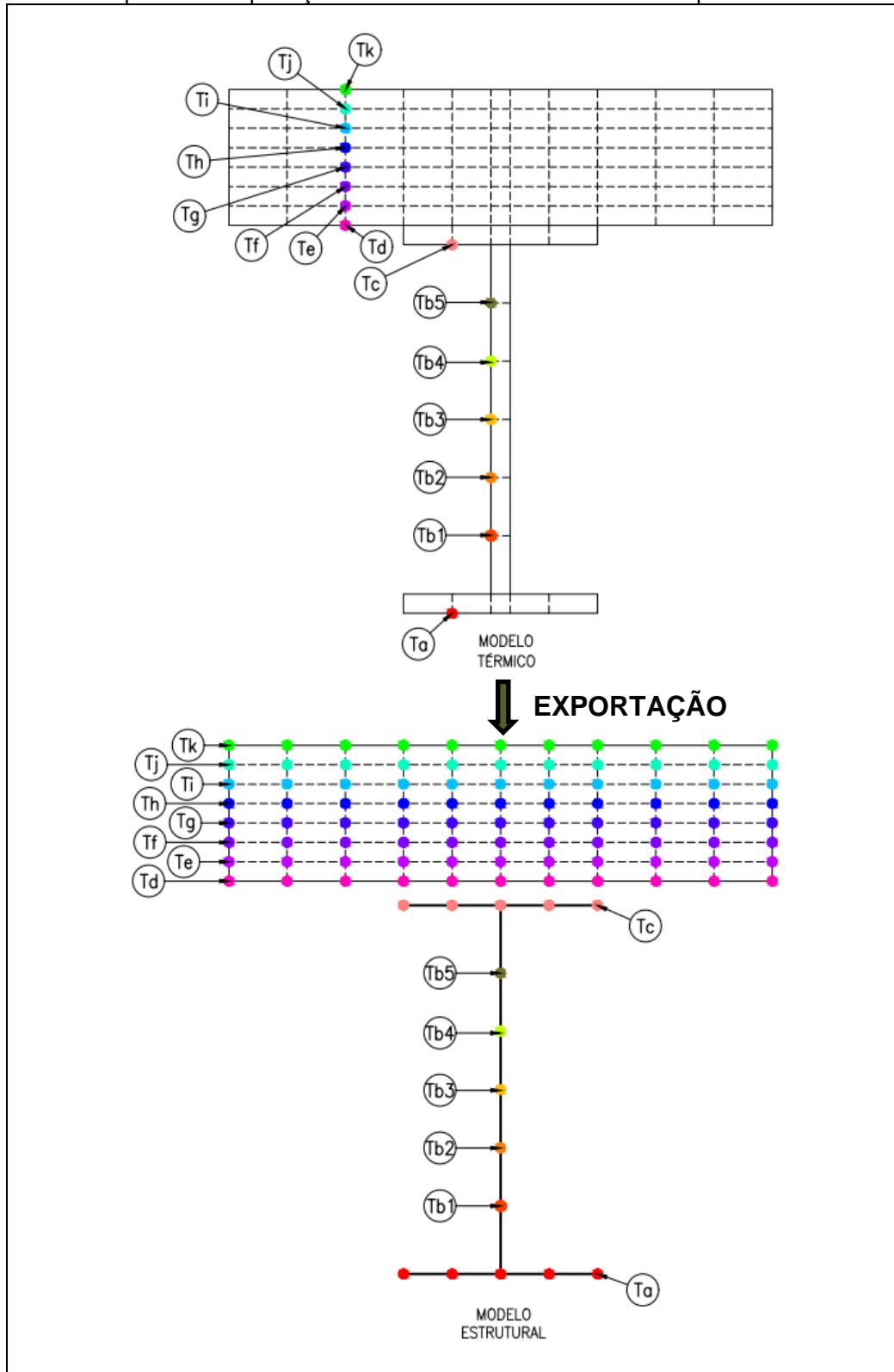


4.1.2.5 Ação Térmica

Primeiramente, as temperaturas em cada nó do modelo da viga mista são calculadas em função do tempo por meio da análise numérica, de acordo com as prescrições do item 4.1.1. Em seguida, as temperaturas calculadas pelo modelo térmico para cada componente da seção transversal do elemento estrutural (mesa inferior, alma, mesa superior e laje) são exportadas em cada instante de tempo para os nós coincidentes no modelo estrutural. Por simplificação, as temperaturas ao longo da altura dos conectores de cisalhamento são adotadas com os mesmos valores dos adotados para a laje de concreto.

Os valores das temperaturas calculadas em cada camada da seção da estrutura são utilizados como dados de entrada no modelo termoestrutural. A exportação entre modelos é realizada de acordo com a ilustração da Figura 64. Esse mesmo recurso foi utilizado por Aziz (2015) para a realização do estudo paramétrico termoestrutural.

Figura 64 – Esquema de exportação dos resultados do modelo térmico para o modelo estrutural.

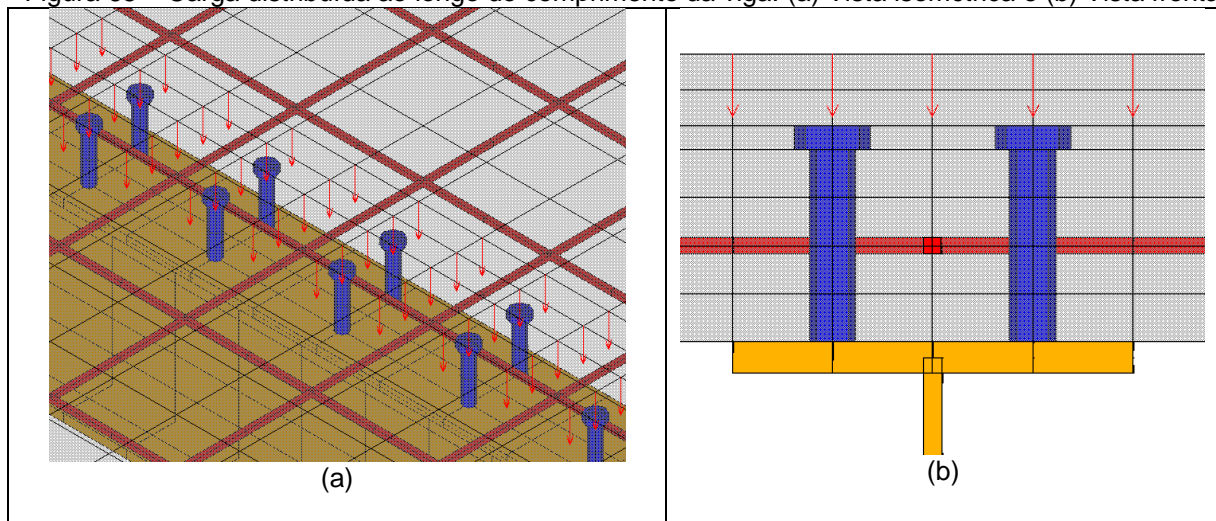


4.1.2.6 Carregamento Estrutural

O carregamento estrutural foi dividido em duas etapas. Na primeira, considerou-se o peso próprio dos componentes. Para isso, adotaram-se os pesos específicos de cada material, sendo 2,4 tf/m³ para o concreto e 7,7 tf/m³ para o aço. Aplicou-se então a ação gravitacional no modelo numérico.

Na segunda etapa, aplicou-se uma sobrecarga de utilização distribuída ao longo do vão da viga. Para isso, foram selecionados os nós da face superior da laje correspondentes à largura da mesa da viga de aço. Em seguida, dividiu-se a força resultante pela quantidade de nós e aplicou-se o valor dessa carga em cada nó, conforme indicado na Figura 65. Os valores das cargas distribuídas adotadas estão descritos no item 4.3.

Figura 65 – Carga distribuída ao longo do comprimento da viga. (a) Vista isométrica e (b) Vista frontal.



4.2 CRITÉRIO DE FALHA

Para os modelos numéricos termoestruturais, utilizou-se como critério de falha estrutural o instante em que o deslocamento do centro da viga ou a taxa de variação do deslocamento ultrapassem os limites estabelecidos na Equação (3.1) pela norma BS 476:Part 20:1987. Em resumo, ocorre a falha estrutural quando o deslocamento do centro da viga ultrapassa o limite de $L/20$ ou $L/30$, caso a taxa de variação seja maior que $L^2/9000d$.

Caso o ANSYS apresente problemas de convergência antes de atingir o limite de deslocamento da viga mista, admite-se que houve falha estrutural no último instante calculado.

4.3 PLANEJAMENTO DAS ANÁLISES PARAMÉTRICAS

Nas análises paramétricas para verificação do comportamento de vigas mistas buscou-se as variações nos parâmetros:

- a) Perfil da viga de aço: adotaram-se perfis comerciais com diferentes alturas e pesos lineares similares, variando-se o índice de esbeltez da alma (h/t_w). A Tabela 5 indica os diferentes perfis adotados;

Tabela 5 – Perfis adotados com peso semelhantes e h/t_w diferentes.

Perfil	h/t_w
W 310 x 52,0	38,2
W 360 x 51,0	46,1
W 410 x 53,0	50,8
W 460 x 52,0	56,4

- b) Perfil da viga de aço: adotaram-se perfis comerciais com alturas e pesos lineares diferentes, mantendo-se os índices de esbeltezes da alma (h/t_w) similares. A Tabela 6 indica os diferentes perfis adotados.

Tabela 6 – Perfis adotados com diferentes pesos lineares e h/t_w similares.

Perfil	h/t_w
W 360 x 51,0	46,1
W 410 x 67,0	43,3
W 460 x 68,0	47,1
W 610 x 155,0	45,1

- c) Vão livre da viga (L): adotaram-se vãos livres de 4 m, 5 m, 6 m e 7 m;

- d) Índice de aproveitamento (i_a): adotaram-se índices de aproveitamento em relação ao momento fletor em temperatura ambiente, conforme equação (4.3), com valores de 0,15, 0,30, 0,50 e 0,70;

$$i_a = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \quad (4.3)$$

Onde:

M_{Sd} é o momento solicitante de cálculo;

M_{Rd} é o momento resistente de cálculo em temperatura ambiente.

- e) Espessura da laje (t_c): foram utilizadas espessuras da laje de 10 cm, 12 cm, 15 cm e 20 cm;
- f) Resistência à compressão do concreto (f_{ck}): foram utilizados f_{ck} de 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa e 35 MPa;
- g) Resistência de escoamento do aço do perfil (f_y): adotaram-se perfis feitos com aço ASTM A36 ($f_y = 250$ MPa), ASTM A572 Gr. 50 ($f_y = 345$ MPa), ASTM A572 Gr. 60 ($f_y = 415$ MPa) e ASTM A992 ($f_y = 450$ MPa);
- h) Taxa de armadura (ρ): foram utilizadas taxas de armadura de 0,12%, 0,20%, 0,31% e 0,48%.

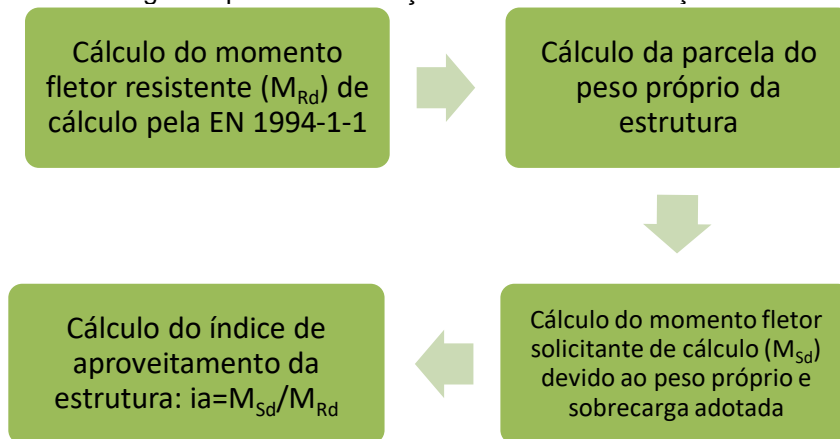
Em todas as vigas foram adotadas dois conectores de cisalhamento na seção transversal da viga (Figura 51), tipo pino com cabeça, com quantidade suficiente para se obter uma interação total entre laje e perfil de aço. Os conectores terão diâmetro do fuste de 19,1 mm, diâmetro da cabeça de 31,7 mm, comprimento total de 90 mm. Os conectores são formados pelo aço ASTM A108 – Grau 1020, com resistência ao escoamento de 345 MPa. Os espaçamentos entre conectores atendem aos valores máximos e mínimos descritos no item 2.1.

As armaduras positivas serão de aço CA-50, com resistência ao escoamento de 500 MPa e módulo de elasticidade de 210 GPa. Nos modelos em que o parâmetro da taxa de armadura é fixo, serão utilizadas 7 barras de Ø8 mm dispostas

longitudinalmente. A largura da laje de concreto é adotada como valor de $2*L/8$, conforme o cálculo da largura efetiva mostrado no item 2.1.

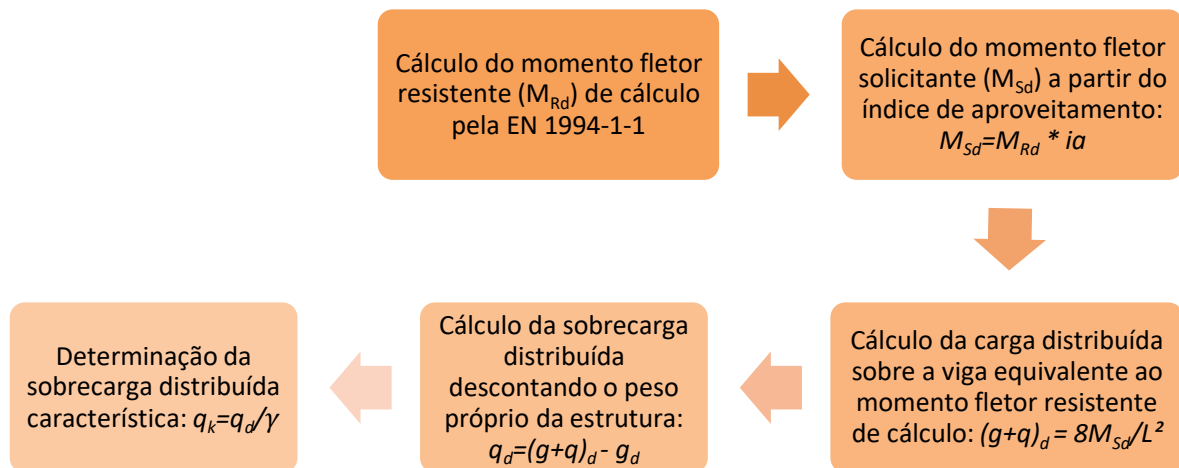
Com todos os parâmetros da viga mista adotados, calcula-se pelas prescrições da EN 1994-1-1:2004 o momento fletor resistente da seção transversal. Em seguida é possível encontrar o momento solicitante de cálculo devido às parcelas do peso próprio da estrutura e da sobrecarga adotada. Com esse valor, determina-se o índice de aproveitamento da estrutura para cada modelo. O fluxograma da Figura 66 mostra as etapas para o cálculo do índice de utilização para cada modelo listado na Tabela 7.

Figura 66 – Fluxograma para determinação do índice de utilização de cada modelo.



Nos modelos em que o índice de aproveitamento da estrutura é um parâmetro de entrada, calcula-se a sobrecarga distribuída sobre a viga mista a partir do índice de aproveitamento adotado. O fluxograma da Figura 67 mostra os passos para o cálculo da sobrecarga distribuída característica em função do índice de aproveitamento adotado.

Figura 67 – Fluxograma para determinação da sobrecarga característica a ser utilizada.



A Tabela 7 lista os diferentes modelos de vigas mistas a serem analisadas com seus diferentes parâmetros. Apresentam-se os parâmetros variados em cada modelo e aqueles que são adotados constantes.

Para facilitar as análises dos resultados e a influência de cada grupo de parâmetros, os modelos 2, 10, 14, 17, 25 e 29, marcados com “*” na Tabela 7, foram adotados com os mesmos parâmetros, ou seja, possuem os mesmos resultados térmicos e termoestruturais.

Tabela 7 – Modelos de vigas mistas a serem analisados com diferentes parâmetros.

Modelo	Parâmetro Variado	Variação do Parâmetro	Parâmetros Constantes
Modelo 1	Perfil da viga com peso linear similar	W 310 x 52,0 (h/tw = 38,2)	qk = 35 kN/m; L = 6 m; tc = 12 cm; fy = 345 MPa; fck = 30 MPa
Modelo 2*		W 360 x 51,0 (h/tw = 46,1)	
Modelo 3		W 410 x 53,0 (h/tw = 50,8)	
Modelo 4		W 460 x 52,0 (h/tw = 56,4)	
Modelo 5	Perfil da viga com índice de esbeltez da alma	W 410 x 67,0 (h/tw = 43,3)	qk = 35 kN/m; L = 6 m; tc = 12 cm; fy = 345 MPa; fck = 30 MPa
Modelo 6		W 460 x 68,0 (h/tw = 47,1)	
Modelo 7		W 610 x 155,0 (h/tw = 45,1)	
Modelo 8	Vão da viga (m)	4	W 360 x 51,0; qk = 35 kN/m; tc = 12 cm; fy = 345 MPa; fck = 30 MPa
Modelo 9		5	
Modelo 10*		6	
Modelo 11		7	
Modelo 12	Índice de aproveitamento	0,15	W 360 x 51,0; L = 6 m; tc = 12 cm; fy = 345 MPa; fck = 30 MPa
Modelo 13		0,3	
Modelo 14*		0,5	
Modelo 15		0,7	
Modelo 16	Espessura Laje (cm)	10	W 360 x 51,0; qk = 35 kN/m; L = 6 m; fy = 345 MPa; fck = 30 MPa
Modelo 17*		12	
Modelo 18		15	
Modelo 19		20	
Modelo 20	Resistência do concreto, fck (MPa)	20	W 360 x 51,0; qk = 35 kN/m; L = 6 m; tc = 12 cm; fy = 345 MPa
Modelo 21		25	
Modelo 22*		30	
Modelo 23		35	
Modelo 24	Resistência ao escoamento do aço, fy (MPa)	250 (ASTM A36)	W 360 x 51,0; qk = 35 kN/m; L = 6 m; tc = 12 cm; fck = 30 MPa
Modelo 25*		345 (ASTM A572 Gr50)	
Modelo 26		415 (ASTM A572 Gr60)	
Modelo 27		450 (ASTM A992)	
Modelo 28	taxa de armadura (%)	0,12	W 360 x 51,0; qk = 35 kN/m; L = 6 m; tc = 12 cm; fy = 345 MPa; fck = 30 MPa.
Modelo 29*		0,20	
Modelo 30		0,31	
Modelo 31		0,48	
* Modelos com os mesmos parâmetros			

Serão analisados 31 modelos de vigas mistas sendo realizadas a análise térmica e termoestrutural para cada um deles.

4.4 RESULTADOS A SEREM EXTRAÍDOS

Será realizada a análise térmica, para todos os modelos de vigas mistas, onde se calcula a temperatura da estrutura, ao longo do tempo, em situação de incêndio. Os resultados obtidos da temperatura, nos nós de cada elemento da malha da estrutura, serão plotados.

Em seguida, serão executadas as análises termoestruturais. Como resultado, será calculado o deslocamento vertical do centro da viga mista ao longo do incêndio. A partir desses resultados e dos critérios de falhas discutidos no item 4.2, será estabelecido o tempo em que a estrutura levará para atingir o colapso. A partir dos resultados do tempo para falha estrutural de cada modelo, poderá ser observada a influência de cada parâmetro no comportamento termoestrutural de uma viga mista.

4.5 CÁLCULO ANALÍTICO

Os mesmos modelos listados na Tabela 7 serão calculados analiticamente de acordo com as prescrições normativas expostas no item 2.4. Serão adotados os mesmos parâmetros utilizados no cálculo numérico.

Primeiramente serão calculadas as temperaturas no perfil da viga ao longo do tempo, conforme sequência exposta no item 2.4.1.1. Em seguida, são calculadas as temperaturas ao longo da espessura da laje de concreto para os tempos tabelados, conforme descrito no item 2.4.1.2. Embora o método de análise térmica para o perfil metálico possibilita encontrar os valores das temperaturas nos elementos a cada intervalo máximo de 5 segundos, o método adotado para análise térmica da laje de concreto limita o cálculo da temperatura na laje de concreto para os tempos tabelados (30, 60, 90, 120 e 180 minutos).

A partir das temperaturas encontradas para os elementos da viga mista, será calculado o momento fletor resistente da seção conforme descrito no item 2.4.2. O momento fletor resistente será calculado para os tempos de 30 minutos e 60 minutos, uma vez que se percebeu que é os modelos propostos chegam ao colapso em até 60 minutos de exposição à curva de incêndio padrão. Os momentos fletores resistentes de cálculo em situação de incêndio para os tempos de 30 e 60 minutos

($M_{Rd,\theta,30}$ e $M_{Rd,\theta,60}$) são comparados com o momento fletor resistente de cálculo em temperatura ambiente ($M_{Rd,ambiente}$) a fim de quantificar o índice de redução da capacidade resistente devido às altas temperaturas ($i_{M,\theta}$), conforme equação (4.4). O cálculo do momento resistente em temperatura ambiente é calculado de acordo com prescrições da EN 1994-1-1:2004.

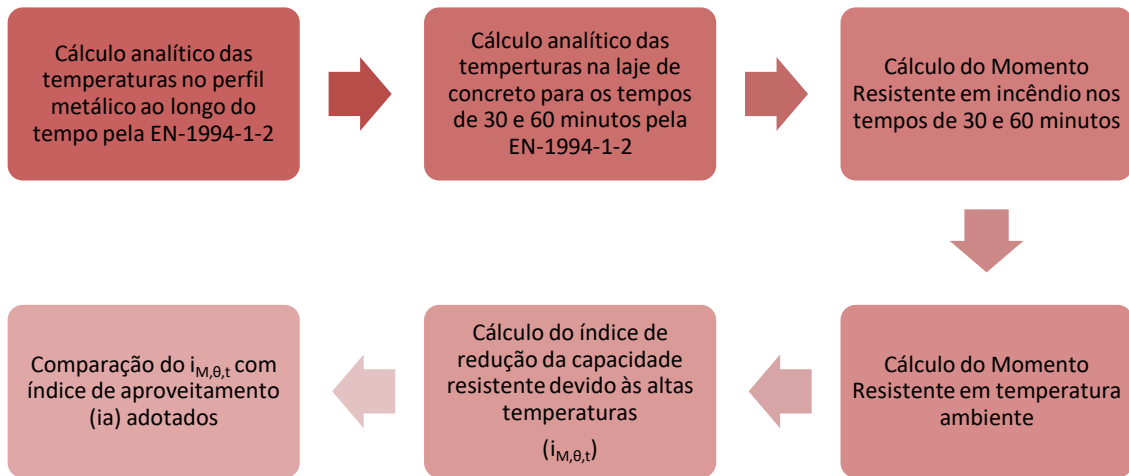
$$i_{M,\theta,t} = \frac{M_{Rd,\theta}}{M_{Rd,ambiente}} \quad (4.4)$$

Por fim, compara-se o índice de redução da capacidade resistente devido às altas temperaturas ($i_{M,\theta}$) com o índice de aproveitamento (ia) adotado para cada modelo:

- Se $i_{M,\theta,30} < ia$: espera-se que a estrutura atinja o limite da resistência estrutural em um tempo inferior a 30 minutos de exposição à curva do incêndio-padrão;
- Se $i_{M,\theta,60} < ia$: espera-se que a estrutura atinja o limite da resistência estrutural em um tempo inferior a 60 minutos de exposição à curva do incêndio-padrão;
- Se $i_{M,\theta,60} \geq ia$: espera-se que a estrutura atinja o limite da resistência estrutural em um tempo igual ou superior a 60 minutos de exposição à curva do incêndio-padrão.

Os tempos esperados para falha estrutural da viga mista encontrados analiticamente serão comparados com os tempos calculados por meio dos modelos numéricos. A Figura 68 mostra os passos do cálculo analítico para estimar o tempo de falha estrutural de cada modelo de vigas mistas.

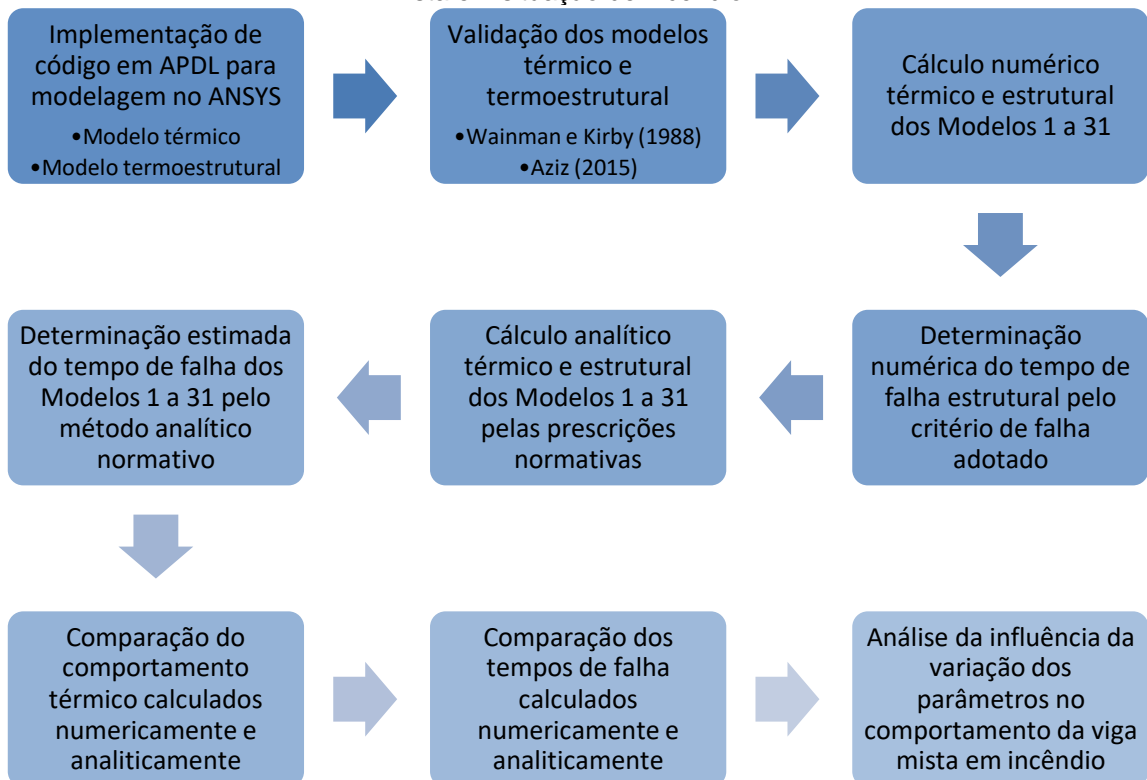
Figura 68 – Fluxograma do cálculo analítico dos modelos adotados.



4.6 FLUXOGRAMA GERAL

A Figura 69 apresenta o fluxograma geral da abordagem metodológica adotada para estudo do comportamento térmico e estrutural de vigas mistas em situação de incêndio.

Figura 69 – Fluxograma da abordagem metodológica adotada para estudo do comportamento de viga mista em situação de incêndio.



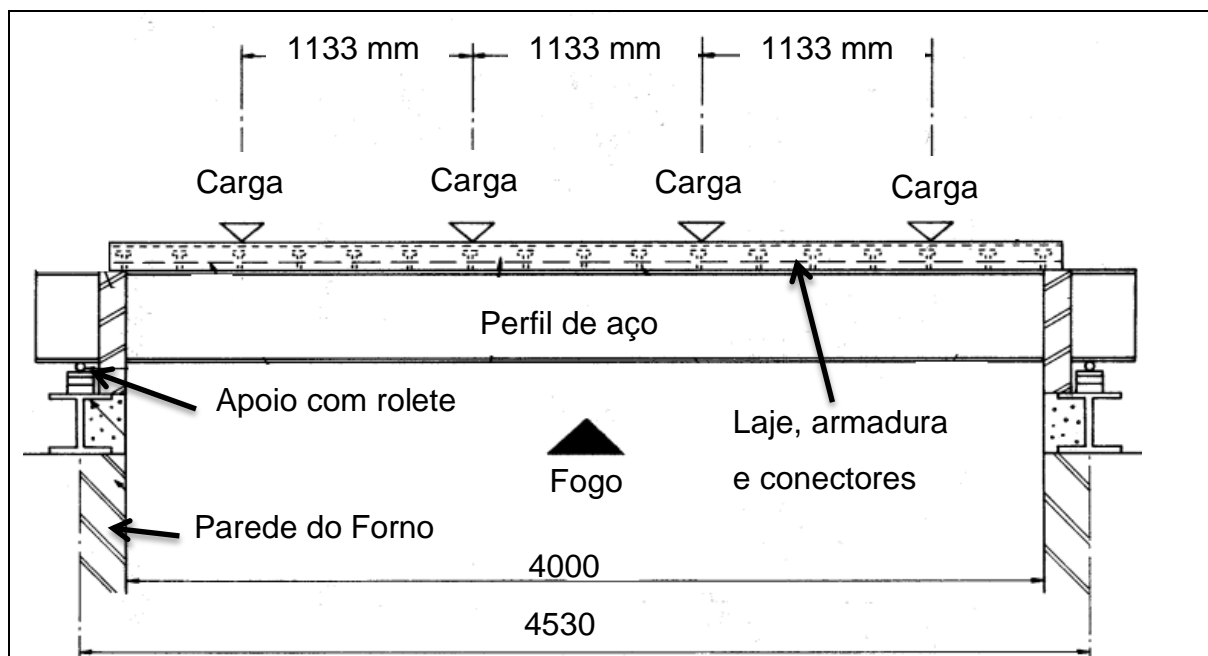
5 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Foram utilizados os experimentos de Wainman e Kirby (1988) e de Aziz (2015) realizados com vigas mistas em elevadas temperaturas, a fim de validar os resultados do modelo numérico térmico e estrutural desenvolvido no programa computacional ANSYS (versão 21.1).

5.1 EXPERIMENTOS DE WAINMAN E KIRBY (1988)

Wainman e Kirby (1988) realizaram experimentos denominados Ensaio 15 e Ensaio 16 com vigas mistas de aço e concreto em situação de incêndio. Os ensaios foram realizados com perfis de aço conectados à laje de concreto maciça por meio de conectores. A viga era apoiada sobre roletes com vão livre de 4530 mm. As estruturas foram submetidas à curva de temperatura *versus* tempo do incêndio padrão da ISO 834:1999. Quatro cargas concentradas foram aplicadas sobre a laje durante o ensaio, conforme o arranjo geral dos experimentos indicado na Figura 70.

Figura 70 – Arranjo geral dos ensaios realizados em vigas mistas em elevadas temperaturas



Fonte: Wainman e Kirby (1988). Adaptado pelo autor.

Como resultados de cada ensaio, os autores informam a temperatura dos componentes da seção ao longo do tempo, por meio da leitura de termopares instalados ao longo da viga mista, e o deslocamento vertical do centro da viga.

Tabela 9 – Deslocamento vertical medidos no centro da viga mista por Wainman e Kirby (1988) no Ensaio 15.

Tempo (min)	Deslocamento δ (mm)	L/δ
0	0	-
3	-6	755,0
6	-17	266,5
9	-29	156,2
12	-41	110,5
15	-52	87,1
18	-63	71,9
21	-75	60,4
24	-88	51,5
27	-105	43,1
30	-123	36,8
33	-141	32,1
35	-154	29,4
36	-163	27,8
39	-185	24,5
40	-190	23,8

5.1.1.1 Resultados do Modelo Numérico

Foi elaborado um modelo numérico no programa computacional ANSYS (versão 21.1) a fim de simular o comportamento da viga mista do Ensaio 15 de Wainman e Kirby (1988). Conforme indicado no item 3.3, calculou-se a emissividade equivalente média a ser considerada em função da geometria do forno e dos resultados medidos durante o ensaio. A emissividade equivalente calculada ao longo do tempo é apresentada na Figura 72. Para simplificação, foi adotada uma emissividade de 0,25. A Figura 73 mostra o modelo numérico desenvolvido no ANSYS para o Ensaio 15.

Figura 72 – Emissividade calculada ao longo do tempo para o Ensaio 15.

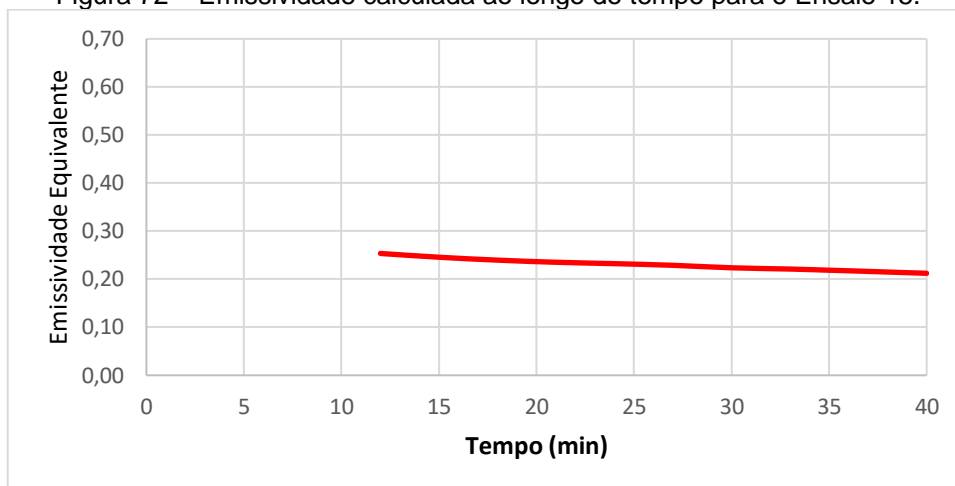
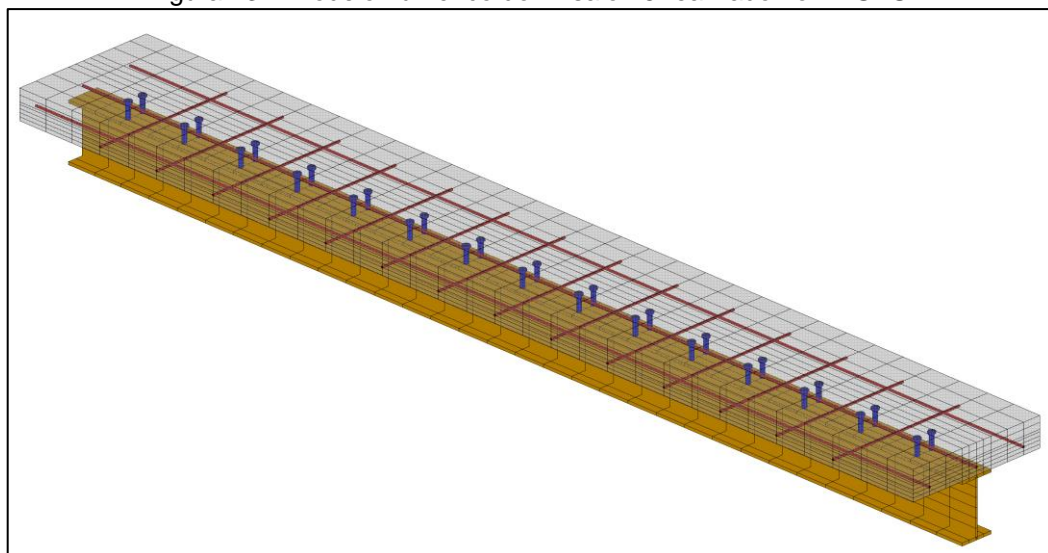
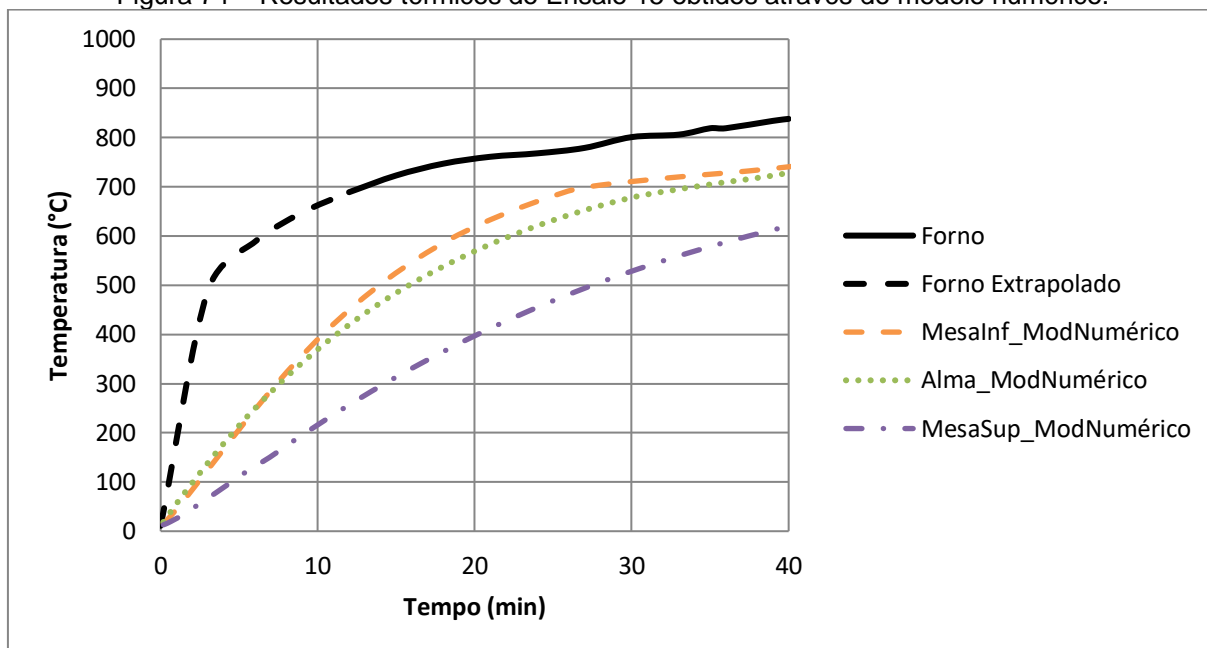


Figura 73 – Modelo numérico do Ensaio 15 realizado no ANSYS.



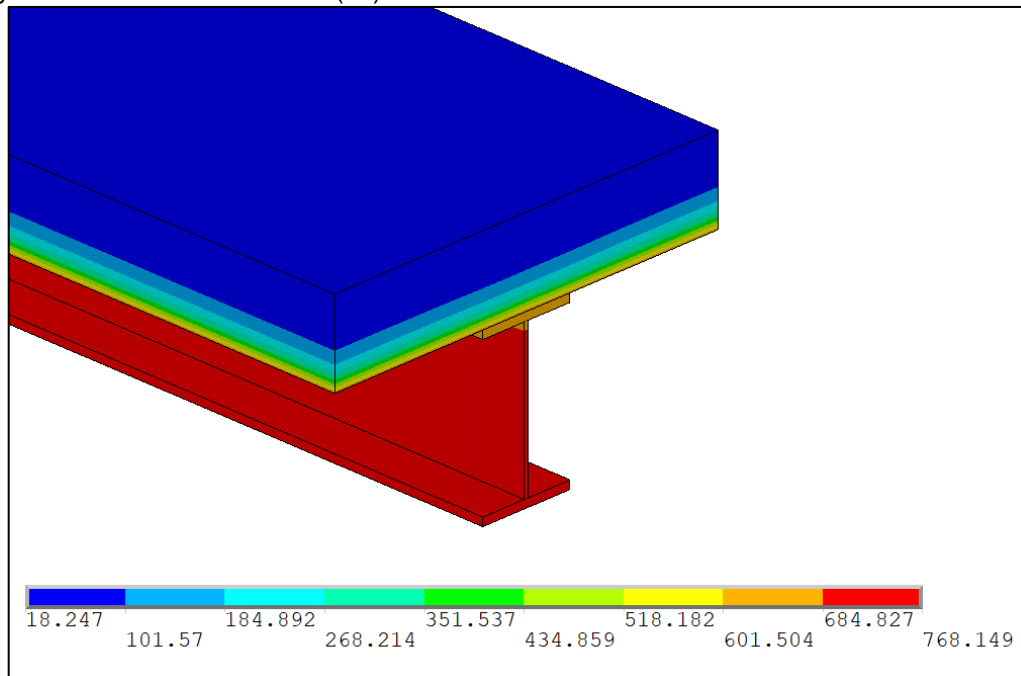
Os resultados térmicos encontrados a partir do modelo numérico são mostrados na Figura 74. Estão indicadas as temperaturas do forno e aquelas obtidas na mesa inferior, na alma e na mesa superior da viga ensaiada. Os resultados da temperatura do forno abaixo de 12 minutos foram extrapolados em função da forma do incêndio-padrão da ISO 834:1999.

Figura 74 – Resultados térmicos do Ensaio 15 obtidos através do modelo numérico.



A Figura 75 mostra o resultado térmico do modelo numérico do Ensaio 15 obtido após 40 minutos de incêndio.

Figura 75 – Resultado térmico (°C) obtido no modelo numérico do Ensaio 15 aos 40 minutos.



A Figura 76, Figura 77 e Figura 78 mostram a comparação dos resultados das temperaturas obtidos experimentalmente e a partir do modelo numérico para mesa inferior, alma e mesa superior da viga mista do Ensaio 15.

Figura 76 – Comparação dos resultados térmicos da mesa inferior da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 15.

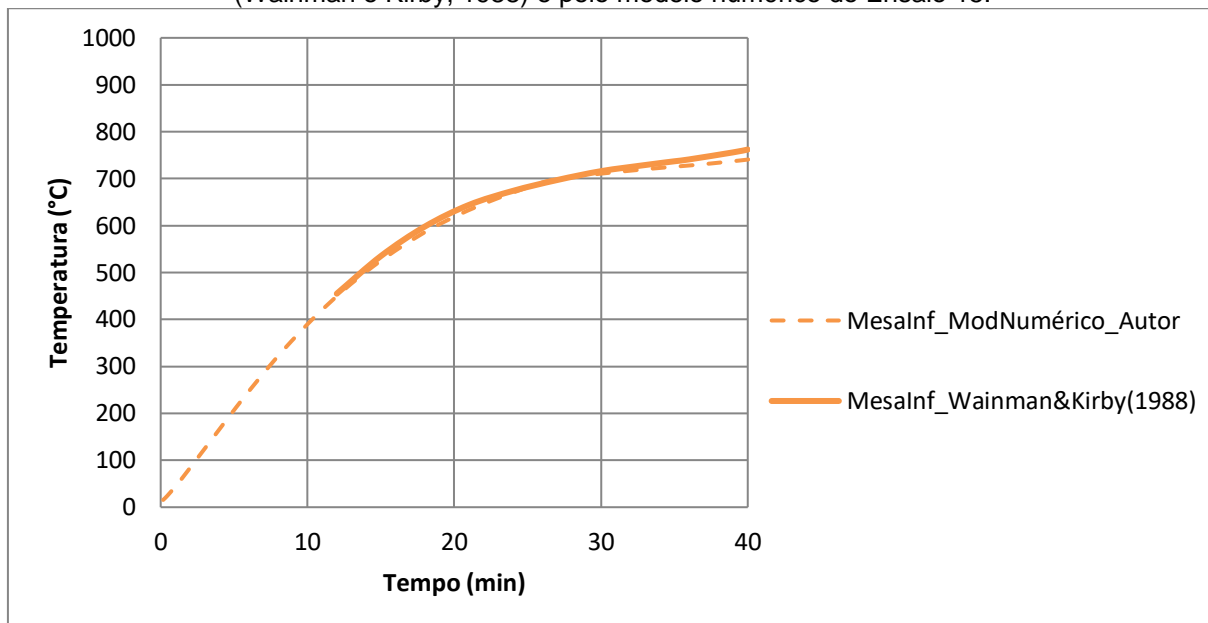


Figura 77 – Comparação dos resultados térmicos da alma da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 15.

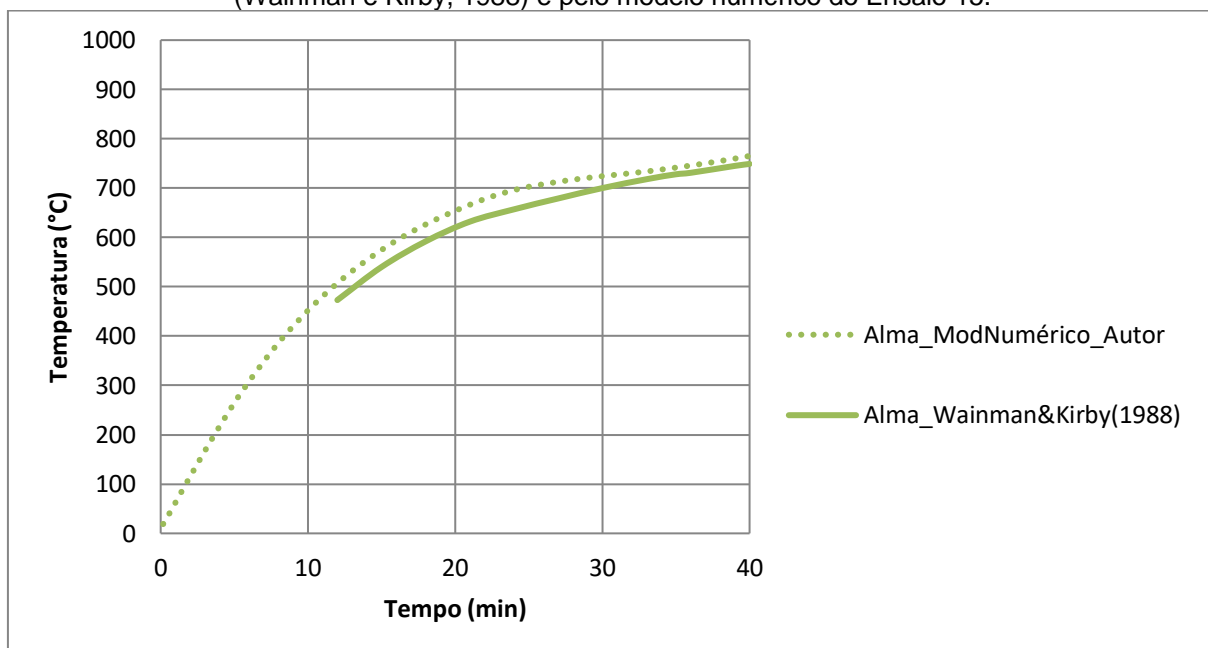
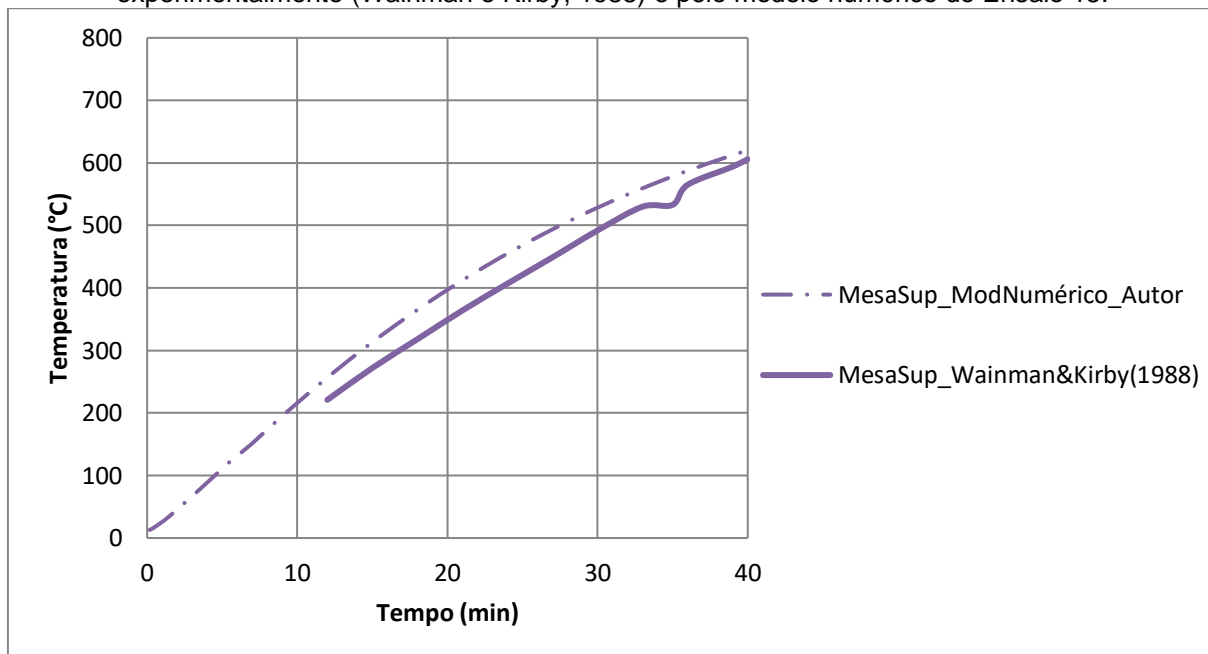
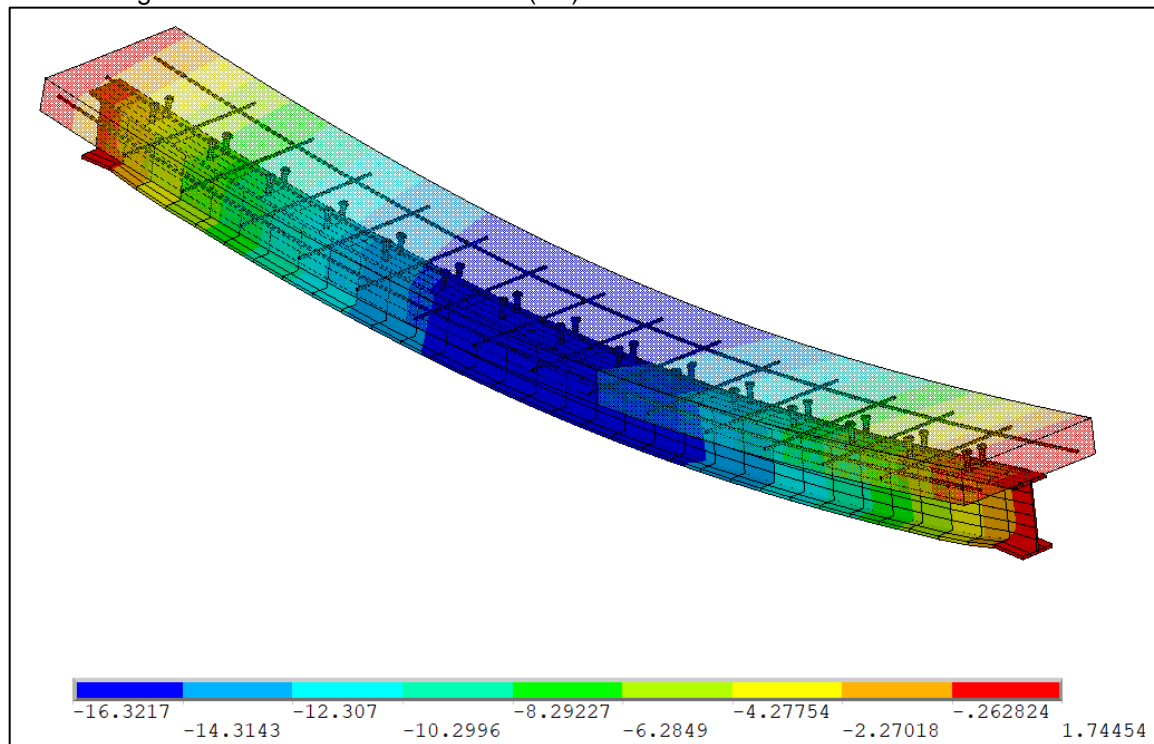


Figura 78 – Comparação dos resultados térmicos da mesa superior da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 15.



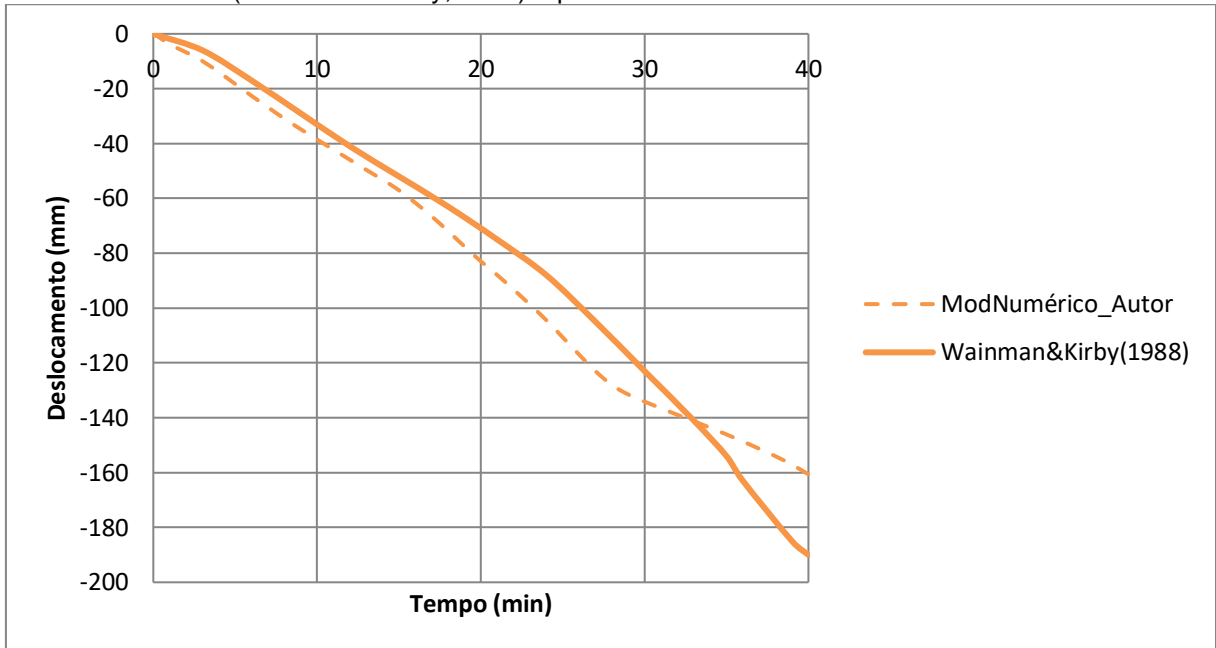
A Figura 79 mostra o resultado do deslocamento vertical do centro da viga obtidos pelo modelo numérico do Ensaio 15 após 40 minutos de incêndio.

Figura 79 – Deslocamento vertical (cm) calculada do Ensaio 15 aos 40 minutos.



A Figura 80 mostra a comparação dos deslocamentos verticais do centro da viga obtidos experimentalmente e por meio do modelo numérico do Ensaio 15.

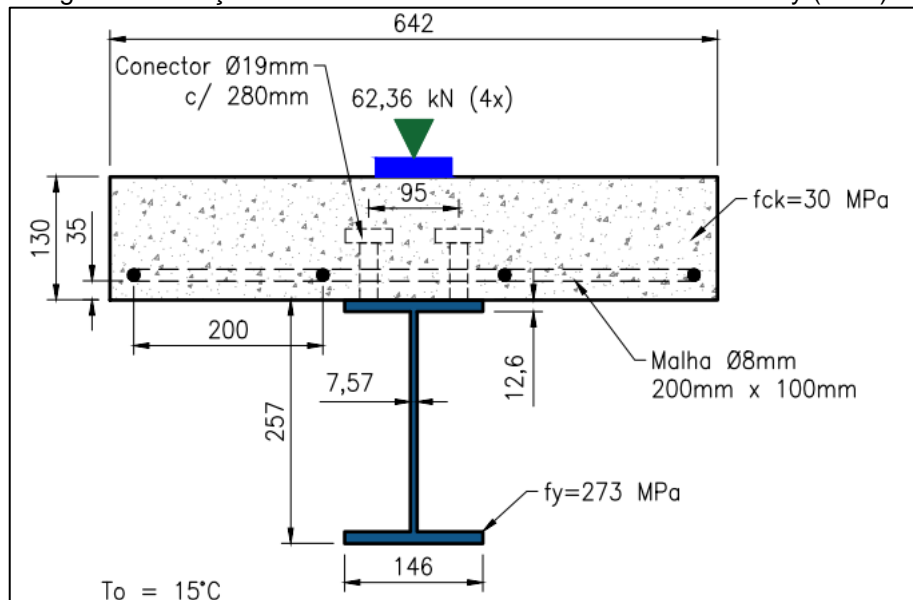
Figura 80 – Comparação dos deslocamentos verticais do centro da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 15.



5.1.2 Ensaio 16

A Figura 81 apresenta os dados do Ensaio 16 realizado por Wainman e Kirby (1988).

Figura 81 – Seção transversal do Ensaio 16 de Wainman e Kirby (1988).



As temperaturas medidas no forno e na seção da viga mista durante o Ensaio 16 são indicadas na Tabela 10 e os deslocamentos verticais medidos do centro da viga durante o Ensaio 16 são indicados na Tabela 11.

Tabela 10 – Resultados térmicos medidos na viga mista por Wainman e Kirby (1988) no Ensaio 16.

Tempo (min)	Temperatura (°C)			
	Forno	Mesa Inferior	Alma	Mesa Superior
0	15	15	15	15
3	546	153	183	137
6	586	248	285	185
9	640	359	388	239
12	678	462	476	300
15	717	544	542	353
18	736	602	590	400
21	762	642	625	448
22	780	654	636	469
23	785	666	647	488

Tabela 11 – Deslocamento vertical medidos no centro da viga mista por Wainman e Kirby (1988) no Ensaio 16.

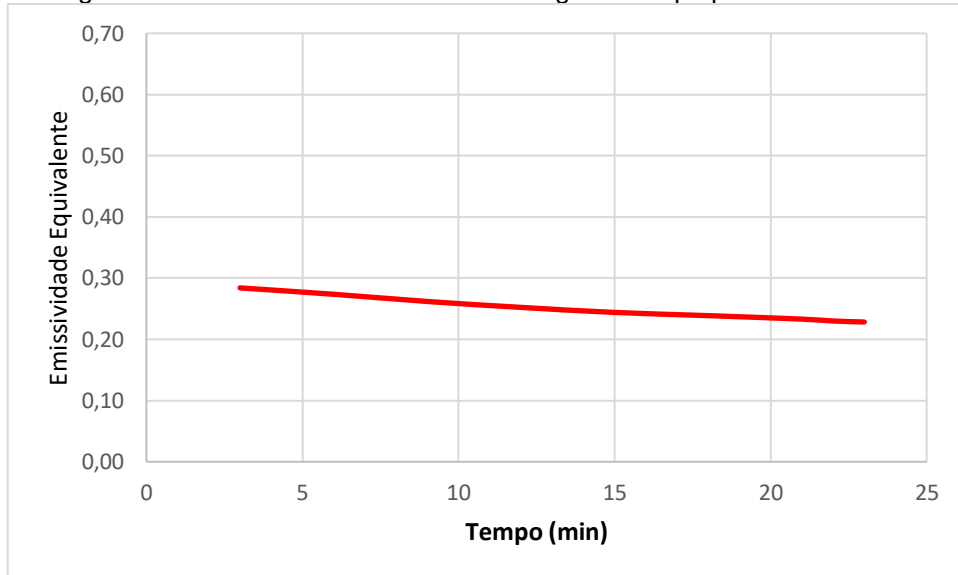
Tempo (min)	Deslocamento δ (mm)	L/δ
0	0	-
3	-2	2265,0
6	-11	411,8
9	-25	181,2
12	-41	110,5
15	-62	73,1
18	-86	52,7
21	-121	37,4
22	-137	33,1
23	-224	20,2

5.1.2.1 Resultados do Modelo Numérico

Foi elaborado um modelo numérico no software ANSYS (versão 21.1) a fim de simular o comportamento da viga mista do Ensaio 16 de Wainman e Kirby (1988). Conforme indicado no item 3.3, calculou-se a emissividade equivalente média a ser considerada em função da geometria do forno e dos resultados medidos durante o

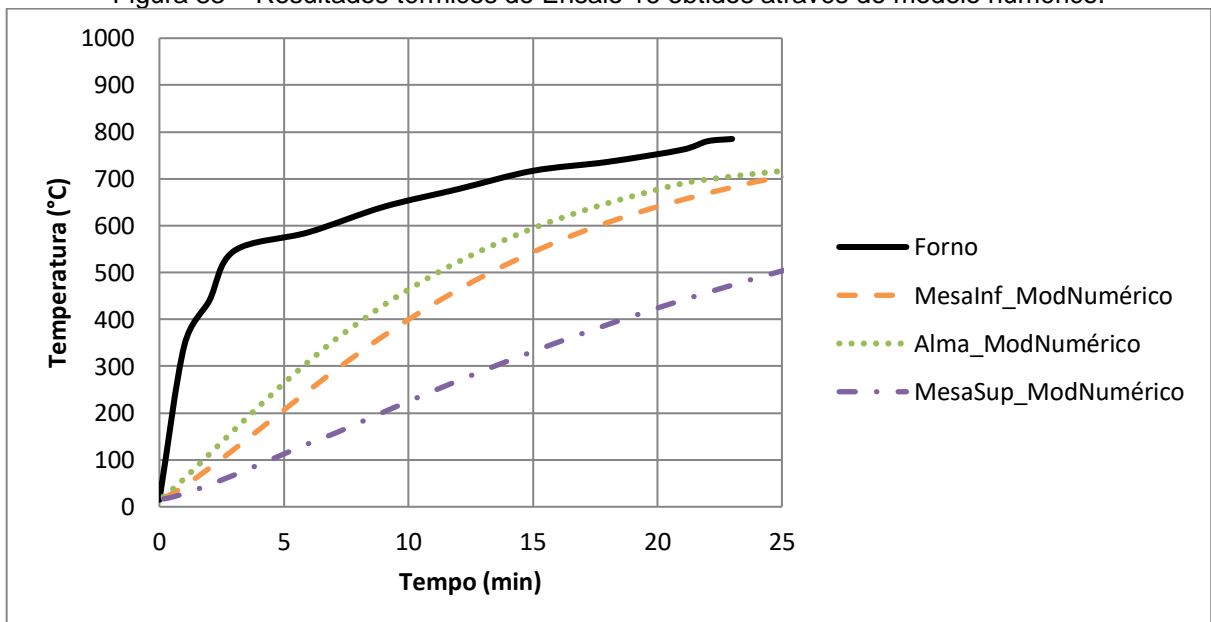
ensaio. A emissividade equivalente calculada ao longo do tempo é apresentada na Figura 82. Para simplificação, foi adotada uma emissividade de 0,25.

Figura 82 – Emissividade calculada ao longo do tempo para o Ensaio 16.



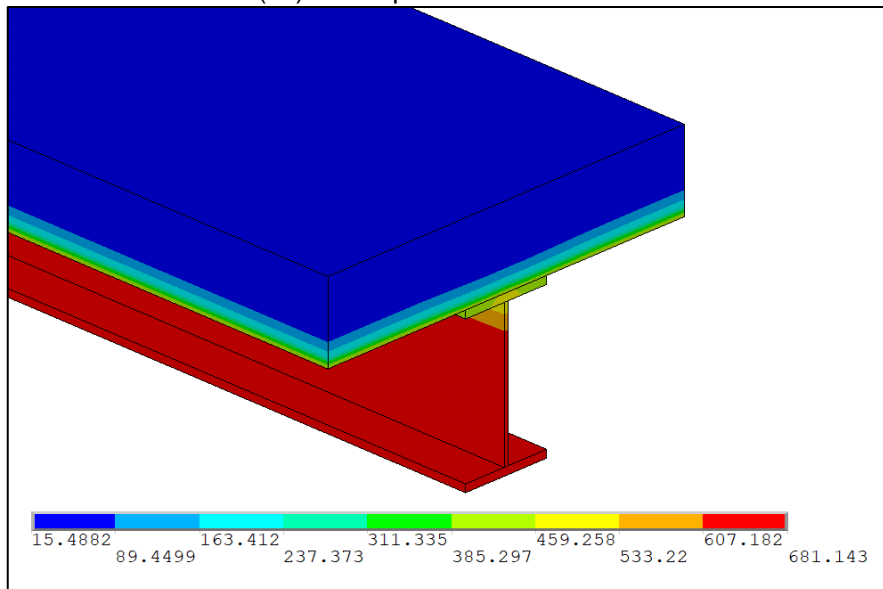
Os resultados térmicos encontrados a partir do modelo numérico estão apresentados na Figura 83. Estão indicadas as temperaturas do forno e aquelas obtidas para a mesa inferior, alma e mesa superior da viga ensaiada.

Figura 83 – Resultados térmicos do Ensaio 16 obtidos através do modelo numérico.



A Figura 84 mostra o resultado térmico do modelo numérico do Ensaio 16 obtido após 20 minutos de incêndio.

Figura 84 – Resultado térmico (°C) obtido pelo modelo numérico do Ensaio 16 aos 20 minutos.



A Figura 85, a Figura 86 e a Figura 87 mostram a comparação dos resultados das temperaturas obtidos experimentalmente e por meio do modelo numérico para mesa inferior, alma e mesa superior da viga mista do Ensaio 16.

Figura 85 – Comparação dos resultados térmicos da mesa inferior da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 16.

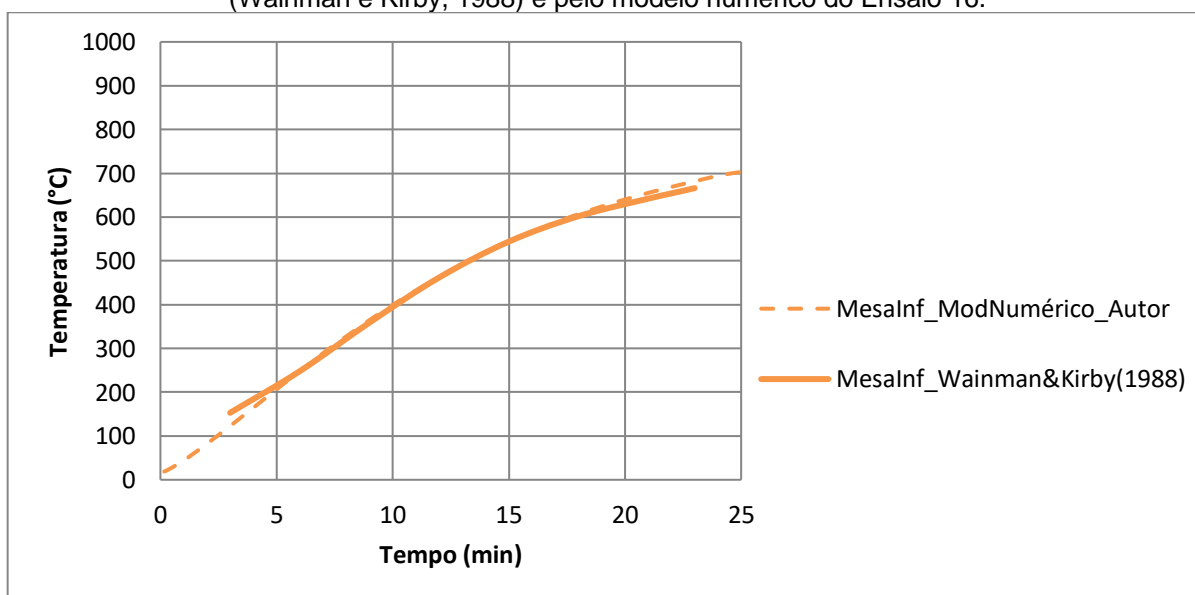


Figura 86 – Comparação dos resultados térmicos da alma da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 16.

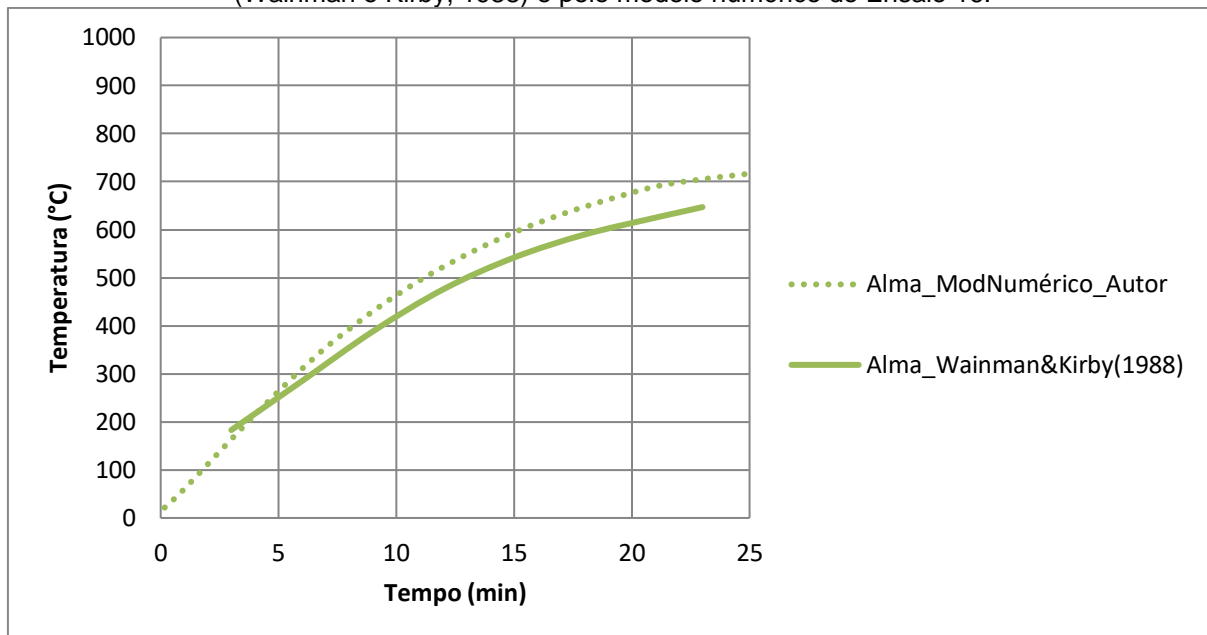
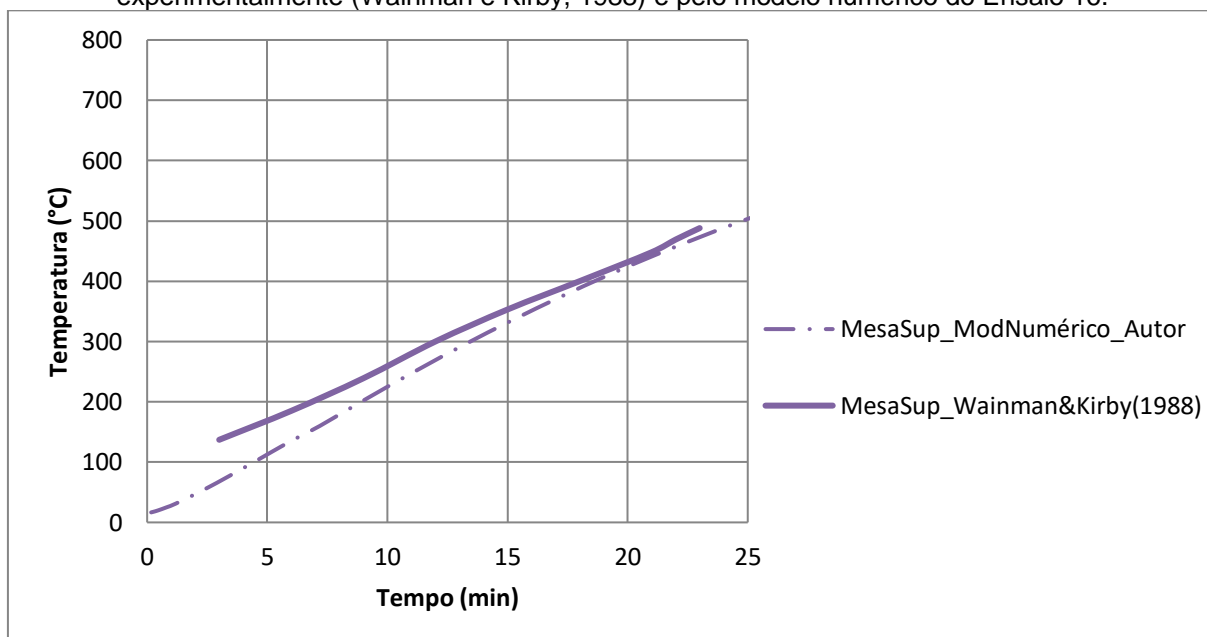
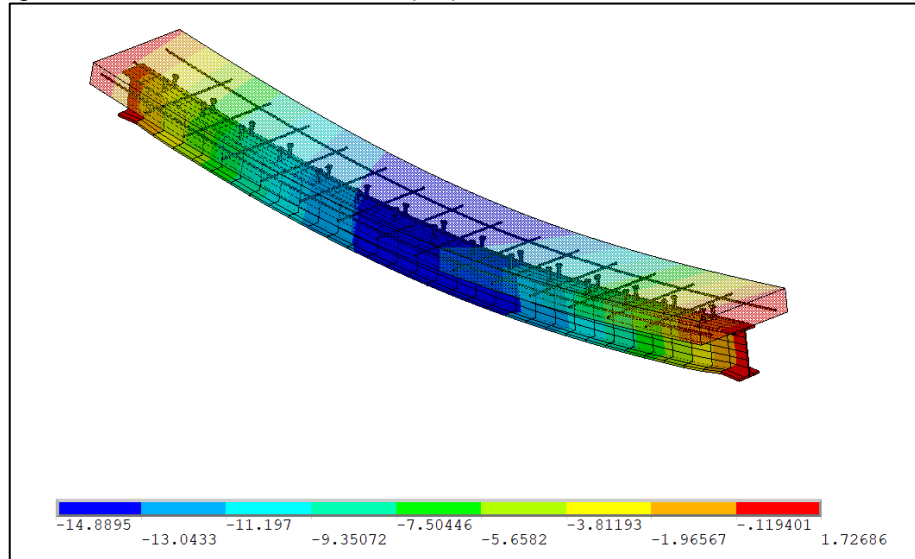


Figura 87 – Comparação dos resultados térmicos da mesa superior da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 16.



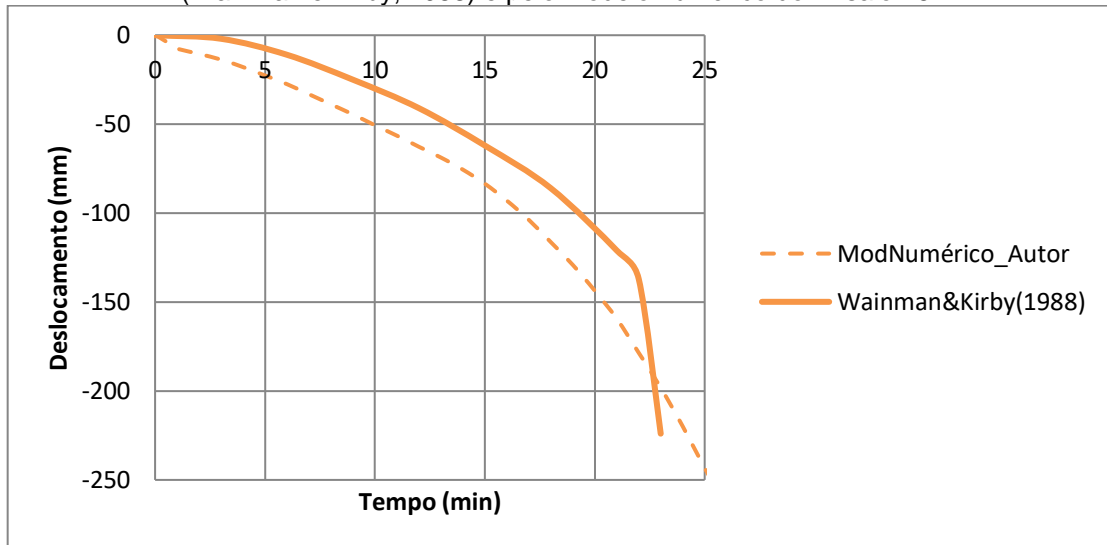
A Figura 88 mostra o resultado do deslocamento vertical do centro da viga obtidos pelo modelo numérico do Ensaio 16 após 20 minutos de incêndio.

Figura 88 – Deslocamento vertical (cm) calculada do Ensaio 16 aos 20 minutos.



A Figura 89 mostra a comparação dos deslocamentos verticais do centro da viga obtidos experimentalmente e pelo modelo numérico do Ensaio 16.

Figura 89 – Comparação dos deslocamentos verticais do centro da viga obtidos experimentalmente (Wainman e Kirby, 1988) e pelo modelo numérico do Ensaio 16.



5.2 EXPERIMENTO DE AZIZ (2015)

Aziz (2015) realizou ensaios experimentais térmicos e termoestruturais, em vigas mistas típicas de ponte. Dentre os experimentos realizados, será utilizado o ensaio realizado na Viga G1, conforme denominação do autor.

A Viga G1 era composta por um perfil de aço W24x62 conectado à laje de concreto maciça com conectores de cisalhamento. A viga é apoiada sobre roletes com vão

livre de 3658 mm. A estrutura foi submetida à curva de temperatura *versus* tempo de incêndio padrão da ASTM E119. Uma carga concentrada foi aplicada sobre a laje durante o ensaio no valor de 691 kN. As seções longitudinal e transversal, dentre outras informações do experimento, estão indicadas na Figura 90 e na Figura 91, respectivamente.

Figura 90 – Seção longitudinal da Viga G1 ensaiada por Aziz (2015).

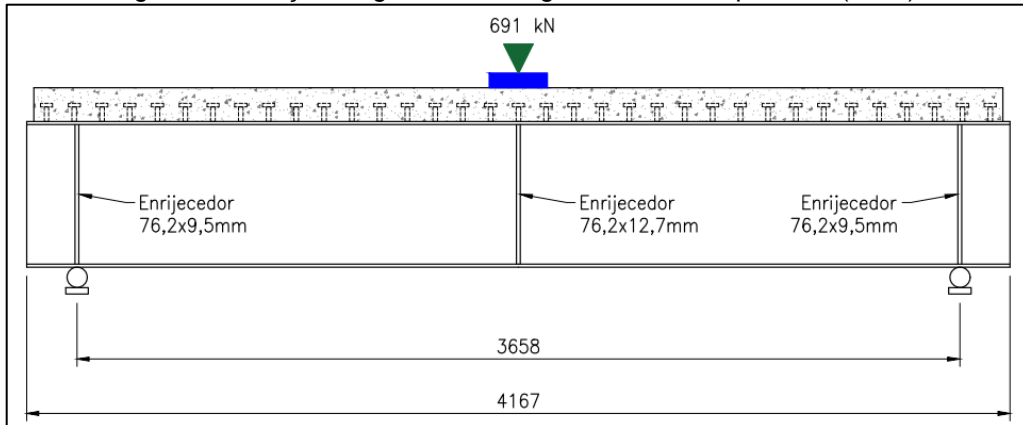
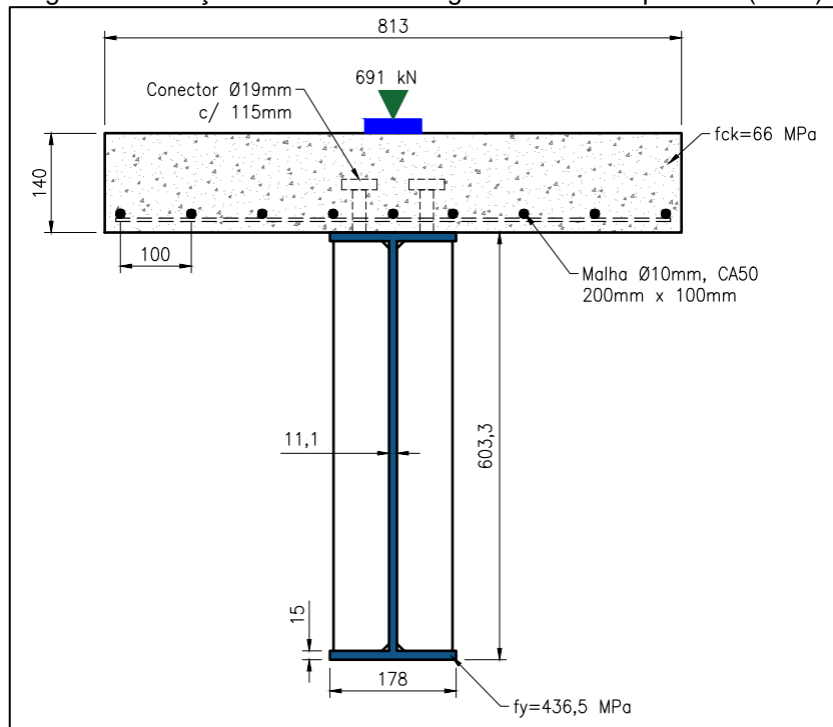


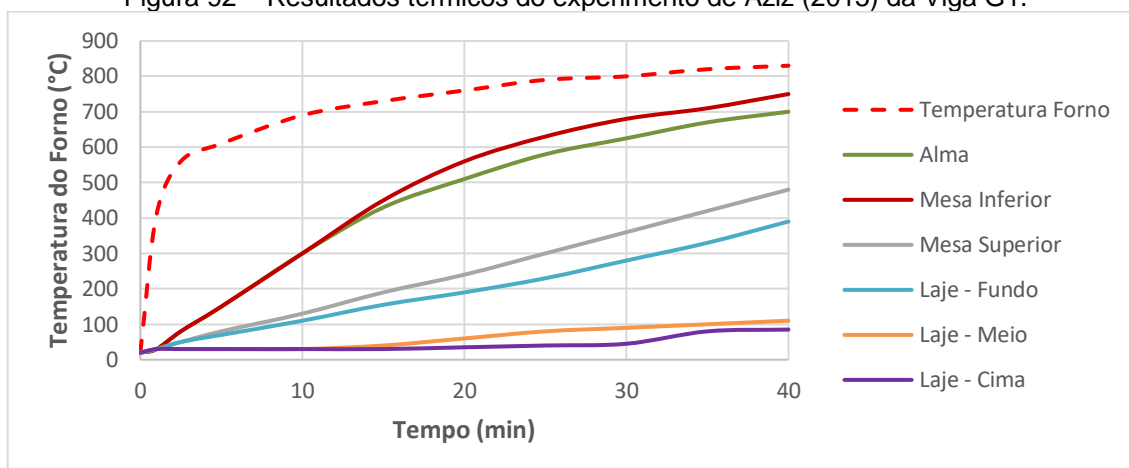
Figura 91 – Seção transversal da Viga G1 ensaiada por Aziz (2015).



5.2.1 Resultados dos experimentos

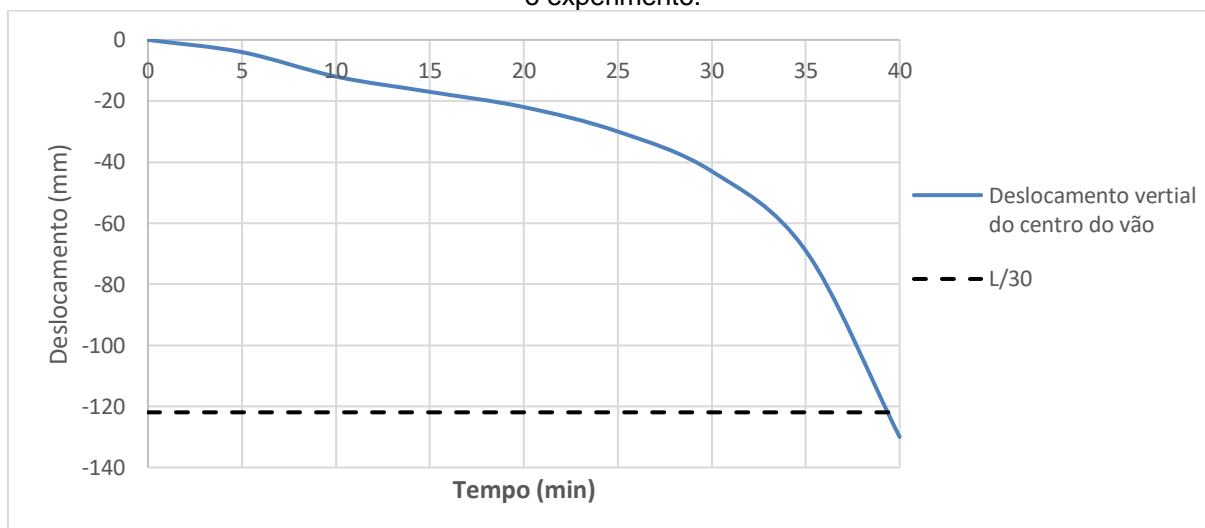
Os resultados térmicos do experimento são apresentados na Figura 92 onde são informadas as temperaturas do forno ao longo do tempo e as temperaturas dos trechos do perfil de aço e da laje de concreto.

Figura 92 – Resultados térmicos do experimento de Aziz (2015) da Viga G1.



O resultado do deslocamento vertical ao longo do tempo no centro da viga, medido durante o experimento, é apresentado na Figura 93.

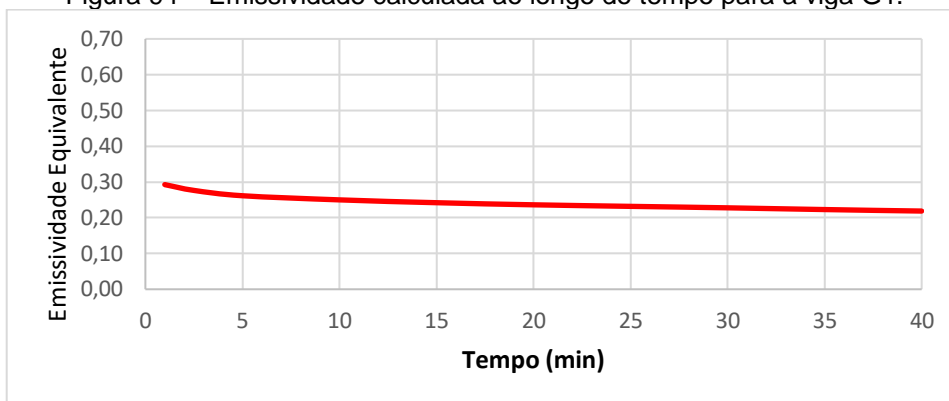
Figura 93 – Resultado do deslocamento vertical do centro da viga G1 medido por Aziz (2015) durante o experimento.



5.2.2 Resultados do modelo numérico

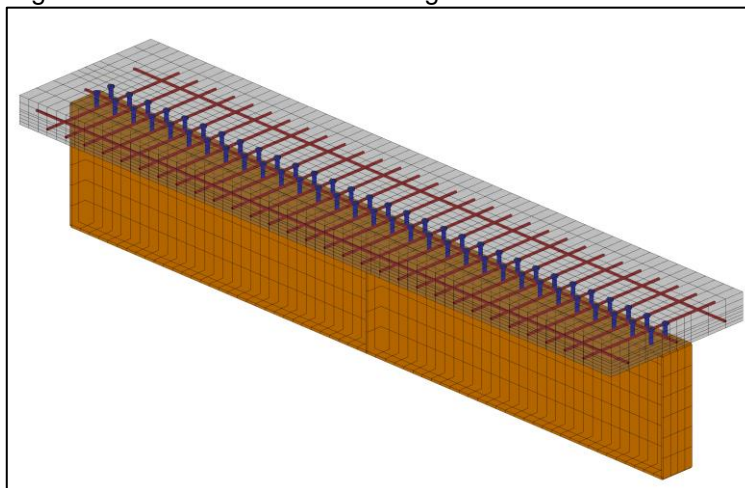
Foi elaborado um modelo numérico no programa computacional ANSYS a fim de simular a situação da viga G1 ensaiada por Aziz (2015). Conforme indicado no item 3.3, calculou-se a emissividade equivalente média a ser considerada em função da geometria do forno e dos resultados medidos durante o ensaio. A emissividade equivalente calculada ao longo do tempo é apresentada na Figura 94. Para simplificação, foi adotada uma emissividade de 0,25.

Figura 94 – Emissividade calculada ao longo do tempo para a viga G1.



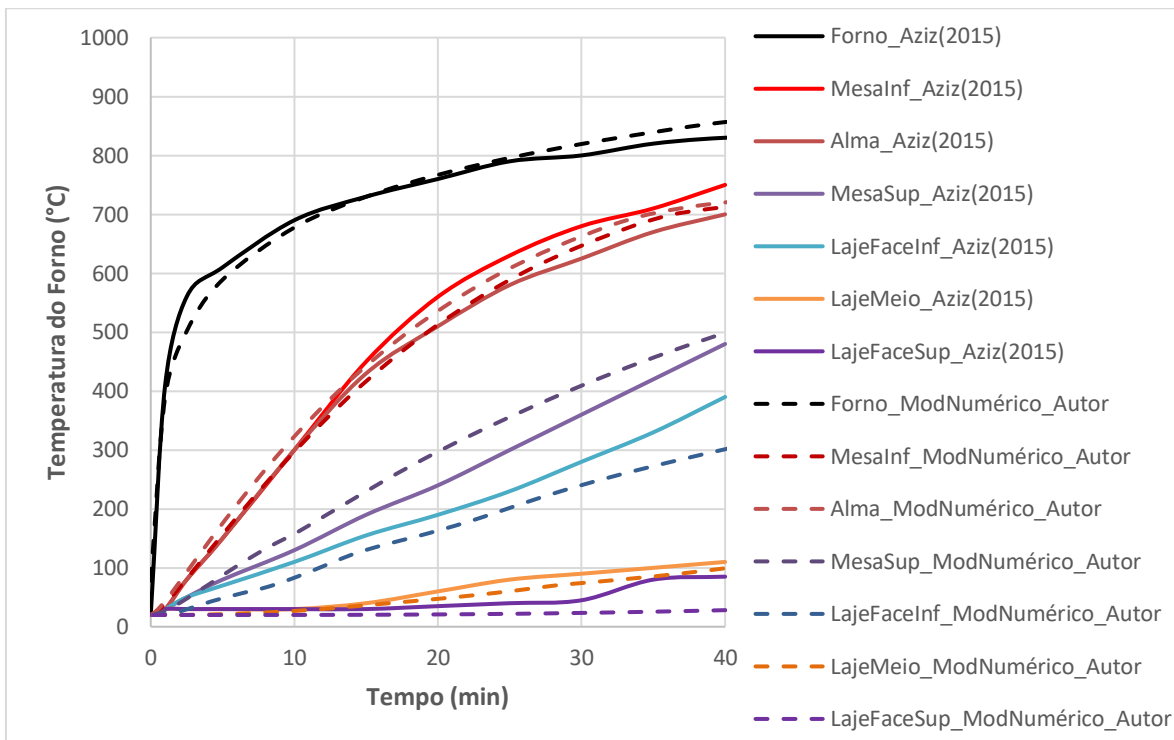
A Figura 95 mostra o modelo numérico desenvolvido no ANSYS para a Viga G1.

Figura 95 – Modelo numérico da Viga G1 realizado no ANSYS.



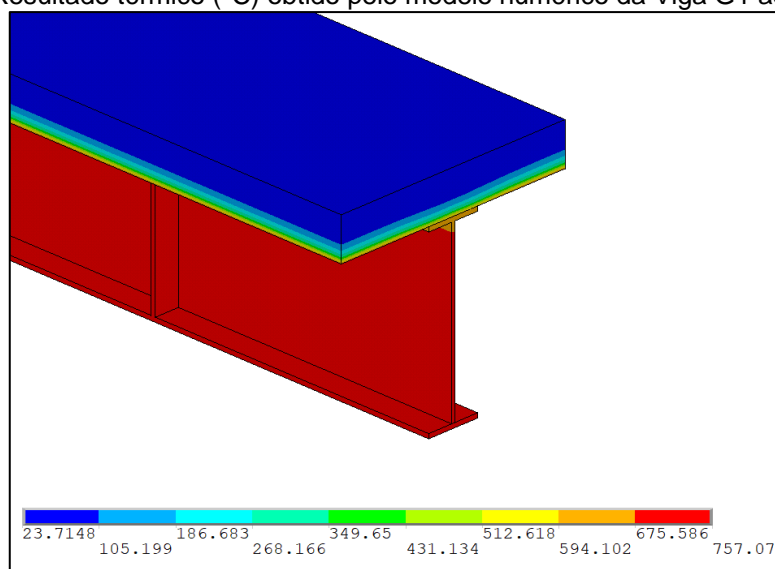
Os resultados térmicos encontrados a partir do modelo numérico estão apresentados na Figura 96. São indicadas as temperaturas da seção calculadas por meio do modelo numérico e as encontradas experimentalmente por Aziz (2015).

Figura 96 – Comparação das temperaturas calculadas pelo modelo numérico para a viga G1 com os resultados obtidos experimentalmente por Aziz (2015).



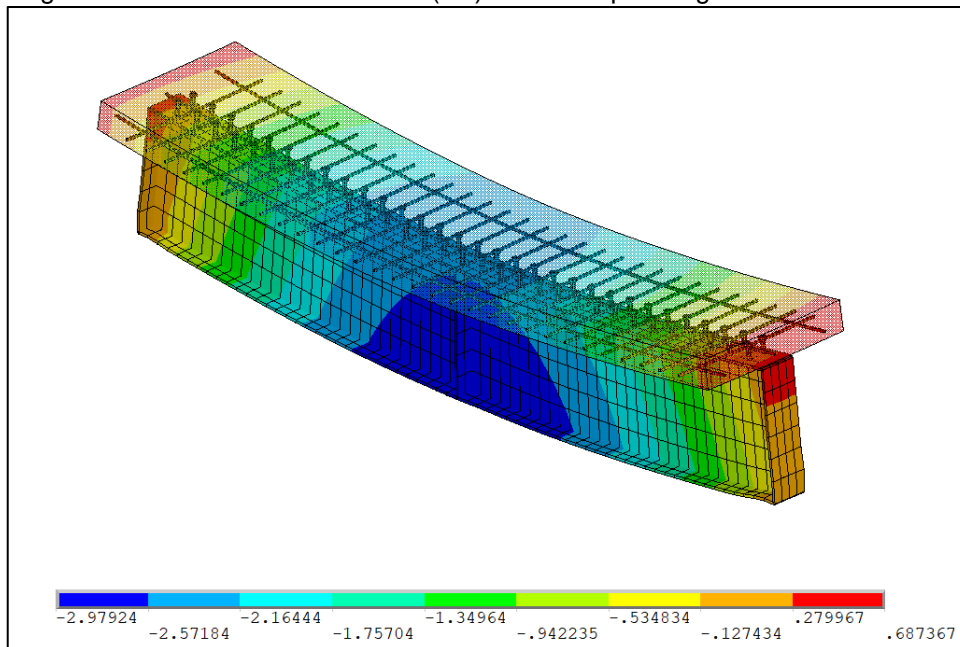
A Figura 97 mostra o resultado térmico do modelo numérico da Viga G1 obtido após 40 minutos de incêndio.

Figura 97 – Resultado térmico (°C) obtido pelo modelo numérico da Viga G1 aos 40 minutos.



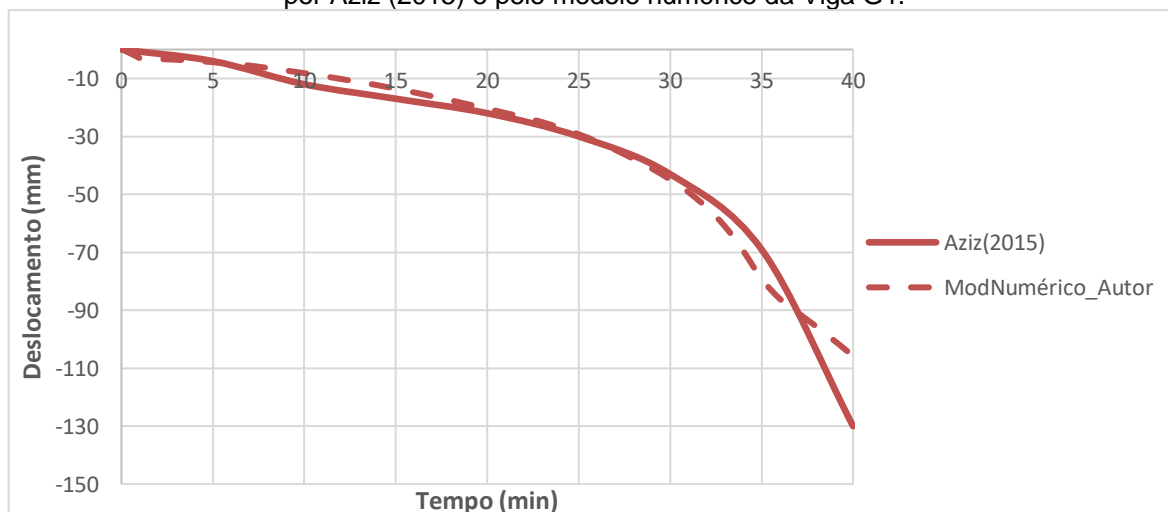
A Figura 98 mostra o resultado do deslocamento vertical do centro da Viga G1 obtidos pelo modelo numérico após 25 minutos de incêndio.

Figura 98 – Deslocamento vertical (cm) calculada para Viga G1 aos 25 minutos.



A Figura 99 mostra a comparação dos deslocamentos verticais do centro da viga G1 obtidos experimentalmente e por meio do modelo numérico.

Figura 99 – Comparação dos deslocamentos verticais do centro da viga obtidos experimentalmente por Aziz (2015) e pelo modelo numérico da Viga G1.



5.3 CONCLUSÃO SOBRE VALIDAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

Conclui-se que os modelos numéricos apresentam resultados térmicos e termoestruturais muito satisfatórios, se comparados com aqueles obtidos experimentalmente. As flutuações apresentadas nos resultados provavelmente são consequência da diferença entre as variações das propriedades térmicas e estruturais em função da temperatura adotadas, conforme as prescrições normativas, e aquelas que realmente acontecem no modelo real.

6 RESULTADOS

Nos modelos, apresentados na Tabela 7, foi determinada a evolução da temperatura nos elementos da viga e o deslocamento vertical no centro da estrutura ao longo do tempo de exposição à curva de incêndio padrão.

6.1 ANÁLISE TÉRMICA

Para discussão dos resultados, foram selecionadas as análises dos modelos de 1 a 7, onde foram adotados diferentes perfis, e os modelos de 16 a 19 com diferentes espessuras da laje. Os demais modelos adotam o mesmo perfil e espessura da laje do modelo 2, portanto apresentam os mesmos resultados térmicos.

As evoluções da temperatura em cada componente da seção transversal da estrutura, do modelo 2, são apresentadas na Figura 100 e na Figura 101. Os resultados das análises térmicas calculadas para todos os modelos listados na Tabela 7 são apresentados no Apêndice A.

Figura 100 – Resultado da análise térmica da Modelo 2.

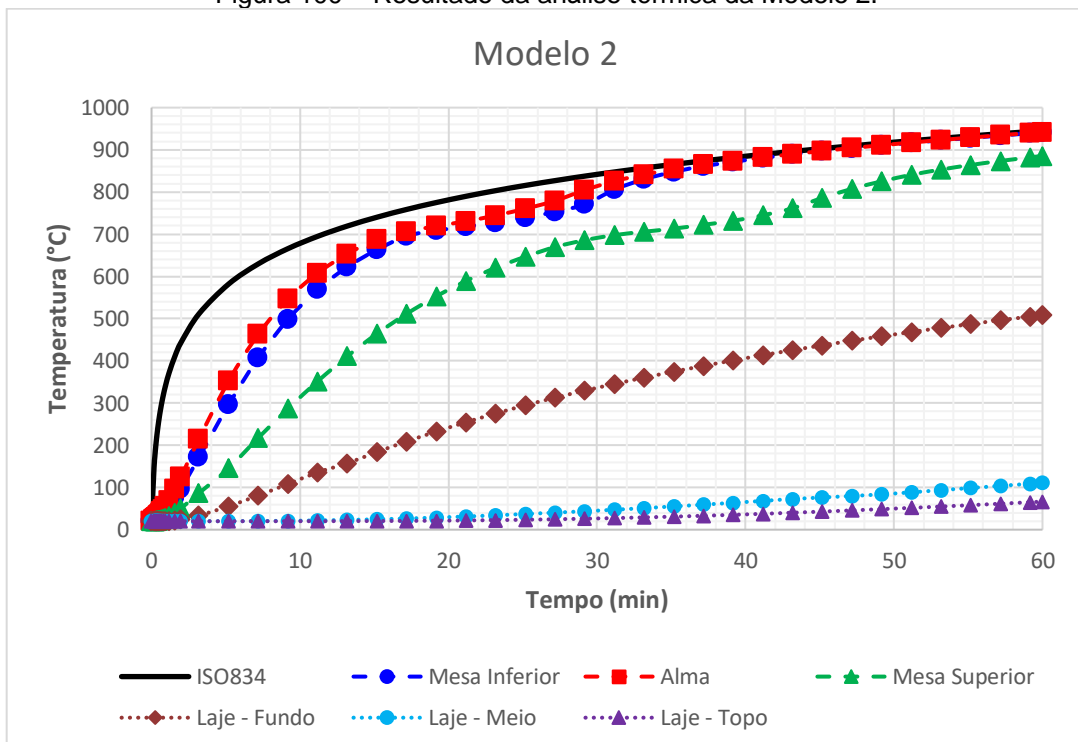
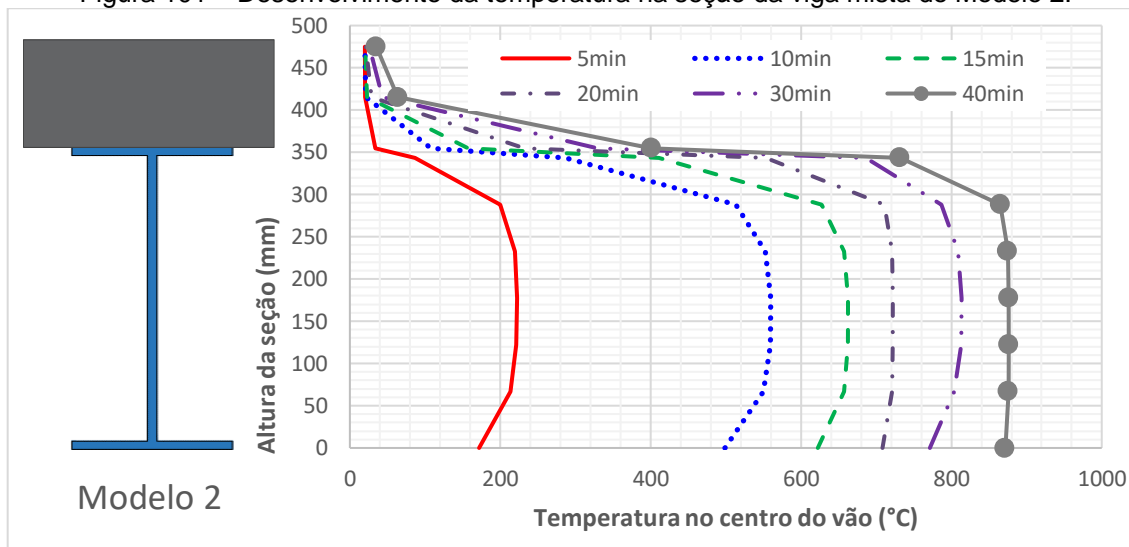


Figura 101 – Desenvolvimento da temperatura na seção da viga mista do Modelo 2.



De acordo com os resultados mostrados no apêndice A, todos os modelos estudados apresentaram o mesmo comportamento térmico. A alma e mesa inferior da viga alcançam temperaturas maiores mais rapidamente, uma vez que estão expostas ao incêndio em todo o seu perímetro. A temperatura na alma é superior à da mesa inferior nos primeiros 30 minutos devido a sua menor espessura em relação às mesas da viga. Ao longo do tempo, a tendência é que a alma e mesa inferior da viga fiquem com temperaturas semelhantes. A temperatura na mesa superior é menor do que os demais elementos da viga, pois sua face superior está em contato com a laje de concreto. A face inferior do concreto, onde recebe calor por radiação e convecção, alcança temperaturas capazes de reduzir as propriedades estruturais do concreto em pouco tempo de exposição ao incêndio padrão, o que não ocorre no meio e o topo da laje, que não atingem temperaturas elevadas.

6.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES TERMOESTRUTURAIS

A partir dos resultados numéricos, dos modelos 1 a 31 desenvolvidos no ANSYS, foram estabelecidos os tempos de colapso estrutural. A Tabela 12 mostra todos os parâmetros de entrada dos modelos analisados.

Tabela 12 – Parâmetros de entrada dos modelos.

MODELO	Vão (m)	Perfil Viga	h/tw	b,ef (cm)	n° linhas de conectores	tc (cm)	fck (kN/cm ²)	fy (kN/cm ²)	Taxa Armadura
Modelo1	6	W 310 x 52,0	38,2	150	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo2	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo3	6	W 410 x 53,0	50,8	150	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo4	6	W 460 x 52,0	56,4	150	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo5	6	W 410 x 67,0	43,3	150	36	12	3	34,5	0,20%
Modelo6	6	W 460 x 68,0	47,1	150	36	12	3	34,5	0,20%
Modelo7	6	W 610 x 155,0	45,1	150	44	12	3	34,5	0,20%
Modelo8	4	W 360 x 51,0	46,1	100	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo9	5	W 360 x 51,0	46,1	125	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo10	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo11	7	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo12	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo13	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo14	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo15	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo16	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	10	3	34,5	0,23%
Modelo17	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo18	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	15	3	34,5	0,16%
Modelo19	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	20	3	34,5	0,12%
Modelo20	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	2	34,5	0,20%
Modelo21	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	2,5	34,5	0,20%
Modelo22	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo23	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3,5	34,5	0,20%
Modelo24	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	25	0,20%
Modelo25	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo26	6	W 360 x 51,0	46,1	150	32	12	3	41,5	0,20%
Modelo27	6	W 360 x 51,0	46,1	150	34	12	3	45	0,20%
Modelo28	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	34,5	0,12%
Modelo29	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	34,5	0,20%
Modelo30	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	34,5	0,31%
Modelo31	6	W 360 x 51,0	46,1	150	28	12	3	34,5	0,48%

A Figura 102 mostra a estrutura deformada do Modelo 1 após 16 minutos de exposição à curva de incêndio padrão e a Figura 103 mostra a curva de deslocamento ao longo do tempo no centro da viga.

Figura 102 – Deslocamento vertical, em cm, do Modelo 1 para o tempo de 16 minutos.

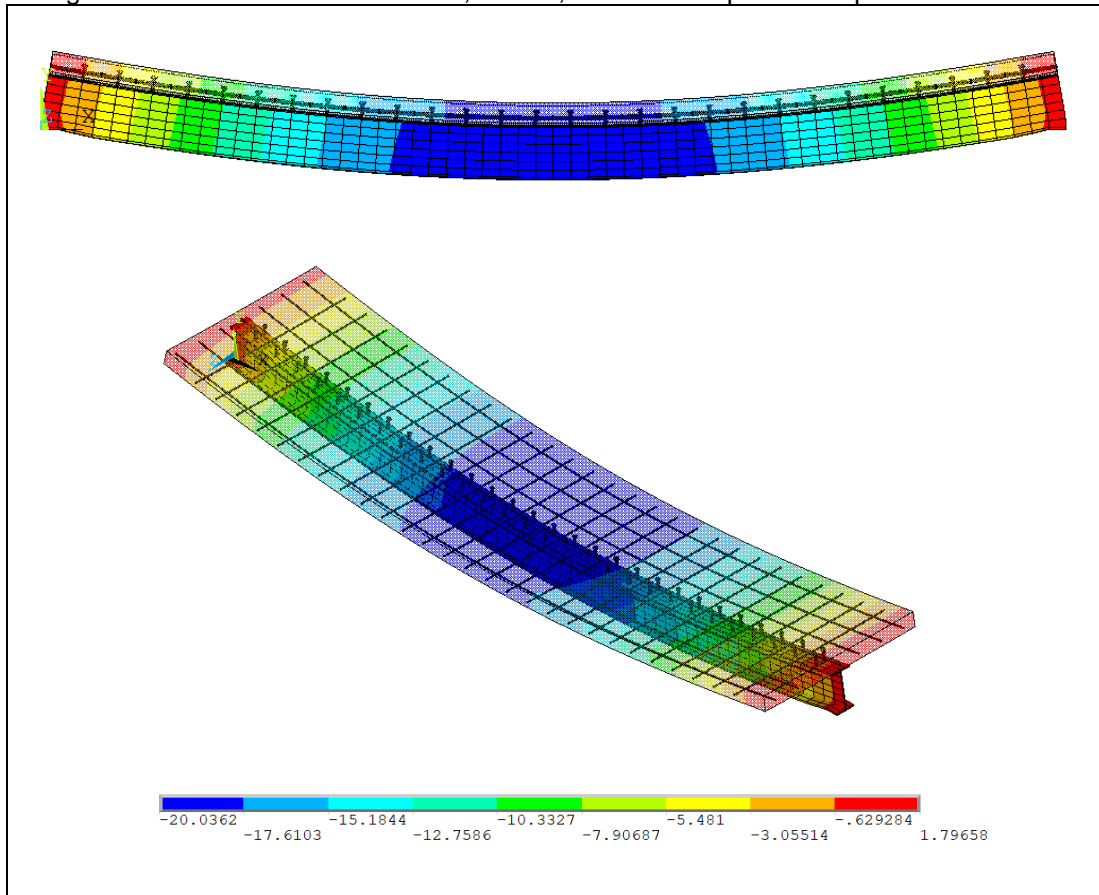
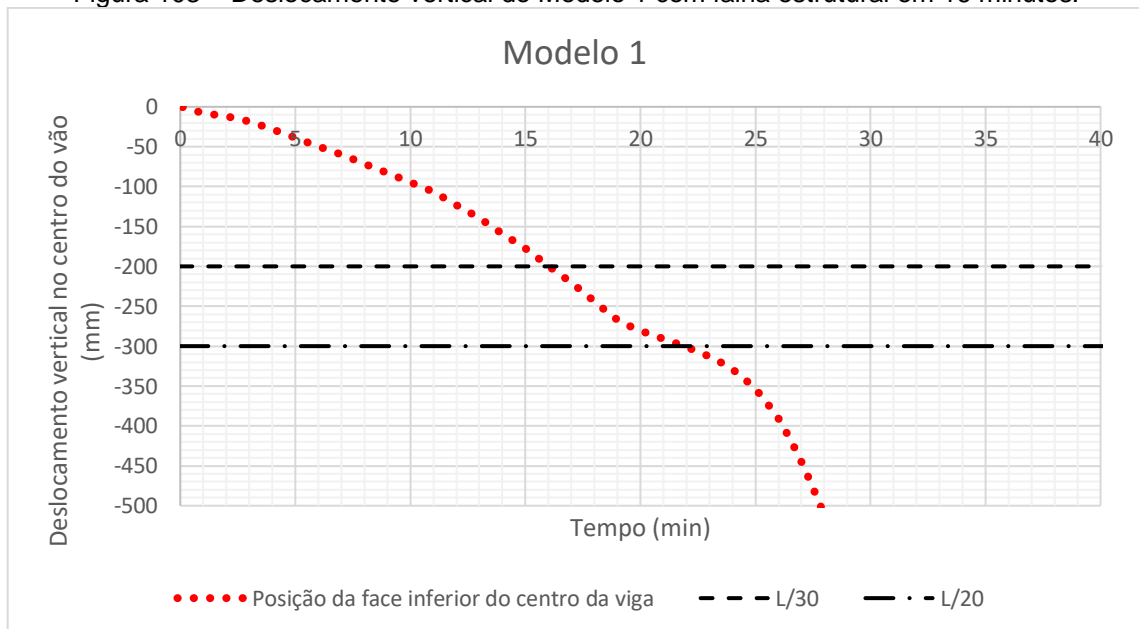


Figura 103 – Deslocamento vertical do Modelo 1 com falha estrutural em 16 minutos.



Os gráficos dos deslocamentos verticais, dos modelos 1 a 31, são apresentados no Apêndice A. A partir desses gráficos determina-se o tempo de falha por meio dos critérios de falha estabelecidos no item 4.2 conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 13 – Resumo do resultado final da análise paramétrica termoestrutural e o tempo de falha determinado.

Modelo	Parâmetro Variado	Variação do Parâmetro	Parâmetros Constantes	ia	Tempo (min)
Modelo 1	Perfil da viga com peso linear similar	W 310 x 52,0 (h/tw = 38.2)	qk = 35 kN/m; L = 6 m; tc = 12 cm; fy = 345 MPa; fck = 30 MPa	0,52	16
Modelo 2		W 360 x 51,0 (h/tw = 46.1)		0,50	16
Modelo 3		W 410 x 53,0 (h/tw = 50.8)		0,44	17
Modelo 4		W 460 x 52,0 (h/tw = 56.4)		0,41	18
Modelo 5	Perfil da viga com índice de esbelteza da alma	W 410 x 67,0 (h/tw = 43.3)	qk = 35 kN/m; L = 6 m; tc = 12 cm; fy = 345 MPa; fck = 30 MPa	0,36	22
Modelo 6		W 460 x 68,0 (h/tw = 47.1)		0,32	25
Modelo 7		W 610 x 155,0 (h/tw = 45.1)		0,13	35
Modelo 8	Vão da viga (m)	4	W 360 x 51,0; qk = 35 kN/m; tc = 12 cm; fy = 345 MPa; fck = 30 MPa	0,23	27
Modelo 9		5		0,35	26
Modelo 10		6		0,50	16
Modelo 11		7		0,68	13
Modelo 12	Índice de aproveitamento	0.15	W 360 x 51,0; L = 6 m; tc = 12 cm; fy = 345 MPa; fck = 30 MPa	0,15	51
Modelo 13		0.3		0,30	25
Modelo 14		0.5		0,50	16
Modelo 15		0.7		0,70	13
Modelo 16	Espessura Laje (cm)	10	W 360 x 51,0; qk = 35 kN/m; L = 6 m; fy = 345 MPa; fck = 30 MPa	0,53	14
Modelo 17		12		0,50	16
Modelo 18		15		0,46	22
Modelo 19		20		0,41	24
Modelo 20	Resistência do concreto, fck (MPa)	20	W 360 x 51,0; qk = 35 kN/m; L = 6 m; tc = 12 cm; fy = 345 MPa	0,54	15
Modelo 21		25		0,51	16
Modelo 22		30		0,50	16
Modelo 23		35		0,49	17
Modelo 24	Resistência ao escoamento do aço, fy (MPa)	250 (ASTM A36)	W 360 x 51,0; qk = 35 kN/m; L = 6 m; tc = 12 cm; fck = 30 MPa	0,66	15
Modelo 25		345 (ASTM A572 Gr50)		0,50	16
Modelo 26		415 (ASTM A572 Gr60)		0,43	17
Modelo 27		450 (ASTM A992)		0,40	17
Modelo 28	taxa de armadura (%)	0.12	W 360 x 51,0; qk = 35 kN/m; L = 6 m; tc = 12 cm; fy = 345 MPa; fck = 30 MPa.	0,50	16
Modelo 29		0.20		0,50	16
Modelo 30		0.31		0,50	16
Modelo 31		0.48		0,50	16

Percebeu-se que os critérios de falha estabelecidos no item 4.2 são conservadores, uma vez que muitos modelos ainda apresentavam capacidade portante no tempo de falha determinado segundo os critérios.

7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados obtidos numericamente são analisados de acordo com o comportamento térmico e estrutural e comparados com os resultados analíticos obtidos pelos procedimentos do EN-1994-1-2:2005.

7.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS TÉRMICOS

7.1.1 Comparação entre os modelos analítico e numérico

Foram calculadas as temperaturas de acordo com as prescrições do EN-1994-1-2:2005, para todos os modelos listados na Tabela 7, e comparadas com os resultados numéricos.

Na Figura 104 a Figura 106 mostra-se a comparação entre os resultados térmicos numéricos e analíticos para a alma, mesa inferior e mesa superior da viga dos modelos 1 a 7, nos tempos de exposição ao incêndio padrão de 30 e 60 minutos. Para a alma e mesa inferior das vigas, os valores das temperaturas calculados de forma numérica são muito similares àqueles encontrados por meio das prescrições normativas. A relação entre os resultados numéricos e analíticos variam de 0,98 a 1,00, conforme indicado na Tabela 14 e Tabela 15. Para mesa superior, os valores analíticos são ligeiramente maiores daqueles encontrados utilizando modelos numéricos. A relação entre os resultados numéricos e analíticos variam de 0,93 a 0,96, conforme mostra a Tabela 16, o que indica que os resultados obtidos por meio das prescrições normativas são ligeiramente mais conservadores. A pequena diferença encontrada é, provavelmente, devido à interação entre o aço da mesa superior da viga e o concreto da laje.

Figura 104 – Comparativo entre resultados térmicos na alma das vigas dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 1 a 7 para o tempo de 30 e 60 minutos.

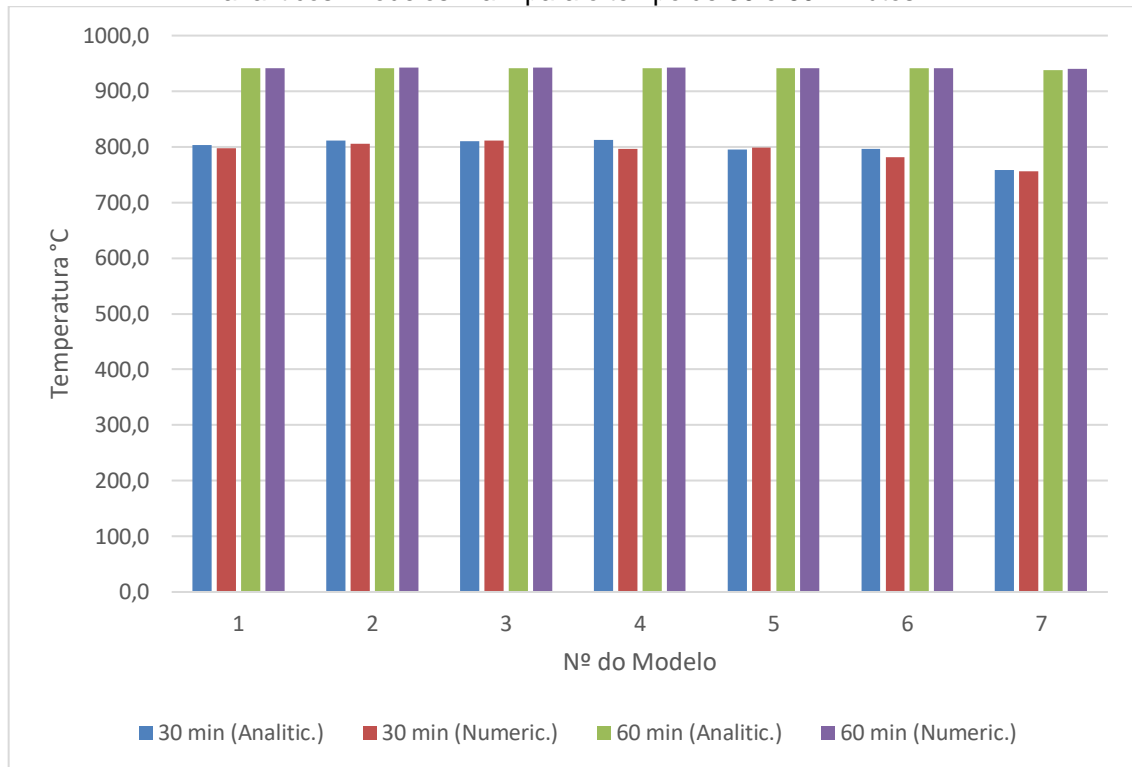


Tabela 14 - Comparativo entre resultados térmicos na alma das vigas dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 1 a 7 para o tempo de 30 e 60 minutos.

MODELO	Alma, 30 min			Alma, 60 min		
	Analitic.	Numeric.	Relação Num./Analit.	Analitic.	Numeric.	Relação Num./Analit.
Modelo1	803,0	798,0	0,99	941,3	941,6	1,00
Modelo2	810,8	805,1	0,99	941,6	942,1	1,00
Modelo3	809,7	811,0	1,00	941,5	942,2	1,00
Modelo4	812,8	796,5	0,98	941,7	942,3	1,00
Modelo5	795,0	798,2	1,00	940,8	941,5	1,00
Modelo6	796,9	781,2	0,98	940,9	941,5	1,00
Modelo7	758,3	755,7	1,00	938,2	939,9	1,00

Figura 105 – Comparativo entre resultados térmicos na mesa inferior das vigas numéricos e analíticos. Modelos 1 a 7 para o tempo de 30 e 60 minutos.

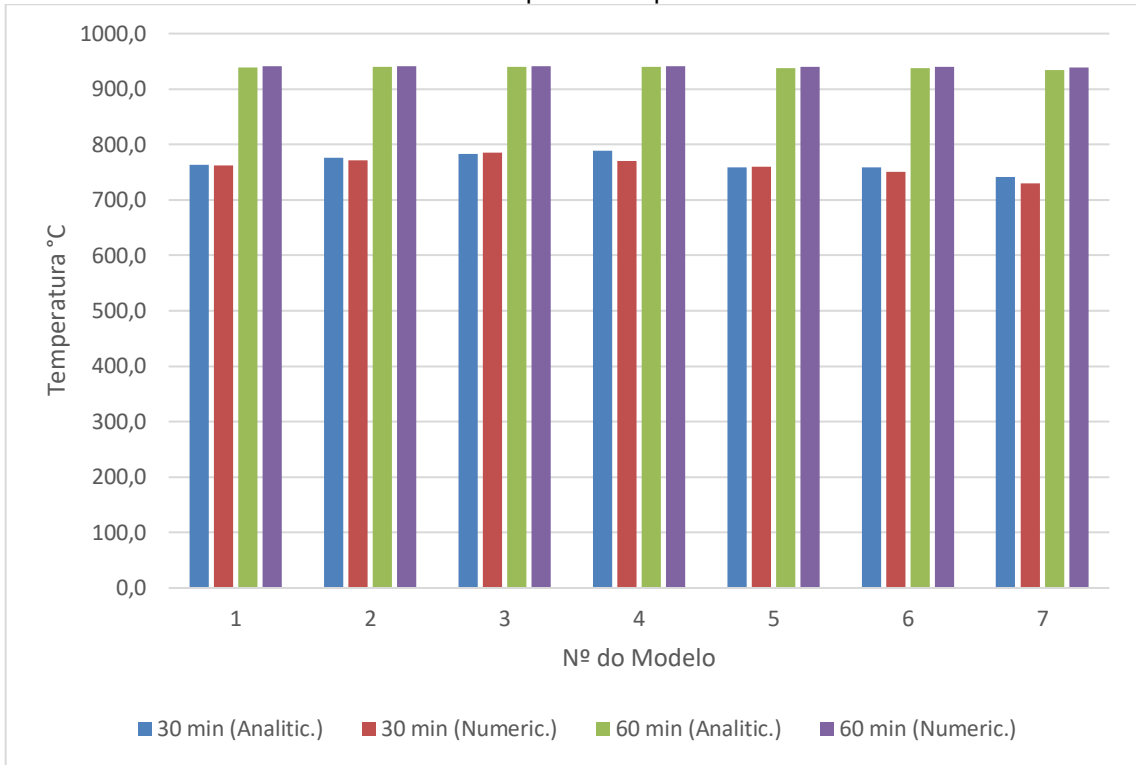


Tabela 15 - Comparativo entre resultados térmicos na mesa superior das vigas numéricos e analíticos. Modelos 1 a 7 para o tempo de 30 e 60 minutos.

MODELO	Mesa Inf., 30 min			Mesa Inf., 60 min		
	Analitic.	Numeric.	Relação Num./Analit.	Analitic.	Numeric.	Relação Num./Analit.
Modelo1	763,7	762,6	1,00	938,5	940,9	1,00
Modelo2	775,7	771,2	0,99	939,5	941,4	1,00
Modelo3	783,4	785,3	1,00	940,0	941,6	1,00
Modelo4	788,6	770,8	0,98	940,4	941,7	1,00
Modelo5	759,0	759,9	1,00	938,2	940,4	1,00
Modelo6	758,3	750,9	0,99	938,2	940,2	1,00
Modelo7	741,3	730,1	0,98	934,0	938,4	1,00

Figura 106 – Comparativo entre resultados térmicos na mesa superior das vigas dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 1 a 7 para o tempo de 30 e 60 minutos.

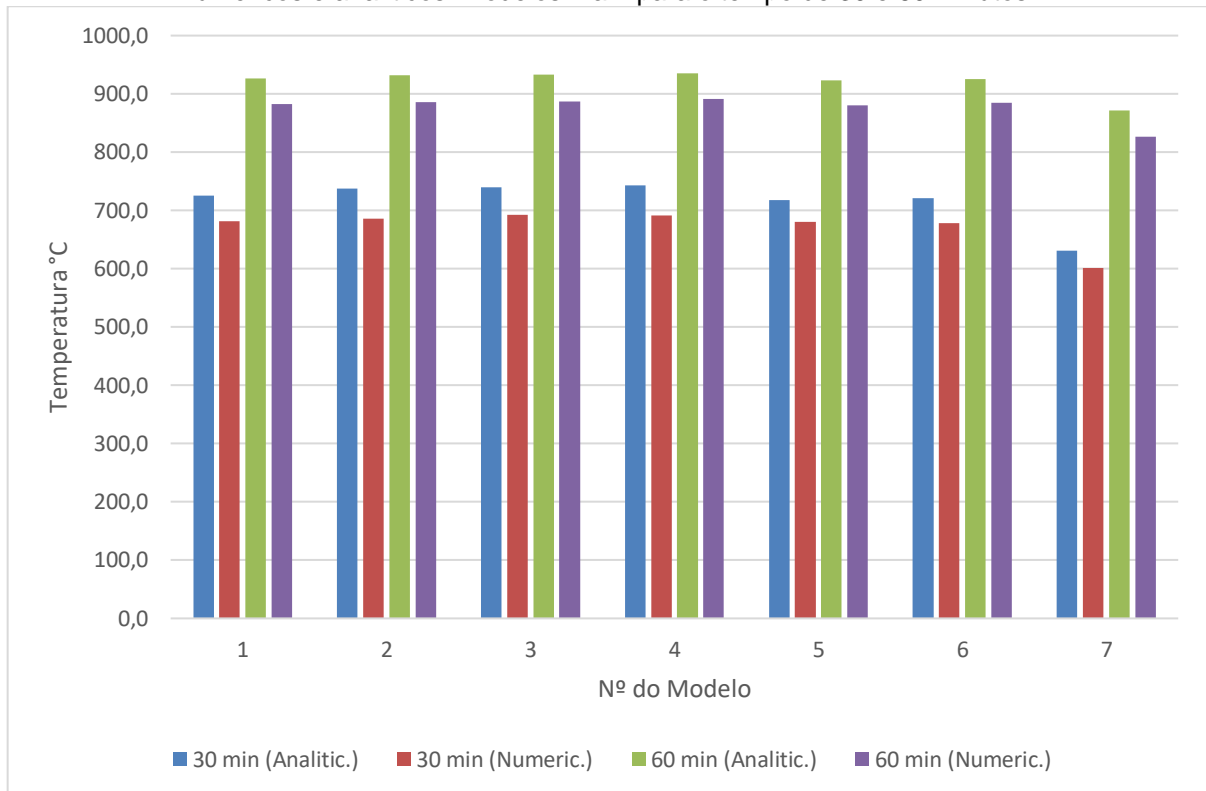


Tabela 16 - Comparativo entre resultados térmicos na mesa superior das vigas dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 1 a 7 para o tempo de 30 e 60 minutos.

MODELO	Mesa Sup., 30 min			Mesa Sup., 60 min		
	Analitic.	Numeric.	Relação Num./Analit.	Analitic.	Numeric.	Relação Num./Analit.
Modelo1	725,7	682,0	0,94	926,0	883,0	0,95
Modelo2	737,9	686,1	0,93	931,4	885,6	0,95
Modelo3	740,2	692,5	0,94	933,3	886,8	0,95
Modelo4	742,4	691,4	0,93	934,8	891,1	0,95
Modelo5	717,9	680,6	0,95	923,5	880,2	0,95
Modelo6	721,5	678,4	0,94	924,9	884,6	0,96
Modelo7	630,8	600,8	0,95	871,4	826,9	0,95

Da Figura 107 a Figura 109 são mostradas comparações entre os resultados térmicos numéricos e analíticos dos modelos 16 a 19, em que parâmetro variado é a espessura da laje de concreto. Apresentam-se os resultados na face inferior, superior e no meio da espessura laje, para os tempos de 30 e 60 minutos de exposição à curva de incêndio padrão.

Para a face inferior da laje de concreto, os valores das temperaturas calculados de forma numérica são menores em relação àqueles encontrados por meio das prescrições normativas. As relações entre os resultados numéricos e os analíticos variam de 0,60 e 0,72, conforme indicado na Tabela 17. No meio da espessura da laje, os valores analíticos das temperaturas são maiores em relação aos encontrados nos modelos numéricos. As relações entre os resultados numéricos e os analíticos variam de 0,37 a 0,99, conforme indicado na Tabela 18. Da mesma forma, no topo da laje, os valores analíticos são maiores em relação aos encontrados nos modelos numéricos, exceto para o modelo 16 após 60 minutos de exposição ao incêndio padrão. As relações entre os resultados numéricos e os analíticos variam de 0,23 a 1,07, conforme indicado na Tabela 19.

As diferenças entre os resultados mostram que o método para o cálculo de temperaturas na laje por meio de tabelas é simplificado e conservador para a maioria dos casos.

Figura 107 – Comparativo entre resultados térmicos na face inferior da laje dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 16 a 19 para o tempo de 30 e 60 minutos.

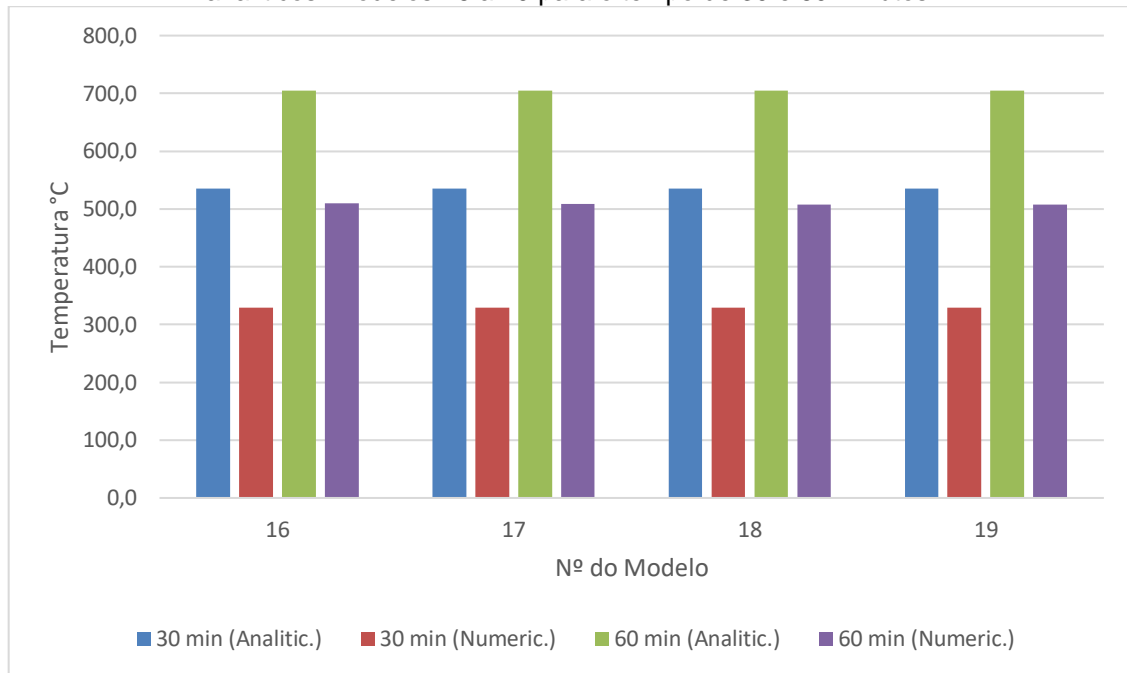


Tabela 17 - Comparativo entre resultados térmicos na face inferior da laje dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 16 a 19 para o tempo de 30 e 60 minutos.

MODELO	Laje Inf., 30 min			Laje Inf., 60 min		
	Analitic.	Numeric.	Relação Num./Analit.	Analitic.	Numeric.	Relação Num./Analit.
Modelo16	535,0	329,6	0,62	705,0	509,8	0,72
Modelo17	535,0	329,6	0,62	705,0	508,5	0,72
Modelo18	535,0	329,6	0,62	705,0	508,0	0,72
Modelo19	535,0	329,5	0,62	705,0	507,4	0,72

Figura 108 – Comparativo entre resultados térmicos no meio da espessura da laje dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 16 a 19 para o tempo de 30 e 60 minutos.

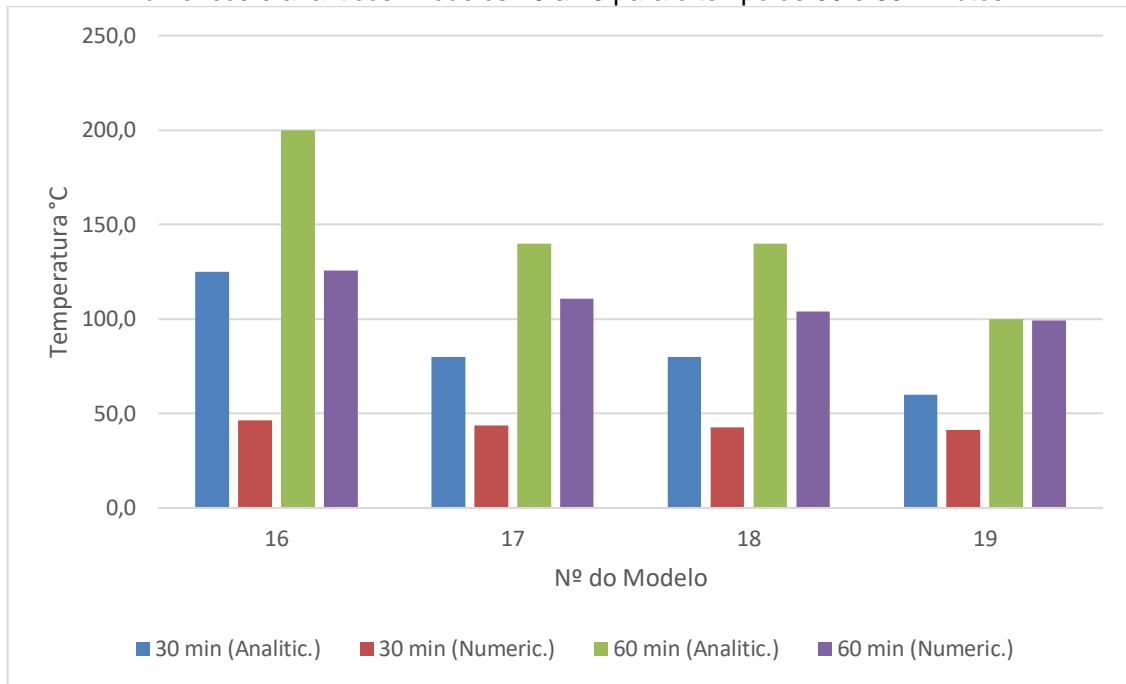


Tabela 18 - Comparativo entre resultados térmicos no meio da espessura da laje dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 16 a 19 para o tempo de 30 e 60 minutos.

MODELO	Laje Meio, 30 min			Laje Meio, 60 min		
	Analitic.	Numeric.	Relação Num./Analit.	Analitic.	Numeric.	Relação Num./Analit.
Modelo16	125,0	46,4	0,37	200,0	125,8	0,63
Modelo17	80,0	43,7	0,55	140,0	110,9	0,79
Modelo18	80,0	42,7	0,53	140,0	104,0	0,74
Modelo19	60,0	41,3	0,69	100,0	99,2	0,99

Figura 109 – Comparativo entre resultados térmicos no topo das lajes dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 16 a 19 para o tempo de 30 e 60 minutos.

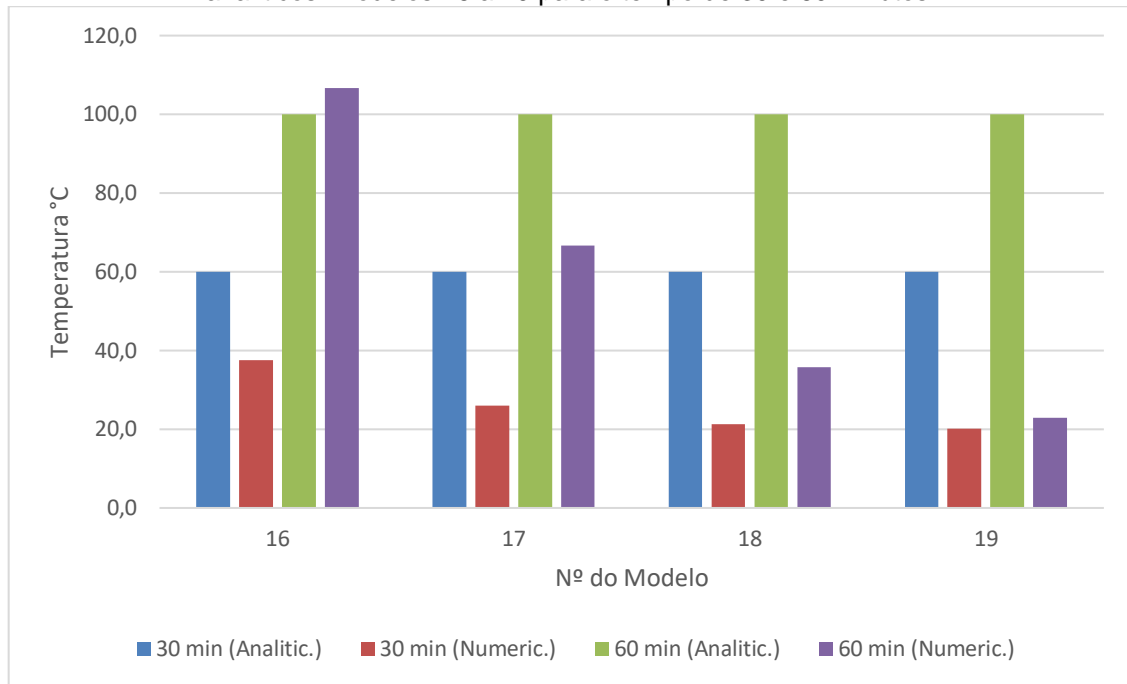


Tabela 19 - Comparativo entre resultados térmicos no topo das lajes dos modelos numéricos e analíticos. Modelos 16 a 19 para o tempo de 30 e 60 minutos.

MODELO	Laje Topo, 30 min			Laje Topo, 60 min		
	Analitic.	Numeric.	Relação Num./Analit.	Analitic.	Numeric.	Relação Num./Analit.
Modelo16	60,0	37,5	0,63	100,0	106,6	1,07
Modelo17	60,0	26,0	0,43	100,0	66,6	0,67
Modelo18	60,0	21,2	0,35	100,0	35,8	0,36
Modelo19	60,0	20,1	0,34	100,0	22,9	0,23

7.1.2 Análise paramétrica no comportamento térmico

Para realização das análises paramétricas, tendo como ênfase o comportamento térmico, variou-se o perfil da viga de aço nos modelos de 1 a 7, conforme indicado na Tabela 7. Os resultados térmicos nos elementos que compõe o perfil da viga mista foram comparados a fim de avaliar a influência da variação de suas geometrias. Da Figura 110 a Figura 112 são mostrados os resultados térmicos calculados para a mesa inferior, mesa superior e alma das vigas, respectivamente,

dos modelos 1 a 7. Os resultados de algumas vigas foram suprimidos do gráfico a fim de facilitar a visualização.

As vigas com espessuras menores da mesa inferior alcançaram temperaturas superiores nos instantes iniciais. A partir de 45 minutos, aproximadamente, as temperaturas das mesas inferiores de todas as vigas tendem ao mesmo valor de temperatura. Em relação à mesa superior, as vigas que possuem maiores espessuras atingiram temperaturas mais brandas se comparadas com as de mesas com menores espessuras.

As vigas com menor espessura de alma alcançaram temperaturas maiores nesse elemento nos instantes iniciais. A partir de 45 minutos, aproximadamente, as temperaturas das almas de todas as vigas tendem ao mesmo valor de temperatura.

Figura 110 – Comparativo do comportamento térmico da mesa inferior das vigas dos modelos 1, 6 e 7. Espessura da mesa (t_f) e largura da mesa (b_f)

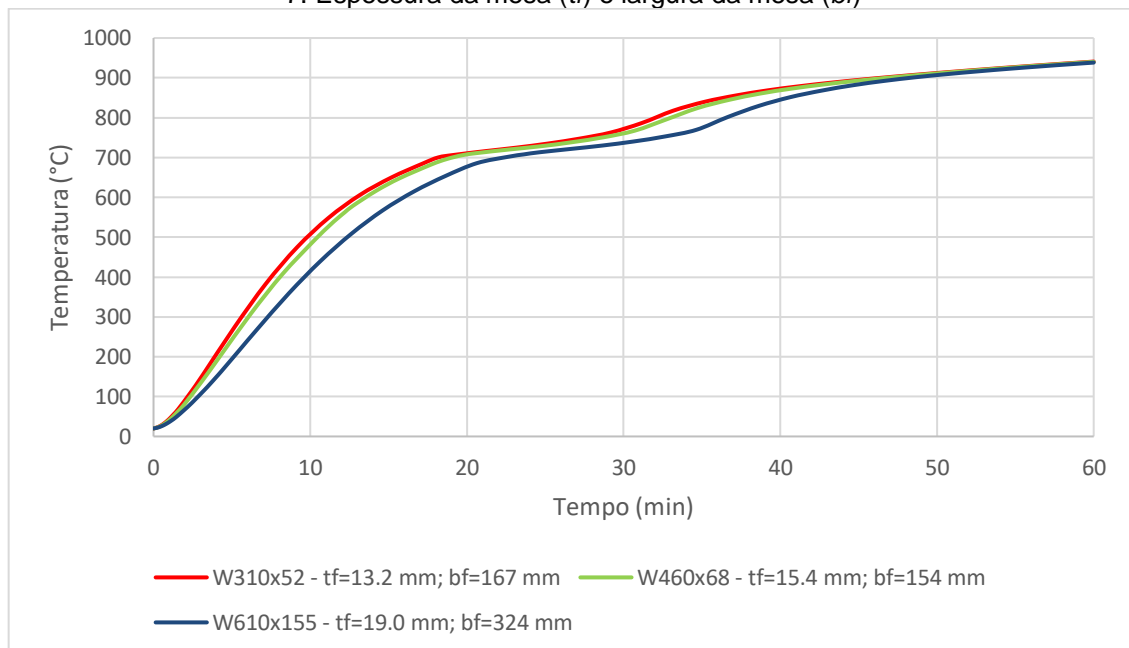


Figura 111 – Comparativo do comportamento térmico da mesa superior das vigas dos modelos 4, 5 e 7. Espessura da mesa (t_f) e largura da mesa (b_f).

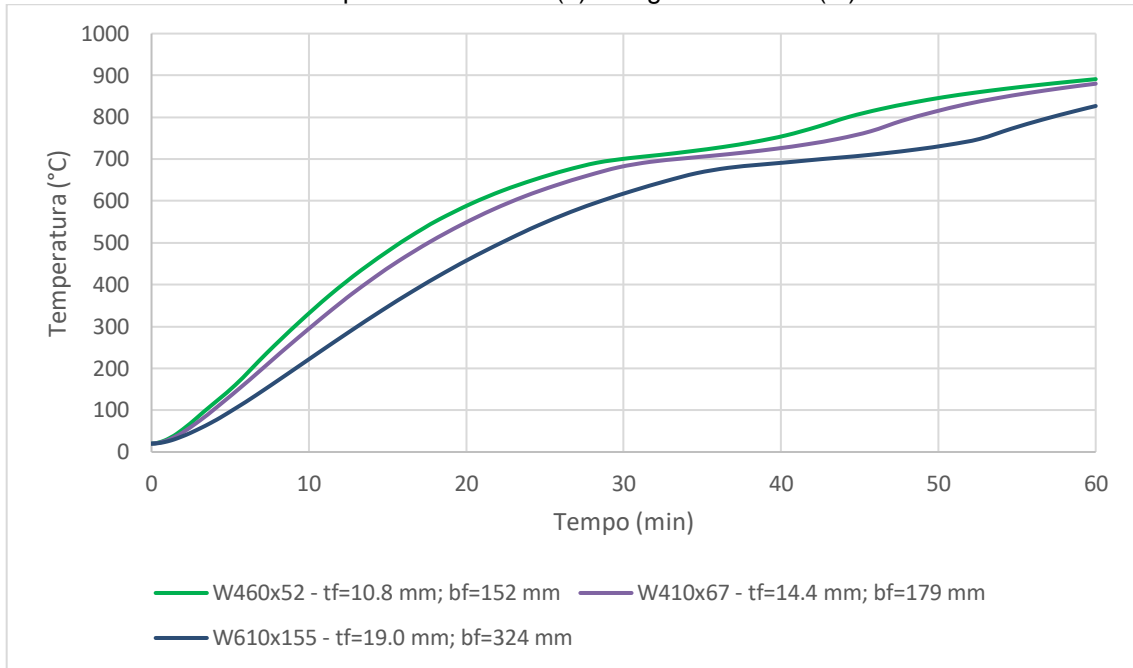
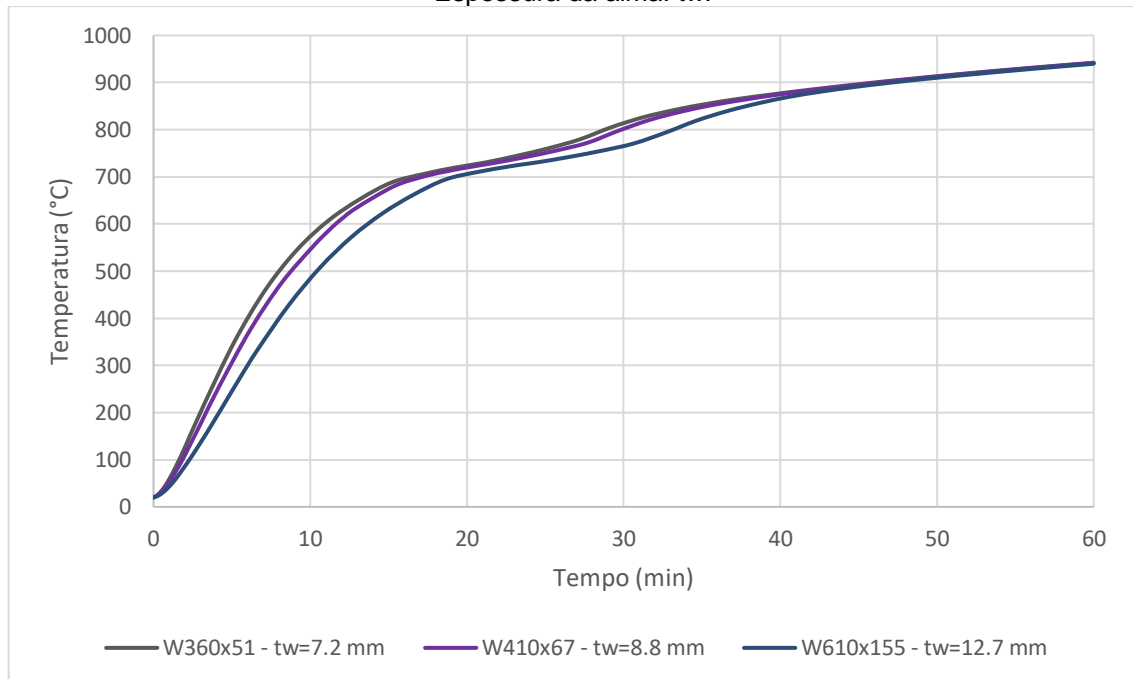


Figura 112 – Comparativo do comportamento térmico da alma das vigas dos modelos 2, 5 e 7. Espessura da alma: t_w .



O parâmetro variado entre os modelos 16 a 19, conforme indicado na Tabela 7, foi a espessura da laje de concreto. Os resultados térmicos ao longo da altura da laje, obtidos numericamente, foram comparados a fim de avaliar a influência da variação da sua espessura em seu comportamento térmico. A Figura 113 e a Figura 114

mostram a comparação dos resultados térmicos calculados no meio da altura e topo da laje, respectivamente, dos modelos 16 a 19. Os componentes da viga e a face inferior da laje mantiveram o mesmo comportamento térmico para todos os modelos em questão.

Verificou-se que as lajes com maiores espessuras atingiram temperaturas menores no meio de sua altura e na face superior. Esses resultados testificam a baixa condutividade térmica e excelente proteção térmica oferecida pelo concreto.

Figura 113 –Comportamento térmico do meio da altura da laje de concreto dos modelos 16 a 19 em relação a espessura da laje de concreto (t_c).

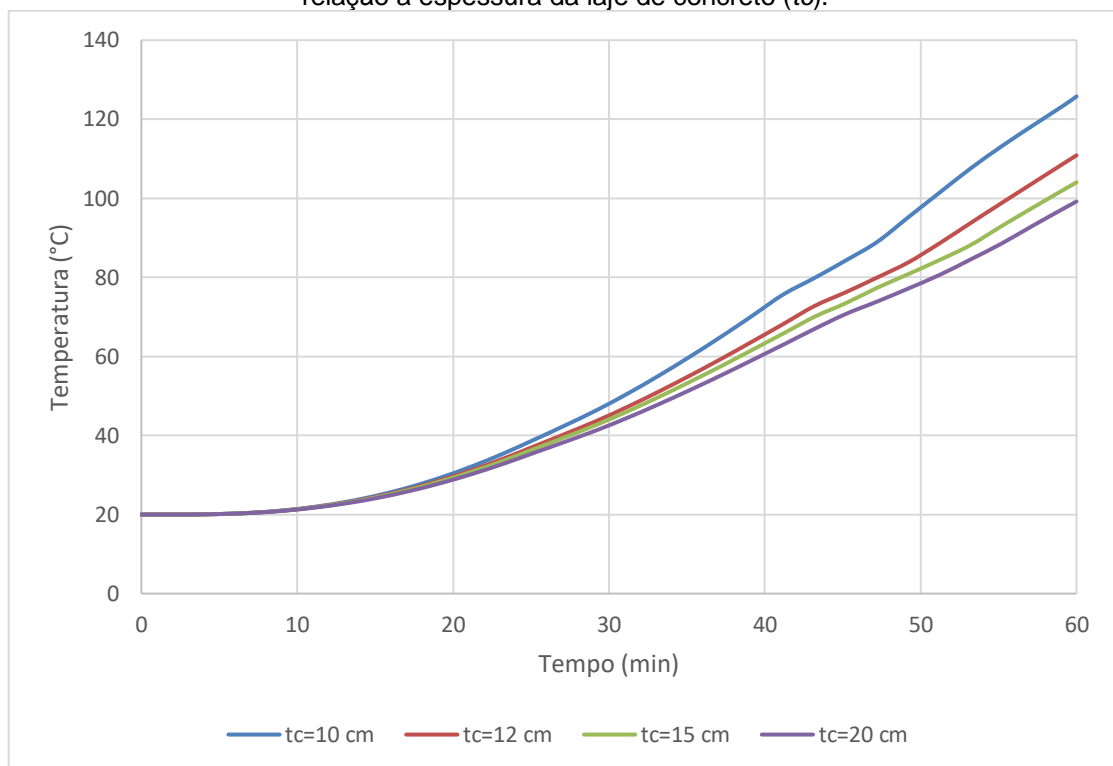
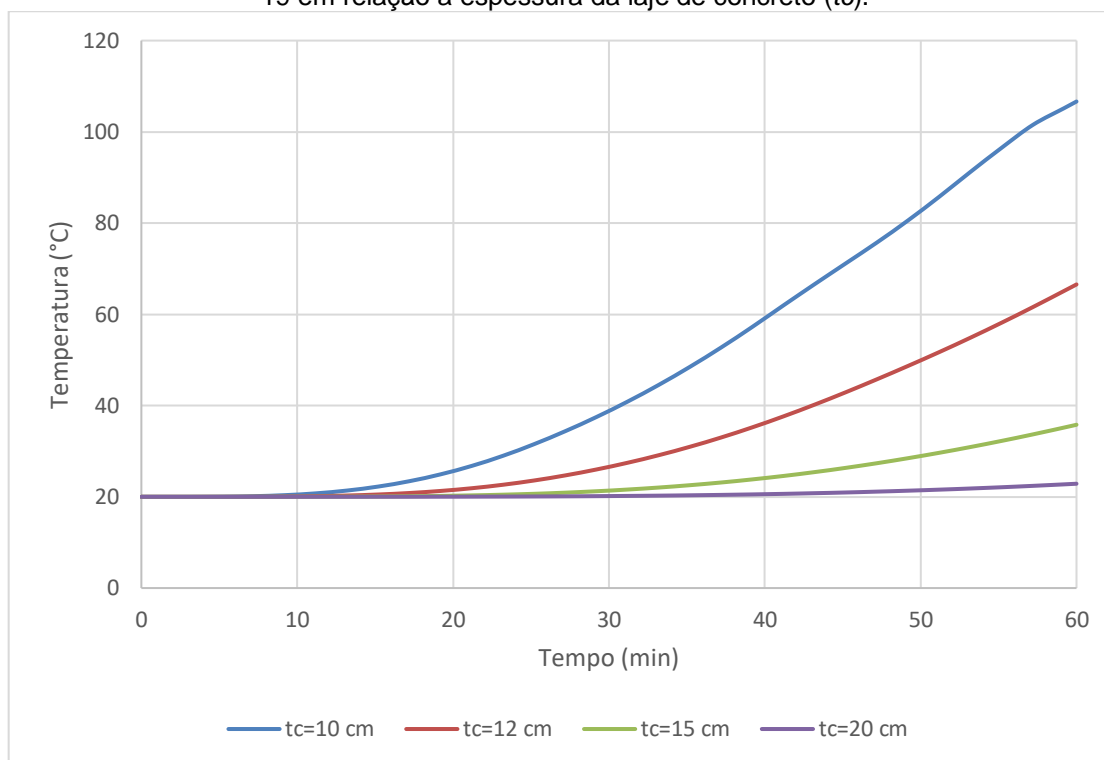


Figura 114 – Comparativo do comportamento térmico do topo da laje de concreto dos modelos 16 a 19 em relação a espessura da laje de concreto (t_c).



7.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS TERMOESTRUTURAIS

7.2.1 Comparação entre os modelos analítico e numérico

A Tabela 20 mostra os momentos resistentes calculados para as vigas mistas de todos os modelos em temperatura ambiente, com 30 e 60 minutos de exposição à curva de incêndio padrão, de acordo com o EN-1994-1-2:2005. A Tabela 21 apresenta os índices de aproveitamento estrutural de cada modelo, o tempo de falha estimado analiticamente e o tempo de falha calculado por meio dos modelos numéricos conforme o item 4.5 deste trabalho. O tempo de falha determinado numericamente está dentro do intervalo de tempo estimado analiticamente para todos os modelos.

Tabela 20 – Cálculo analítico da capacidade resistente da viga mista em temperatura ambiente e em situação de incêndio.

MODELO	TEMPERATURA AMBIENTE			SITUAÇÃO DE INCÊNDIO			
	Dist. LNP (cm)	Posição da Linha Neutra	MRd, ambiente (kN.m)	MRd,θ,30 (kN.m)	MRd,θ,60 (kN.m)	MRd,θ,30/M Rd,amb	MRd,θ,60/M Rd,amb
Modelo1	7,7	LN NA LAJE	504,6	99,5	7,5	0,20	0,08
Modelo2	7,4	LN NA LAJE	529,0	99,9	7,4	0,19	0,07
Modelo3	7,9	LN NA LAJE	605,6	111,1	8,2	0,18	0,07
Modelo4	7,6	LN NA LAJE	641,0	112,0	8,1	0,17	0,07
Modelo5	9,9	LN NA LAJE	745,9	165,6	12,6	0,22	0,08
Modelo6	10,1	LN NA LAJE	822,4	179,9	13,6	0,22	0,08
Modelo7	13,4	LN NA MESA	2080,0	622,6	53,0	0,30	0,09
Modelo8	11,2	LN NA LAJE	491,2	99,1	7,8	0,20	0,08
Modelo9	8,9	LN NA LAJE	513,9	99,6	7,5	0,19	0,08
Modelo10	7,4	LN NA LAJE	529,0	99,9	7,4	0,19	0,07
Modelo11	7,4	LN NA LAJE	529,0	99,9	7,4	0,19	0,07
Modelo12	7,4	LN NA LAJE	529,0	99,9	7,4	0,19	0,07
Modelo13	7,4	LN NA LAJE	529,0	99,9	7,4	0,19	0,07
Modelo14	7,4	LN NA LAJE	529,0	99,9	7,4	0,19	0,07
Modelo15	7,4	LN NA LAJE	529,0	99,9	7,4	0,19	0,07
Modelo16	7,4	LN NA LAJE	488,4	92,6	6,9	0,19	0,07
Modelo17	7,4	LN NA LAJE	529,0	99,9	7,4	0,19	0,07
Modelo18	7,4	LN NA LAJE	590,0	110,8	8,1	0,19	0,07
Modelo19	7,4	LN NA LAJE	691,6	129,0	9,2	0,19	0,07
Modelo20	11,2	LN NA LAJE	491,2	99,1	7,8	0,20	0,08
Modelo21	8,9	LN NA LAJE	513,9	99,6	7,5	0,19	0,08
Modelo22	7,4	LN NA LAJE	529,0	99,9	7,4	0,19	0,07
Modelo23	6,4	LN NA LAJE	539,8	100,1	7,2	0,19	0,07
Modelo24	5,4	LN NA LAJE	398,4	72,7	5,2	0,18	0,07
Modelo25	7,4	LN NA LAJE	529,0	99,9	7,4	0,19	0,07
Modelo26	8,9	LN NA LAJE	617,9	119,8	9,1	0,19	0,08
Modelo27	9,7	LN NA LAJE	660,0	129,7	10,0	0,20	0,08
Modelo28	7,4	LN NA LAJE	529,0	99,9	18,9	0,19	0,19
Modelo29	7,4	LN NA LAJE	529,0	99,9	18,9	0,19	0,19
Modelo30	7,4	LN NA LAJE	529,0	99,9	18,9	0,19	0,19
Modelo31	7,4	LN NA LAJE	529,0	99,9	18,9	0,19	0,19

Tabela 21 – Tempos de falha estrutural calculados analiticamente e numericamente dos modelos.

MODELO	ESF. SOLICITANTE		TEMPOS DE FALHA ESTRUTURAL	
	qk (kN/m)	Índice de aproveitamento (temperatura ambiente)	TEMPO DE FALHA ESTIMADO ANALITICAMENTE (min)	TEMPO DE FALHA CALCULADO NUMERICAMENTE (min)
Modelo1	35,0	0,52	t<30	16
Modelo2	35,0	0,50	t<30	16
Modelo3	35,0	0,44	t<30	17
Modelo4	35,0	0,41	t<30	18
Modelo5	35,0	0,36	t<30	22
Modelo6	35,0	0,32	t<30	25
Modelo7	35,0	0,13	30<t<60	35
Modelo8	35,0	0,23	t<30	27
Modelo9	35,0	0,35	t<30	26
Modelo10	35,0	0,50	t<30	16
Modelo11	35,0	0,68	t<30	13
Modelo12	7,6	0,15	30<t<60	51
Modelo13	19,3	0,30	t<30	25
Modelo14	35,0	0,50	t<30	16
Modelo15	50,7	0,70	t<30	13
Modelo16	35,0	0,53	t<30	14
Modelo17	35,0	0,50	t<30	16
Modelo18	35,0	0,46	t<30	22
Modelo19	35,0	0,41	t<30	24
Modelo20	35,0	0,54	t<30	15
Modelo21	35,0	0,51	t<30	16
Modelo22	35,0	0,50	t<30	16
Modelo23	35,0	0,49	t<30	17
Modelo24	35,0	0,66	t<30	15
Modelo25	35,0	0,50	t<30	16
Modelo26	35,0	0,43	t<30	17
Modelo27	35,0	0,40	t<30	17
Modelo28	35,0	0,50	t<30	16
Modelo29	35,0	0,50	t<30	16
Modelo30	35,0	0,50	t<30	16
Modelo31	35,0	0,50	t<30	16

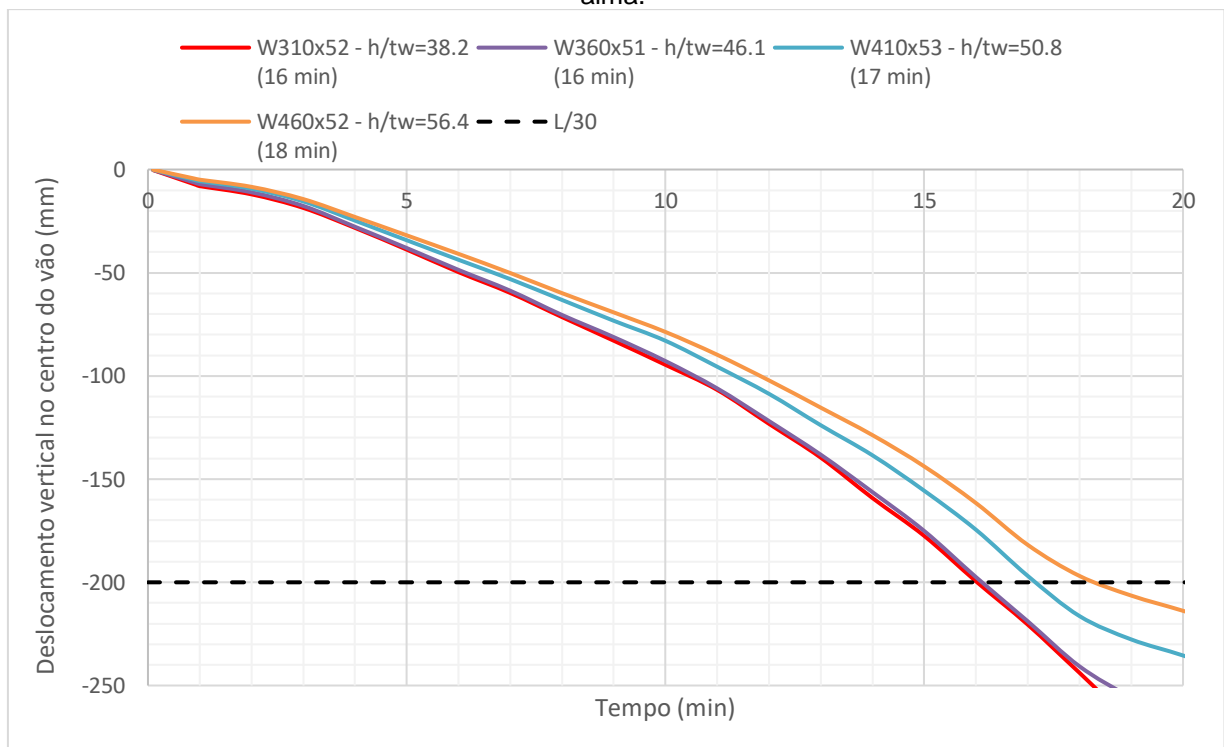
7.2.2 Análise paramétrica do comportamento estrutural

Os resultados numéricos dos deslocamentos para os modelos listados na Tabela 7 foram comparados a fim de avaliar a influência dos parâmetros estudados no comportamento estrutural das vigas mistas em situação de incêndio.

7.2.2.1 Influência da variação do índice de esbeltez da alma

Para os modelos de 1 a 4, listados na Tabela 7, foram adotados perfis de aço com pesos lineares similares e com diferentes índices de esbeltez da alma (h/t_w). A Figura 115 mostra a comparação do comportamento estrutural dessas vigas, onde o modelo 1 (perfil W310x52, $h/t_w=38,2$) e o modelo 2 (perfil W360x51, $h/t_w=46,1$) apresentaram um comportamento estrutural similar, com falha estrutural após 16 minutos de exposição à curva de incêndio-padrão. O modelo 3 (perfil W410x53, $h/t_w=50,8$) e o modelo 4 (perfil W460x52, $h/t_w=56,4$) apresentaram falha estrutural com 17 e 18 minutos, respectivamente.

Figura 115 – Deslocamentos das vigas dos modelos 1 a 4. Parâmetro variado: índice de esbeltez da alma.

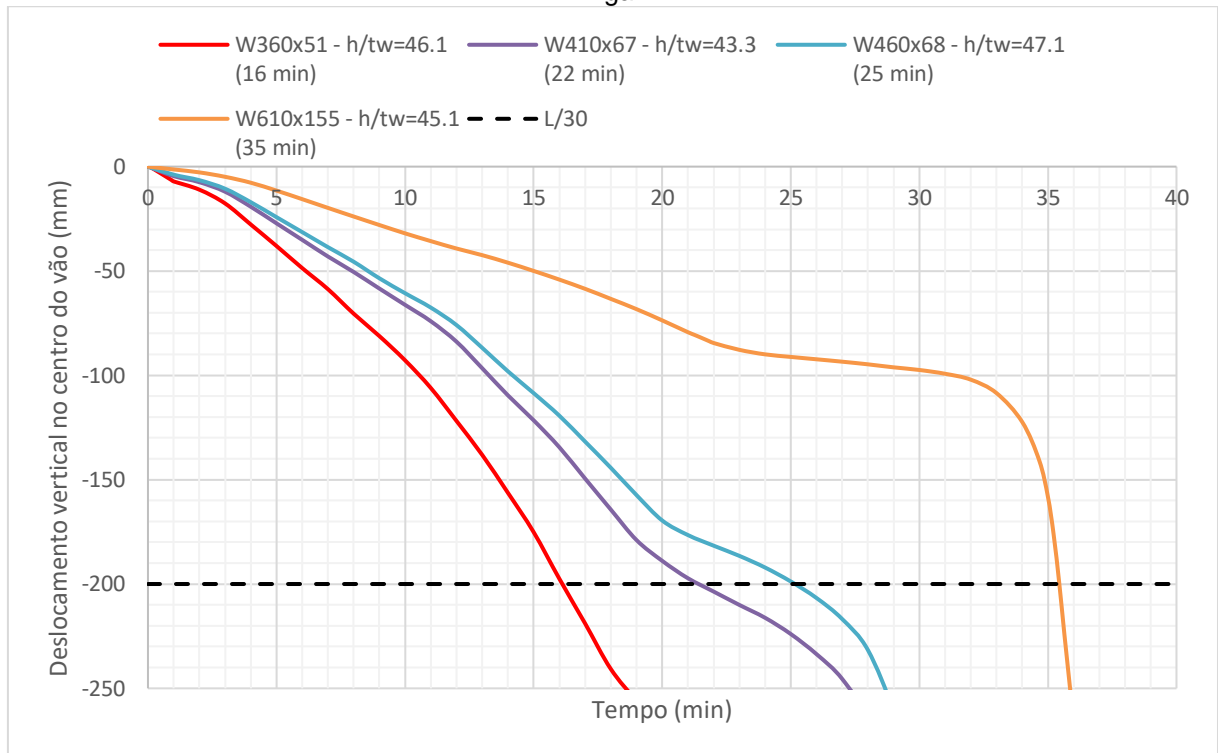


Os índices de esbeltez dos perfis variaram de 38,2 a 56,4, ou seja, em todos os casos a alma é classificada como compacta, em temperatura ambiente e em situação de incêndio, não apresentando instabilidade local na alma. Portanto, a variação do índice de esbeltez da alma, dentro do limite de classificação de alma compacta, não apresentou influência direta no comportamento estrutural da viga mista. A capacidade resistente do perfil da viga foi o que influenciou o comportamento termoestrutural dos modelos em questão. Quanto maior a altura e a inércia do perfil, menor é o índice de aproveitamento em temperatura ambiente e, conseqüentemente, maior o tempo para atingir a falha estrutural da viga mista em situação de incêndio.

7.2.2.2 Influência da altura e do peso da viga

Para os modelos 2, 5, 6 e 7, da Tabela 7, foram adotados perfis de aço com índices de esbeltez da alma similares e com diferentes alturas e pesos lineares. A Figura 116 mostra o deslocamento ao longo do tempo, em nó localizado no centro do vão e na parte inferior das vigas. O modelo 2 (perfil W360x51, $h/t_w=46,1$) apresentou falha estrutural com 16 minutos de exposição à curva de incêndio-padrão. O modelo 5 (perfil W410x67, $h/t_w=43,3$), o modelo 6 (perfil W460x68, $h/t_w=47,1$) e o modelo 7 (perfil W610x155, $h/t_w=45,1$) apresentaram falha estrutural com 22, 25 e 35 minutos, respectivamente.

Figura 116 – Deslocamentos das vigas dos modelos 2, 5, 6 e 7. Parâmetro variado: altura e peso da viga.

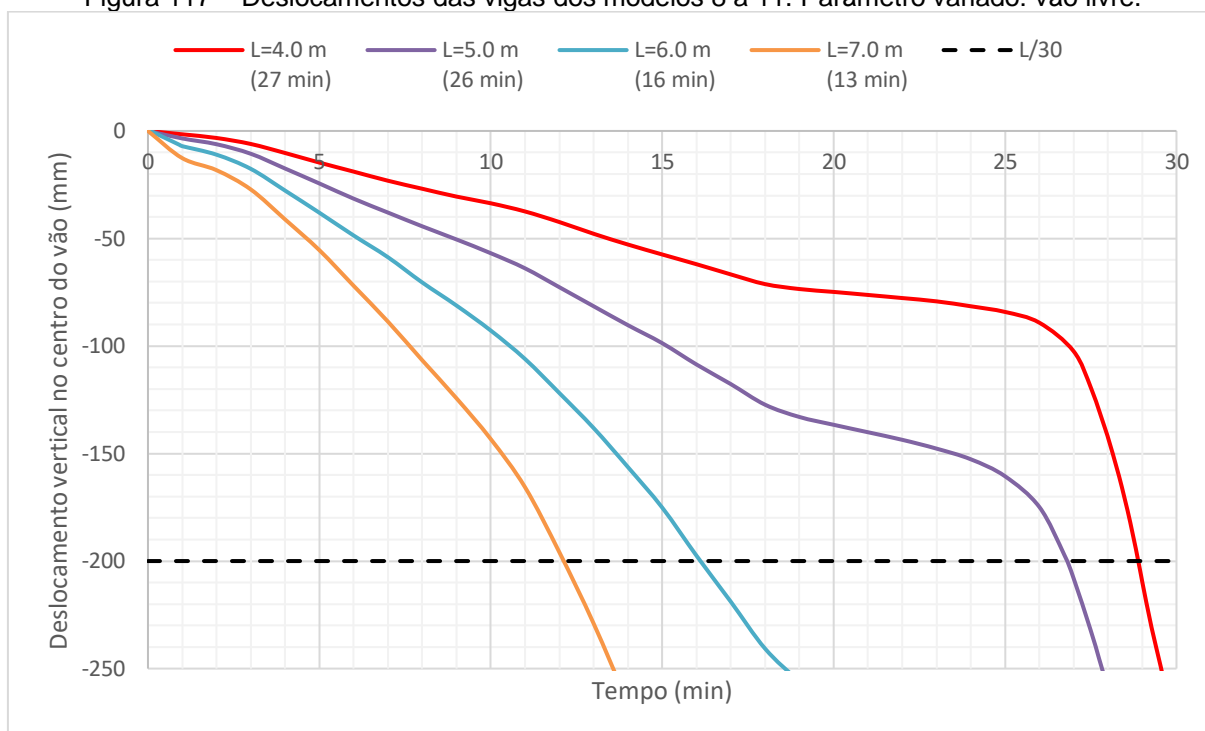


A capacidade estrutural do perfil de aço influenciou diretamente o tempo em que a viga atingiu a falha estrutural. Quanto maior o peso e a altura da viga, maiores suas propriedades mecânicas resistentes, menor é o índice de aproveitamento da seção estrutural em temperatura ambiente e, conseqüentemente, maior o tempo para atingir a falha estrutural da viga mista em situação de incêndio.

7.2.2.3 Influência do vão livre da viga mista

Para os modelos 8 a 11, listados na Tabela 7, foram adotados diferentes vãos livres (L) para as vigas mistas, variando de 4 a 7 metros, sendo seus deslocamentos mostrados na Figura 117. O modelo 8, com vão livre de 4,0 metros, apresentou falha estrutural com 27 minutos de exposição à curva de incêndio-padrão. O modelo 9, com vão livre de 5,0 m, o modelo 10, com vão livre de 6,0 m e o modelo 11, com vão livre de 7,0 m apresentaram falha estrutural com 26, 16 e 13 minutos, respectivamente.

Figura 117 – Deslocamentos das vigas dos modelos 8 a 11. Parâmetro variado: vão livre.

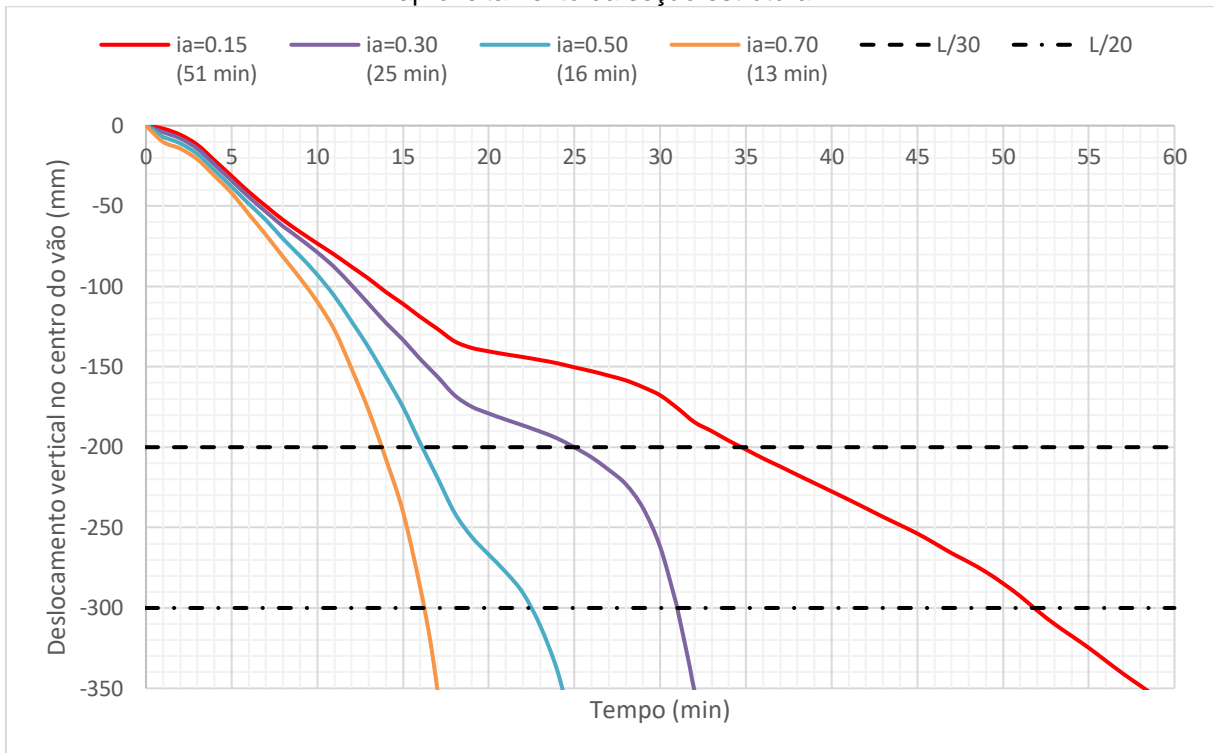


Na Tabela 13, nota-se que o vão livre influencia diretamente o índice de aproveitamento da estrutura em temperatura ambiente. O modelo com maior vão, 7 m, possui um índice de aproveitamento de 0,68, enquanto o modelo com menor vão, 4 m, possui um valor de 0,23. Portanto, observa-se que, quanto maior o vão livre da viga mista, e conseqüentemente maior o índice de aproveitamento da seção estrutural, menor o tempo necessário para a seção apresentar falha estrutural em situação de incêndio.

7.2.2.4 Influência do índice de aproveitamento da seção transversal

Para os modelos 12 a 15, listados na Tabela 7, foram adotadas sobrecargas diferentes, de modo que os índices de aproveitamento do elemento estrutural variassem de 0,15 a 0,70. A Figura 118 mostra a comparação do comportamento estrutural dessas vigas. O modelo 12, com índice de aproveitamento de 0,15, apresentou falha estrutural com 51 minutos de exposição à curva de incêndio-padrão. O modelo 13, com índice de aproveitamento de 0,30, o modelo 14, com índice de aproveitamento de 0,50, e o modelo 15, com índice de aproveitamento de 0,70, apresentaram falha estrutural com 25, 16 e 13 minutos, respectivamente.

Figura 118 – Deslocamentos das vigas dos modelos 12 a 15. Parâmetro variado: índice de aproveitamento da seção estrutural.

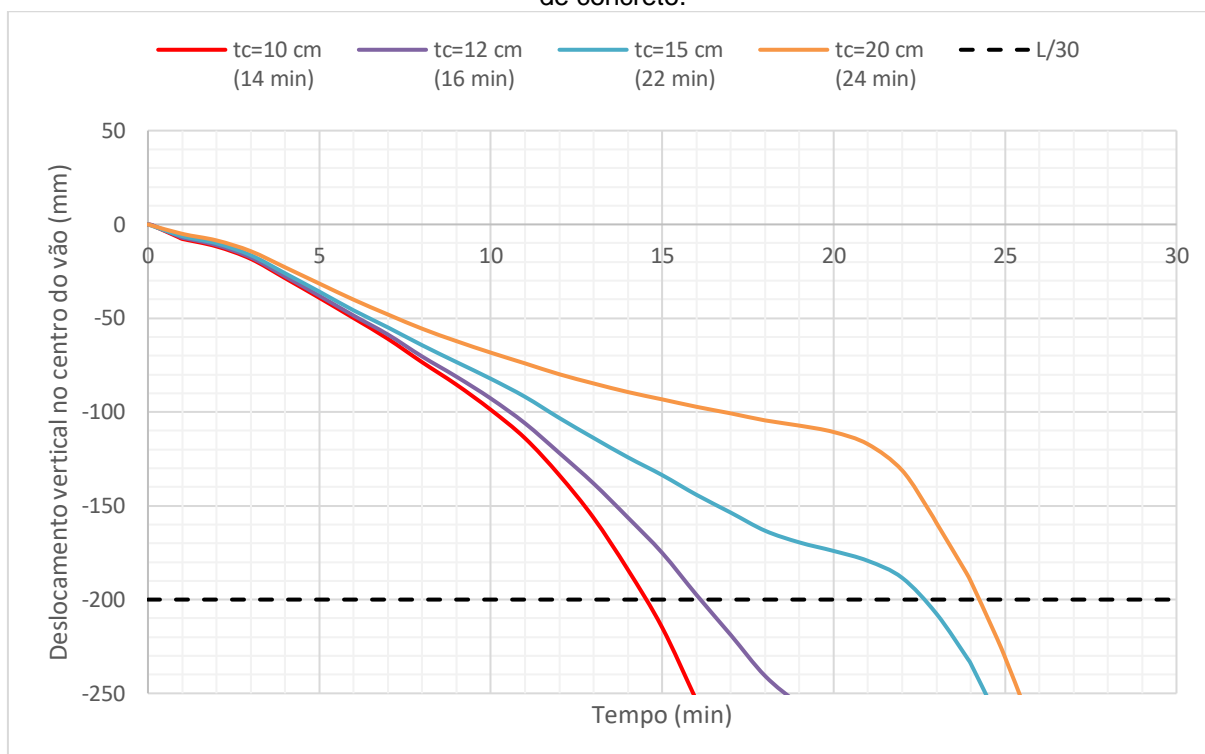


Observa-se que, quanto maior o índice de aproveitamento do elemento, ou seja, quanto mais a capacidade resistente do elemento estiver perto do seu limite estrutural em temperatura ambiente, menor o tempo necessário para a seção apresentar falha estrutural em situação de incêndio.

7.2.2.5 Influência da espessura da laje de concreto

Para os modelos 16 a 19, listados na Tabela 7, foram adotadas espessuras diferentes para laje de concreto (t_c), variando de 10 cm a 20 cm, conforme mostra a Figura 119. O modelo 16, com 10 cm de espessura da laje, apresentou falha estrutural com 14 minutos. O modelo 17, com espessura da laje de 12 cm, o modelo 18, com espessura da laje de concreto de 15 cm, e o modelo 19, espessura da laje de concreto de 20 cm, apresentaram falha estrutural com 16, 22 e 24 minutos, respectivamente.

Figura 119 – Deslocamentos das vigas dos modelos 16 a 19. Parâmetro variado: espessura da laje de concreto.

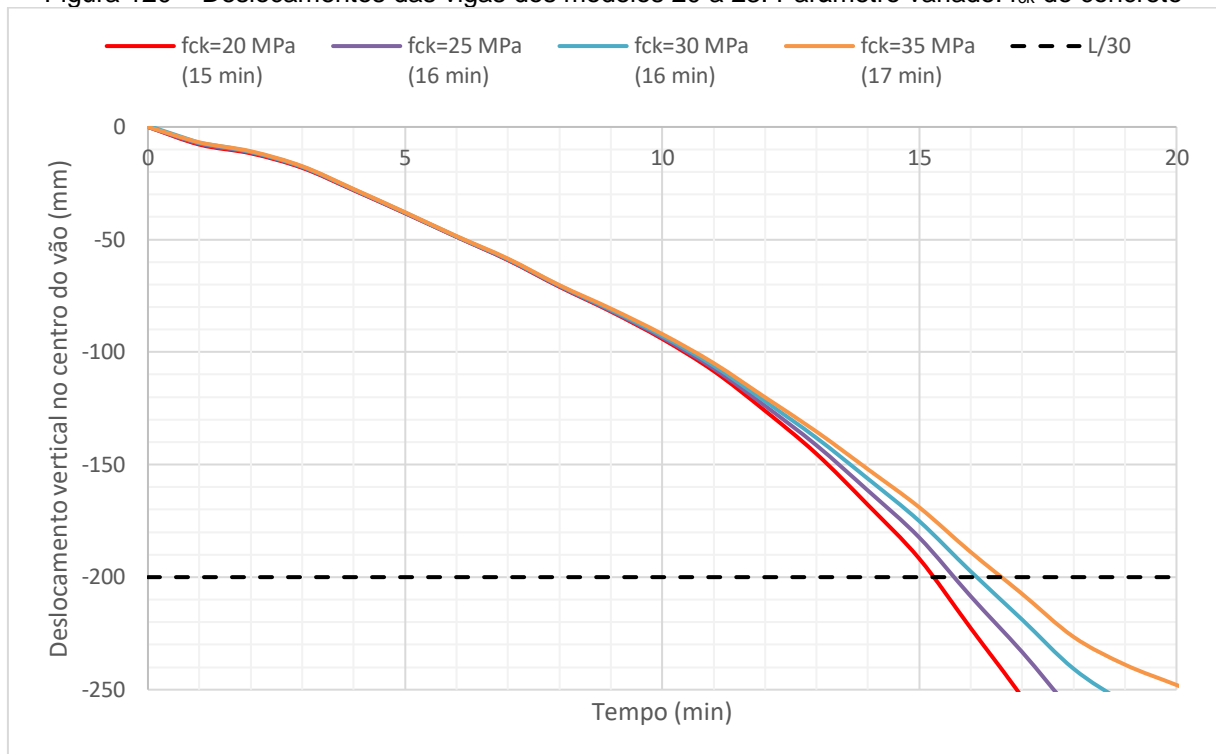


Nota-se na Tabela 13 que a espessura da laje de concreto influencia diretamente o índice de aproveitamento da seção estrutural em temperatura ambiente. O modelo com maior espessura (20 cm) possui um índice de aproveitamento de 0,41, enquanto o modelo com menor espessura (10 cm) possui um valor de 0,53. Portanto, observa-se que, quanto maior a espessura da laje de concreto, menor o índice de aproveitamento do elemento estrutural e, conseqüentemente, maior o tempo necessário para a seção apresentar falha estrutural em situação de incêndio.

7.2.2.6 Influência da resistência à compressão do concreto da laje

Conforme mostra a Tabela 7, para os modelos 20 a 23 foram adotadas diferentes resistências à compressão do concreto, variando de 20 a 35 MPa. A Figura 120 apresenta a comparação do comportamento estrutural dessas vigas. O modelo 20 (f_{ck} de 20 MPa) apresentou falha estrutural com 15 minutos de exposição à curva de incêndio-padrão. O modelo 21 (f_{ck} de 25 MPa) e 22 (f_{ck} de 30 MPa) apresentaram mesmo tempo de falha estrutural, 16 minutos. O modelo 23, com f_{ck} de 35 MPa, apresentou falha estrutural em 17 minutos.

Figura 120 – Deslocamentos das vigas dos modelos 20 a 23. Parâmetro variado: f_{ck} do concreto

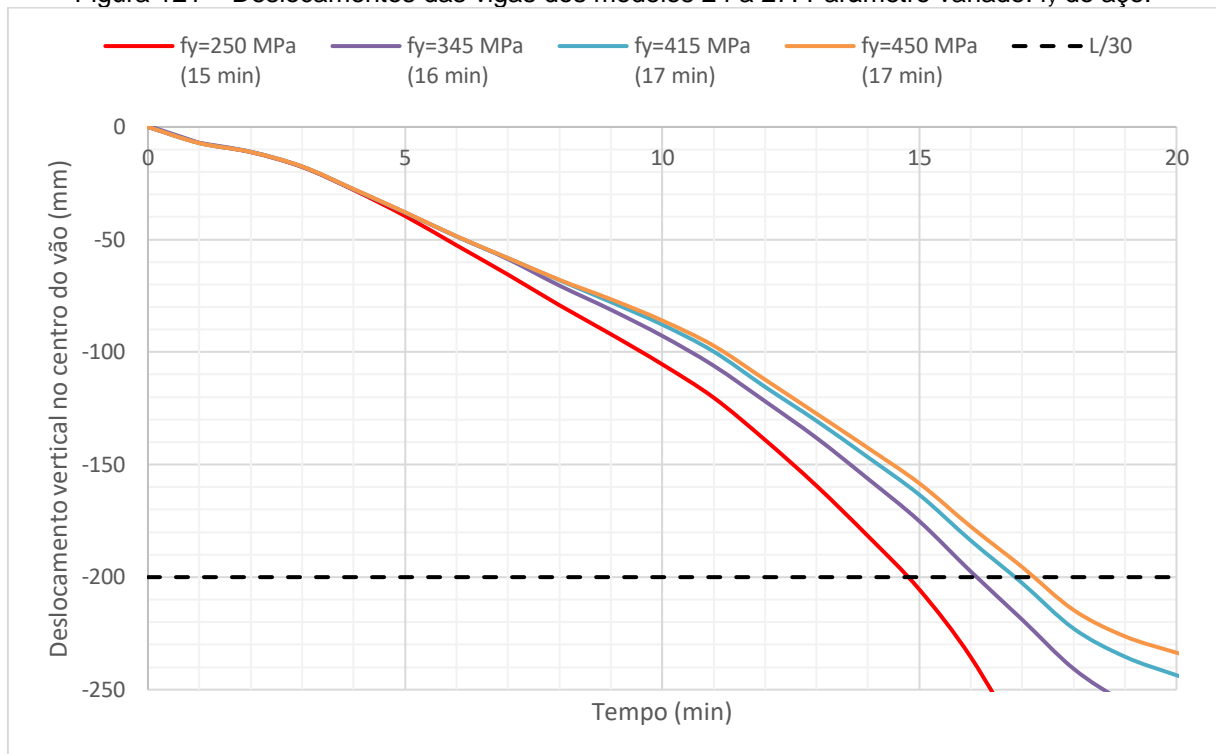


Conforme indicado na Tabela 13, a capacidade resistente da laje de concreto influencia diretamente o índice de aproveitamento da seção estrutural em temperatura ambiente. O modelo com maior f_{ck} , 35 MPa, possui um índice de aproveitamento de 0,49, enquanto o modelo com menor f_{ck} , 20 MPa, possui um valor de 0,54. Portanto, observa-se que, ao aumentar a resistência da laje de concreto, o índice de aproveitamento da seção estrutural é reduzido e o tempo necessário para a seção apresentar falha estrutural em situação de incêndio aumenta, embora esse acréscimo seja pequeno.

7.2.2.7 Influência da resistência ao escoamento do aço do perfil

Para os modelos 24 a 27, conforme Tabela 7, foram adotados aços com diferentes tensões de escoamento (f_y), variando de 250 a 450 MPa. A Figura 121 mostra a comparação do comportamento estrutural dessas vigas. O modelo 24 (f_y de 250 MPa) apresentou falha estrutural em 15 minutos de exposição à curva de incêndio-padrão. O modelo 25 (f_y de 345 MPa) apresentou falha estrutural 16 minutos. Os modelos 26 (f_y de 415 MPa) e 27 (f_y de 450 MPa) apresentaram falha estrutural com 17 minutos.

Figura 121 – Deslocamentos das vigas dos modelos 24 a 27. Parâmetro variado: f_y do aço.

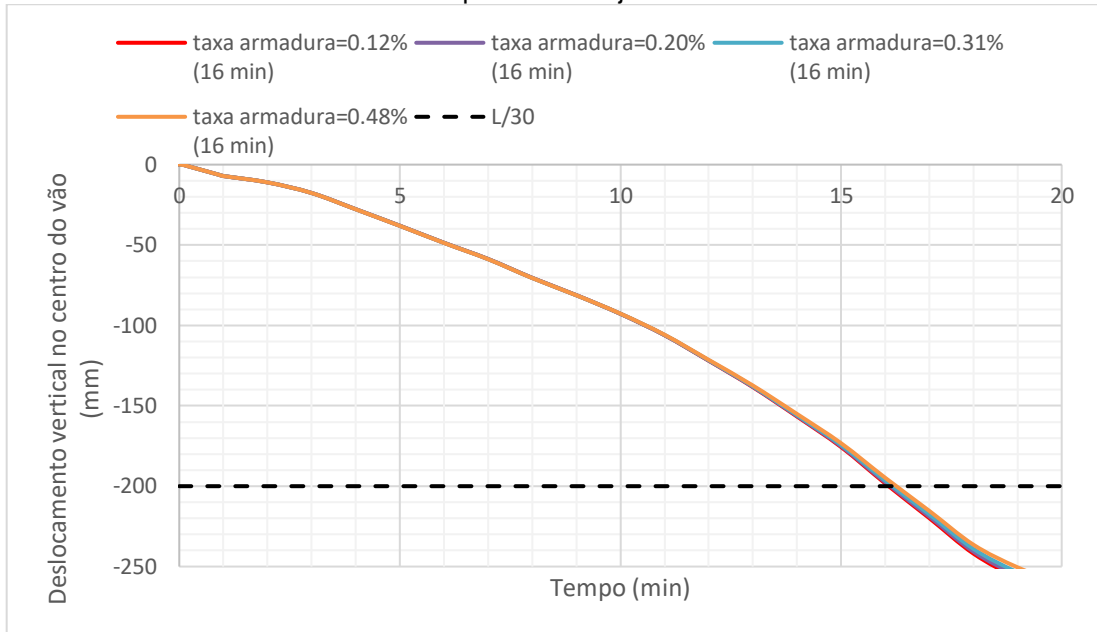


A resistência de escoamento do aço do perfil afeta o índice de aproveitamento da viga mista em temperatura ambiente, conforme Tabela 13. O modelo com maior resistência ao escoamento (450 MPa) possui um índice de aproveitamento de 0,40, enquanto o modelo com menor f_y (250 MPa) possui um valor de 0,66. Portanto, observa-se que, ao aumentar a resistência ao escoamento do aço e, conseqüentemente reduzir o índice de aproveitamento do elemento estrutural, o tempo necessário para a seção apresentar falha estrutural em situação de incêndio aumenta.

7.2.2.8 Influência da taxa de armadura positiva da laje de concreto

Considerando os modelos 28 a 31 da Tabela 7, foram adotadas diferentes taxas da armadura positiva da laje de concreto, variando de 0,12% a 0,48%. A Figura 122 mostra o comportamento estrutural dessas vigas onde se percebe que todos os modelos apresentaram falha estrutural com 16 minutos de exposição à curva de incêndio-padrão.

Figura 122 – Deslocamentos das vigas dos modelos 28 a 31. Parâmetro variado: taxa da armadura positiva da laje.



Observa-se que o aumento da taxa de armadura da laje de concreto não influencia o comportamento da viga mista em situação de incêndio. Isso porque a distância da posição da armadura até a linha neutra da seção mista é muito pequena, ou seja, não contribui efetivamente para a resistência ao momento fletor da estrutura. Destaca-se também que, conforme indicado na Tabela 13, a taxa de armadura da laje também não influencia diretamente o índice de aproveitamento calculado para o elemento estrutural em temperatura ambiente. Isso acontece porque a metodologia de cálculo utilizada pela ABNT NBR 8800:2008 não considera a armadura positiva da laje no cálculo do momento fletor resistente positivo.

8 CONCLUSÃO

A presente dissertação avaliou o comportamento térmico e estrutural de vigas mistas de aço e concreto, simplesmente apoiadas, em situação de incêndio. O estudo foi realizado por meio de modelos numéricos, via método dos elementos finitos, desenvolvidos no programa computacional ANSYS v21.1. O modelo numérico proposto foi validado por meio dos resultados experimentais apresentados por Wainman e Kirby (1988) e Aziz (2015). Os dados obtidos numericamente para o comportamento térmico e estrutural foram comparados com os experimentais e os resultados foram considerados satisfatórios.

Após a validação numérica, foram realizadas análises paramétricas de vigas mistas com variações dos parâmetros: perfil da viga de aço, vão livre da viga mista, índice de aproveitamento da viga mista, espessura da laje, resistência à compressão do concreto, resistência ao escoamento do aço e taxa de armadura da laje. Utilizou-se como critério de colapso estrutural no instante em que o deslocamento do centro da viga ultrapassa o limite de $L/20$ ou $L/30$ (caso a taxa de variação seja maior que $L^2/9000d$), de acordo com a norma BS 476-Part 20:1987. Todos os modelos propostos foram avaliados também por meio das prescrições normativas das EN 1994-1-1:2004 e EN 1994-1-2:2005.

8.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados nesse estudo, destacam-se as seguintes conclusões:

- a) O método analítico, na realização da análise térmica para o perfil de aço da viga mista, prescrito no EN 1994-1-2:2005, gera valores iguais ou muito próximos aos encontrados nos modelos numéricos. A relação entre os resultados numéricos e os analíticos na alma e na mesa inferior variou de 0,98 a 1,00. Para a mesa superior, essa relação variou de 0,93 a 0,96. A pequena diferença encontrada na mesa superior é, provavelmente, devido à dificuldade de representar a real interação entre a temperatura do aço do perfil em contato com o concreto da laje nos modelos analíticos. Como a

diferença entre os resultados foi pequena, confirma-se a confiabilidade obtida por meio dos métodos analíticos;

- b) O método analítico para análise térmica da laje de concreto das vigas mistas, por meio de tabelas, prescrito no EN 1994-1-2:2005, gera valores muito conservadores. Porém, destaca-se que na face superior e no meio da espessura da laje, as temperaturas calculadas pelos métodos analítico e numérico atingem valores muito baixos e não afetam o comportamento estrutural do elemento. Para a face inferior da laje, os resultados obtidos analiticamente irão produzir análises conservadoras e antieconômicas;
- c) Para os instantes iniciais do incêndio, os elementos dos perfis de aço atingem maiores temperaturas quanto menor for sua espessura. Porém, a partir de aproximadamente 45 minutos de exposição à curva de incêndio padrão, as temperaturas da mesa inferior da viga atingem valores similares independentemente de sua espessura. O mesmo fenômeno acontece para a alma do perfil. Os valores das temperaturas na mesa superior dos perfis são maiores, quanto menor sua espessura, durante todo o tempo de exposição à curva de incêndio padrão;
- d) Os valores das temperaturas nos elementos da viga e na face inferior da laje independem da espessura da laje de concreto. Esse parâmetro influencia no comportamento térmico ao longo da altura da laje: quanto maior a espessura da laje, menores são as temperaturas calculadas para o topo da laje e no meio de sua espessura ao longo do tempo de exposição ao incêndio padrão;
- e) Os intervalos de tempo das falhas estruturais, estimados por meio do método analítico, são comprovados com os resultados calculados numericamente. Portanto, é possível afirmar que os métodos analíticos conseguem prever o comportamento termoestrutural de maneira satisfatória;
- f) O índice de aproveitamento estrutural em temperatura ambiente é o parâmetro predominante em relação ao comportamento estrutural da viga mista em situação de incêndio. Quanto maior o índice de aproveitamento,

menor será o tempo até o colapso estrutural ocorrer, quando submetida à curva de incêndio padrão;

- g) Quando a estrutura tiver um Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) de 30 minutos, o índice de aproveitamento da viga mista simplesmente apoiada em temperatura ambiente deve ser no máximo de 0,20. Se o TRRF for de 60 minutos, o índice de aproveitamento deve ser no máximo de 0,10. Se não for possível atender a esse critério, dispositivos de proteção térmica para as vigas mistas devem ser previstos no projeto.

8.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A análise de estruturas em situação de incêndio é uma área de estudo muito ampla e requer maior aprofundamento sobre os efeitos das altas temperaturas aplicadas em diferentes sistemas estruturais. A seguir são listadas recomendações para trabalhos futuros:

- Realizar um estudo paramétrico, por meio de análise numérica, de vigas mistas biengastadas e/ou contínuas em situação de incêndio;
- Considerar vigas mistas em situação de incêndio com os mesmos parâmetros apresentados nesse trabalho, porém utilizando materiais de proteção térmica;
- Realizar um estudo paramétrico, por meio de análise numérica, de vigas mistas com perfis de aço não compactos;
- Estudar vigas mistas em situação de incêndio com os mesmos parâmetros apresentados nesse trabalho, porém considerando interação parcial entre o perfil de aço e a laje de concreto.

9 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. West Conshoocken, PA. **ASTM**, 2011.

ANSYS. Finite element computer code. Version 21.1. Canonburg, PA. **ANSYS, INC.**, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. **ABNT**, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. **ABNT**, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. **ABNT**, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. **ABNT**, 2012.

AZIZ, Esam. **Response of fire exposed steel bridge girdes**. 2015b. 321 f. Michigan State University, 2015.

BAILEY, C. G.; WHITE, D. S.; MOORE, D. B. The tensile membrane action of unrestrained composite slabs simulated under fire conditions. **Engineering Structures**, 2000.

BRE Cardington Steel Framed Building Fire Tests. Disponível em: <<https://www.bregroup.com/case-studies/bre-cardington-steel-framed-building-fire-tests/>>. , 1998.

BRITISH STANDARD. BS 476: Part 20: 1987. Fire tests on buildings materials and structures - Part 20. Method for determination of the fire resistance of elements of construction (general principles). **BS**, 1987.

BRUNKHORST, S.; PFENNING, S.; ZEHFUB, J.; MENSINGER, M. Influence of Elevated Temperatures on the Composite Joint of a Composite Beam in Fire. **Fire Technology**, v. 55, n. 5, p. 1553–1570, 2019.

BUCHANAN, A. H. **Structural Design for Fire Safety**. 1. ed. New Zealand: Wiley & Sons, 2001.

CAVALCANTI, L. A. **Estudo teórico-experimental da contribuição da armadura para a capacidade resistente de vigas parcialmente revestidas**. 2010. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

CEDENO, Guillermo A.; VARMA, Amit H.; GORE, Jay. Predicting the standard fire behavior of composite steel beams. **Composite Construction in Steel and Concrete VI - Proceedings of the 2008 Composite Construction in Steel and Concrete Conference**, v. 41142, n. February, p. 642–656, 2011.

DIAS, Mateus de Souza Furriel. **Análise do comportamento térmico de vigas mistas aço-concreto submetidas a incêndio**. 2018. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1991-1-2: Eurocode 1: Action on structures – part 1-2: General action – Action on structures exposed to fire. **CEN**, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1992-1-2: Eurocode 2: Design of concrete structures – part 1-2: General rules – Structural fire design. **CEN**, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1993-1-2: Eurocode 3: Design of steel structures – part 1-2: General rules – Structural fire design. **CEN**, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – part 1-1: General rules and rules for buildings. **CEN**, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1994-1-2: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – part 1-2: General rules – Structural fire design. **CEN**, 2005.

FISCHER, Erica C. Amit H. Varma. Fire resilience of composite beams with simple connections: Parametric studies and design. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 128, p. 11–135, 2017.

FISCHER, Erica C.; VARMA, Amit H. Fire behavior of composite beams with simple connections: Benchmarking of numerical models. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 111, p. 112–125, 2015.

GILLIE, M.; USMANI, A. S.; ROTTER, J. M. A structural analysis of the first Cardington test. **Journal of Constructional Steel Research**, 2001.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 834. Fire-resistance Tests – Elements of Building construction, Part 1: General Requirements. **ISO**, 1999.

JIANG, Jian; LI, Guo Qiang; USMANI, Asif. Analysis of composite steel-concrete beams exposed to fire using OpenSees. **Journal of Structural Fire Engineering**, v. 6, n. 1, p. 1–19, 2015.

KODUR, V. K.R.; NASER, M. Z.; PAKALA, P.; VARMA, A. Modeling the response of composite beam-slab assemblies exposed to fire. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 80, p. 163–173, 2013.

KODUR, V. K.R.; NASER, M. Z. Effect of local instability on capacity of steel beams exposed to fire. **Journal of Constructional Steel Research**, 2015.

KOTINDA, Tatianne lamin. **Modelagem Numérica De Vigas Mistas Aço-Concreto Simplesmente Apoiadas : Ênfase Ao Estudo Da Interface Laje-Viga**. 2006. 114 f.

Universidade de São Paulo, 2006.

MÄKELÄINEN, Pentti; MA, Zhongcheng. Fire resistance of composite slim floor beams. **Journal of Constructional Steel Research**, 2000.

MORAIS, André Pinto. **ANÁLISE NUMÉRICA VIA MEF DE VIGAS MISTAS AÇO E CONCRETO COM LAJES ALVEOLARES**. 2018. 90 f. Dissertação (Mestrado). COPPE UFRJ, 2018.

NASER, M. Z.; KODUR, V. K.R. Factors governing onset of local instabilities in fire exposed steel beams. **Thin-Walled Structures**, v. 98, p. 48–57, 2016.

NATIONAL WILDFIRE COORDINATING GROUP. **Glossary of Wildland Fire Terminology**. Boise, 2012

PAK, H.; KANG, M. S.; KANG, J. W.; KEE, S.; CHOI, B. A Numerical Study on the Thermo-mechanical Response of a Composite Beam Exposed to Fire. **International Journal of Steel Structures**, v. 18, n. 4, p. 1177–1190, 2018.

PILOTO, P.; Balsa, C.; SANTOS, L.; KIMURA, E. Effect of the load level on the resistance of composite slabs with steel decking under fire conditions. **Journal of Fire Sciences**, v. 38, n. 2, p. 212–231, 2020.

PITANGA, Marcelo de Andrade. **ANÁLISE TÉRMICA DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**. 2004. 171 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pernambuco, 2004.

REGOBELLO, Ronaldo. **Numerical analysis of steel and composite steel-concrete cross sections and structural elements in fire situation [in portuguese]**. 2007. 254 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

RICARDO H. FAKURY, ANA LYDIA CASTRO E SILVA, RODRIGO CALDAS. **DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE AÇO E MISTOS DE AÇO E CONCRETO**. SÃO PAULO: PEARSON EDUCATION, 2016.

RIGOBELLO, Ronaldo; NETO, Jorge Munaiar. Análise Numérica de Seções Transversais e de Elementos Estruturais de Aço e Mistos de Aço e Concreto em Situação de Incêndio. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 10, n. 47, p. 97–116, 2008.

ROMAGNOLI, L C; SILVA, V P. About the use of semi-continuity to remove fireproof coatings in simply supported composite steel and concrete beams/ Sobre o aproveitamento da semicontinuidade para eliminar o revestimento contra fogo em vigas mistas de aço e concreto simplesmente apoiadas. **IBRACON Structures and Materials Journal**. v. 11, n. 7, p. 296–306, 2018.

ROMAGNOLI, Lucas Coscia. **Análise de vigas mistas de aço e concreto semicontínuas em situação de incêndio**. 2018. 307 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

SELDEN, Kristi L.; FISCHER, Erica C.; VARMA, Amit H. Experimental investigation of composite beams with shear connections subjected to fire loading. **Journal of Structural Engineering (United States)**, 2016.

SELDEN, Kristi L.; VARMA, Amit H. Composite beams under fire loading: Numerical modeling of behavior. **Journal of Structural Fire Engineering**, v. 7, n. 2, p. 142–157, 2016.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo, 2001.

WAINMAN, D.E.; KIRBY, B.R. Compendium of UK Standard Fire teste Data Unprotected Structural Steel - 1. **British Steel Comporation Research Services Swindem Laboratories**, v. BSC, n. 1988, p. 236, 1988.

WELLMAN, E. Experimental evaluation of composite floor assemblies under fire loading. **ASCE J Struct Eng**, 2011.

WONG, M. B. Size Effect on Temperatures of Structural Steel in Fire. **Journal of Structural Engineering**, v. 131, n. 1, p. 16–20, 2005.

APÊNDICE A – GRÁFICOS DOS RESULTADOS TÉRMICOS E ESTRUTURAIS

Figura A.1 - Resultado da análise térmica da Modelo 1.

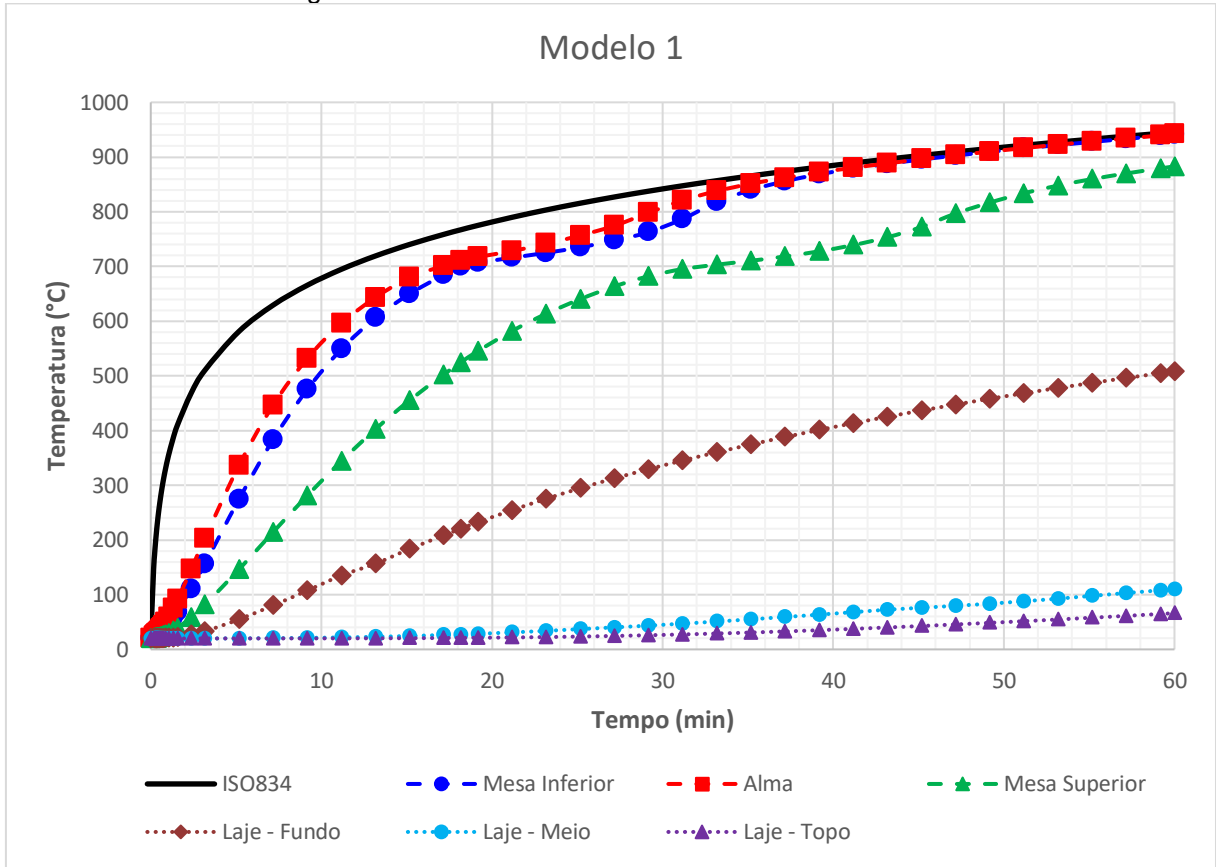


Figura A.2 - Desenvolvimento da temperatura na seção da viga mista do Modelo 1.

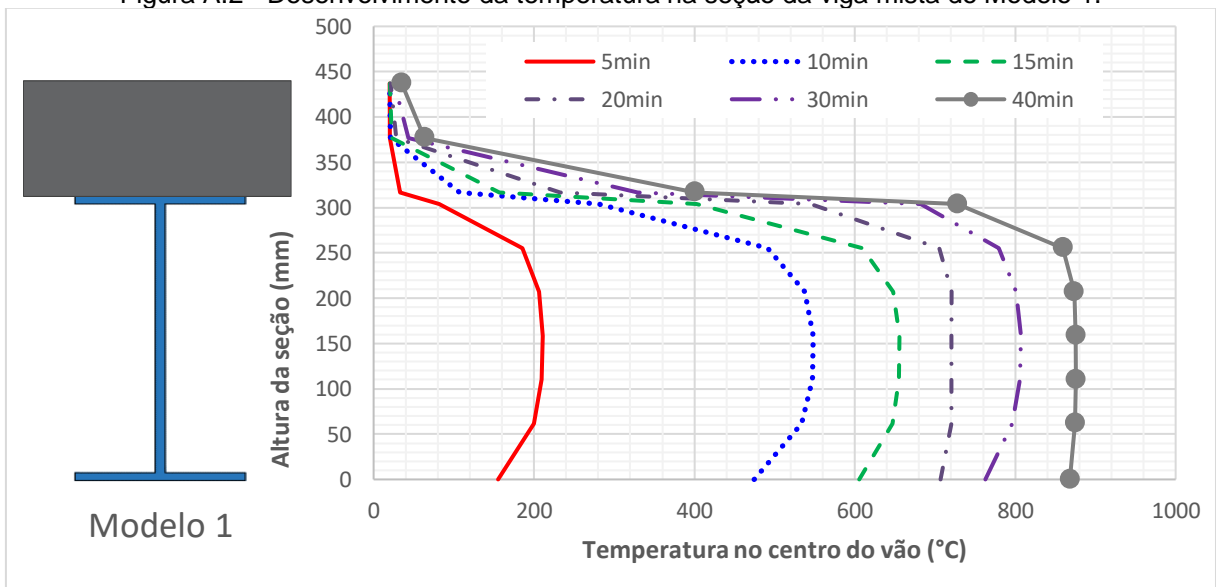


Figura A.3 - Resultado da análise térmica da Modelo 2.

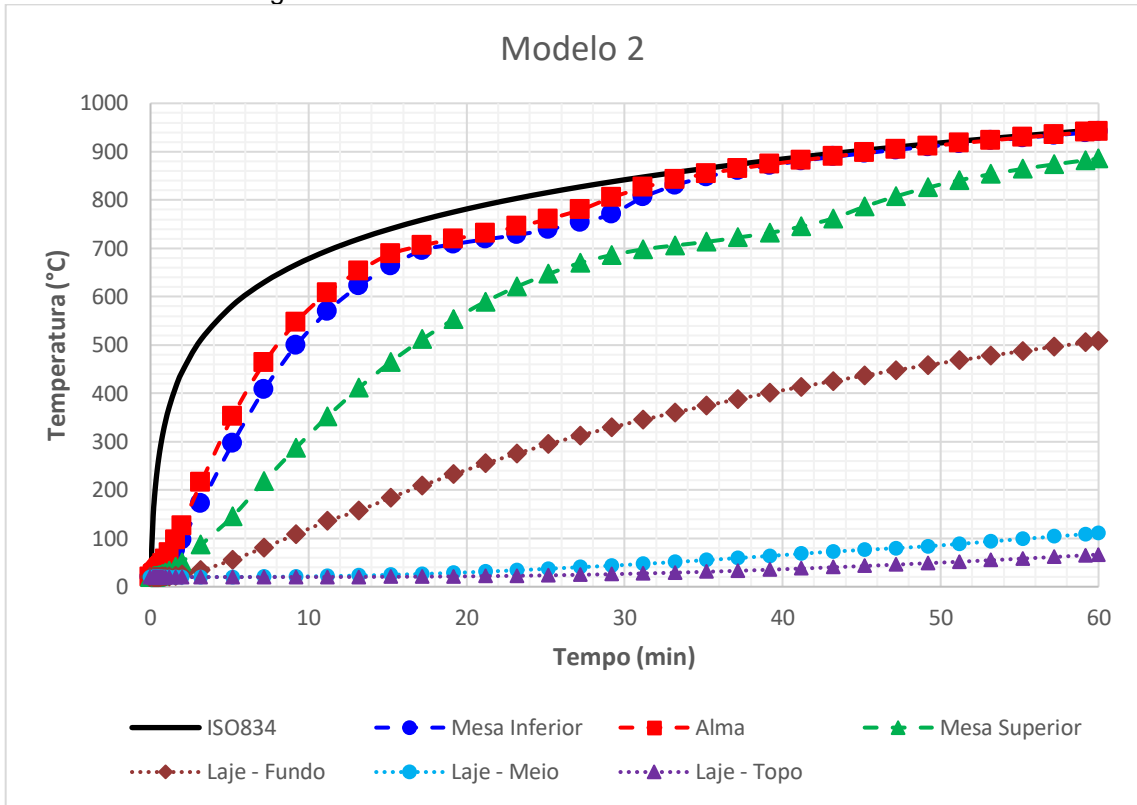


Figura A.4 – Desenvolvimento da temperatura na seção da viga mista do Modelo 2.

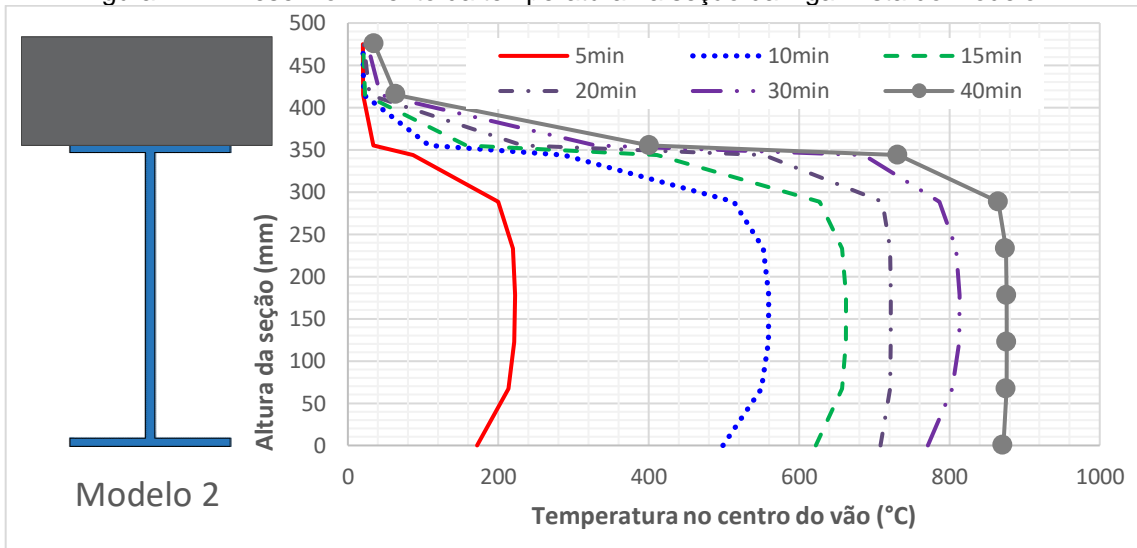


Figura A.5 – Resultado da análise térmica da Modelo 3.

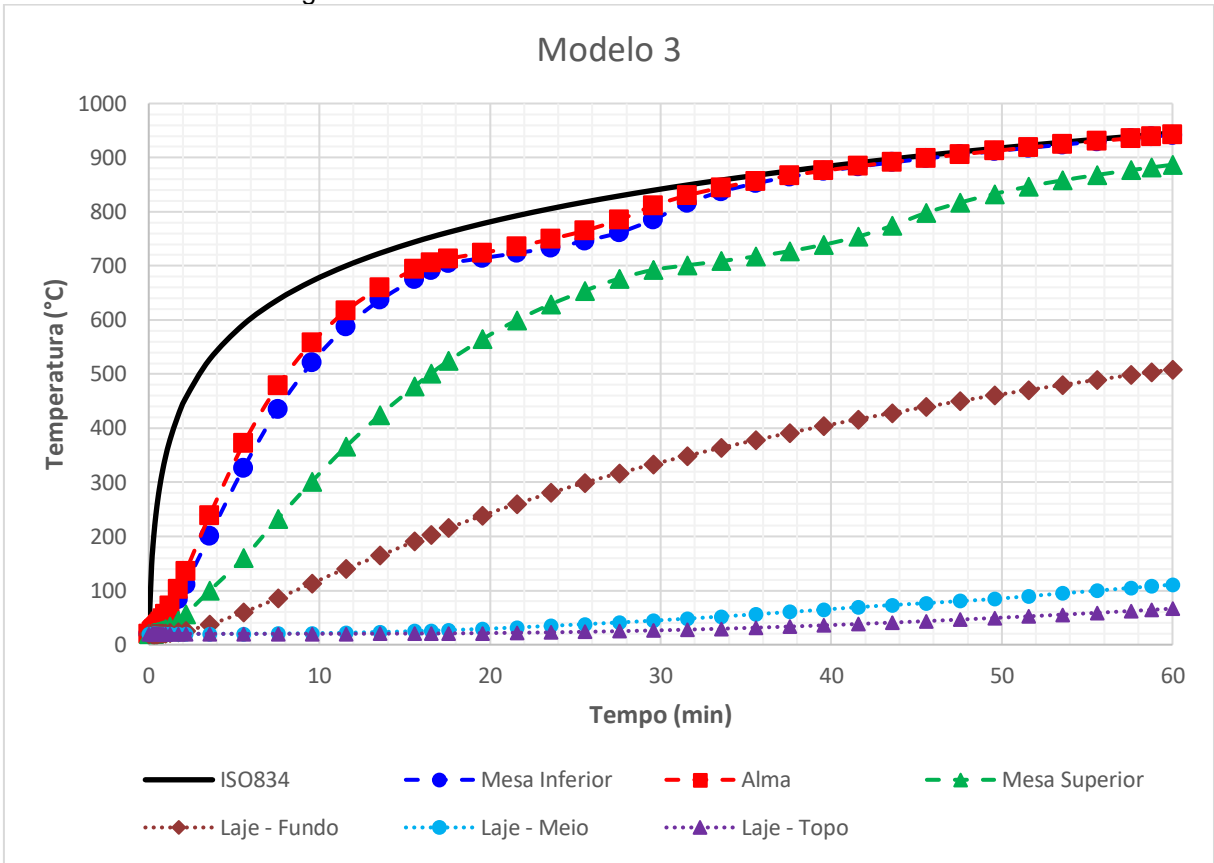


Figura A.6 – Desenvolvimento da temperatura na seção da viga mista do Modelo 3.

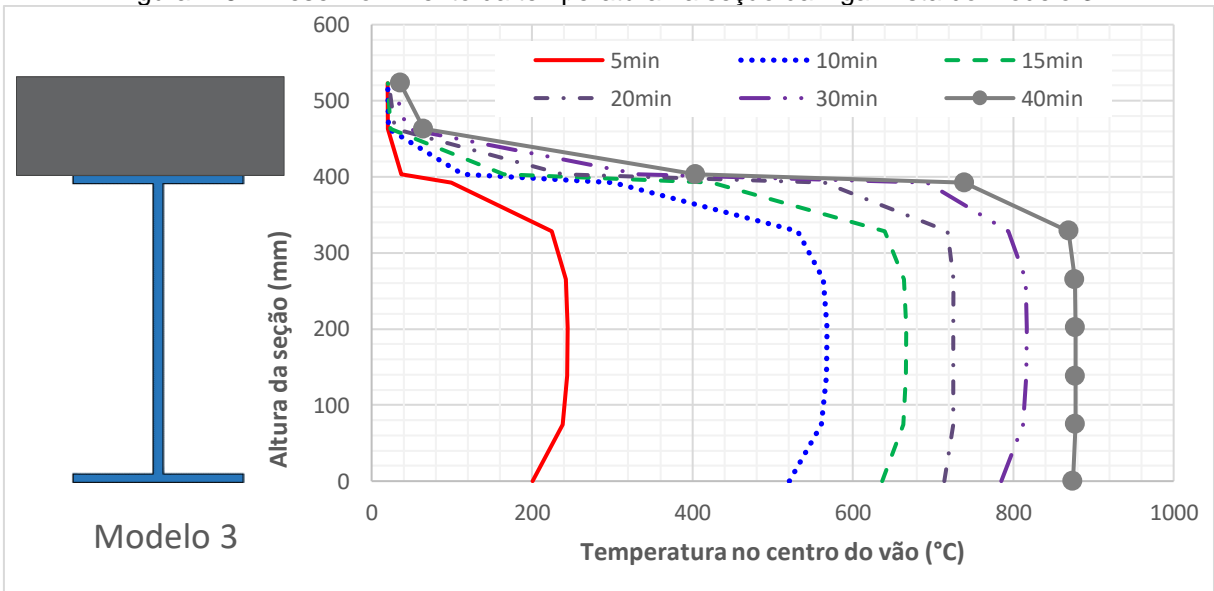


Figura A.7 – Resultado da análise térmica da Modelo 4.

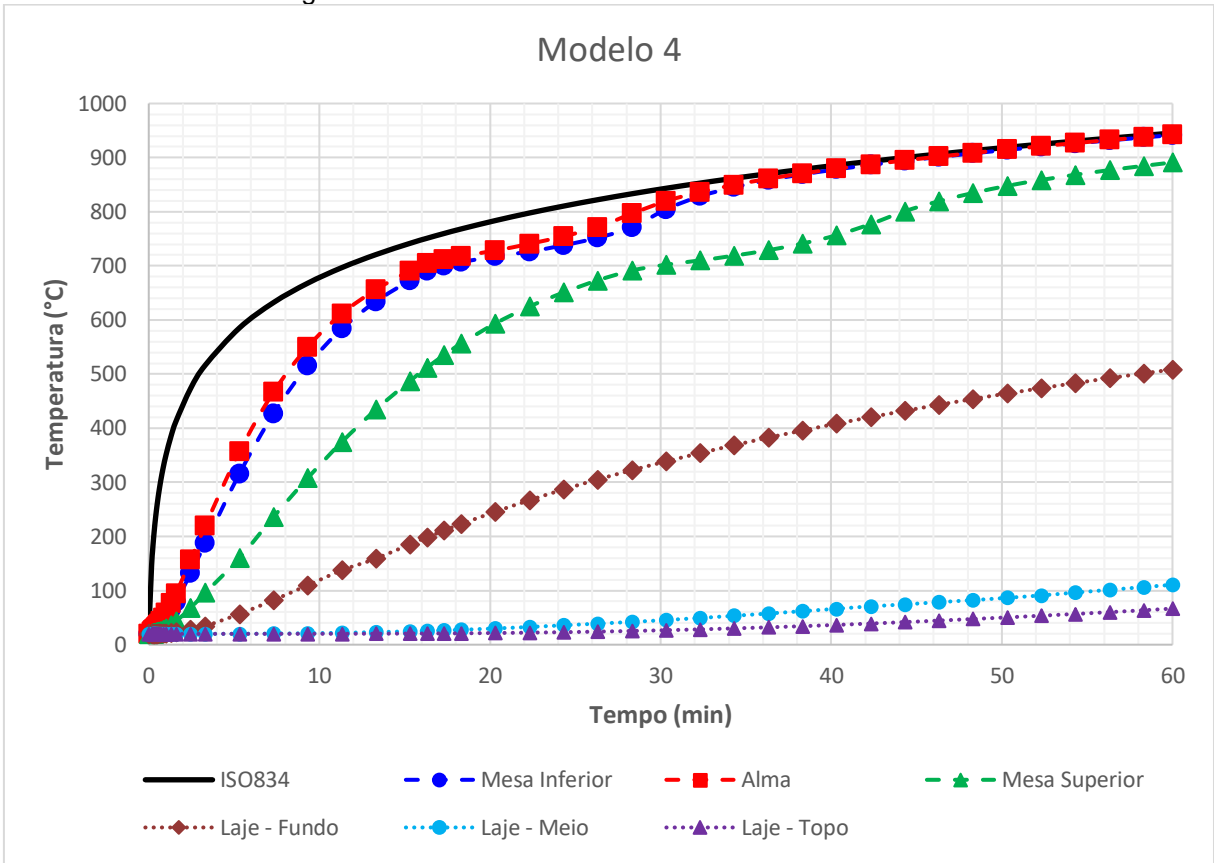


Figura A.8 – Desenvolvimento da temperatura na seção da viga mista do Modelo 4.

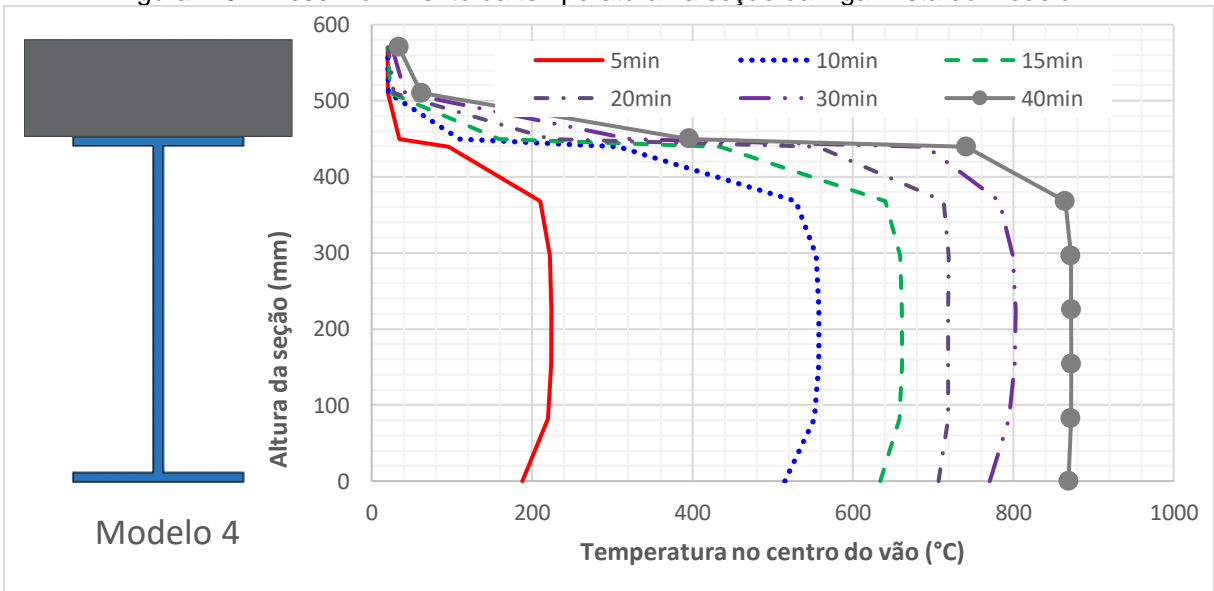


Figura A.9 – Resultado da análise térmica da Modelo 5.

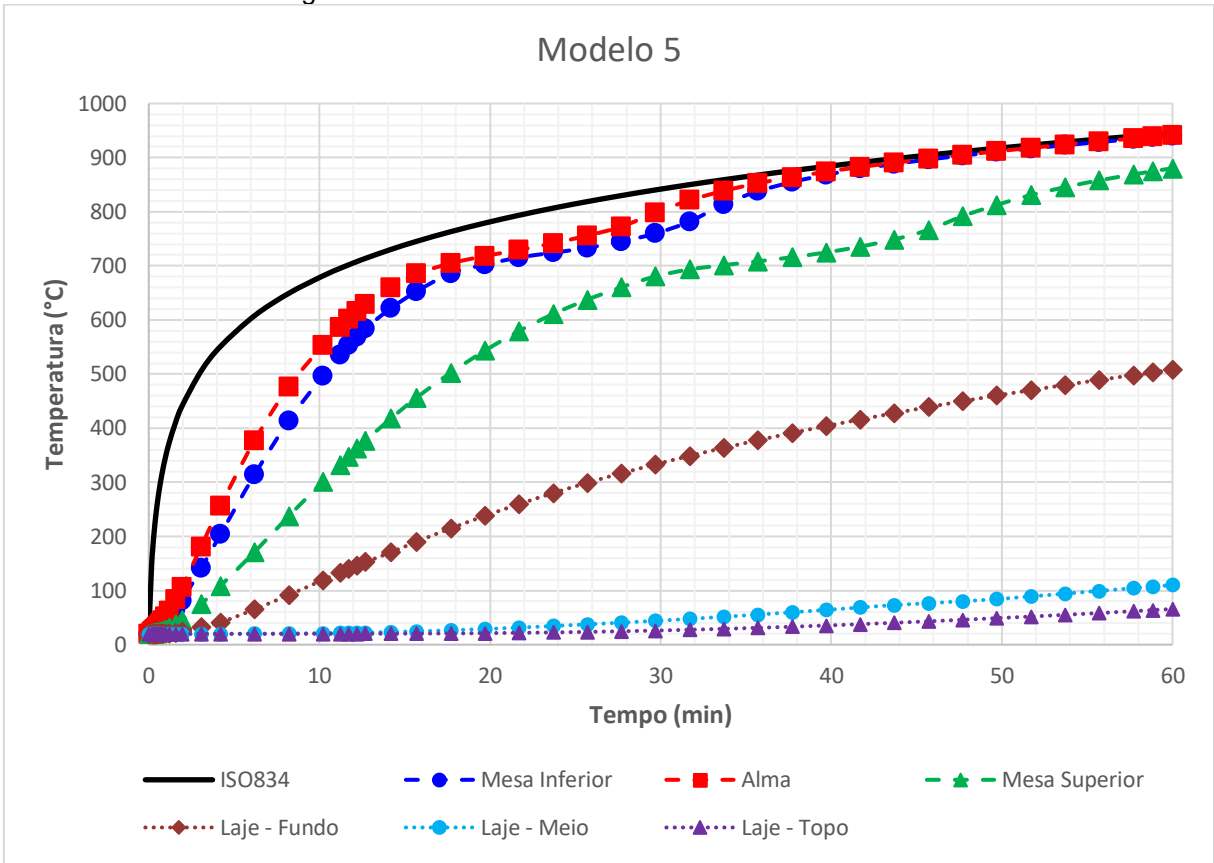


Figura A.10 – Desenvolvimento da temperatura na seção da viga mista do Modelo 5.

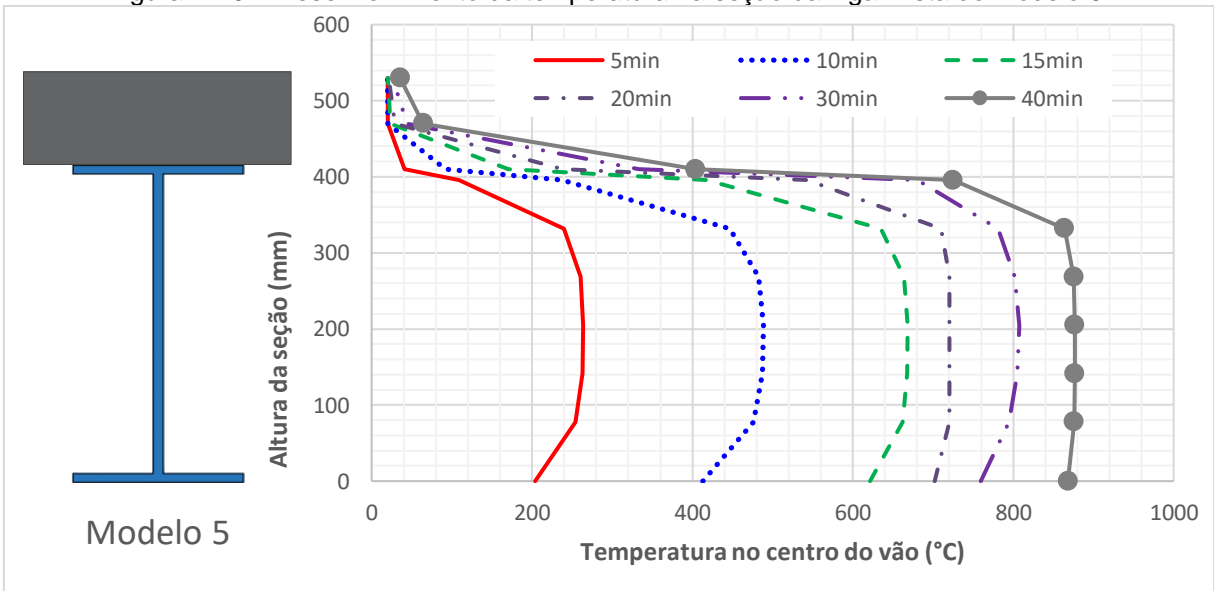


Figura A.11 – Resultado da análise térmica da Modelo 6.

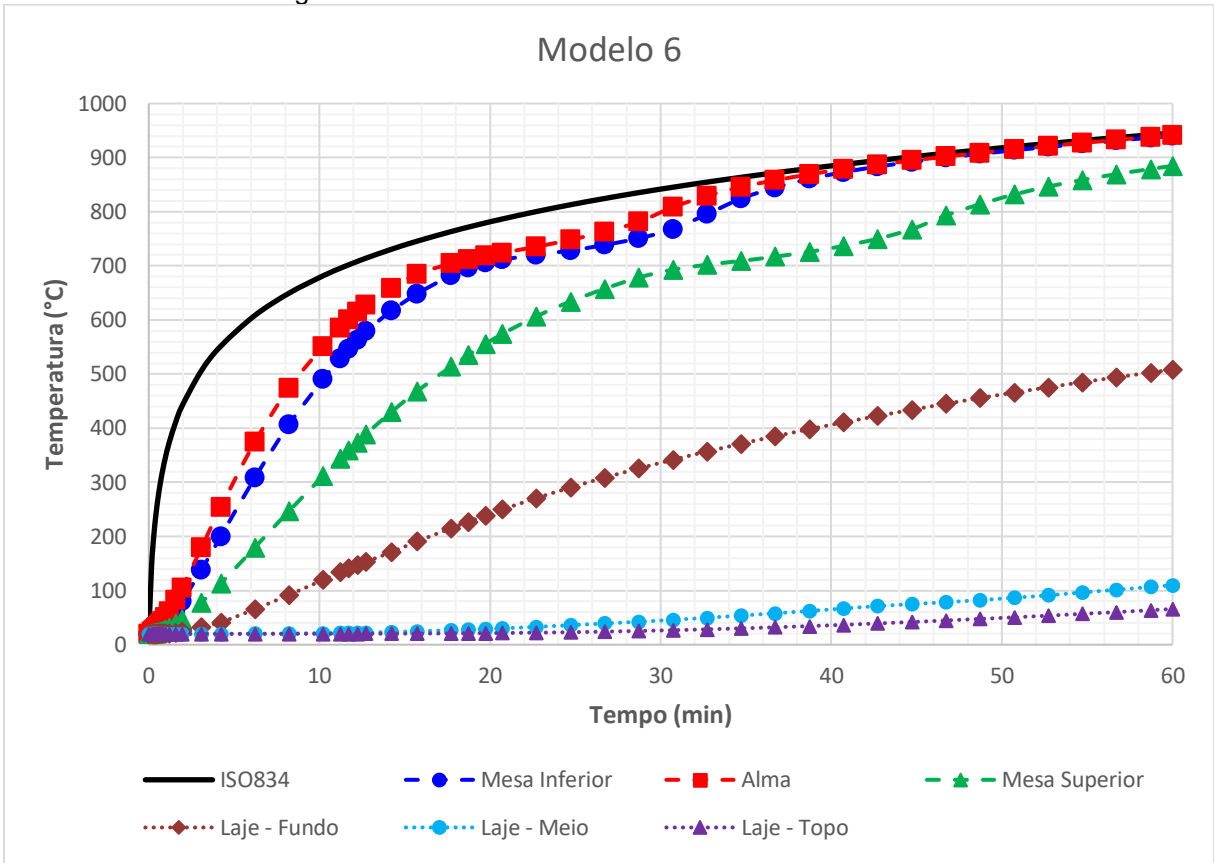


Figura A.12 – Desenvolvimento da temperatura na seção da viga mista do Modelo 6.

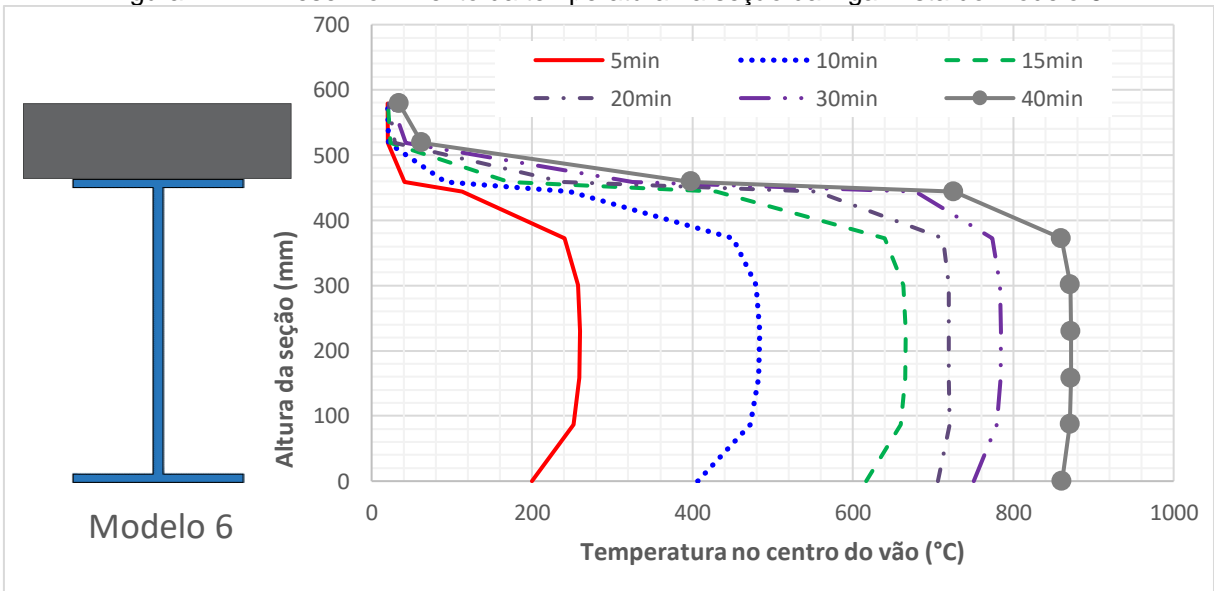


Figura A.13 – Resultado da análise térmica da Modelo 7.

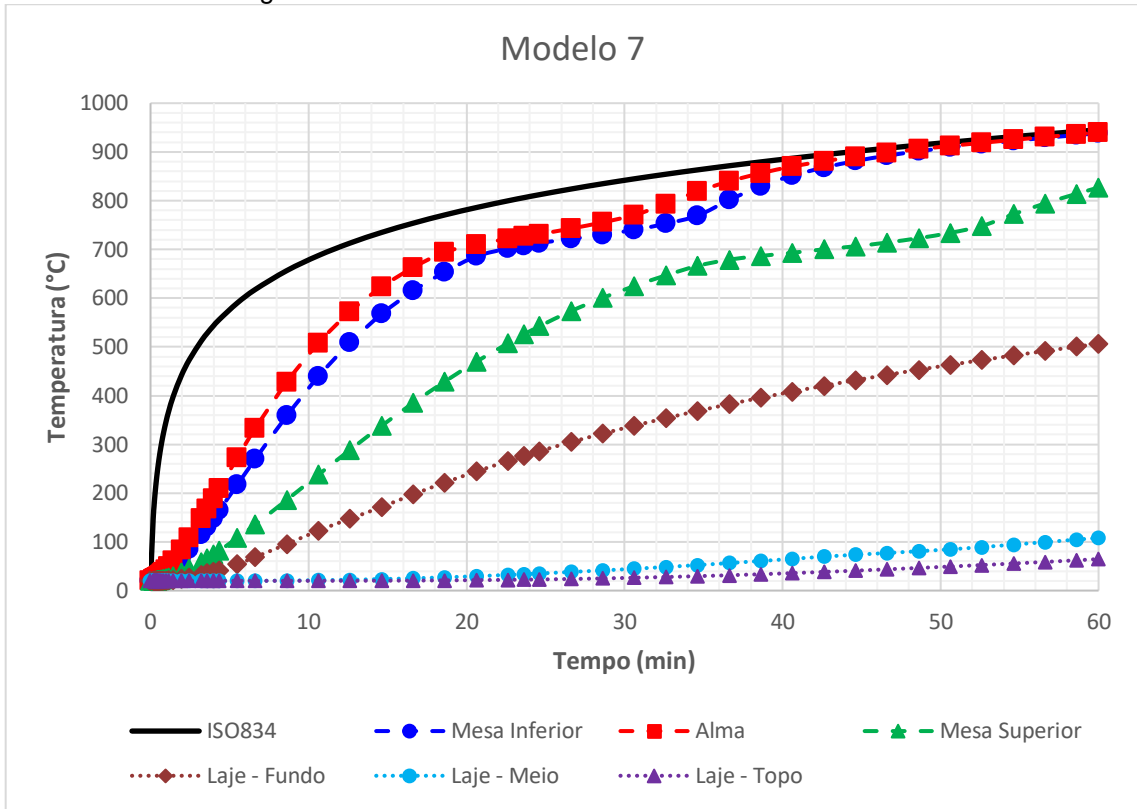


Figura A.14 – Desenvolvimento da temperatura na seção da viga mista do Modelo 7.

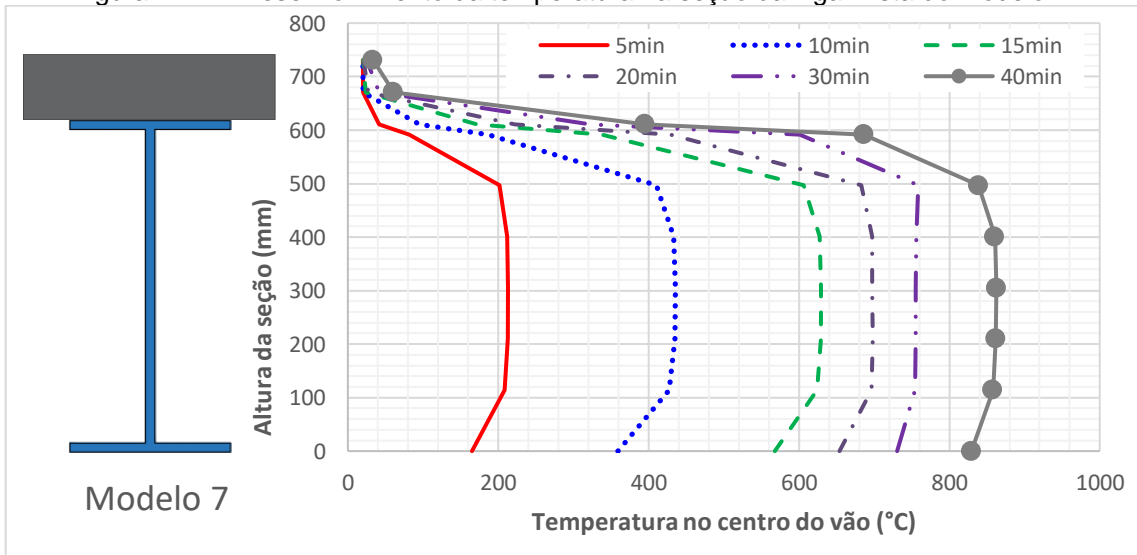


Figura A.15 – Resultado da análise térmica da Modelo 16.

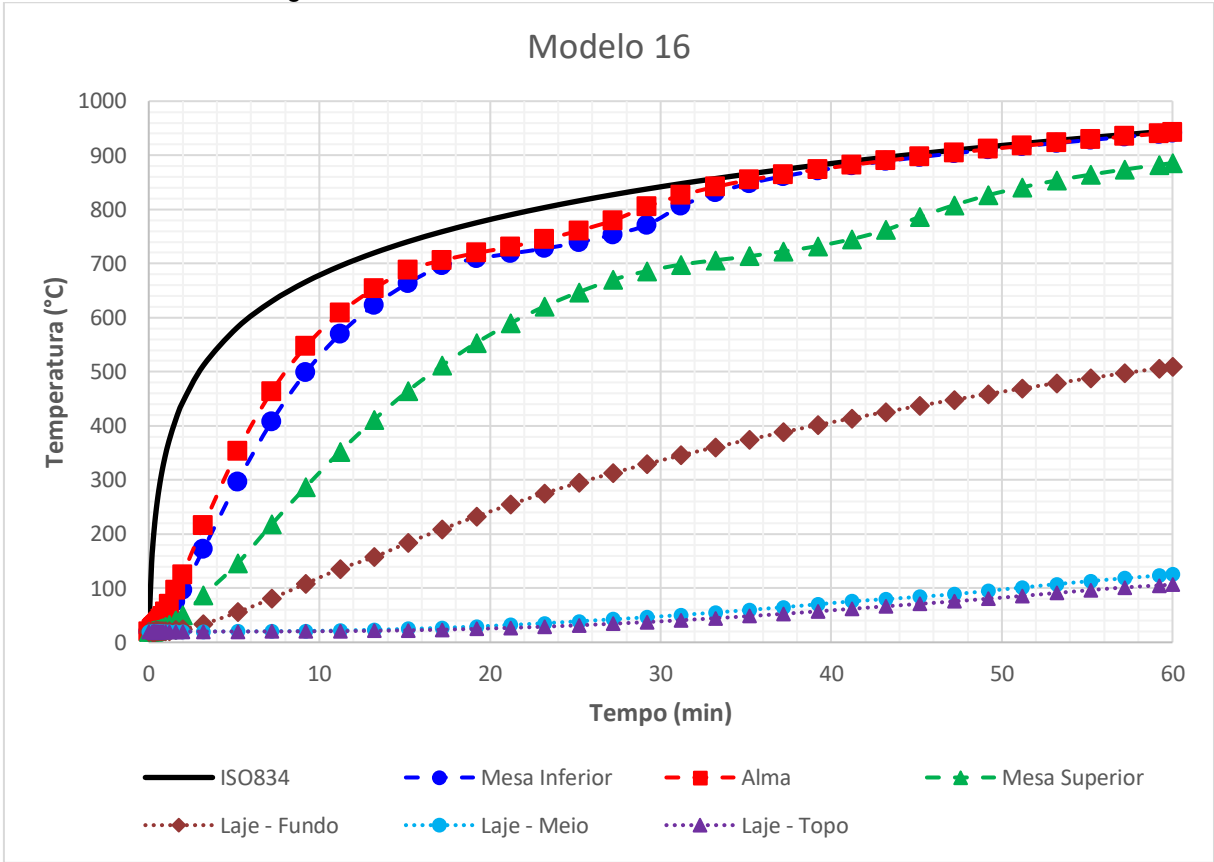


Figura A.16 – Desenvolvimento da temperatura na seção da viga mista do Modelo 16.

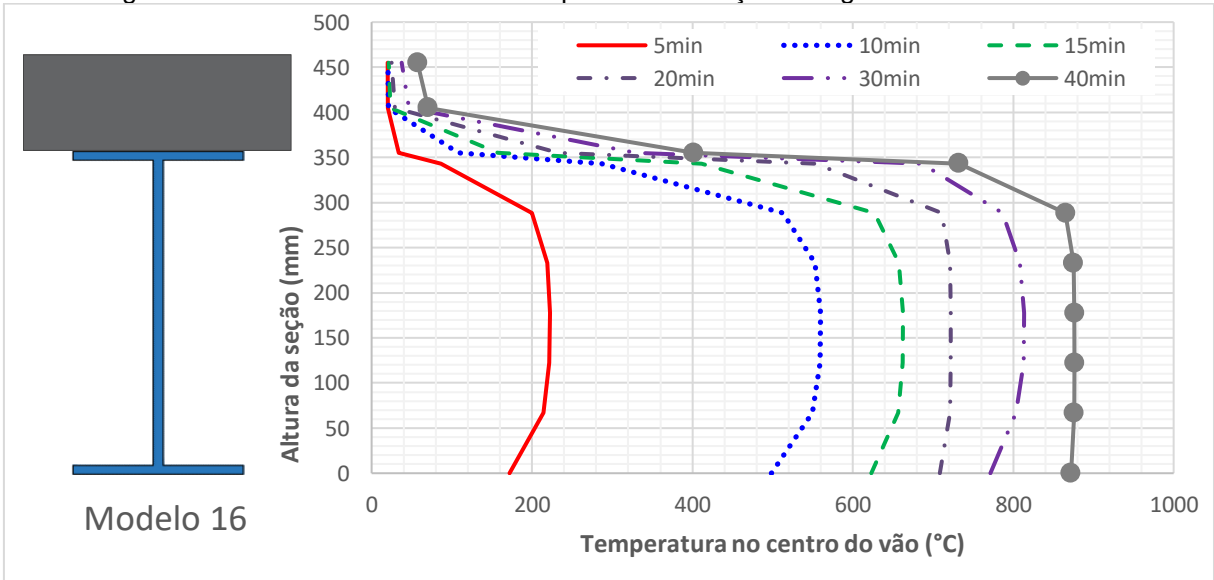


Figura A.17 – Resultado da análise térmica da Modelo 18.

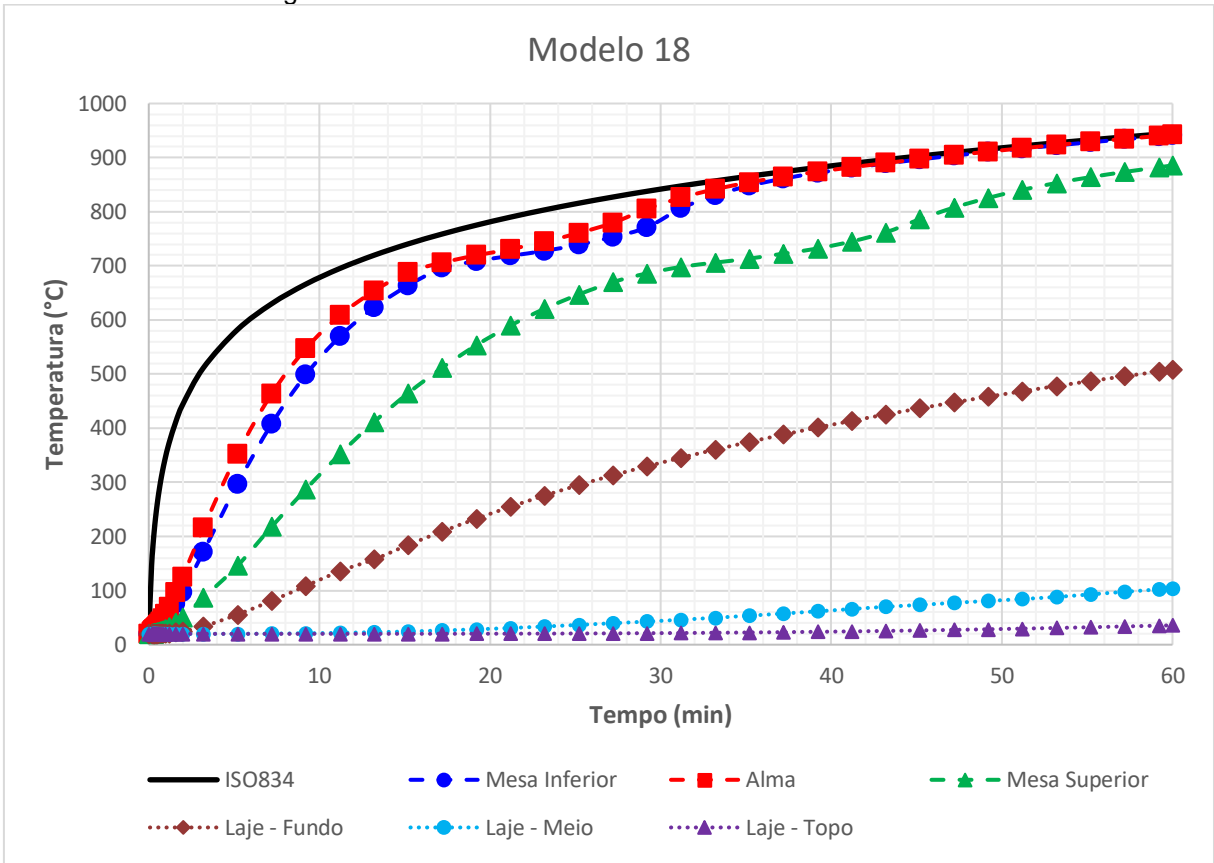


Figura A.18 – Desenvolvimento da temperatura na seção da viga mista do Modelo 18.

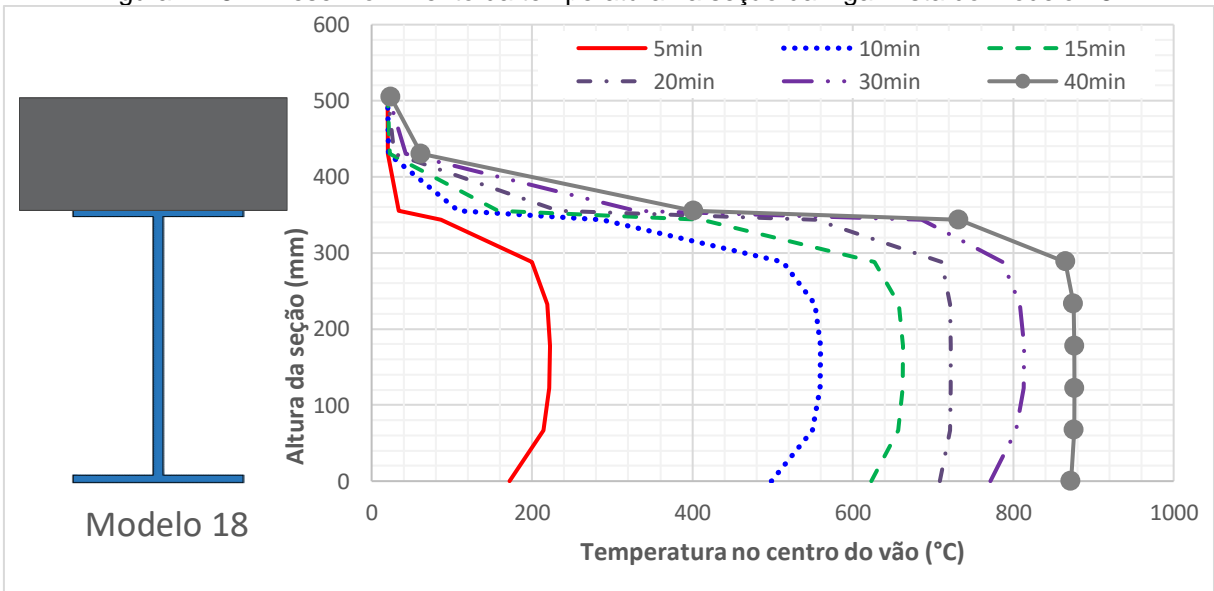


Figura A.19 – Resultado da análise térmica da Modelo 19.

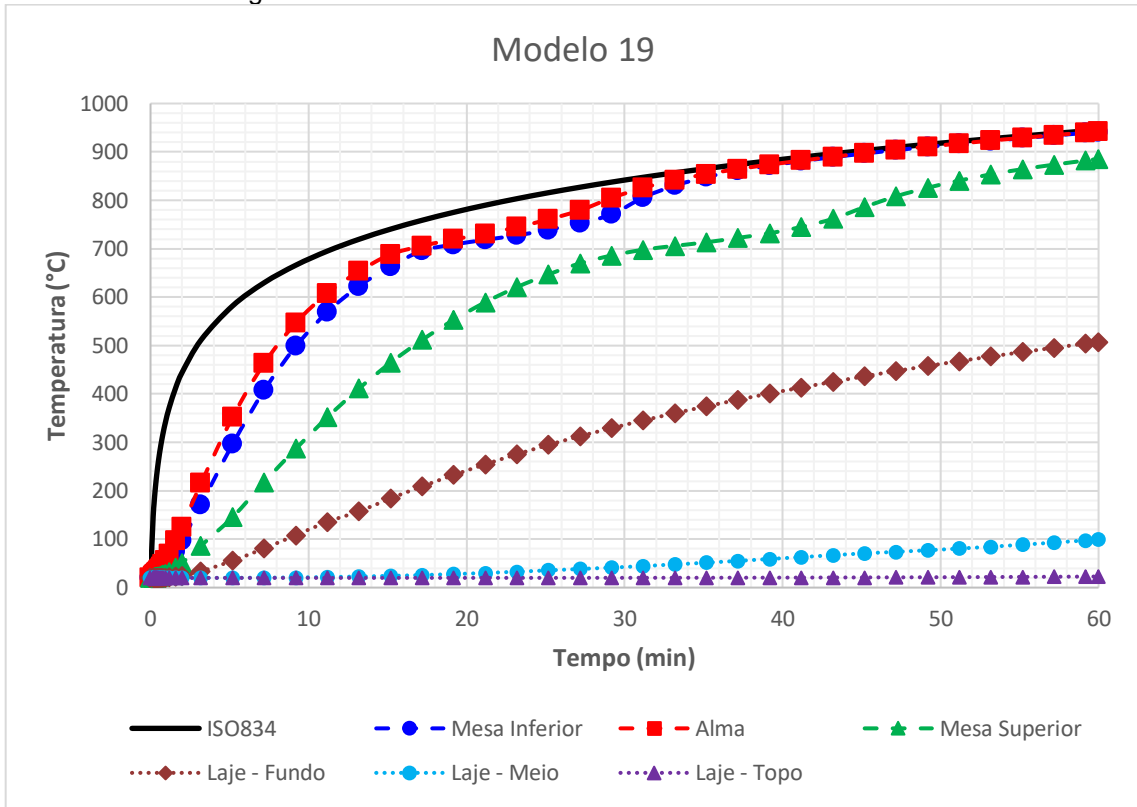


Figura A.20 – Desenvolvimento da temperatura na seção da viga mista do Modelo 19.

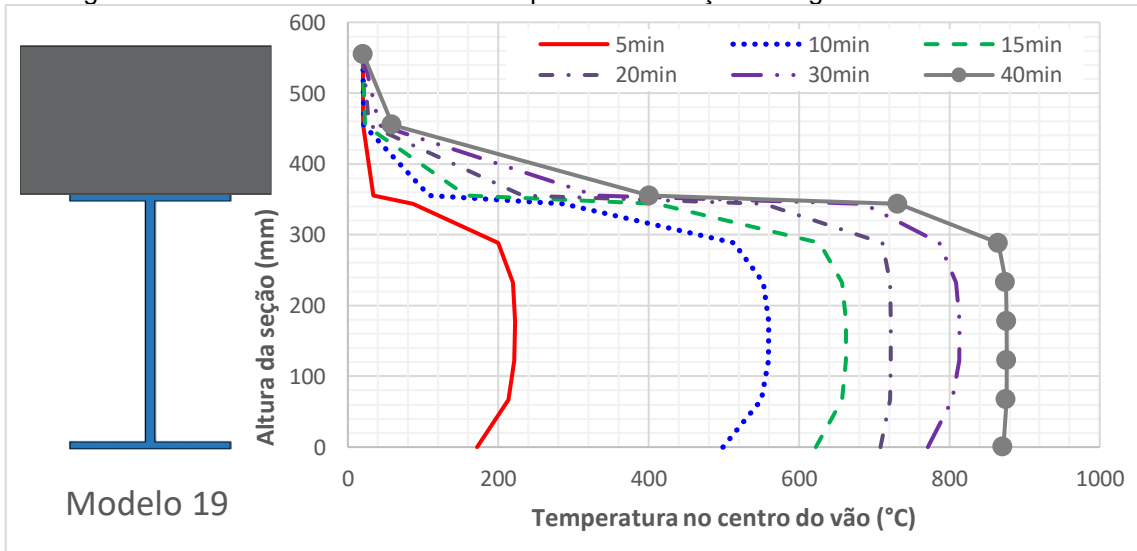


Figura A.21 – Deslocamento do Modelo 1. Tempo de falha estrutural: 16 minutos.

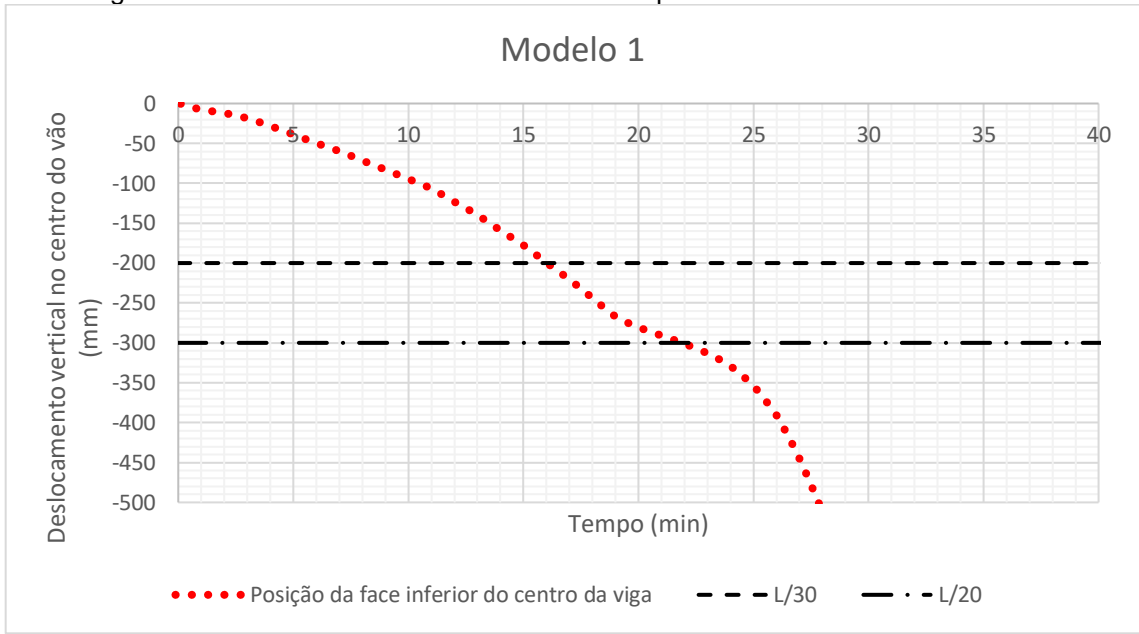


Figura A.22 – Deslocamento do Modelo 2. Tempo de falha estrutural: 16 minutos.

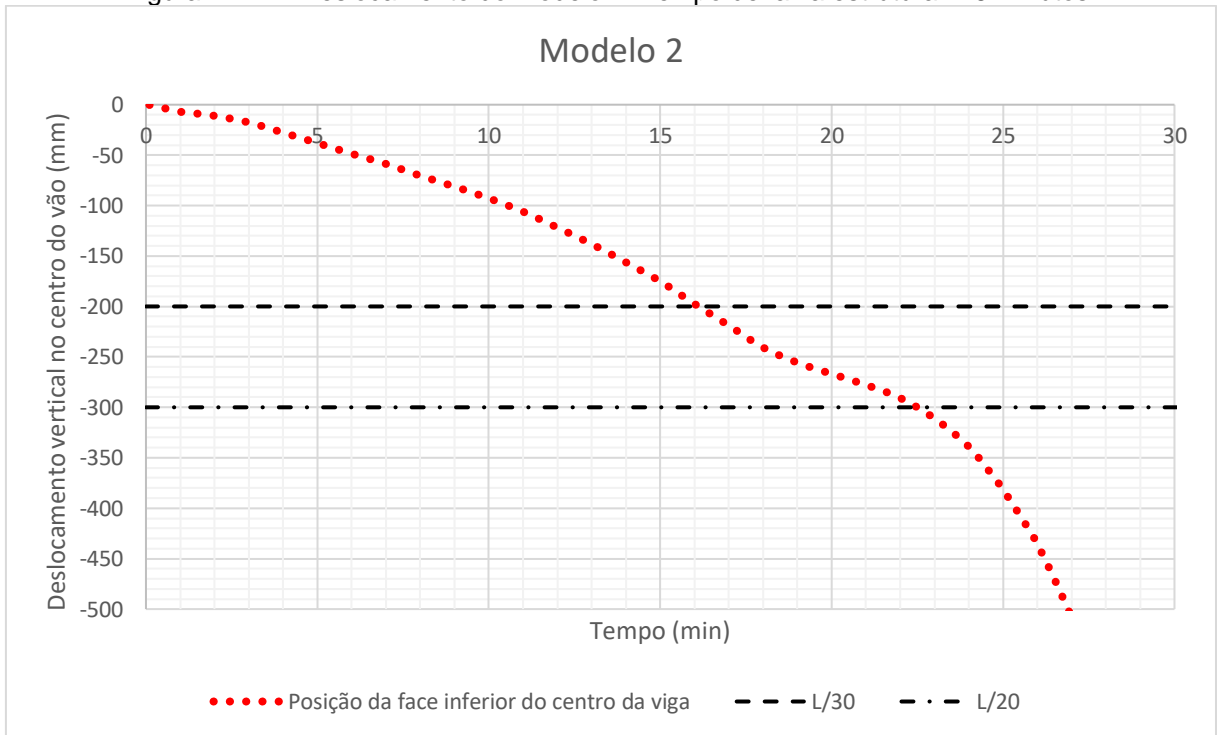


Figura A.23 – Deslocamento do Modelo 3. Tempo de falha estrutural: 17 minutos.

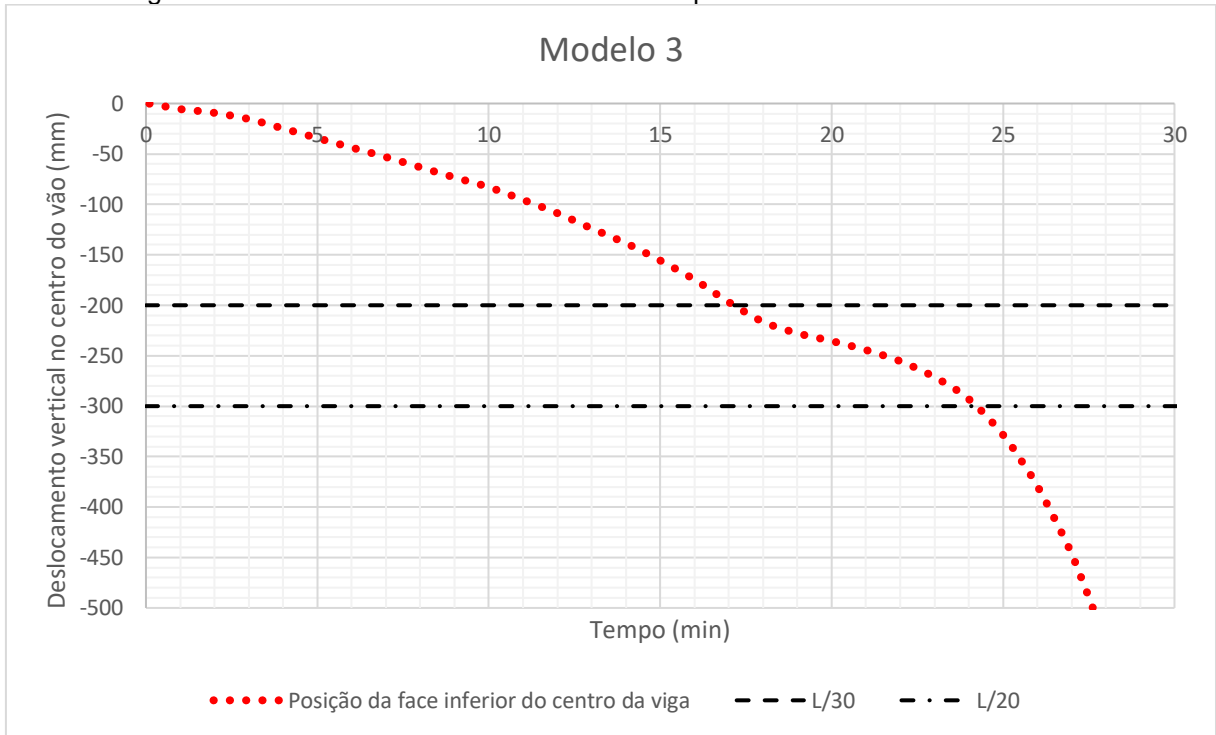


Figura A.24 – Deslocamento do Modelo 4. Tempo de falha estrutural: 18 minutos.

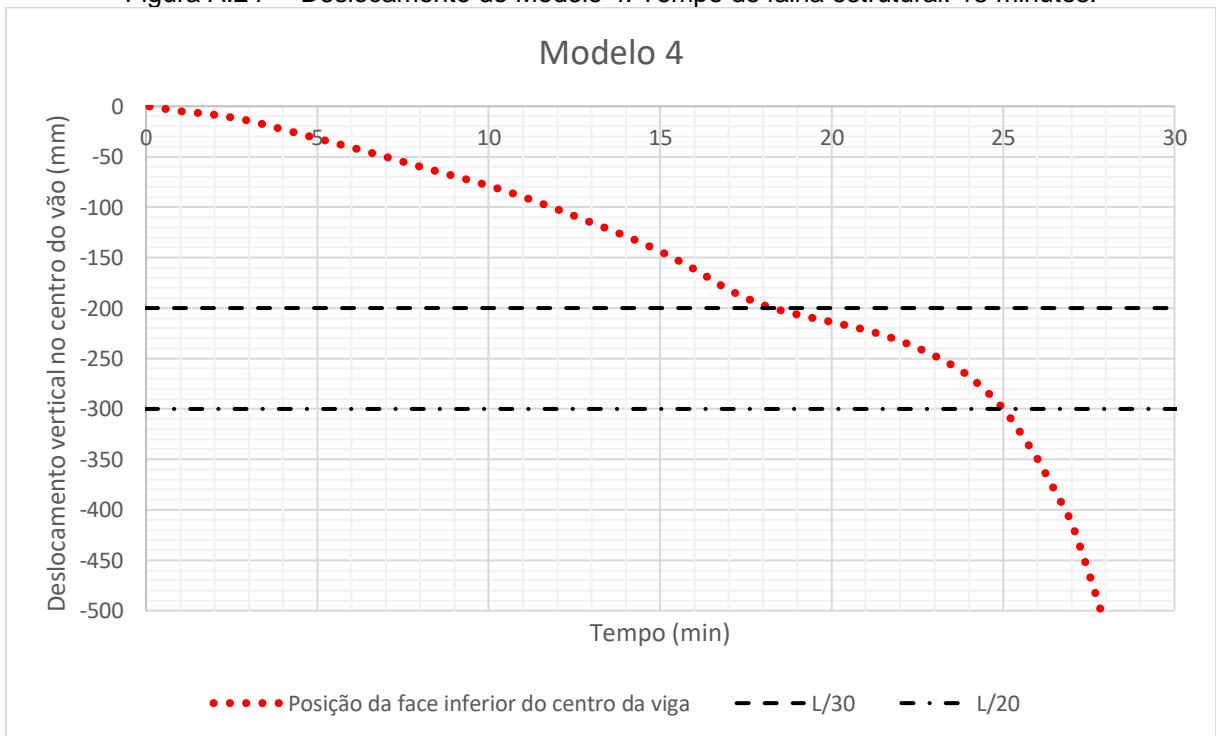


Figura A.25 – Deslocamento do Modelo 5. Tempo de falha estrutural: 22 minutos.

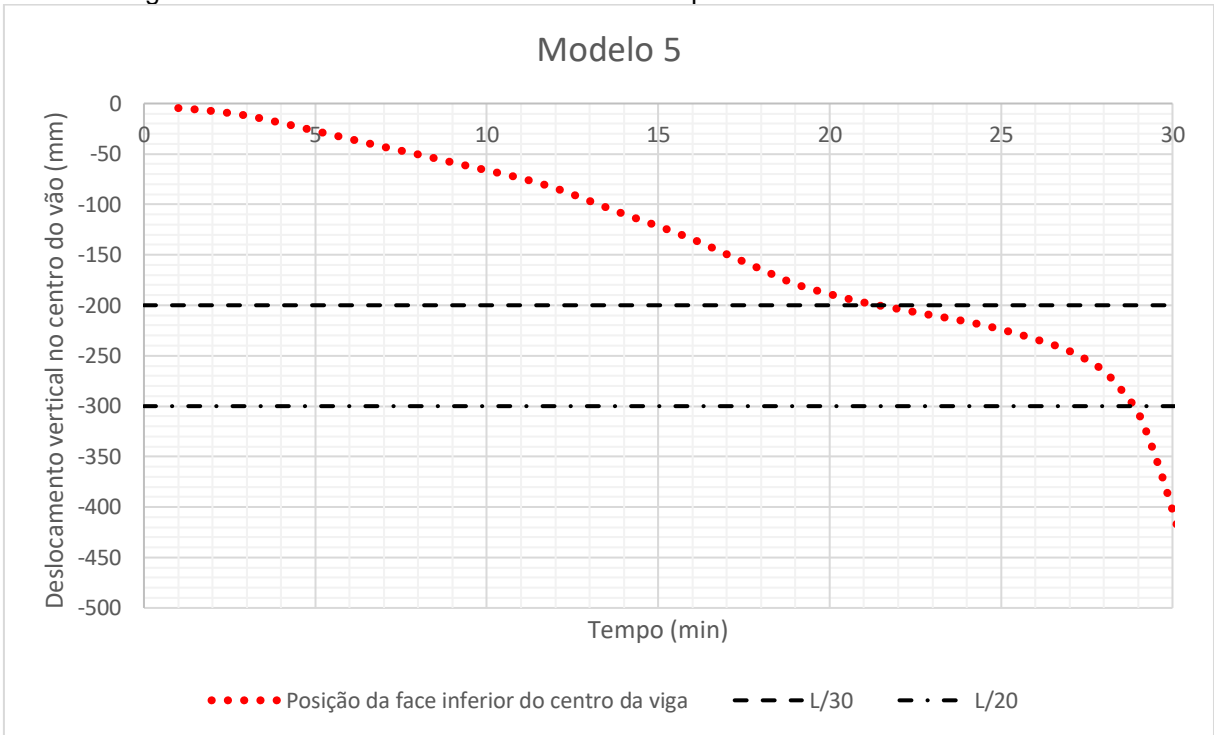


Figura A.26 – Deslocamento do Modelo 6. Tempo de falha estrutural: 25 minutos.

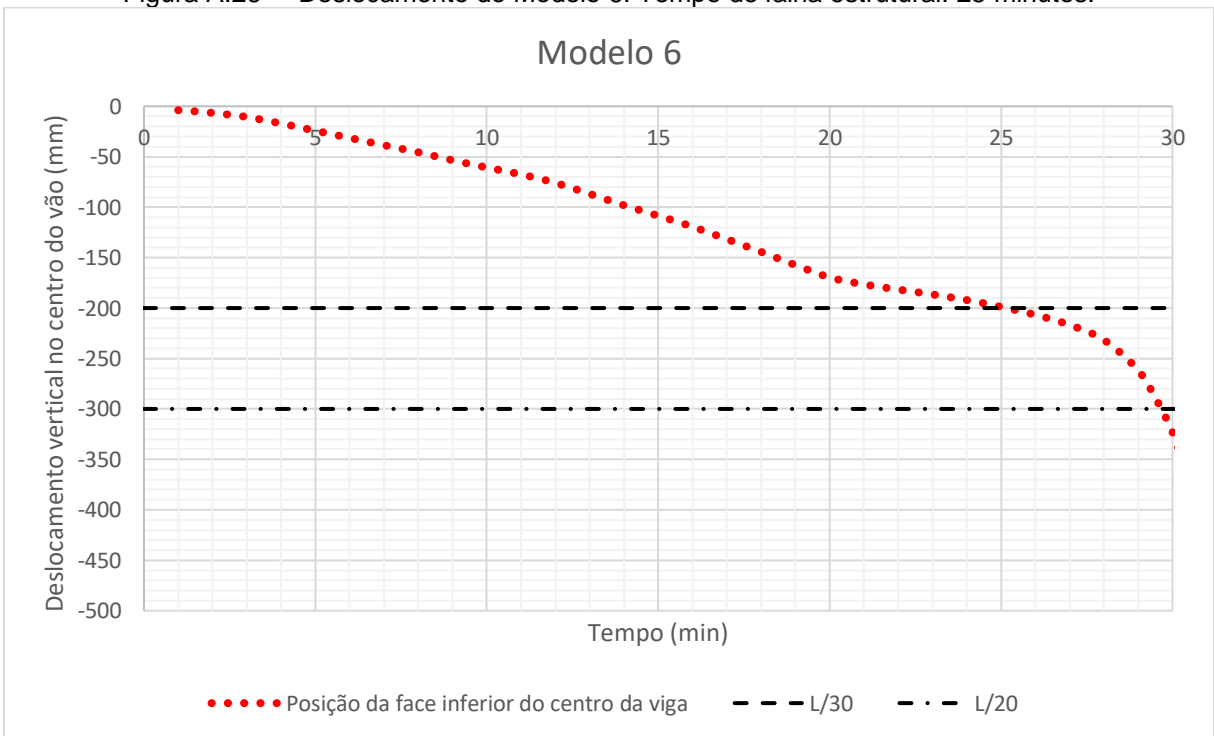


Figura A.27 – Deslocamento do Modelo 7. Tempo de falha estrutural: 35 minutos.

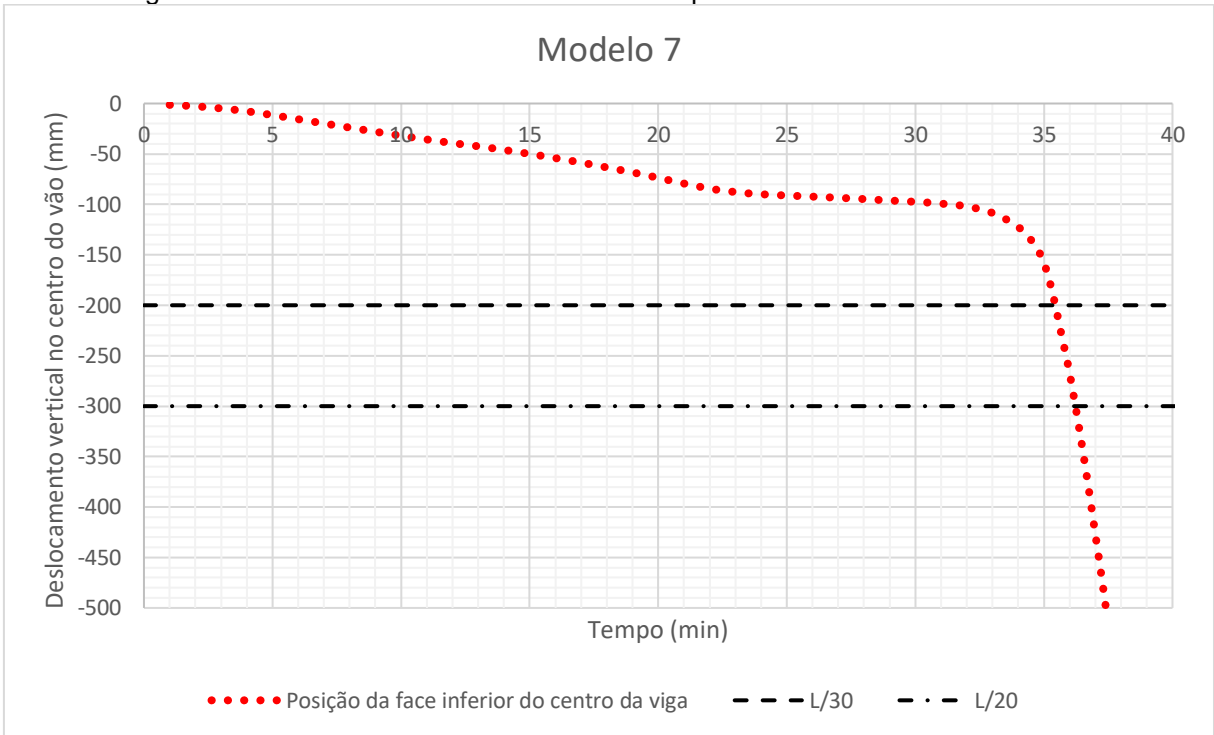


Figura A.28 – Deslocamento do Modelo 8. Tempo de falha estrutural: 27 minutos.

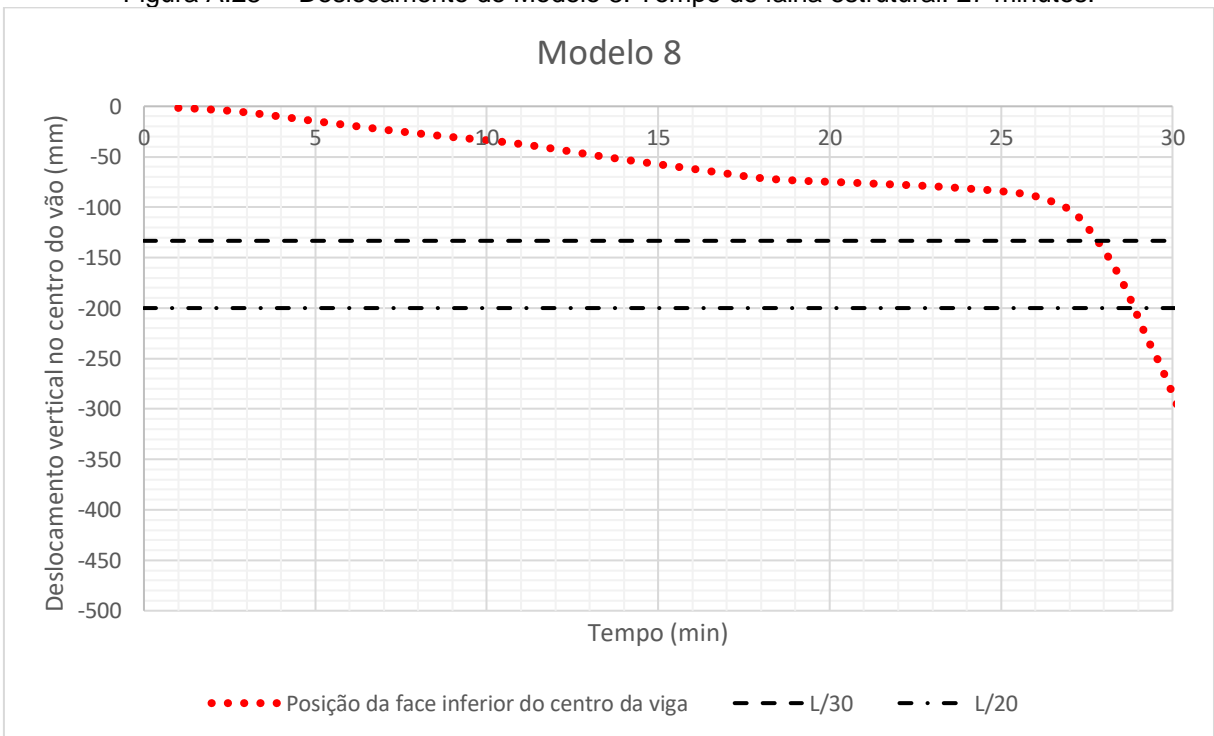


Figura A.29 – Deslocamento do Modelo 9. Tempo de falha estrutural: 26 minutos.

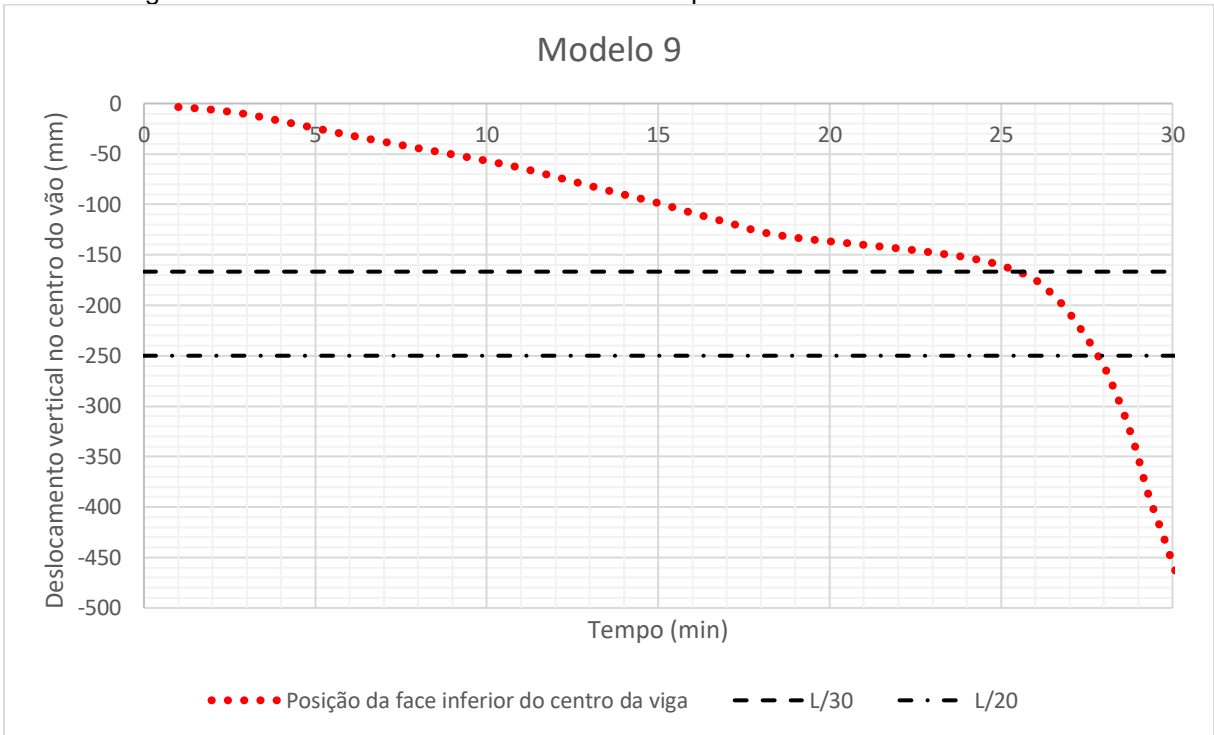


Figura A.30 – Deslocamento do Modelo 11. Tempo de falha estrutural: 13 minutos.

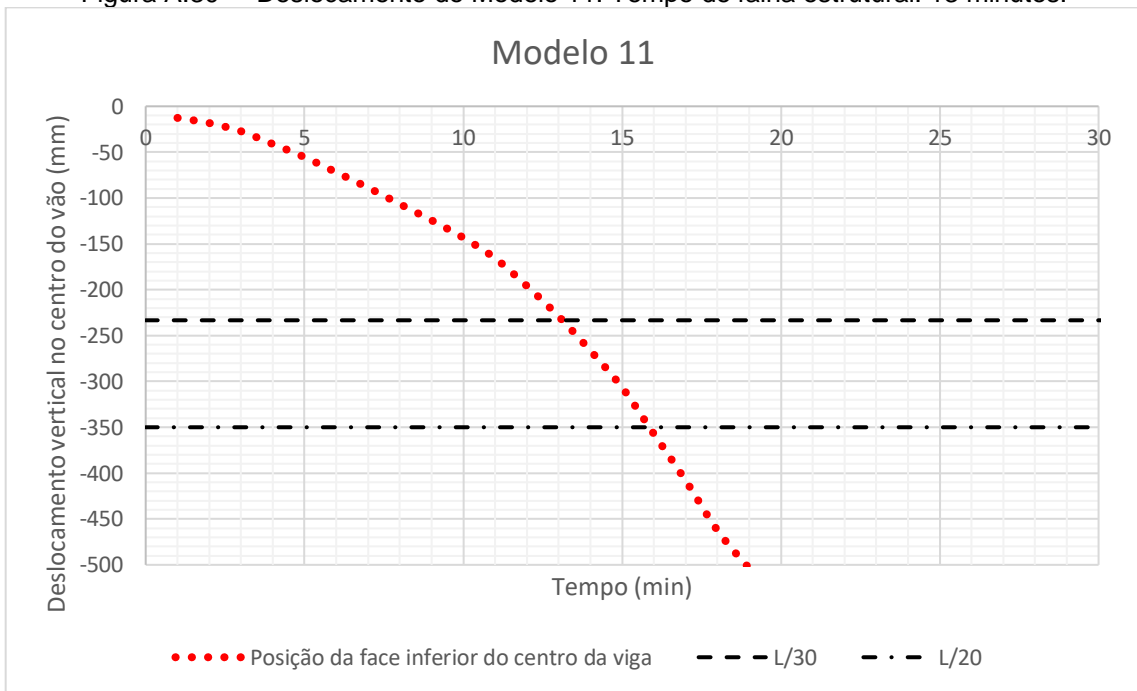


Figura A.31 – Deslocamento do Modelo 12. Tempo de falha estrutural: 51 minutos.

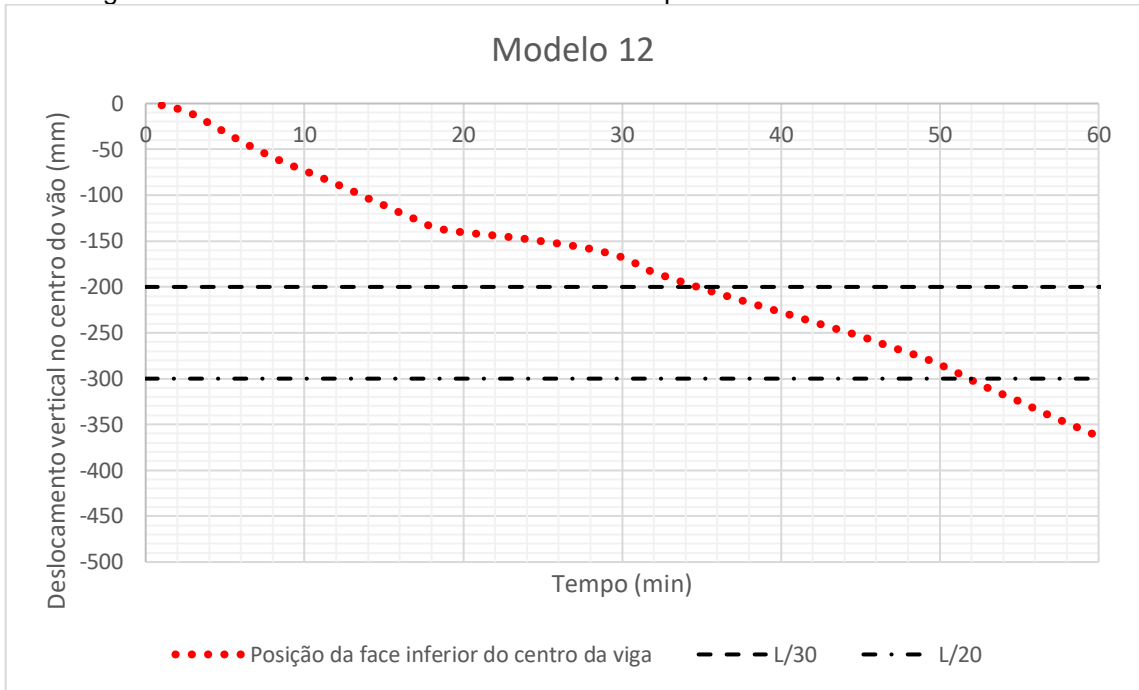


Figura A.32 – Deslocamento do Modelo 13. Tempo de falha estrutural: 16 minutos.

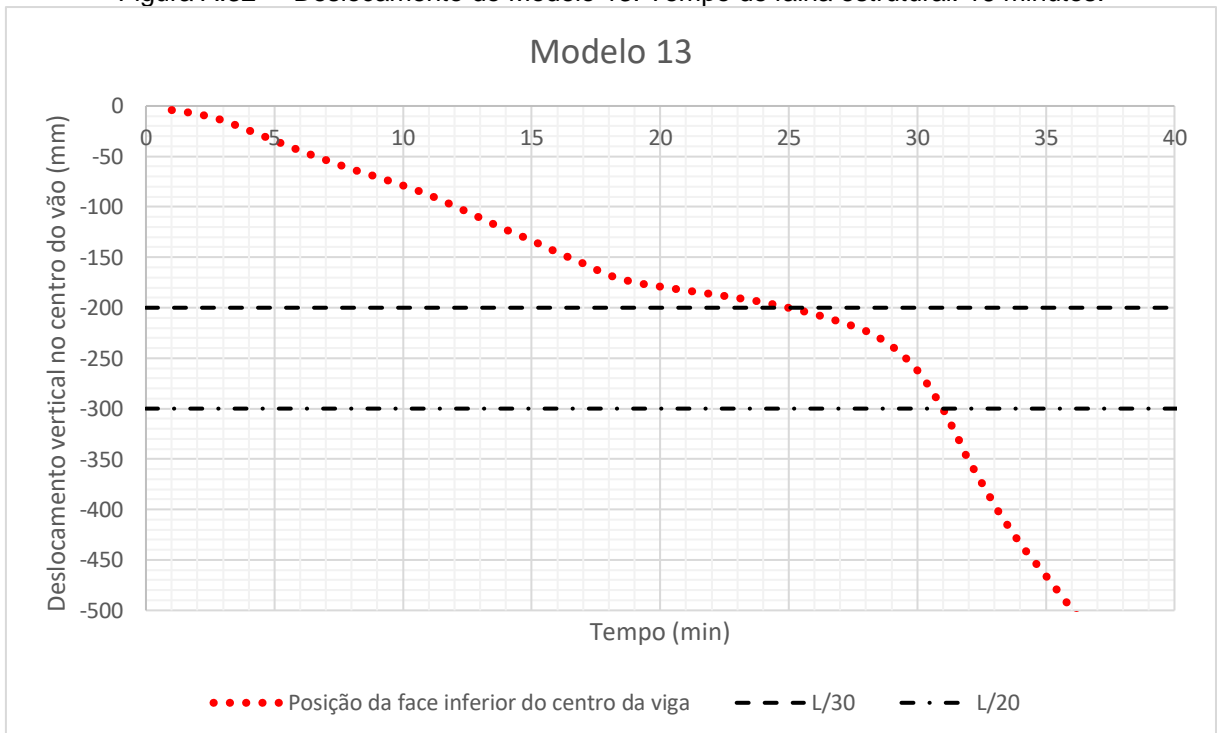


Figura A.33 – Deslocamento do Modelo 15. Tempo de falha estrutural: 13 minutos.

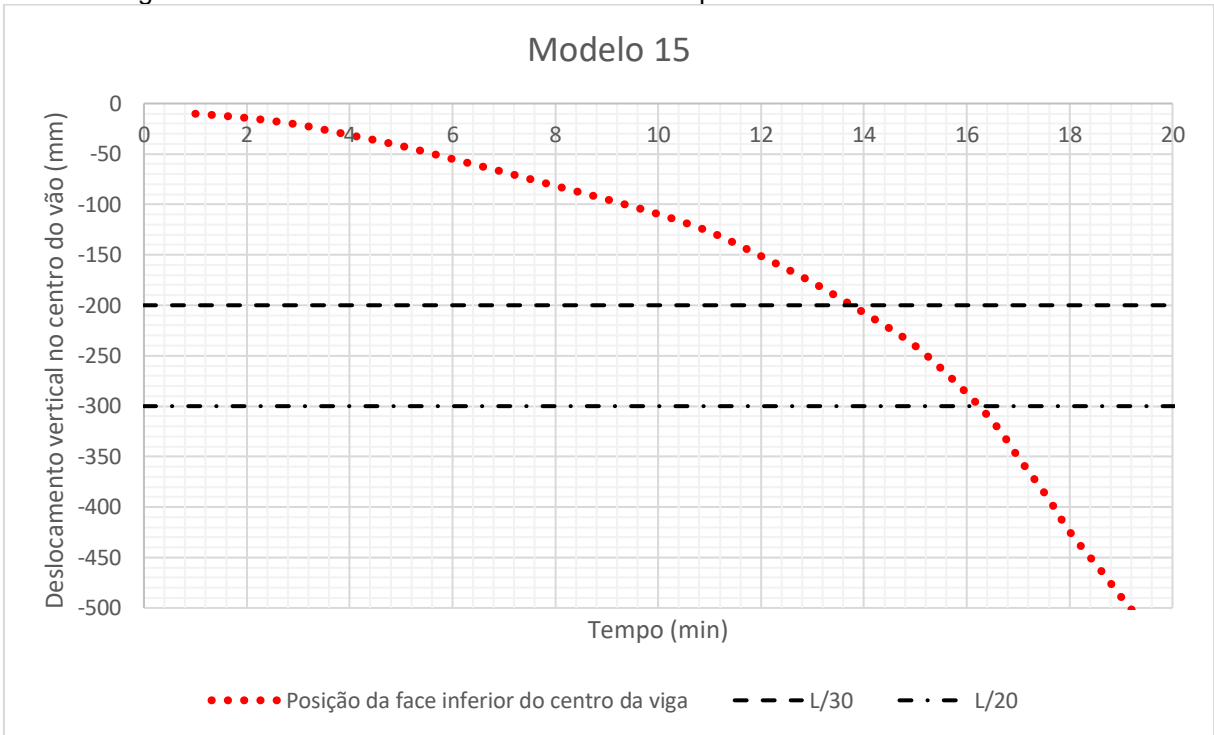


Figura A.34 – Deslocamento do Modelo 16. Tempo de falha estrutural: 14 minutos.

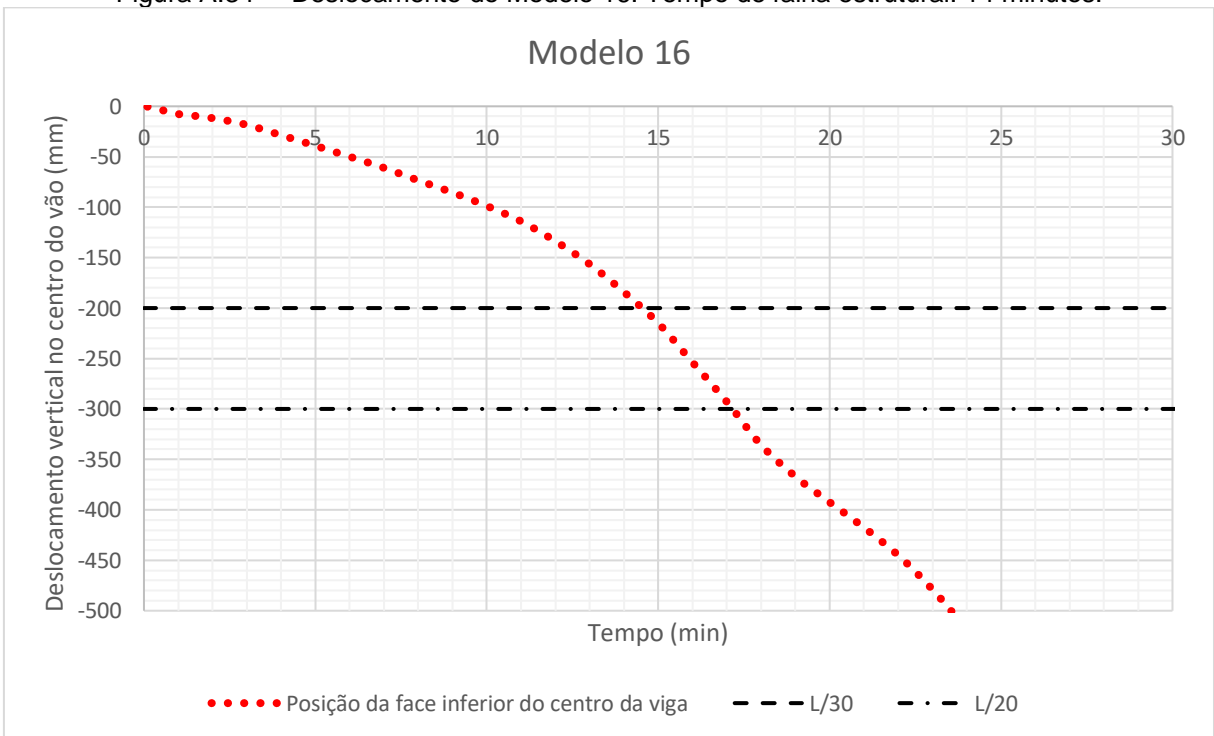


Figura A.35 – Deslocamento do Modelo 18. Tempo de falha estrutural: 22 minutos.

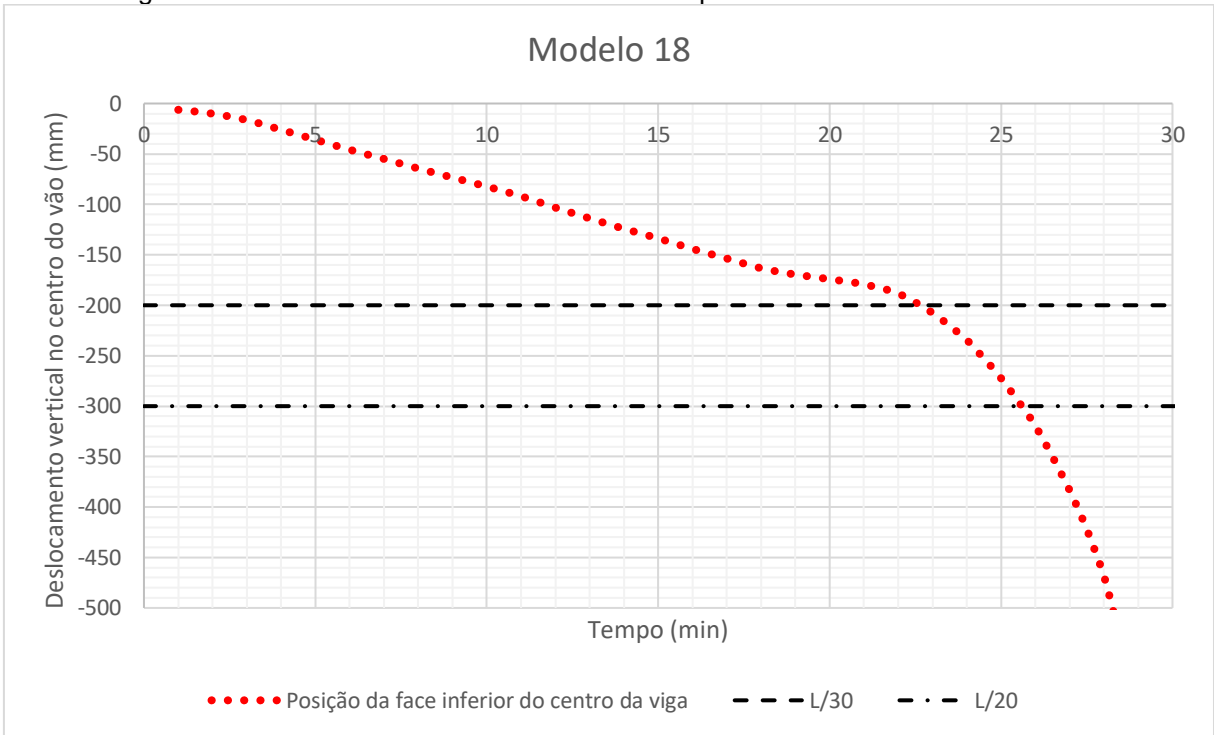


Figura A.36 – Deslocamento do Modelo 19. Tempo de falha estrutural: 24 minutos.

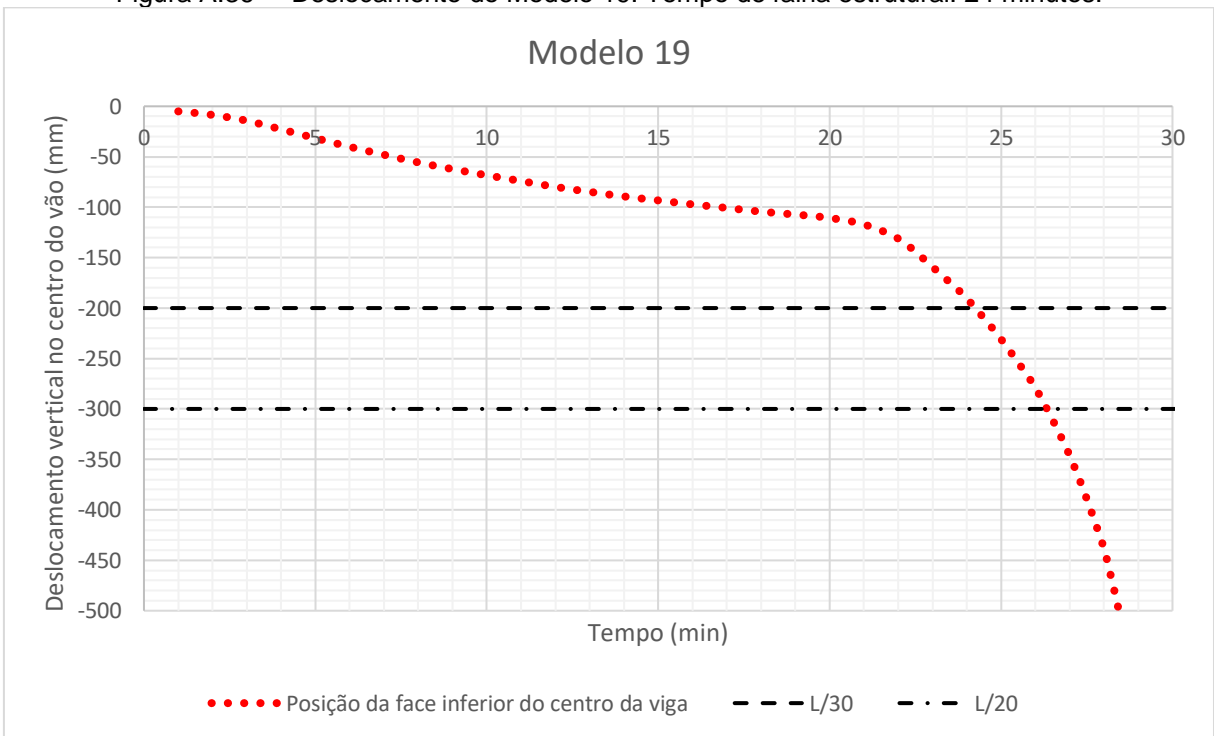


Figura A.37 – Deslocamento do Modelo 20. Tempo de falha estrutural: 15 minutos.

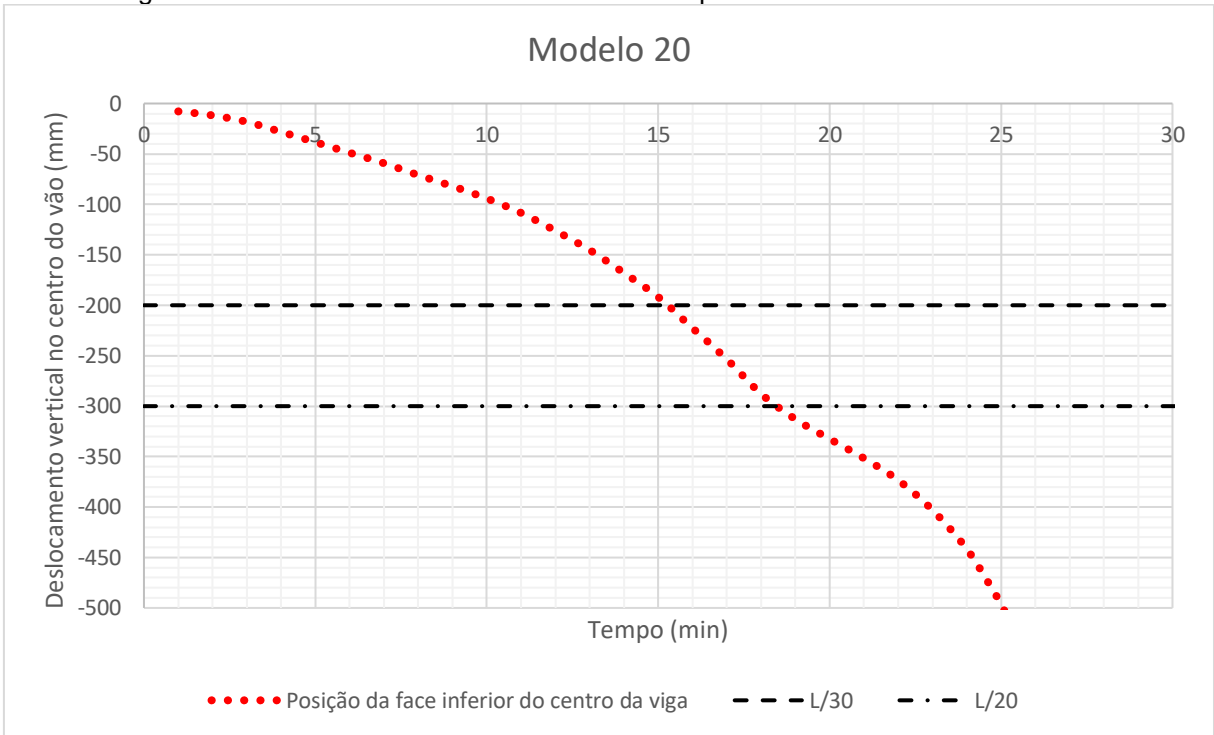


Figura A.38 – Deslocamento do Modelo 21. Tempo de falha estrutural: 16 minutos.

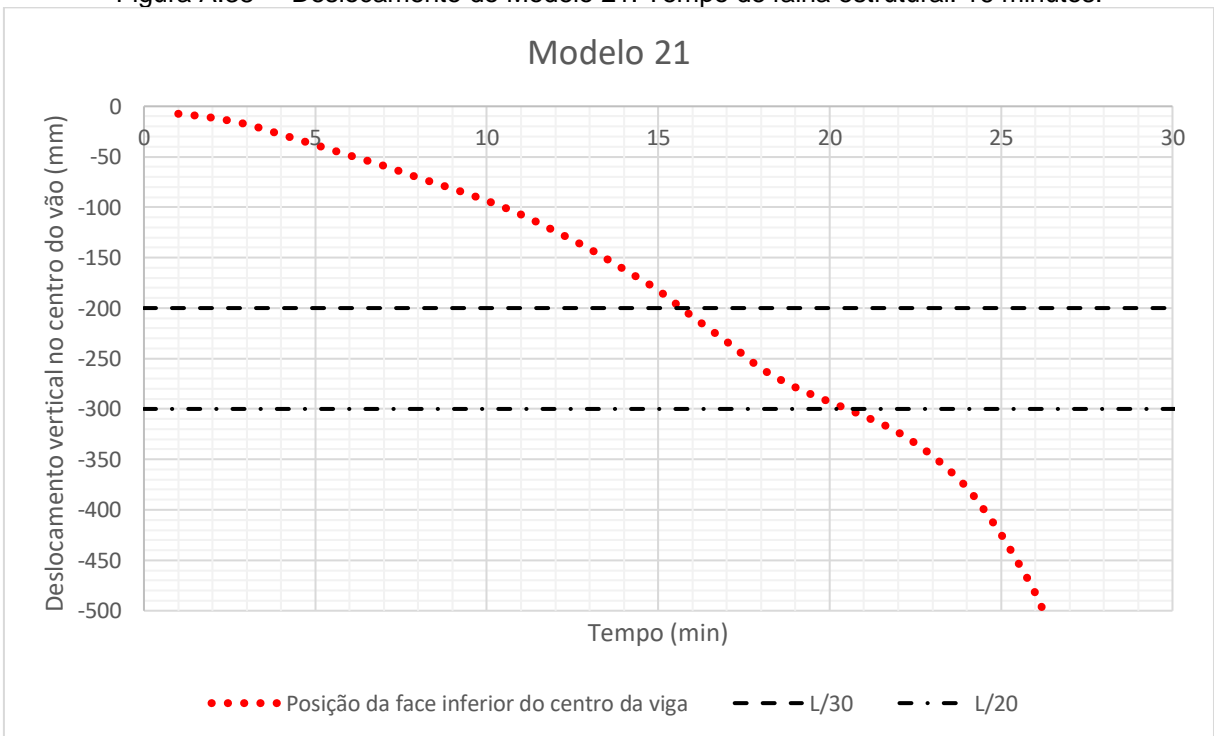


Figura A.39 – Deslocamento do Modelo 23. Tempo de falha estrutural: 17 minutos.

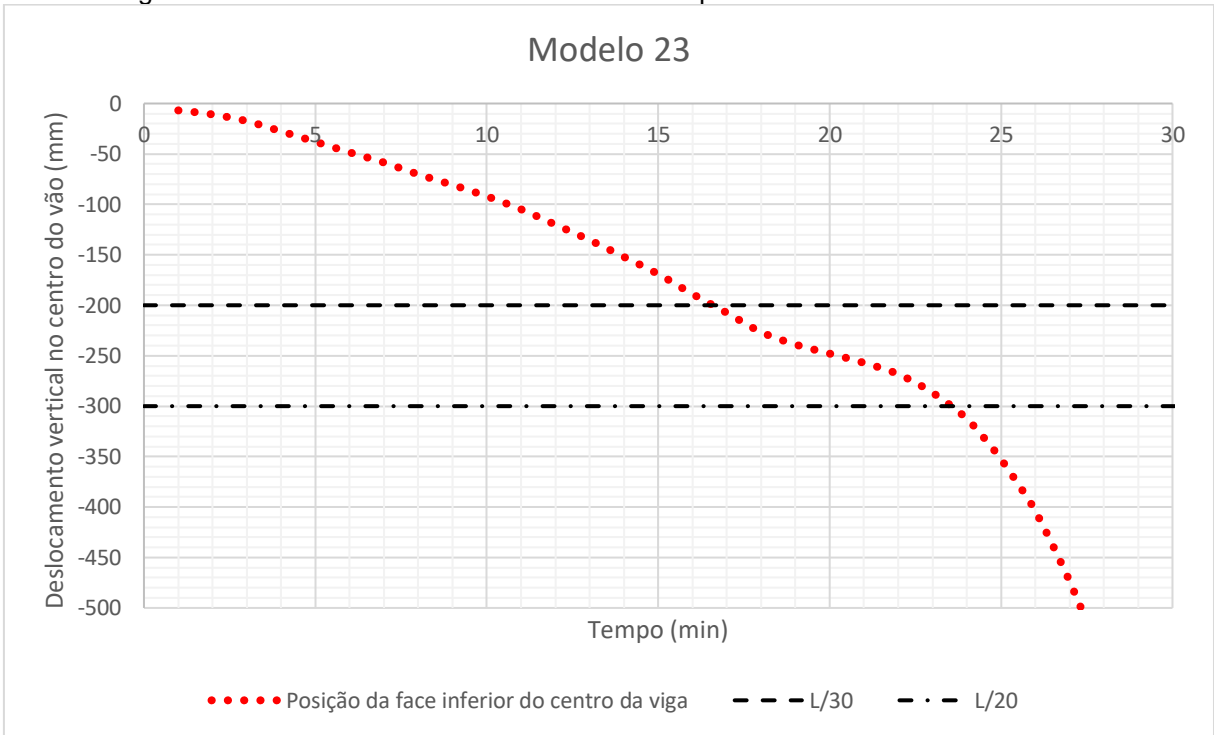


Figura A.40 – Deslocamento do Modelo 24. Tempo de falha estrutural: 15 minutos.

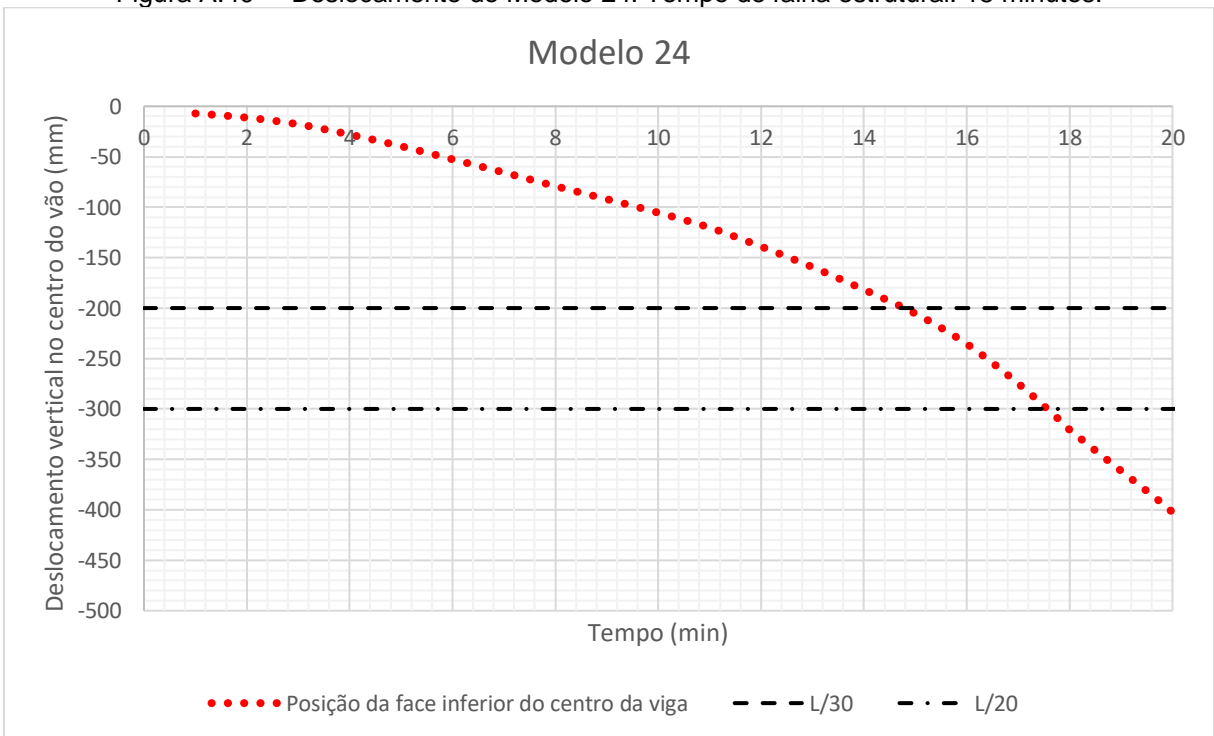


Figura A.41 – Deslocamento do Modelo 26. Tempo de falha estrutural: 17 minutos.

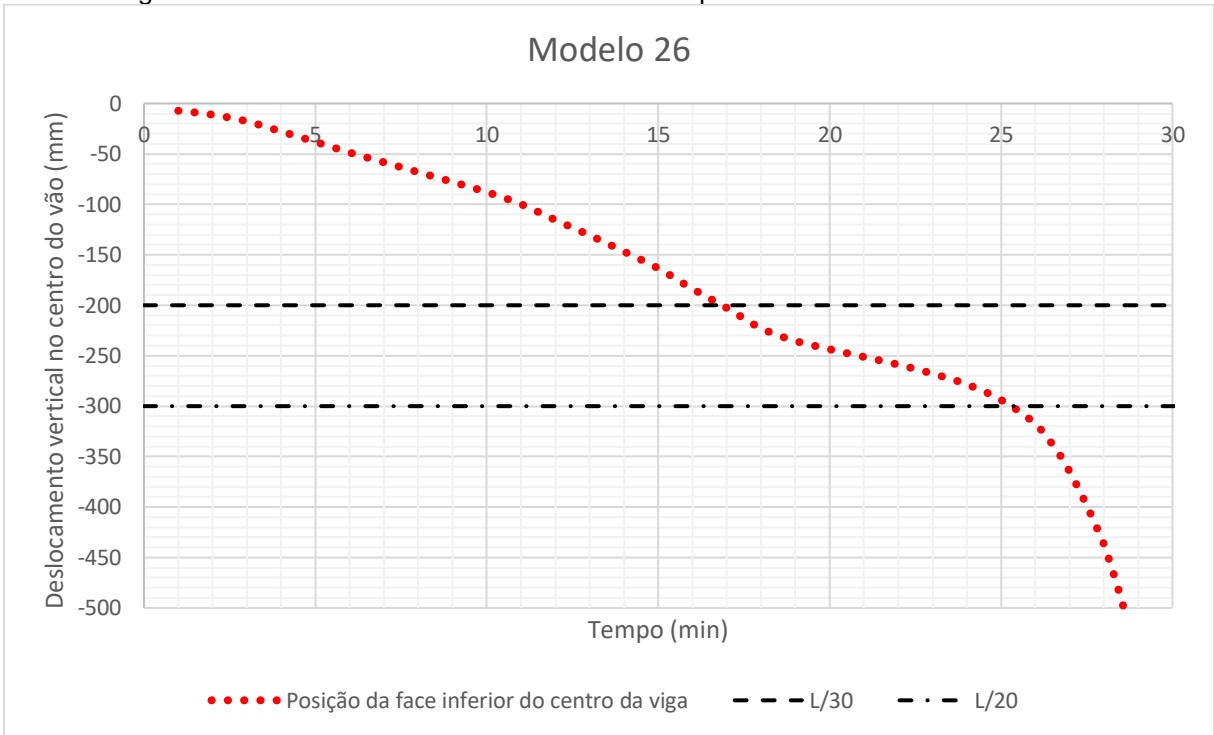


Figura A.42 – Deslocamento do Modelo 27. Tempo de falha estrutural: 17 minutos.

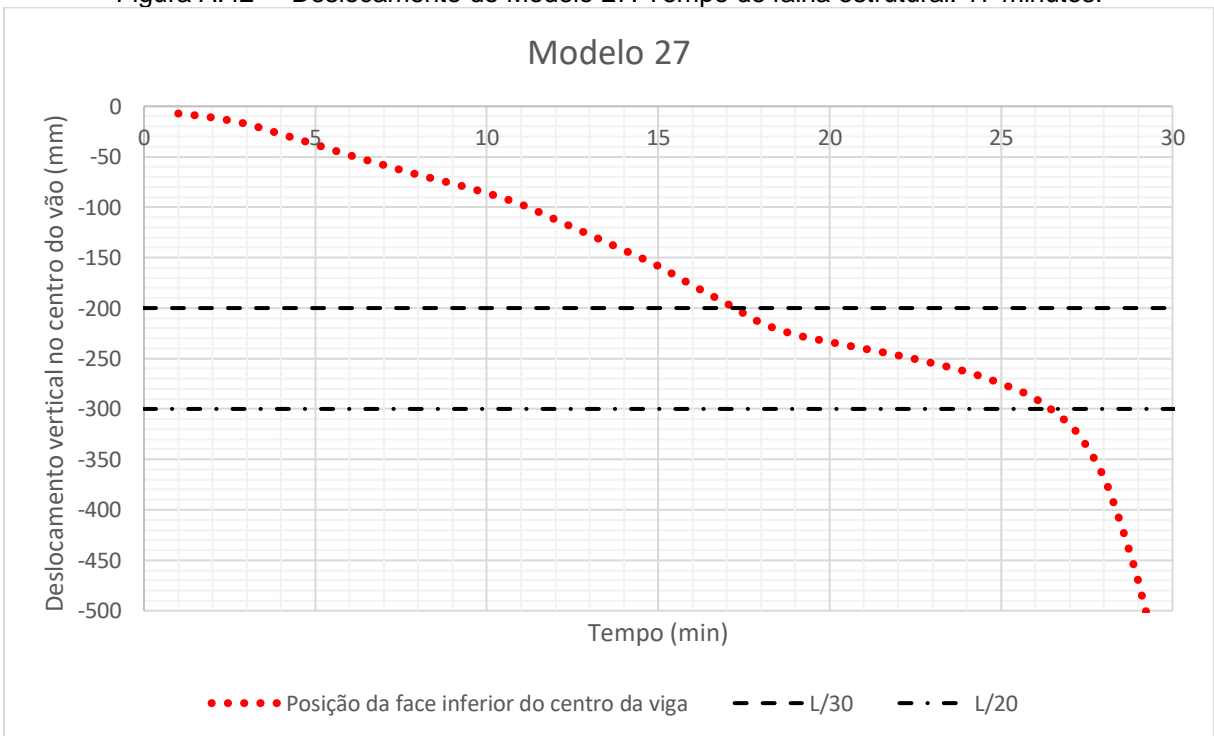


Figura A.43 – Deslocamento do Modelo 28. Tempo de falha estrutural: 16 minutos.

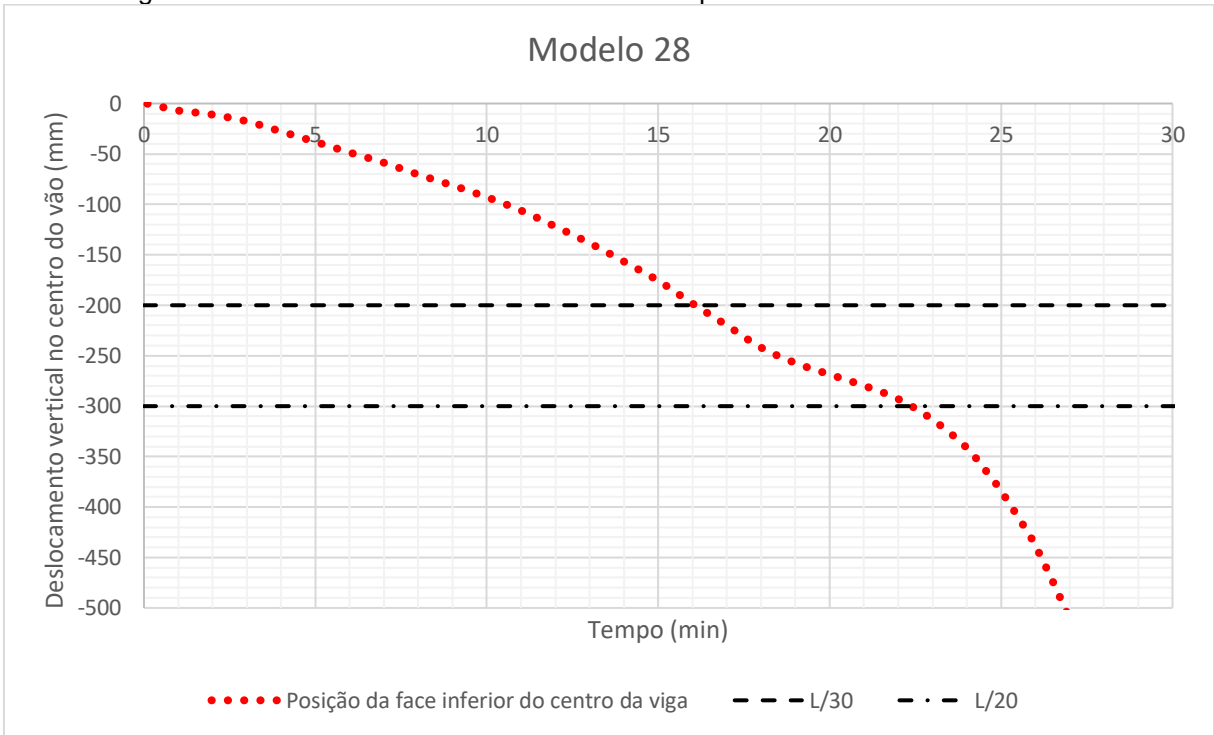


Figura A.44 – Deslocamento do Modelo 30. Tempo de falha estrutural: 16 minutos.

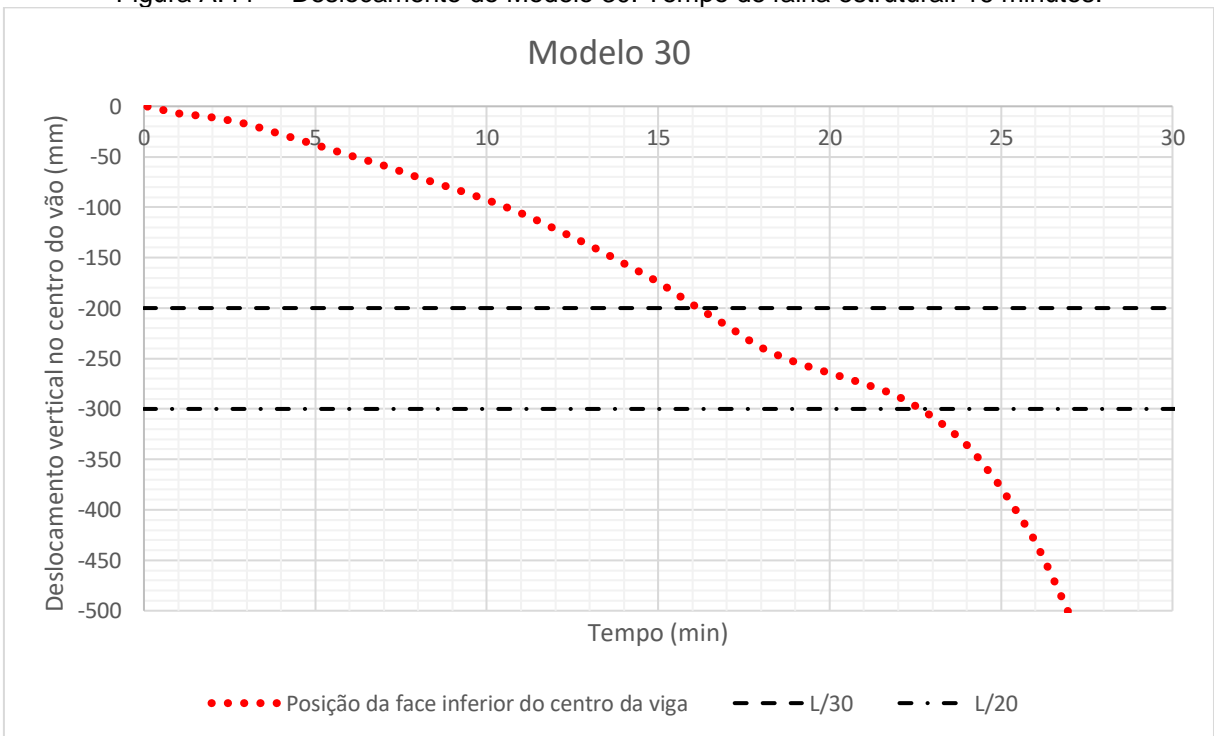
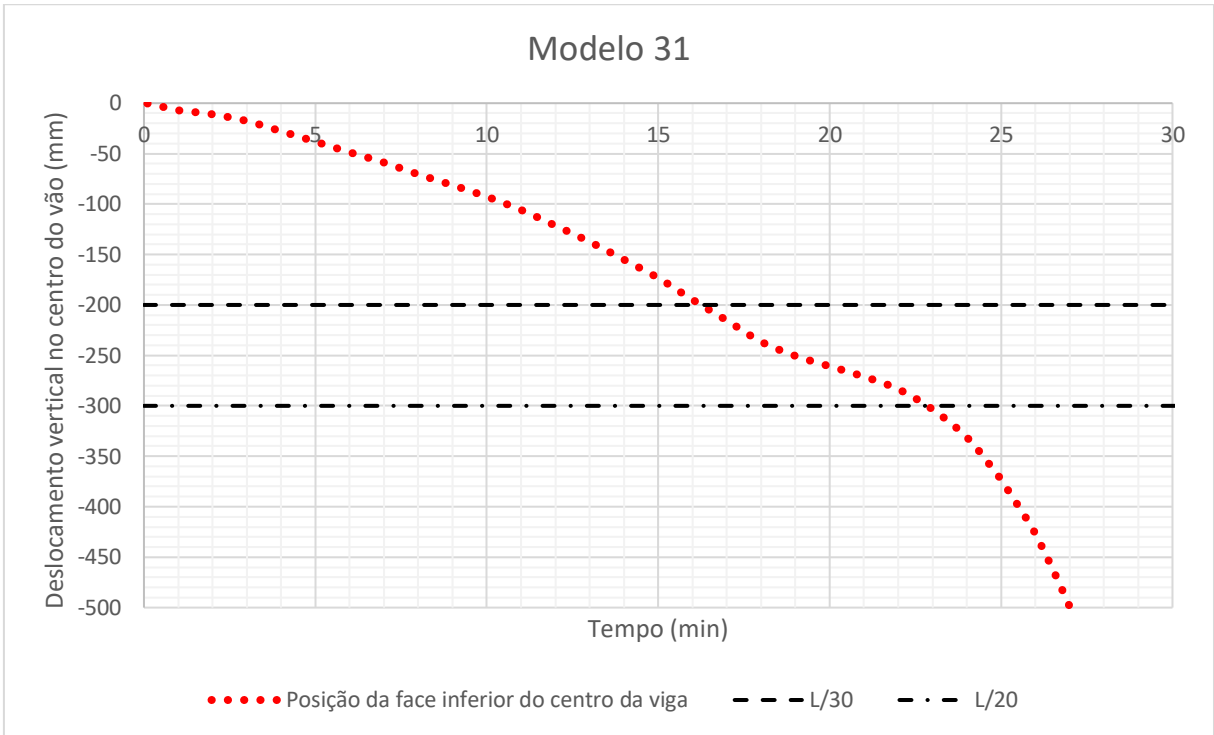


Figura A.45 – Deslocamento do Modelo 31. Tempo de falha estrutural: 16 minutos.



APÊNDICE B – CÓDIGOS EM APDL UTILIZADOS PARA ANÁLISES TÉRMICAS E ESTRUTURAIS

B.1 ANÁLISE TÉRMICA DE VIGA MISTA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO COM UTILIZAÇÃO DE ELEMENTOS SÓLIDOS.

!DADOS DE ENTRADA

!SEÇÃO PERFIL DE AÇO

bfi = 0.167 !mesa inferior - m
bfs = bfi !mesa superior - m
dt= 0.317 !altura total - m
tfi = 0.0132 !espessura mesa inferior - m
tfs = tfi !espessura mesa superior - m
tw = 0.0076 !espessura alma - m
h = dt - tfi - tfs
lb = 2 !comprimento da viga - m

!SEÇÃO LAJE DE CONCRETO

tc = 0.12 !espessura laje - m
bc = 1.5 !largura da laje - m
lc = lb !comprimento da laje - m

!DADOS PARA CÁLCULO

emiss1 = 0.7 !emissividade do perfil de aço
emiss2 = 0.7 !emissividade do concreto
T0 = 20 !temperatura inicial (°C)
ta = 20 !incremento de tempo (s)
tmax = 3600 !tempo total de ensaio (s)

!STUD BOLT

sbL=80/1000 !comprimento do stud bolt -m
sbLCab=10/1000 !comprimento do stud bolt - m

!CONTROLE MALHA

dv = 20 !numero de divisões no eixo longitudinal da viga.
dvLaje = 6 !número de divisões na laje sem contato com a viga

! OPÇÕES GERAIS

/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/ESHAPE,1
/UIS,MSGPOP,3
/PBC,ALL,,1
/REP,FAST
/AUTO,1

/prep7

!TIPOS DE ELEMENTOS

! AÇO

ET,1,SOLID70 !sólido para análise térmica
KEYOPT,1,2,0 !film coefficient: fluid bulk temperature TB
KEYOPT,1,4,0 !sistema de coordenada: global
KEYOPT,1,7,0 !Fluido não linear: transferência de calor normativa
KEYOPT,1,8,0 !mass transport effects: no mass transport effects

! CONCRETO

ET,2,SOLID70 *!sólido para análise térmica*
 KEYOPT,2,2,0 *!film coefficient: fluid bulk temperature TB*
 KEYOPT,2,4,0 *!sistema de coordenada: global*
 KEYOPT,2,7,0 *!fluido não linear: transferência de calor normativa*
 KEYOPT,2,8,0 *!mass transport effects: no mass transport effects*

!SUPERFÍCIE DE CONVECÇÃO

ET,3,SURF152 *!superfície para convecção*
 KEYOPT,3,1,0 *!adiabatic wall temperature as bulk temp*
 KEYOPT,3,2,0 *!recovery factor (Fr)*
 KEYOPT,3,3,0 *!eixo de simetria*
 KEYOPT,3,4,1 *!midside node: no midside node*
 KEYOPT,3,5,1 *!nó extra: 1 nó extra*
 KEYOPT,3,6,0 *!use bulk temp: extra node used as bulk temp*
 KEYOPT,3,7,0 *!termo empírico: não multiplicar film coefficient por termo empírico*
 KEYOPT,3,8,2 *!heat flux: usar temperatura mediado film*
 KEYOPT,3,9,0 *!fator de forma de radiação: não incluir*
 KEYOPT,3,11,0 *!nodal degress of freedom: temp*
 KEYOPT,3,13,0 *!film coef. matrix key: progr determina qual usar*

! SUPERFÍCIE DE RADIAÇÃO

ET,4,SURF152 *! superfície para radiação*
 KEYOPT,4,1,0 *!adiabatic wall temperature as bulk temp*
 KEYOPT,4,2,0 *!recovery factor (Fr)*
 KEYOPT,4,3,0 *!eixo de simetria*
 KEYOPT,4,4,1 *!midside node: no midside node*
 KEYOPT,4,5,1 *!nó extra: 1 nó extra*
 KEYOPT,4,6,0 *!use bulk temp: extra node used as bulk temp*
 KEYOPT,4,7,0 *!termo empírico: não multiplicar fulm coefficient por termo empírico*
 KEYOPT,4,8,0 *!heat flux: ignorar heat flux*
 KEYOPT,4,9,1 *!fator de forma de radiação: use radiation with form factor real const.*
 KEYOPT,4,11,0 *!nodal degress of freedom: temp*
 KEYOPT,4,13,0 *!film coef. matrix key: progr determina qual usar*

!CONSTANTES REAIS

R,1, *! sólido para análise térmica - perfil*
 R,2, *! sólido para análise térmica - laje*
 R,4, *! superfície para convecção - perfil*
 R,5, *! superfície para convecção - laje*
 R,7,1,5.67E-8 *! superfície para radiação - perfil*
 R,8,1,5.67E-8 *! superfície para radiação - laje*

! PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

MPTEMP,,,,,, *! aço do perfil - massa específica, kg/m3*
 MPTEMP,1,0
 MPDELE,DENS,1
 MPDATA,DENS,1,,7850

MPTEMP,,,,,, *! aço do perfil - calor específico, J/(kg.°C)*
 MPTEMP,1,0
 MPTEMP,2,100
 MPTEMP,3,200
 MPTEMP,4,300
 MPTEMP,5,400
 MPTEMP,6,500
 MPTEMP,7,600
 MPTEMP,8,700
 MPTEMP,9,735

MPTEMP,10,736
 MPTEMP,11,800
 MPTEMP,12,900
 MPTEMP,13,1000
 MPTEMP,14,1100
 MPTEMP,15,1200
 MPDELE,C,1
 MPDATA,C,1,,425 !1
 MPDATA,C,1,,487.62 !2
 MPDATA,C,1,,529.76 !3
 MPDATA,C,1,,564.74 !4
 MPDATA,C,1,,605.88 !5
 MPDATA,C,1,,666.5 !6
 MPDATA,C,1,,759.92 !7
 MPDATA,C,1,,1008.158 !8
 MPDATA,C,1,,5000 !9
 MPDATA,C,1,,4109 !10
 MPDATA,C,1,,803.2609 !11
 MPDATA,C,1,,650.4438 !12
 MPDATA,C,1,,650 !13
 MPDATA,C,1,,650 !14
 MPDATA,C,1,,650 !15

MPTEMP,,,,,,,, ! aço do perfil - condutividade térmica, W/(m.°C)
 MPTEMP,1,0
 MPTEMP,2,100
 MPTEMP,3,200
 MPTEMP,4,300
 MPTEMP,5,400
 MPTEMP,6,500
 MPTEMP,7,600
 MPTEMP,8,700
 MPTEMP,9,800
 MPTEMP,10,801
 MPTEMP,11,900
 MPTEMP,12,1000
 MPTEMP,13,1100
 MPTEMP,14,1200
 MPDELE,KXX,1
 MPDATA,KXX,1,,54 !1
 MPDATA,KXX,1,,50.70 !2
 MPDATA,KXX,1,,47.40 !3
 MPDATA,KXX,1,,44.10 !4
 MPDATA,KXX,1,,40.80 !5
 MPDATA,KXX,1,,37.50 !6
 MPDATA,KXX,1,,34.20 !7
 MPDATA,KXX,1,,30.90 !8
 MPDATA,KXX,1,,27.60 !9
 MPDATA,KXX,1,,27.3 !10
 MPDATA,KXX,1,,27.3 !11
 MPDATA,KXX,1,,27.3 !12
 MPDATA,KXX,1,,27.3 !13
 MPDATA,KXX,1,,27.3 !14

MPTEMP,,,,,,,, ! concreto - massa específica, kg/m3
 MPTEMP,1,0
 MPDELE,DENS,2
 MPDATA,DENS,2,,2400

MPTEMP,,,,,,,, ! concreto - calor específico, J/(kg.°C)

MPTEMP,1,0
 MPTEMP,2,100
 MPTEMP,3,101
 MPTEMP,4,115
 MPTEMP,5,116
 MPTEMP,6,150
 MPTEMP,7,200
 MPTEMP,8,300
 MPTEMP,9,400
 MPTEMP,10,1200
 MPDELE,C,2
 MPDATA,C,2,,900 !1
 MPDATA,C,2,,900 !2
 MPDATA,C,2,,1470 !3, para w=1.5%
 MPDATA,C,2,,1470 !4, para w=1.5%
 MPDATA,C,2,,916 !5
 MPDATA,C,2,,950 !6
 MPDATA,C,2,,1000 !7
 MPDATA,C,2,,1050 !8
 MPDATA,C,2,,1100 !9
 MPDATA,C,2,,1100 !10

MPTEMP,,,,,,,, ! concreto - condutividade térmica, W/(m.°C)
 MPTEMP,1,0
 MPTEMP,2,100
 MPTEMP,3,200
 MPTEMP,4,300
 MPTEMP,5,400
 MPTEMP,6,500
 MPTEMP,7,600
 MPTEMP,8,700
 MPTEMP,9,800
 MPTEMP,10,900
 MPTEMP,11,1000
 MPTEMP,12,1100
 MPTEMP,13,1200
 MPDATA,KXX,2,,1.36
 MPDATA,KXX,2,,1.23
 MPDATA,KXX,2,,1.111
 MPDATA,KXX,2,,1.003
 MPDATA,KXX,2,,0.907
 MPDATA,KXX,2,,0.823
 MPDATA,KXX,2,,0.749
 MPDATA,KXX,2,,0.687
 MPDATA,KXX,2,,0.637
 MPDATA,KXX,2,,0.598
 MPDATA,KXX,2,,0.57
 MPDATA,KXX,2,,0.554
 MPDATA,KXX,2,,0.549

MPTEMP,,,,,,,, ! filme - superfície convecção perfil
 MPTEMP,1,0
 MPDATA,HF,4,,

MPTEMP,,,,,,,, ! filme - superfície convecção laje
 MPTEMP,1,0
 MPDATA,HF,5,,

MP,EMISS,7,emiss1 ! emissividade resultante - superfície radiação perfil

MP,EMISS,8,emiss2 ! emissividade resultante - superfície radiação laje

TOFFST,273.15 ! correção unidade temperatura °C:K

!CONTRUÇÃO DO MODELO

block,0,lb,0,tfi,-bfi/2,-tw/2 !mesa inferior

block,0,lb,0,tfi,-tw/2,tw/2

block,0,lb,0,tfi,tw/2,bfi/2

block,0,lb,dt-tfs,dt,-bfs/2,-tw/2 !mesa superior

block,0,lb,dt-tfs,dt,-tw/2,tw/2

block,0,lb,dt-tfs,dt,tw/2,bfs/2

block,0,lb,tfi,tfi+h,-tw/2,tw/2 !alma

block,0,lc,dt,dt+tc,-bc/2,-bfs/2 !laje

block,0,lc,dt,dt+tc,-bfs/2,-tw/2

block,0,lc,dt,dt+tc,-tw/2,tw/2

block,0,lc,dt,dt+tc,tw/2,bfs/2

block,0,lc,dt,dt+tc,bfs/2,bc/2

!DIVIDIR ALTURA DA LAJE

WPROT,0,-90,0

WPOFF,0,0,dt

WPOFF,0,0,sbL/4

VSBW,ALL

WPOFF,0,0,sbL/4

VSBW,ALL

WPOFF,0,0,sbL/4

VSBW,ALL

WPOFF,0,0,sbL/4

VSBW,ALL

WPOFF,0,0,sbLCab

VSBW,ALL

WPOFF,0,0,(tc-(sbl+sbLCab))/2

VSBW,ALL

WPCSYS,-1,0

allsel,all

VGLUE,all

!DIVIDIR LINHAS

ALLSEL,ALL

VATT,1,1,1,0

!definir atributos aos volumes

ALLSEL,ALL

VSEL,S,LOC,Y,dt,dt+tc

!seleciona volumes da laje

VATT,2,2,2,0

!definir atributo do concreto

ALLSEL,ALL

/PNUM,MAT,1

/NUMBER,1

/RELOT

```

LESIZE,ALL,,1,,1,,0,           ! definição da divisão das linhas

!SELECIONAR LINHAS DA ALMA
LSEL,S,LOC,Z,-tw/2,tw/2
LSEL,U,LOC,Y,0,tfi
LSEL,U,LOC,Y,dt-tfs,dt+tc
LESIZE,ALL,,6,,1,,0,

!SELECIONAR AS LINHAS FRONTAIS EM CONTATO COM PERFIL
ALLSEL,ALL
lsel,u,loc,z,-bc/2,-bfs/2
LSEL,U,LOC,Z,bc/2,bfs/2
LSEL,U,LOC,Z,-tw/2,tw/2
LESIZE,ALL,,2,,1,,0

!SELECIONAR AS LINHAS FRONTAIS DA LAJE SEM CONTATO COM O PERFIL
ALLSEL,ALL
lsel,u,loc,z,-bc/2
lsel,u,loc,z,bc/2
lsel,u,loc,z,-bfs/2,bfs/2
LESIZE,ALL,,dvLaje,,1,,0,

!SELECIONAR LINHA DA PROFUNDIDADE
ALLSEL,ALL
LSEL,U,LOC,X,-1,0
LSEL,U,LOC,X,lb,lb+1
LESIZE,ALL,,dv,,1,,0,

!DEFINIÇÃO DOS ATRIBUTOS DA MALHA
MSHKEY,1           !use mapped mashing
MSHAPE,0,3-D      !mashape,0 to elemento quadrangulares,3D
VSEL,ALL
VMESH,all

!NÓ DE CONTROLE
N,1000000,lb/2,-1,0      ! nó de controle - convecção e radiação

/ANG,1
/REPLOT

!GERAR ELEMENTOS DE CONVECÇÃO/RADIAÇÃO
!CONVECÇÃO DO PERFIL
TYPE,3           !surf152-convecção. Geração dos elementos de
                 convecção no perfil
REAL,4           !superf. convecção perfil
MAT,4           !filme, superf. convecção perfil

NSEL,S,LOC,Y,0,tfi           !seleciona nós da borda da mesa inferior
ESURF,1000000           !gera elementos nas faces livres dos nós
                       selecionados associado ao nó de controle

ASEL,S,LOC,Z,-tw/2           !seleciona áreas da borda da alma
ASEL,A,LOC,Z,tw/2
ASEL,R,LOC,Y,tfi,dt-tfs
NSLA,S,1           !seleciona os nós associados às áreas
                 selecionadas
ESURF,1000000           !gera elementos nas faces livres dos nós
                       selecionados associado ao nó de controle

```

ASEL,S,LOC,Y,dt-tfs,dt	<i>!seleciona área da borda da mesa superior</i>
ASEL,U,LOC,Y,dt	
ASEL,U,LOC,Z,tw/2	
ASEL,U,LOC,Z,-tw/2	
NSLA,S,1	<i>!seleciona os nós associados às áreas selecionadas</i>
ESURF,1000000	<i>!gera elementos nas faces livres dos nós selecionados associado ao nó de controle</i>
 !CONVECÇÃO DA LAJE	
TYPE,3	<i>!surf152-convecção. Geração dos elementos de convecção na laje</i>
REAL,5	<i>!superf convecção laje</i>
MAT,5	<i>!filme, superf convecção laje</i>
ASEL,S,LOC,Y,dt	<i>!seleciona área da borda inferior da laje</i>
ASEL,U,LOC,Z,-bfs/2,bfs/2	
NSLA,S,1	<i>!seleciona os nós associados às áreas selecionadas</i>
ESURF,1000000	<i>!gera elementos nas faces livres dos nós selecionados associado ao nó de controle</i>
 !RADIAÇÃO DO PERFIL	
TYPE,4	<i>!surf152-radiação. Geração dos elementos de radiação no perfil</i>
REAL,7	<i>!superf radiação perfil</i>
MAT,7	<i>!filme, radiação perfil</i>
NSEL,S,LOC,Y,0,tfi	<i>!seleciona nós da borda da mesa inferior</i>
ESURF,1000000	<i>!gera elementos nas faces livres dos nós selecionados associado ao nó de controle</i>
ASEL,S,LOC,Z,-tw/2	<i>!seleciona área da borda da alma</i>
ASEL,A,LOC,Z,tw/2	
ASEL,R,LOC,Y,tfi,dt-tfs	
NSLA,S,1	<i>!seleciona os nós associados às áreas selecionadas</i>
ESURF,1000000	<i>!gera elementos nas faces livres dos nós selecionados associado ao nó de controle</i>
ASEL,S,LOC,Y,dt-tfs,dt	<i>!seleciona borda da mesa superior</i>
ASEL,U,LOC,Y,dt	
ASEL,U,LOC,Z,tw/2	
ASEL,U,LOC,Z,-tw/2	
NSLA,S,1	<i>!seleciona os nós associados às áreas selecionadas</i>
ESURF,1000000	<i>!gera elementos nas faces livres dos nós selecionados associado ao nó de controle</i>
 !RADIAÇÃO DA LAJE	
TYPE,4	<i>!surf152-radiação. Geração dos elementos de radiação na laje</i>
REAL,8	<i>!superf radiação laje</i>
MAT,8	<i>!filme, radiação laje</i>
ASEL,S,LOC,Y,dt	<i>!seleciona área da borda inferior da laje</i>
ASEL,U,LOC,Z,-bfs/2,bfs/2	
NSLA,S,1	<i>!seleciona os nós associados às áreas selecionadas</i>
ESURF,1000000	<i>!gera elementos nas faces livres dos nós selecionados associado ao nó de controle</i>
ALLSEL,ALL	
EPL0T	

```

!APLICAÇÃO DO FILME DE CONVECÇÃO
  !PARA OS ELEMENTOS DE CONVECÇÃO DO PERFIL
    ESEL,S,REAL,,4
    SFE,ALL,1,CONV,0,25,
    ALLSEL,ALL

  !PARA OS ELEMENTOS DE CONVECÇÃO DA LAJE
    ESEL,S,REAL,,5
    SFE,ALL,1,CONV,0,25,
    ALLSEL,ALL

!GERAR TABELA PARA CURVA DE INCÊNDIO PADRÃO DA ISO 834
  *DIM,TempIP, TABLE,tmax+1,1,1,TIME,,
  i=1
  *DOWHILE,i
    tempo=(i-1)
    *SET,TempIP(i,0,1),tempo,
    *SET,tempIP(i,1,1),T0+345*LOG10((8*tempo/60)+1),
    i=i+1
  *IF,tempo,GE,tmax,THEN
  *EXIT
  *ENDIF
*ENDDO

!APLICAÇÃO DA CARGA TÉRMICA
  D,1000000,TEMP,%TempIP%
  ALLSEL,ALL
  EPLOTT

!OPÇÕES PARA SOLUÇÃO
  ANTYPE,4
  IC,ALL,TEMP,T0
  KBC,1
  AUTOTS,1
  TIME,tmax
  DELTIM,10,.001,120,
  OUTRES,ERASE
  OUTRES,NSOL,ALL

  !definição do tipo de análise: Transiente
  !definição das condições iniciais de temp.
  !opções de processamento

  !tempo máximo do ensaio
  !determinar substep,minium time step and maximum tipe step

SAVE
FINISH

!SOLUÇÃO
  ALLSEL,ALL
  /SOLU
  SOLVE

!VER RESULTADOS
  /POST1
    PLNSOL, TEMP,,0

  /POST26
    NUMVAR,200 !número de variáveis máxima permitidas no post26.

!SALVAR DADOS DOS RESULTADOS EM *.txt
  !SALVAR NOME PARA OS NÓS
  ! Nó N2 - mesa inferior
  NSEL,S,LOC,Y,0
  NSEL,R,LOC,Z,tw/2+(bfi/2-tw/2)/2
  NSEL,R,LOC,X,lb/2

```



```
*get,N2,NODE,,NUM,MIN
ALLSEL
NSOL,2,N2,TEMP,,MesaInf
```

! Nó N3 a N7 - alma

```
NSEL,S,LOC,Y,tfi+1*h/6
NSEL,R,LOC,Z,tw/2
NSEL,R,LOC,X,lb/2
*get,N3,NODE,,NUM,
ALLSEL
NSOL,3,N3,TEMP,,Alma1
```

```
NSEL,S,LOC,Y,tfi+2*h/6
NSEL,R,LOC,Z,tw/2
NSEL,R,LOC,X,lb/2
*get,N4,NODE,,NUM,MIN
ALLSEL
NSOL,4,N4,TEMP,,Alma2
```

```
NSEL,S,LOC,Y,tfi+3*h/6
NSEL,R,LOC,Z,tw/2
NSEL,R,LOC,X,lb/2
*get,N5,NODE,,NUM,MIN
ALLSEL
NSOL,5,N5,TEMP,,Alma3
```

```
NSEL,S,LOC,Y,tfi+4*h/6
NSEL,R,LOC,Z,tw/2
NSEL,R,LOC,X,lb/2
*get,N6,NODE,,NUM,MIN
ALLSEL
NSOL,6,N6,TEMP,,Alma4
```

```
NSEL,S,LOC,Y,tfi+5*h/6
NSEL,R,LOC,Z,tw/2
NSEL,R,LOC,X,lb/2
*get,N7,NODE,,NUM,MIN
ALLSEL
NSOL,7,N7,TEMP,,Alma5
```

! Nó N8 - mesa superior

```
NSEL,S,LOC,Y,dt
NSEL,R,LOC,Z,tw/2+(bfi/2-tw/2)/2
NSEL,R,LOC,X,lb/2
*get,N8,NODE,,NUM,MIN
ALLSEL
NSOL,8,N8,TEMP,,MesaSup
```

! Nó N9 a N16- laje

```
NSEL,S,LOC,Y,dt
NSEL,R,LOC,Z,bfs/2+((bc-bfs)/2)/dvLaje
NSEL,R,LOC,X,lb/2
*get,N9,NODE,,NUM,MIN
ALLSEL
NSOL,9,N9,TEMP,,Laje1
```

```
NSEL,S,LOC,Y,dt+1*sbl/4
NSEL,R,LOC,Z,bfs/2+((bc-bfs)/2)/dvLaje
NSEL,R,LOC,X,lb/2
*get,N10,NODE,,NUM,MIN
```

NSOL, 10, N10, TEMP,, Laje2

NSEL, S, LOC, Y, dt+2*sb/4
 NSEL, R, LOC, Z, bfs/2+((bc-bfs)/2)/dvLaje
 NSEL, R, LOC, X, lb/2
 *get, N11, NODE,, NUM, MIN
 NSOL, 11, N11, TEMP,, Laje3

NSEL, S, LOC, Y, dt+3*sb/4
 NSEL, R, LOC, Z, bfs/2+((bc-bfs)/2)/dvLaje
 NSEL, R, LOC, X, lb/2
 *get, N12, NODE,, NUM, MIN
 NSOL, 12, N12, TEMP,, Laje4

NSEL, S, LOC, Y, dt+4*sb/4
 NSEL, R, LOC, Z, bfs/2+((bc-bfs)/2)/dvLaje
 NSEL, R, LOC, X, lb/2
 *get, N13, NODE,, NUM, MIN
 NSOL, 13, N13, TEMP,, Laje5

NSEL, S, LOC, Y, dt+sb+sbLCab
 NSEL, R, LOC, Z, bfs/2+((bc-bfs)/2)/dvLaje
 NSEL, R, LOC, X, lb/2
 *get, N14, NODE,, NUM, MIN
 NSOL, 14, N14, TEMP,, Laje6

NSEL, S, LOC, Y, dt+sb+sbLCab+(tc-sb-sbLCab)/2
 NSEL, R, LOC, Z, bfs/2+((bc-bfs)/2)/dvLaje
 NSEL, R, LOC, X, lb/2
 *get, N15, NODE,, NUM, MIN
 NSOL, 15, N15, TEMP,, Laje7

NSEL, S, LOC, Y, dt+tc
 NSEL, R, LOC, Z, bfs/2+((bc-bfs)/2)/dvLaje
 NSEL, R, LOC, X, lb/2
 *get, N16, NODE,, NUM, MIN
 NSOL, 16, N16, TEMP,, Laje8

!SALVAR VETOR TEMPO

time_size=tmax/ta
 *DEL,time_array
 *DIM,time_array, TABLE,time_size, 1
 VGET,time_array(1,0), 1

!SALVAR VARIÁVEIS

*CREATE,scratch,gui
 *DEL,_P26_EXPORT !post26
 *DIM,_P26_EXPORT, TABLE,time_size, 15
 VGET,_P26_EXPORT(1,0), 1
 VGET,_P26_EXPORT(1,1), 2
 VGET,_P26_EXPORT(1,2), 3
 VGET,_P26_EXPORT(1,3), 4
 VGET,_P26_EXPORT(1,4), 5
 VGET,_P26_EXPORT(1,5), 6
 VGET,_P26_EXPORT(1,6), 7
 VGET,_P26_EXPORT(1,7), 8
 VGET,_P26_EXPORT(1,8), 9
 VGET,_P26_EXPORT(1,9), 10

```
VGET,_P26_EXPORT(1,10),11
VGET,_P26_EXPORT(1,11),12
VGET,_P26_EXPORT(1,12),13
VGET,_P26_EXPORT(1,13),14
VGET,_P26_EXPORT(1,14),15
VGET,_P26_EXPORT(1,15),16
```

*!CONFIGURAR ARQUIVOS *.txt*

```
/OUTPUT,'REPORT_TEMP_PERFIL','TXT',';'
*VWRITE,'TIME','MesaInf','Alma1','Alma2','Alma3','Alma4','Alma5','MesaSup'
%C, %C, %C, %C, %C, %C, %C, %C
*VWRITE,_P26_EXPORT(1,0),_P26_EXPORT(1,1),_P26_EXPORT(1,2),_P26_EXPORT(1,3),_P26_EXPORT(1,4),_P26_EXPORT(1,5),_P26_EXPORT(1,6),_P26_EXPORT(1,7)
%G, %G, %G, %G, %G, %G, %G, %G
/OUTPUT,TERM
```

```
/OUTPUT,'REPORT_TEMP_LAJE','TXT',';'
*VWRITE,'TIME','Laje1','Laje2','Laje3','Laje4','Laje5','Laje6','Laje7','Laje8'
%C, %C, %C, %C, %C, %C, %C, %C, %C
*VWRITE,_P26_EXPORT(1,0),_P26_EXPORT(1,8),_P26_EXPORT(1,9),_P26_EXPORT(1,10),_P26_EXPORT(1,11),_P26_EXPORT(1,12),_P26_EXPORT(1,13),_P26_EXPORT(1,14),_P26_EXPORT(1,15)
%G, %G, %G, %G, %G, %G, %G, %G, %G
/OUTPUT,TERM
```

```
*END
/INPUT,scratch,gui
```

B.2 ANÁLISE TERMOESTRUTURAL DE VIGA MISTA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO COM UTILIZAÇÃO DE ELEMENTOS SÓLIDO E DE CASCA

!DADOS DE ENTRADA

fatorcm = 100 !fator pra passar m para cm.

!SEÇÃO AÇO

bfi = 0.167*fatorcm !mesa inferior - cm
 bfs = bfi !mesa superior - cm
 dt= 0.317*fatorcm !altura total - cm
 tfi = 0.0132*fatorcm !espessura mesa inferior - cm
 tfs = tfi !espessura mesa superior - cm
 tw = 0.0076*fatorcm !espessura alma - cm
 h = dt - tfi - tfs
 lb = 6*fatorcm !comprimento da viga - cm
 lf = 5.6*fatorcm !comprimento do forno - cm

!SEÇÃO CONCRETO

tc = 0.12*fatorcm !espessura laje - cm
 bc = 1.5*fatorcm !largura da laje - cm
 lc = lb !comprimento da laje - cm

!STUD BOLT

sby=bfs/2
 sbx=lf/(nsb-1) !espaçamento entre linha de stud bolt na longitudinal - cm
 sSBx=sbx !espaçamento em x entre stud bolt - cm
 sbDi=19.1/1000*fatorcm !diâmetro do stud bolt - cm
 sbDcab=31.7/1000*fatorcm !diâmetro da cabeça do stud bolt - cm
 sbL=80/1000*fatorcm !comprimento do stud bolt - cm
 sbLCab=10/1000*fatorcm !comprimento do stud bolt - cm

!ARMADURA POSITIVA

diap=8/1000*100 !diâmetro da armadura positiva - cm
 cobap=sbl/2 !cobrimento da armaura positiva - cm

!PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

gc=2.4e-5 !densidade do concreto, kN/cm3
 psc=0.2 !coeficiente de poisson do concreto
 ga=7.7e-5 !densidade do aço do perfil laminado, kN/cm3
 psa=0.3 !coeficiente de poisson do aço do perfil laminado
 gsb=7.7e-5 !densidade do aço do conector, kN/cm3
 pssb=0.3 !coeficiente de poisson do aço do conector
 gap=7.7e-5 !densidade do aço armadura, kN/cm3
 Eap=21000 !módulo de elasticidade do aço armadura, kN/cm2
 psap=0.3 !coeficiente de poisson do aço armadura

!CARGA

carga1=35 !carga linear aplicada sobre a via mista, kN/m
 carga=carga1*(lb/fatorcm) !carga resultante, kN

!CONTROLE MALHA

dvLaje = 6 !número de divisões na laje sem contato com a viga

!DADOS PARA CÁLCULO

T0 = 20 !temperatura inicial (°C)
 tmax = 3600 !tempo total de ensaio (s)

!OPÇÕES GERAIS

/VIEW,1,1,1,1

```

/ANG,1
/ESHAPE,1
/UIS,MSGPOP,3
/PBC,ALL,,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/prep7

!TIPOS DE ELEMENTOS
!AÇO
    ET,1,SHELL181 !shell para viga
    KEYOPT,1,1,0
    KEYOPT,1,3,0
    KEYOPT,1,4,0
    KEYOPT,1,5,0
    KEYOPT,1,8,0
    KEYOPT,1,9,0
    KEYOPT,1,10,0
    KEYOPT,1,11,0

!CONCRETO
    ET,2,SOLID185! sólido para concreto
    KEYOPT,2,2,2

!PAR DE CONTATO
    ET,3,TARGE170
    KEYOPT,3,1,0
    KEYOPT,3,2,0
    KEYOPT,3,3,0
    KEYOPT,3,4,0
    KEYOPT,3,5,0

    ET,4,CONTA174
    KEYOPT,4,1,0
    KEYOPT,4,4,1
    KEYOPT,4,2,4
    KEYOPT,4,5,4
    KEYOPT,4,7,1
    KEYOPT,4,8,0
    KEYOPT,4,9,1
    KEYOPT,4,10,0
    KEYOPT,4,11,1
    KEYOPT,4,12,0

!CONECTOR
    ET,5,BEAM189
    KEYOPT,5,1,0
    KEYOPT,5,2,1
    KEYOPT,5,4,2
    KEYOPT,5,6,0
    KEYOPT,5,7,2
    KEYOPT,5,9,3
    KEYOPT,5,10,0
    KEYOPT,5,11,0
    KEYOPT,5,12,0

!ARMADURA
    ET,7,LINK180
    KEYOPT,7,2,0

```

! CONSTANTES REAIS

!AÇO

R,1

!CONCRETO

R,2

!CONTATO

R,4,0,0,-0.01,-1,-1

RMORE,0,0,1000000,0,0,

RMORE,0.18

RMORE,,,1,0,-0.18,

RMORE,10

!CONECTOR

R,5

!ARMADURA POSITIVA

R,7,3.1416*((diap/2)**2)

! PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

!AÇO

!TENSÃO X DEFORMAÇÃO

TBDE,MISO,1,,,

TB,MISO,1,14,7,

TBTEMP,0,1

TBPT,,0,0

TBPT,,0.00164285714285714,34.5

TBPT,,0.00623214285714286,34.5

TBPT,,0.0108214285714286,34.5

TBPT,,0.0154107142857143,34.5

TBPT,,0.02,34.5

TBPT,,0.15,34.5

TBTEMP,20,2

TBPT,,0.00164285714285714,34.5

TBPT,,0.00623214285714286,34.5

TBPT,,0.0108214285714286,34.5

TBPT,,0.0154107142857143,34.5

TBPT,,0.02,34.5

TBPT,,0.15,34.5

TBTEMP,100,3

TBPT,,0.00164285714285714,34.5

TBPT,,0.00623214285714286,34.5

TBPT,,0.0108214285714286,34.5

TBPT,,0.0154107142857143,34.5

TBPT,,0.02,34.5

TBPT,,0.15,34.5

TBTEMP,200,4

TBPT,,0.00162460317460317,30.705

TBPT,,0.00621845238095238,33.2010021382107

TBPT,,0.0108123015873016,33.9859540684823

TBPT,,0.0154061507936508,34.3781618274712

TBPT,,0.02,34.5

TBPT,,0.15,34.5

TBTEMP,300,5

TBPT,,0.00160178571428571,26.91

TBPT,,0.00620133928571429,31.8660506000983

TBPT,,0.0108008928571429,33.4575851648425

TBPT,,0.0154004464285714,34.2529211468705

TBPT,,0.02,34.5

TBPT,,0.15,34.5

TBTEMP,400,6

TBPT,,0.00152551020408163,22.425

TBPT,,0.00614413265306122,30.2240012251245
TBPT,,0.0107627551020408,32.8072637057773
TBPT,,0.0153813775510204,34.0987409665215
TBPT,,0.02,34.5
TBPT,,0.15,34.5
TBTEMP,500,7
TBPT,,0.00145119047619048,18.285
TBPT,,0.00608839285714286,23.8791472779164
TBPT,,0.0107255952380952,25.7103276991971
TBPT,,0.0153627976190476,26.6256326641418
TBPT,,0.02,26.91
TBPT,,0.15,26.91
TBTEMP,600,8
TBPT,,0.00158986175115207,10.35
TBPT,,0.00619239631336406,14.1285745847435
TBPT,,0.010794930875576,15.388977458766
TBPT,,0.015397465437788,16.0191876073598
TBPT,,0.02,16.215
TBPT,,0.15,16.215
TBTEMP,700,9
TBPT,,0.00164285714285714,4.485
TBPT,,0.00623214285714286,6.68235514080428
TBPT,,0.0108214285714286,7.43882540209024
TBPT,,0.0154107142857143,7.8173593769082
TBPT,,0.02,7.935
TBPT,,0.15,7.935
TBTEMP,800,10
TBPT,,0.00127777777777778,2.415
TBPT,,0.005958333333333333,3.30902825207563
TBPT,,0.01063888888888889,3.60263650882493
TBPT,,0.01531944444444444,3.74940214060602
TBPT,,0.02,3.795
TBPT,,0.15,3.795
TBTEMP,900,11
TBPT,,0.00121693121693122,1.725
TBPT,,0.00591269841269841,1.95166788437637
TBPT,,0.0106084656084656,2.02317260290498
TBPT,,0.0153042328042328,2.05890102688986
TBPT,,0.02,2.07
TBPT,,0.15,2.07
TBTEMP,1000,12
TBPT,,0.0010952380952381,1.035
TBPT,,0.00582142857142857,1.26090779011821
TBPT,,0.010547619047619,1.33286999942621
TBPT,,0.0152738095238095,1.36882915751054
TBPT,,0.02,1.38
TBPT,,0.15,1.38
TBTEMP,1100,13
TBPT,,0.00146031746031746,0.69
TBPT,,0.0060952380952381,0.69
TBPT,,0.0107301587301587,0.69
TBPT,,0.0153650793650794,0.69
TBPT,,0.02,0.69
TBPT,,0.15,0.69
TBTEMP,1200,14
TBPT,,0.00164285714285714,0.000345
TBPT,,0.00623214285714286,0.000345
TBPT,,0.0108214285714286,0.000345
TBPT,,0.0154107142857143,0.000345
TBPT,,0.02,0.000345

TBPT,,0.15,0.000345

!DENSIDADE

MPTEMP,,,,,,,,
 MPTEMP,1,0
 MPTEMP,2,100
 MPTEMP,3,200
 MPTEMP,4,300
 MPTEMP,5,400
 MPTEMP,6,500
 MPTEMP,7,600
 MPTEMP,8,700
 MPTEMP,9,800
 MPTEMP,10,900
 MPTEMP,11,1000
 MPTEMP,12,1100
 MPTEMP,13,1200
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81 !kN/cm³ / m/s² = kg/cm³
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81
 MPDATA,DENS,1,,(ga)/9.81

!COEFICIENTE DE POISSON

MPDATA,PRXY,1,,psa
 MPDATA,PRXY,1,,psa
 MPDATA,PRXY,1,,psa
 MPDATA,PRXY,1,,psa
 MPDATA,PRXY,1,,psa
 MPDATA,PRXY,1,,psa
 MPDATA,PRXY,1,,psa
 MPDATA,PRXY,1,,psa
 MPDATA,PRXY,1,,psa
 MPDATA,PRXY,1,,psa
 MPDATA,PRXY,1,,psa
 MPDATA,PRXY,1,,psa
 MPDATA,PRXY,1,,psa
 MPDATA,PRXY,1,,psa
 MPDATA,PRXY,1,,psa

!MÓDULO DE ELASTICIDADE

MPDATA,EX,1,,21000
 MPDATA,EX,1,,21000
 MPDATA,EX,1,,18900
 MPDATA,EX,1,,16800
 MPDATA,EX,1,,14700
 MPDATA,EX,1,,12600
 MPDATA,EX,1,,6510
 MPDATA,EX,1,,2730
 MPDATA,EX,1,,1890
 MPDATA,EX,1,,1417.5
 MPDATA,EX,1,,945
 MPDATA,EX,1,,472.5
 MPDATA,EX,1,,0.21

!EXPANSÃO TÉRMICA (DELTA L/L) : EN 1994-1-2:2005

MPDE,THSX,1
MPTMP,,,,,,
MPTMP,1,0
MPTMP,2,100
MPTMP,3,200
MPTMP,4,300
MPTMP,5,400
MPTMP,6,500
MPTMP,7,600
MPTMP,8,750
MPTMP,9,800
MPTMP,10,860
MPTMP,11,900
MPTMP,12,1000
MPTMP,13,1100
MPTMP,14,1200
UIMP,1,REFT,,,T0
MPDATA,THSX,1,,0
MPDATA,THSX,1,,0.0009984
MPDATA,THSX,1,,0.0023184
MPDATA,THSX,1,,0.0037184
MPDATA,THSX,1,,0.0051984
MPDATA,THSX,1,,0.0067584
MPDATA,THSX,1,,0.0083984
MPDATA,THSX,1,,0.0110084
MPDATA,THSX,1,,0.011
MPDATA,THSX,1,,0.011
MPDATA,THSX,1,,0.0118
MPDATA,THSX,1,,0.0138
MPDATA,THSX,1,,0.0158
MPDATA,THSX,1,,0.0178

*!CONCRETO**!TENSÃOxDEFORMAÇÃO*

TBDE,MISO,2,,,
TB,MISO,2,13,12,
TBTEMP,0
TBPT,,0,0
TBPT,,0.00025,0.449775112443778
TBPT,,0.0005,0.896414342629482
TBPT,,0.00075,1.3320177602368
TBPT,,0.001,1.74418604651163
TBPT,,0.00125,2.11764705882353
TBPT,,0.0015,2.43682310469314
TBPT,,0.00175,2.68886043533931
TBPT,,0.002,2.86624203821656
TBPT,,0.00225,2.96812019054599
TBPT,,0.0025,3
TBPT,,0.02,3
TBTEMP,100
TBPT,,0,0
TBPT,,0.0004,0.449775112443778
TBPT,,0.0008,0.896414342629482
TBPT,,0.0012,1.3320177602368
TBPT,,0.0016,1.74418604651163

TBPT,,0.002,2.11764705882353
TBPT,,0.0024,2.43682310469314
TBPT,,0.0028,2.68886043533931
TBPT,,0.0032,2.86624203821656
TBPT,,0.0036,2.96812019054599
TBPT,,0.004,3
TBPT,,0.0225,3
TBTEMP,200
TBPT,,0,0
TBPT,,0.00055,0.436281859070465
TBPT,,0.0011,0.869521912350598
TBPT,,0.00165,1.2920572274297
TBPT,,0.0022,1.69186046511628
TBPT,,0.00275,2.05411764705882
TBPT,,0.0033,2.36371841155235
TBPT,,0.00385,2.60819462227913
TBPT,,0.0044,2.78025477707006
TBPT,,0.00495,2.87907658482961
TBPT,,0.0055,2.91
TBPT,,0.025,2.91
TBTEMP,300
TBPT,,0,0
TBPT,,0.0007,0.409295352323838
TBPT,,0.0014,0.815737051792829
TBPT,,0.0021,1.21213616181549
TBPT,,0.0028,1.58720930232558
TBPT,,0.0035,1.92705882352941
TBPT,,0.0042,2.21750902527076
TBPT,,0.0049,2.44686299615877
TBPT,,0.0056,2.60828025477707
TBPT,,0.0063,2.70098937339685
TBPT,,0.007,2.73
TBPT,,0.0275,2.73
TBTEMP,400
TBPT,,0,0
TBPT,,0.001,0.382308845577211
TBPT,,0.002,0.76195219123506
TBPT,,0.003,1.13221509620128
TBPT,,0.004,1.48255813953488
TBPT,,0.005,1.8
TBPT,,0.006,2.07129963898917
TBPT,,0.007,2.28553137003841
TBPT,,0.008,2.43630573248408
TBPT,,0.009,2.52290216196409
TBPT,,0.01,2.55
TBPT,,0.03,2.55
TBTEMP,500
TBPT,,0,0
TBPT,,0.0015,0.332833583208396
TBPT,,0.003,0.663346613545817
TBPT,,0.0045,0.985693142575234
TBPT,,0.006,1.2906976744186
TBPT,,0.0075,1.56705882352941
TBPT,,0.009,1.80324909747292
TBPT,,0.0105,1.98975672215109
TBPT,,0.012,2.12101910828025
TBPT,,0.0135,2.19640894100403
TBPT,,0.015,2.22
TBPT,,0.0325,2.22
TBTEMP,600

TBPT,,0,0
TBPT,,0.0025,0.269865067466267
TBPT,,0.005,0.537848605577689
TBPT,,0.0075,0.799210656142082
TBPT,,0.01,1.04651162790698
TBPT,,0.0125,1.27058823529412
TBPT,,0.015,1.46209386281588
TBPT,,0.0175,1.61331626120359
TBPT,,0.02,1.71974522292994
TBPT,,0.0225,1.78087211432759
TBPT,,0.025,1.8
TBPT,,0.035,1.8
TBTEMP,700
TBPT,,0,0
TBPT,,0.0025,0.193403298350825
TBPT,,0.005,0.385458167330677
TBPT,,0.0075,0.572767636901825
TBPT,,0.01,0.75
TBPT,,0.0125,0.910588235294118
TBPT,,0.015,1.04783393501805
TBPT,,0.0175,1.1562099871959
TBPT,,0.02,1.23248407643312
TBPT,,0.0225,1.27629168193477
TBPT,,0.025,1.29
TBPT,,0.0375,1.29
TBTEMP,800
TBPT,,0,0
TBPT,,0.0025,0.12143928035982
TBPT,,0.005,0.24203187250996
TBPT,,0.0075,0.359644795263937
TBPT,,0.01,0.47093023255814
TBPT,,0.0125,0.571764705882353
TBPT,,0.015,0.657942238267148
TBPT,,0.0175,0.725992317541613
TBPT,,0.02,0.773885350318471
TBPT,,0.0225,0.801392451447417
TBPT,,0.025,0.81
TBPT,,0.04,0.81
TBTEMP,900
TBPT,,0,0
TBPT,,0.0025,0.0674662668665667
TBPT,,0.005,0.134462151394422
TBPT,,0.0075,0.19980266403552
TBPT,,0.01,0.261627906976744
TBPT,,0.0125,0.317647058823529
TBPT,,0.015,0.365523465703971
TBPT,,0.0175,0.403329065300896
TBPT,,0.02,0.429936305732484
TBPT,,0.0225,0.445218028581898
TBPT,,0.025,0.45
TBPT,,0.0425,0.45
TBTEMP,1000
TBPT,,0,0
TBPT,,0.0025,0.0269865067466267
TBPT,,0.005,0.0537848605577689
TBPT,,0.0075,0.0799210656142082
TBPT,,0.01,0.104651162790698
TBPT,,0.0125,0.127058823529412
TBPT,,0.015,0.146209386281588
TBPT,,0.0175,0.161331626120359

TBPT,,0.02,0.171974522292994
 TBPT,,0.0225,0.178087211432759
 TBPT,,0.025,0.18
 TBPT,,0.045,0.18
 TBTEMP,1100
 TBPT,,0,0
 TBPT,,0.0025,0.00899550224887556
 TBPT,,0.005,0.0179282868525896
 TBPT,,0.0075,0.0266403552047361
 TBPT,,0.01,0.0348837209302326
 TBPT,,0.0125,0.0423529411764706
 TBPT,,0.015,0.0487364620938628
 TBPT,,0.0175,0.0537772087067862
 TBPT,,0.02,0.0573248407643312
 TBPT,,0.0225,0.0593624038109198
 TBPT,,0.025,0.06
 TBPT,,0.0475,0.06
 TBTEMP,1200
 TBPT,,0,0
 TBPT,,0.000000000001,4.49775112443778E-12
 TBPT,,0.000000000002,8.96414342629482E-12
 TBPT,,0.000000000003,1.3320177602368E-11
 TBPT,,0.000000000004,1.74418604651163E-11
 TBPT,,0.000000000005,2.11764705882353E-11
 TBPT,,0.000000000006,2.43682310469314E-11
 TBPT,,0.000000000007,2.68886043533931E-11
 TBPT,,0.000000000008,2.86624203821656E-11
 TBPT,,0.000000000009,2.96812019054599E-11
 TBPT,,0.00000000001,0.00000000003
 TBPT,,0.00000000001,0.00000000003

!DENSIDADE

MPTEMP,,,,,,,,
 MPTEMP,1,0
 MPTEMP,2,100
 MPTEMP,3,200
 MPTEMP,4,300
 MPTEMP,5,400
 MPTEMP,6,500
 MPTEMP,7,600
 MPTEMP,8,700
 MPTEMP,9,800
 MPTEMP,10,900
 MPTEMP,11,1000
 MPTEMP,12,1100
 MPTEMP,13,1200
 MPDELE,DENS,2
 MPDATA,DENS,2,,1*(gc)/9.81 !kN/cm³ / m/s² = kg/cm³
 MPDATA,DENS,2,,1*(gc)/9.81
 MPDATA,DENS,2,,0.98*(gc)/9.81
 MPDATA,DENS,2,,0.965*(gc)/9.81
 MPDATA,DENS,2,,0.950*(gc)/9.81
 MPDATA,DENS,2,,0.941*(gc)/9.81
 MPDATA,DENS,2,,0.933*(gc)/9.81
 MPDATA,DENS,2,,0.924*(gc)/9.81
 MPDATA,DENS,2,,0.915*(gc)/9.81
 MPDATA,DENS,2,,0.906*(gc)/9.81
 MPDATA,DENS,2,,0.898*(gc)/9.81
 MPDATA,DENS,2,,0.889*(gc)/9.81
 MPDATA,DENS,2,,0.88*(gc)/9.81

!MÓDULO DE POISSON

MPDATA,PRXY,2,,psc
 MPDATA,PRXY,2,,psc
 MPDATA,PRXY,2,,psc
 MPDATA,PRXY,2,,psc
 MPDATA,PRXY,2,,psc
 MPDATA,PRXY,2,,psc
 MPDATA,PRXY,2,,psc
 MPDATA,PRXY,2,,psc
 MPDATA,PRXY,2,,psc
 MPDATA,PRXY,2,,psc
 MPDATA,PRXY,2,,psc
 MPDATA,PRXY,2,,psc
 MPDATA,PRXY,2,,psc
 MPDATA,PRXY,2,,psc

!MÓDULO DE ELASTICIDADE (EN 1992-1-1:2004)

MPDATA,EX,2,,1799.10044977511
 MPDATA,EX,2,,1124.43778110945
 MPDATA,EX,2,,793.239743764482
 MPDATA,EX,2,,584.707646176911
 MPDATA,EX,2,,382.308845577211
 MPDATA,EX,2,,221.889055472264
 MPDATA,EX,2,,107.946026986507
 MPDATA,EX,2,,77.3613193403298
 MPDATA,EX,2,,48.575712143928
 MPDATA,EX,2,,26.9865067466267
 MPDATA,EX,2,,10.7946026986507
 MPDATA,EX,2,,3.59820089955022
 MPDATA,EX,2,,4.49775112443778

!EXPANSÃO TÉRMICA (DELTA L/L) : EN 1994-1-2:2005

MPDE,THSX,2
 MPTEMP,,,,,,,,
 MPTEMP,1,0
 MPTEMP,2,100
 MPTEMP,3,200
 MPTEMP,4,400
 MPTEMP,5,500
 MPTEMP,6,600
 MPTEMP,7,700
 MPTEMP,8,800
 MPTEMP,9,900
 MPTEMP,10,1000
 MPTEMP,11,1100
 MPTEMP,12,1200
 UIMP,2,REFT,,,T0
 MPDATA,THSX,2,,0.00
 MPDATA,THSX,2,,0.000743
 MPDATA,THSX,2,,0.001804
 MPDATA,THSX,2,,0.004892
 MPDATA,THSX,2,,0.007195
 MPDATA,THSX,2,,0.010188
 MPDATA,THSX,2,,0.014009
 MPDATA,THSX,2,,0.014
 MPDATA,THSX,2,,0.014
 MPDATA,THSX,2,,0.014
 MPDATA,THSX,2,,0.014
 MPDATA,THSX,2,,0.014

!CONTATO/ATRITO

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,MU,3,,0.4 !coeficiente de atrito concreto x aço

!CONNECTOR

!TENSÃO x DEFORMAÇÃO

TBDE,MISO,5,,

TB,MISO,5,14,7,

TBTEMP,0

TBPT,,0,0

TBPT,,0.00202439024390244,41.5

TBPT,,0.00651829268292683,41.5

TBPT,,0.0110121951219512,41.5

TBPT,,0.0155060975609756,41.5

TBPT,,0.02,41.5

TBPT,,0.15,41.5

TBTEMP,20,2

TBPT,,0.00202439024390244,41.5

TBPT,,0.00651829268292683,41.5

TBPT,,0.0110121951219512,41.5

TBPT,,0.0155060975609756,41.5

TBPT,,0.02,41.5

TBPT,,0.15,41.5

TBTEMP,100,3

TBPT,,0.00202439024390244,41.5

TBPT,,0.00651829268292683,41.5

TBPT,,0.0110121951219512,41.5

TBPT,,0.0155060975609756,41.5

TBPT,,0.02,41.5

TBPT,,0.15,41.5

TBTEMP,200,4

TBPT,,0.00200189701897019,36.935

TBPT,,0.00650142276422764,39.9329984741482

TBPT,,0.0110009485094851,40.8798903203636

TBPT,,0.0155004742547426,41.3530221559233

TBPT,,0.02,41.5

TBPT,,0.15,41.5

TBTEMP,300,5

TBPT,,0.00197378048780488,32.37

TBPT,,0.00648033536585366,38.3112515242095

TBPT,,0.0109868902439024,40.2379312853022

TBPT,,0.0154934451219512,41.2008506258193

TBPT,,0.02,41.5

TBPT,,0.15,41.5

TBTEMP,400,6

TBPT,,0.00187979094076655,26.975

TBPT,,0.00640984320557491,36.2960907066044

TBPT,,0.0109398954703833,39.4394428452548

TBPT,,0.0154699477351916,41.0115102007995

TBPT,,0.02,41.5

TBPT,,0.15,41.5

TBTEMP,500,7

TBPT,,0.00178821138211382,21.995

TBPT,,0.00634115853658537,28.6890481739082

TBPT,,0.0108941056910569,30.9127742888471

TBPT,,0.0154470528455285,32.0245641102338

TBPT,,0.02,32.37

TBPT,,0.15,32.37

TBTEMP,600,8

TBPT,,0.00195908733280881,12.45
 TBPT,,0.00646931549960661,16.9626199841755
 TBPT,,0.0109795436664044,18.4981678144763
 TBPT,,0.0154897718332022,19.2663018526434
 TBPT,,0.02,19.505
 TBPT,,0.15,19.505
 TBTEMP,700,9
 TBPT,,0.00202439024390244,5.395
 TBPT,,0.00651829268292683,8.01022813085302
 TBPT,,0.0110121951219512,8.93669435568145
 TBPT,,0.0155060975609756,9.40074267329466
 TBPT,,0.02,9.545
 TBPT,,0.15,9.545
 TBTEMP,800,10
 TBPT,,0.00157452574525745,2.905
 TBPT,,0.00618089430894309,3.9745323483071
 TBPT,,0.0107872628726287,4.331232453791
 TBPT,,0.0153936314363144,4.50958438256637
 TBPT,,0.02,4.565
 TBPT,,0.15,4.565
 TBTEMP,900,11
 TBPT,,0.00149954832881662,2.075
 TBPT,,0.00612466124661247,2.34719139948042
 TBPT,,0.0107497741644083,2.43348555817125
 TBPT,,0.0153748870822042,2.47660493426918
 TBPT,,0.02,2.49
 TBPT,,0.15,2.49
 TBTEMP,1000,12
 TBPT,,0.00134959349593496,1.245
 TBPT,,0.00601219512195122,1.51604636886017
 TBPT,,0.0106747967479675,1.60302897766581
 TBPT,,0.0153373983739837,1.64649643613568
 TBPT,,0.02,1.66
 TBPT,,0.15,1.66
 TBTEMP,1100,13
 TBPT,,0.00179945799457995,0.83
 TBPT,,0.00634959349593496,0.83
 TBPT,,0.01089972899729,0.83
 TBPT,,0.015449864498645,0.83
 TBPT,,0.02,0.83
 TBPT,,0.15,0.83
 TBTEMP,1200,14
 TBPT,,0.00202439024390244,0.000415
 TBPT,,0.00651829268292683,0.000415
 TBPT,,0.0110121951219512,0.000415
 TBPT,,0.0155060975609756,0.000415
 TBPT,,0.02,0.000415
 TBPT,,0.15,0.000415

!DENSIDADE

MPTEMP,,,,,,,,,
 MPTEMP,1,0
 MPTEMP,2,100
 MPTEMP,3,200
 MPTEMP,4,300
 MPTEMP,5,400
 MPTEMP,6,500
 MPTEMP,7,600
 MPTEMP,8,700
 MPTEMP,9,800

MPTEMP,10,900
 MPTEMP,11,1000
 MPTEMP,12,1100
 MPTEMP,13,1200
 MPDATA,DENS,5,,(gsb)/9.81 !kN/cm³ / m/s² = kg/cm³
 MPDATA,DENS,5,,(gsb)/9.81
 MPDATA,DENS,5,,(gsb)/9.81
 MPDATA,DENS,5,,(gsb)/9.81
 MPDATA,DENS,5,,(gsb)/9.81
 MPDATA,DENS,5,,(gsb)/9.81
 MPDATA,DENS,5,,(gsb)/9.81
 MPDATA,DENS,5,,(gsb)/9.81
 MPDATA,DENS,5,,(gsb)/9.81
 MPDATA,DENS,5,,(gsb)/9.81
 MPDATA,DENS,5,,(gsb)/9.81
 MPDATA,DENS,5,,(gsb)/9.81
 MPDATA,DENS,5,,(gsb)/9.81
 MPDATA,DENS,5,,(gsb)/9.81

!COEFICIENTE DE POISSON

MPDATA,PRXY,5,,pssb
 MPDATA,PRXY,5,,pssb
 MPDATA,PRXY,5,,pssb
 MPDATA,PRXY,5,,pssb
 MPDATA,PRXY,5,,pssb
 MPDATA,PRXY,5,,pssb
 MPDATA,PRXY,5,,pssb
 MPDATA,PRXY,5,,pssb
 MPDATA,PRXY,5,,pssb
 MPDATA,PRXY,5,,pssb
 MPDATA,PRXY,5,,pssb
 MPDATA,PRXY,5,,pssb
 MPDATA,PRXY,5,,pssb
 MPDATA,PRXY,5,,pssb

!MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONECTOR

MPDATA,EX,5,,20500
 MPDATA,EX,5,,20500
 MPDATA,EX,5,,18450
 MPDATA,EX,5,,16400
 MPDATA,EX,5,,14350
 MPDATA,EX,5,,12300
 MPDATA,EX,5,,6355
 MPDATA,EX,5,,2665
 MPDATA,EX,5,,1845
 MPDATA,EX,5,,1383.75
 MPDATA,EX,5,,922.5
 MPDATA,EX,5,,461.25
 MPDATA,EX,5,,0.205

!EXPANSÃO TÉRMICA (DELTA L/L) : EN 1994-1-2:2005

MPDE,THSX,5
 MPTEMP,,,,,,,,,
 MPTEMP,1,0
 MPTEMP,2,100
 MPTEMP,3,200
 MPTEMP,4,300
 MPTEMP,5,400
 MPTEMP,6,500
 MPTEMP,7,600
 MPTEMP,8,750

MPTEMP,9,800
 MPTEMP,10,860
 MPTEMP,11,900
 MPTEMP,12,1000
 MPTEMP,13,1100
 MPTEMP,14,1200
 UIMP,5,REFT,,T0
 MPDATA,THSX,5,,0
 MPDATA,THSX,5,,0.0009984
 MPDATA,THSX,5,,0.0023184
 MPDATA,THSX,5,,0.0037184
 MPDATA,THSX,5,,0.0051984
 MPDATA,THSX,5,,0.0067584
 MPDATA,THSX,5,,0.0083984
 MPDATA,THSX,5,,0.0110084
 MPDATA,THSX,5,,0.011
 MPDATA,THSX,5,,0.011
 MPDATA,THSX,5,,0.0118
 MPDATA,THSX,5,,0.0138
 MPDATA,THSX,5,,0.0158
 MPDATA,THSX,5,,0.0178

!ARMADURA POSITIVA

!TENSÃOxDEFORMAÇÃO

TBDE,MISO,7,,,
 TB,MISO,7,14,7,
 TBTEMP,0
 TBPT,,0,0
 TBPT,,0.0024390243902439,50
 TBPT,,0.00682926829268293,50
 TBPT,,0.011219512195122,50
 TBPT,,0.015609756097561,50
 TBPT,,0.02,50
 TBPT,,0.15,50
 TBTEMP,20,2
 TBPT,,0.0024390243902439,50
 TBPT,,0.00682926829268293,50
 TBPT,,0.011219512195122,50
 TBPT,,0.015609756097561,50
 TBPT,,0.02,50
 TBPT,,0.15,50
 TBTEMP,100,3
 TBPT,,0.0024390243902439,50
 TBPT,,0.00682926829268293,50
 TBPT,,0.011219512195122,50
 TBPT,,0.015609756097561,50
 TBPT,,0.02,50
 TBPT,,0.15,50
 TBTEMP,200,4
 TBPT,,0.0021869918699187,40.35
 TBPT,,0.00664024390243903,46.634829849046
 TBPT,,0.0110934959349594,48.6681295419208
 TBPT,,0.0155467479674797,49.6843073824795
 TBPT,,0.02,50
 TBPT,,0.15,50
 TBTEMP,300,5
 TBPT,,0.00187804878048781,30.8
 TBPT,,0.00640853658536585,43.059118476388
 TBPT,,0.0109390243902439,47.2510454956998
 TBPT,,0.015469512195122,49.3482636428096

TBPT,,0.02,50
 TBPT,,0.15,50
 TBTEMP,400,6
 TBPT,,0.00146341463414634,21
 TBPT,,0.00609756097560976,39.022167152934
 TBPT,,0.0107317073170732,45.6443629059364
 TBPT,,0.0153658536585366,48.9667025045442
 TBPT,,0.02,50
 TBPT,,0.15,50
 TBTEMP,500,7
 TBPT,,0.00146341463414634,18
 TBPT,,0.00609756097560976,31.1894152961315
 TBPT,,0.0107317073170732,35.9035722504852
 TBPT,,0.0153658536585366,38.2656363070823
 TBPT,,0.02,39
 TBPT,,0.15,39
 TBTEMP,600,8
 TBPT,,0.0014162077104642,9
 TBPT,,0.00606215578284815,17.9315005755324
 TBPT,,0.0107081038552321,21.2888199226075
 TBPT,,0.0153540519276161,22.9752899475958
 TBPT,,0.02,23.5
 TBPT,,0.15,23.5
 TBTEMP,700,9
 TBPT,,0.00140712945590994,3.75
 TBPT,,0.00605534709193246,8.41649703754313
 TBPT,,0.010703564727955,10.2724432593288
 TBPT,,0.0153517823639775,11.2084418677145
 TBPT,,0.02,11.5
 TBPT,,0.15,11.5
 TBTEMP,800,10
 TBPT,,0.0013550135501355,2.5
 TBPT,,0.00601626016260163,4.38985927179107
 TBPT,,0.0106775067750677,5.05998629194815
 TBPT,,0.0153387533875339,5.39565161449121
 TBPT,,0.02,5.5
 TBPT,,0.15,5.5
 TBTEMP,900,11
 TBPT,,0.0013550135501355,1.875
 TBPT,,0.00601626016260163,2.60196370855433
 TBPT,,0.0106775067750677,2.84243211253448
 TBPT,,0.0153387533875339,2.96264911122991
 TBPT,,0.02,3
 TBPT,,0.15,3
 TBTEMP,1000,12
 TBPT,,0.0013550135501355,1.25
 TBPT,,0.00601626016260163,1.73464247236955
 TBPT,,0.0106775067750677,1.89495474168966
 TBPT,,0.0153387533875339,1.9750994074866
 TBPT,,0.02,2
 TBPT,,0.15,2
 TBTEMP,1100,13
 TBPT,,0.0013550135501355,0.625
 TBPT,,0.00601626016260163,0.867321236184777
 TBPT,,0.0106775067750677,0.947477370844828
 TBPT,,0.0153387533875339,0.987549703743302
 TBPT,,0.02,1
 TBPT,,0.15,1
 TBTEMP,1200,14
 TBPT,,0.0024390243902439,0.0005

TBPT,,0.00682926829268293,0.0005
 TBPT,,0.011219512195122,0.0005
 TBPT,,0.015609756097561,0.0005
 TBPT,,0.02,0.0005
 TBPT,,0.15,0.0005

!DENSIDADE

MPTEMP,,,,,,,,
 MPTEMP,1,0
 MPTEMP,2,100
 MPTEMP,3,200
 MPTEMP,4,300
 MPTEMP,5,400
 MPTEMP,6,500
 MPTEMP,7,600
 MPTEMP,8,700
 MPTEMP,9,800
 MPTEMP,10,900
 MPTEMP,11,1000
 MPTEMP,12,1100
 MPTEMP,13,1200
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81 !kN/cm³ / m/s² = kg/cm³
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81
 MPDATA,DENS,7,,(gap)/9.81

!COEFICIENTE DE POISSON

MPDATA,PRXY,7,,psap
 MPDATA,PRXY,7,,psap
 MPDATA,PRXY,7,,psap
 MPDATA,PRXY,7,,psap
 MPDATA,PRXY,7,,psap
 MPDATA,PRXY,7,,psap
 MPDATA,PRXY,7,,psap
 MPDATA,PRXY,7,,psap
 MPDATA,PRXY,7,,psap
 MPDATA,PRXY,7,,psap
 MPDATA,PRXY,7,,psap
 MPDATA,PRXY,7,,psap
 MPDATA,PRXY,7,,psap
 MPDATA,PRXY,7,,psap

!MÓDULO DE ELASTICIDADE

MPDATA,EX,7,,20500
 MPDATA,EX,7,,20500
 MPDATA,EX,7,,18450
 MPDATA,EX,7,,16400
 MPDATA,EX,7,,14350
 MPDATA,EX,7,,12300
 MPDATA,EX,7,,6355
 MPDATA,EX,7,,2665
 MPDATA,EX,7,,1845

MPDATA,EX,7,,1383.75
 MPDATA,EX,7,,922.5
 MPDATA,EX,7,,461.25
 MPDATA,EX,7,,0.205

!EXPANSÃO TÉRMICA (DELTA L/L) : EN 1994-1-2:2005

MPDE,THSX,7
 MPTEMP,,,,,,,,
 MPTEMP,1,0
 MPTEMP,2,100
 MPTEMP,3,200
 MPTEMP,4,300
 MPTEMP,5,400
 MPTEMP,6,500
 MPTEMP,7,600
 MPTEMP,8,750
 MPTEMP,9,800
 MPTEMP,10,860
 MPTEMP,11,900
 MPTEMP,12,1000
 MPTEMP,13,1100
 MPTEMP,14,1200
 UIMP,7,REFT,,,T0
 MPDATA,THSX,7,,0
 MPDATA,THSX,7,,0.0009984
 MPDATA,THSX,7,,0.0023184
 MPDATA,THSX,7,,0.0037184
 MPDATA,THSX,7,,0.0051984
 MPDATA,THSX,7,,0.0067584
 MPDATA,THSX,7,,0.0083984
 MPDATA,THSX,7,,0.0110084
 MPDATA,THSX,7,,0.011
 MPDATA,THSX,7,,0.011
 MPDATA,THSX,7,,0.0118
 MPDATA,THSX,7,,0.0138
 MPDATA,THSX,7,,0.0158
 MPDATA,THSX,7,,0.0178

TOFFST,273.15

!correção unidade temperatura °C

! SEÇÕES TRANSVERSAIS

!CONECTORES DE CISLHAMENTO

!CORPO DO STUD BOLT

SECTYPE,1,BEAM,CSOLID,SBCorpo,0
 SECOFFSET,CENT
 SECDATA,sbDi/2,0,0,0,0,0,0,0,0

!CABEÇA DO STUD BOLT

SECTYPE,2,BEAM,CSOLID,SBCabeca,0
 SECOFFSET,CENT
 SECDATA,sbDcab/2,0,0,0,0,0,0,0,0

!ARMADURA POSITIVA

SECTYPE,3,BEAM,CSOLID,ArmPosit,0
 SECOFFSET,CENT
 SECDATA,diap/2,0,0,0,0,0,0,0,0

!PERFIL METÁLICO

!MESA SUPERIOR

SECTYPE,4,SHELL,,MesaSup,0
 SECDATA,tfs

SECTYPE,5,SHELL,,Mesalnf,0
 SECDATA,tfi !colocar a espessura

!ALMA

SECTYPE,6,SHELL,,Alma,0
 SECDATA,tw !colocar a espessura

!CONTATO

!MESA SUPERIOR
 SECTYPE,7,SHELL,,Conta,0
 SECDATA,0.01

!CONTRUÇÃO DO MODELO

! ARMADURA POSITIVA

$bcSobra = (bc-bfs)/2$!trecho da laje que não está sobre o perfil
 $bcSobDiv = bcSobra/dvLaje$!tamanho das divisões da sobra da laje
 $zAP = bfs/2+(dvLaje-1)*bcSobDiv$!posição em Z da armadura positiva
 $xform = (lb-lf)/2$!posição inicial do forno em x

!ARMADURA LONGITUDINAL DA DIREITA

K,5,0,dt+sbl/2,zAP
 K,6,xform,dt+sbl/2,zAP
 K,7,lb-xform,dt+sbl/2,zAP
 K,8,lc,dt+sbl/2,zAP
 L,5,6
 L,6,7
 L,7,8

!ARMADURA TRANSVERSAL NO INÍCIO APÓS O FORNO

K,13,xform+sSBx/2,dt+sbl/2,bc/2
 K,14,xform+sSBx/2,dt+sbl/2,bfs/2
 K,15,xform+sSBx/2,dt+sbl/2,-bfs/2
 K,16,xform+sSBx/2,dt+sbl/2,-bc/2
 L,13,14
 L,14,15
 L,15,16

!ALMA

RECTNG,0,Lb,dt-tfs/2,tfi/2 !x1,x2,y1,y2

!MESA INFERIOR

WPOFF,0,tfi/2,0 !offset na ucs
 WPROT,0,90,0 !rodar a ucs
 RECTNG,0,lb,-bfi/2,bfi/2 !x1,x2,y1,y2

!MESA SUPERIOR

WPOFF,0,0,-(tfi/2+h+tfs/2) !offset na ucs
 RECTNG,0,lb,-bfs/2,bfs/2 !x1,x2,y1,y2
 /RELOT,RESIZE
 WPCSYS,-1,0

!LAJE

block,0,lc,dt,dt+tc,-bc/2,bc/2 !x1,x2,y1,y2,z1,z2

!DIVIDIR LAJE

!DIVISÃO NA REGIAO DO PERFIL

ALLSEL,ALL
 VSBW,ALL

!divide os volume no plano local

WPOFF,0,0,bfs/2 !offset na ucs
 VSBW,ALL

WPOFF,0,0,-bfs
 VSBW,ALL
 WPCSYS,-1,0
 /REPLOT,RESIZE

!DIVISÃO NA REGIAO LIMITE DO FORNO

WPROT,0,0,90 !girar ucs
 WPOFF,0,0,(lb-lf)/2
 VSBW,ALL

WPOFF,0,0,lf
 VSBW,ALL

WPCSYS,-1,0
 /REPLOT,RESIZE

!DIVISÃO NA ESPESSURA DA LAJE

WPROT,0,-90,0
 WPOFF,0,0,dt
 WPOFF,0,0,sbL/4
 VSBW,ALL

WPOFF,0,0,sbL/4
 VSBW,ALL

WPOFF,0,0,sbL/4
 VSBW,ALL

WPOFF,0,0,sbL/4
 VSBW,ALL

WPOFF,0,0,sbLCab
 VSBW,ALL

WPOFF,0,0,(tc-(sbL+sbLCab))/2
 VSBW,ALL

VGLUE,ALL

WPCSYS,-1,0
 /REPLOT,RESIZE

!DIVIDIR PERFIL

!DIVISÃO DAS MESAS NA REGIÃO DA ALMA

ALLSEL,ALL
 ASEL,S,LOC,Y,tfi/2
 ASEL,A,LOC,Y,dt-tfs/2
 ASBW,ALL

WPCSYS,-1,0
 /REPLOT,RESIZE

!DIVISÃO NA REGIÃO DO FORNO

ASEL,S,LOC,Y,0,dt-tfs/2
 WPROT,0,0,90
 WPOFF,0,0,(lb-lf)/2
 ASBW,ALL

WPOFF,0,0,lf
ASBW,ALL

ALLSEL,ALL
ASEL,S,LOC,Y,0,dt-tfs/2
AGLUE,all

WPCSYS,-1,0
ALLSEL,ALL
/REPLOT,RESIZE

!ATRIBUIR MATERIAIS

!ATRIBUINDO PROPRIEDADES DO CONCRETO

WPCSYS,-1,0
ALLSEL,ALL

VSEL,s,loc,y,dt,dt+tc
VATT,2,2,2,0

!ATRIBUINDO PROPRIEDADES AO PERFIL

ASEL,s,loc,y,dt-tfs/2
AREVERSE,all,1 !invertendo a normal da mesa superior

!MESA SUPERIOR

ALLSEL,ALL
WPCSYS,-1,0
ASEL,s,loc,y,dt-tfs/2
AATT,1,1,1,0,4

!MESA INFERIOR

ALLSEL,ALL
ASEL,s,loc,y,tfi/2
AATT,1,1,1,0,5

!ALMA

ALLSEL,ALL
ASEL,s,loc,y,tfi/2+0.1,dt-tfs/2-0.1
AATT,1,1,1,0,6

!ATRIBUINDO PROPRIEDADES À ARMADURA POSITIVA

!ARMADURA LONGITUDINAL

lsel,s,loc,y,dt+sbl/2
lsel,r,loc,z,zap
LATT,7,7,7,,,,3,
ALLSEL,ALL

!ARMADURA TRANSVERSAL

lsel,s,loc,y,dt+sbl/2
lsel,r,loc,x,xform+sSBx/2
LATT,7,7,7,,,,3, !(mat,real,type,,,, sec number)
ALLSEL,ALL

!GERAR CONECTORES

!CONECTOR DA DIREITA

!NÓS DO CORPO

N,1,(lc-lf)/2,dt,sby/2 !N,nº nó,x,y,z
N,2,(lc-lf)/2,dt+1*sbl/4,sby/2
N,3,(lc-lf)/2,dt+2*sbl/4,sby/2
N,4,(lc-lf)/2,dt+3*sbl/4,sby/2
N,5,(lc-lf)/2,dt+sbl,sby/2

!NÓS DA CABEÇA

$N, 6, (lc-lf)/2, dt+sbl+sbLCab/2, sby/2$

$N, 7, (lc-lf)/2, dt+sbl+sbLCab, sby/2$

!KEYPOINT AUXILIAR

$N, 8, (lc-lf)/2+1, dt+tc+10, sby/2$

!GERAR CONECTOR

TYPE,5

MAT,5

SECNUM,1

TSHAP,LINE

E,1,3,2,8

E,3,5,4,8

SECNUM,2

E,5,7,6,8

!CONECTOR DA ESQUERDA

!NÓS DO CORPO

$N, 11, (lc-lf)/2, dt, -sby/2$!N,n° nó,x,y,z

$N, 12, (lc-lf)/2, dt+1*sbl/4, -sby/2$

$N, 13, (lc-lf)/2, dt+2*sbl/4, -sby/2$

$N, 14, (lc-lf)/2, dt+3*sbl/4, -sby/2$

$N, 15, (lc-lf)/2, dt+sbl, -sby/2$

!NÓS DA CABEÇA

$N, 16, (lc-lf)/2, dt+sbl+sbLCab/2, -sby/2$

$N, 17, (lc-lf)/2, dt+sbl+sbLCab, -sby/2$

!KEYPOINT AUXILIAR

$N, 18, (lc-lf)/2+1, dt+tc+10, -sby/2$

!GERAR CONECTOR

TYPE,5

MAT,5

SECNUM,1

TSHAP,LINE

E,11,13,12,18

E,13,15,14,18

SECNUM,2

E,15,17,16,18

!COPIAR CONECTORES

ESEL,S,MAT,,5

EGEN,nsb,20,1,6,1,,,,,sSBx,0,0

!GERANDO MALHA

ALLSEL,ALL

LESIZE,ALL,,,1,,1,,0,

!SELECIONAR SÓ AS LINHAS LONGITUDINAIS DENTRO DO FORNO

$lsel,u,loc,x,0,(lb-lf)/2$

$lsel,u,loc,x,lb-(lb-lf)/2,lb$

$lsel,u,loc,x,xfor+sSBx/2$

LESIZE,ALL,sSBx/2,,,,1,,0,

!SELECIONAR AS LINHAS FORA DO FORNO

ALLSEL,ALL

$lsel,u,loc,x,(lb-lf)/2,lb-(lb-lf)/2$


```

lsel,u,loc,x,0
lsel,u,loc,x,lb
nSB2=nint(((lb-lf)/2)/sSBx)           !Número virtual de conector na regio fora do
                                       forno
sSBx2=((lb-lf)/2)/nSB2
LESIZE,ALL,sSBx2/2,,,,1,,,0         !dividir pelo valor aproximado que dividi o
                                       resto da viga

```

!SELECIONAR AS LINHAS FRONTAIS DA LAJE SEM CONTATO COM O PERFIL

```

ALLSEL,ALL
lsel,u,loc,z,-bc/2
lsel,u,loc,z,bc/2
lsel,u,loc,z,-bfs/2,bfs/2
lsel,u,loc,z,zAP
LESIZE,ALL,,,dvLaje,,1,,,0,

```

!SELECIONAR AS LINHAS FRONTAIS COM CONTATO COM PERFIL

```

ALLSEL,ALL
lsel,u,loc,z,-bc/2,-bfs/2
LSEL,U,LOC,Z,bc/2,bfs/2
LSEL,U,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,,2,,1,,,0

```

!DIVIDIR LINHA DA ARMADURA EM 4 PARA FICAR IGUAL AO DO PERFIL E LAJE

```

LSEL,S,LOC,X,xform+sSBx/2
lsel,u,loc,z,-bc/2,-bfs/2
LSEL,U,LOC,Z,bc/2,bfs/2
LESIZE,ALL,,,4,,1,,,0 !

```

!SELECIONAR LINHA DA ALMA

```

ALLSEL,ALL
lsel,s,loc,z,0
lsel,u,loc,y,tfi/2
lsel,u,loc,y,dt-tfs/2,dt+tc
LESIZE,ALL,,,6,,1,,,0,

```

```

ALLSEL,ALL

```

!MALHA DA ARMADURA

```

lsel,s,type,,7
TSHAPE,LINE
MSHKEY,1
IMESH,all

```

!COPIAR ELEMENTOS DA ARMADURA

!ARMADURA LONGITUDINAL

```

ESEL,S,MAT,,7
ESEL,u,CENT,x,xform+sSBx/2
EGEN,3,200,all,,,,,,,,0,0,-2*bcSobDiv
ESEL,S,MAT,,7
ESEL,u,CENT,x,xform+sSBx/2
ESEL,r,CENT,z,bfs/2+bcSobDiv
EGEN,2,200,all,,,,,,,,0,0,-1*(bcSobDiv+bfs/2)
ESEL,S,MAT,,7
ESEL,u,CENT,x,xform+sSBx/2
ESEL,r,CENT,z,0
EGEN,2,200,all,,,,,,,,0,0,-1*(bcSobDiv+bfs/2)
ESEL,S,MAT,,7
ESEL,u,CENT,x,xform+sSBx/2
ESEL,r,CENT,z,-1*(bcSobDiv+bfs/2)

```

EGEN,3,200,all,,,,,,,,,0,0,-2*bcSobDiv

!ARMADURA TRANSVERSAL

ESEL,S,MAT,,7
 ESEL,R,CENT,x,xform+sSBx/2
 napx=nint(lf/sSBx)
 sAPx=lf/napx
 EGEN,napx,200,all,,,,,,,,,sAPx,0,0

!MALHA DA LAJE

ALLSEL,ALL
 MSHKEY,1
 MSHAPE,0,3-D
 VMESH,all

!MALHA DO PERFIL

ASEL,S,LOC,Y,0,dt-tfs/2
 MSHKEY,1
 MSHAPE,0,2-D
 AMESH,all

!GERAÇÃO DE CONTATO

!TARGE 170 NA FACE DO CONCRETO

asel,s,loc,y,dt
 asel,r,loc,z,-bfs/2,bfs/2
 TYPE,3
 MAT,3
 REAL,4
 ESYS,0
 SECNUM,,
 AMESH,ALL

!CONTA 173 NA FACE DO PERFIL

asel,s,loc,y,dt-tfs/2
 esla,r
 TYPE,4
 MAT,3
 REAL,4
 ESYS,0
 SECNUM,7,
 ESURF, ,TOP

!OPÇÕES GRÁFICAS

/COLOR,NUM,ORAN,1 !PERFIL DE AÇO
 /COLOR,NUM,LGRA,2 !CONCRETO
 /COLOR,NUM,YELL,3 !CONTATO
 /COLOR,NUM,MAGE,4 !CONTATO
 /COLOR,NUM,BLUE,5 !CONECTOR
 /COLOR,NUM,CYAN,6 !MOLA
 /COLOR,NUM,RED,7 !ARMADURA
 /PNUM,TYPE,1 !configuração do significado do número de 1 a 7
 /NUMBER,1

ESEL,S,MAT,,2
 /TRLCY,ELEM,0.6,all!CONCRETO (transparência)

ALLSEL,ALL
 /COLOR,OUTL,BLAC !cor da linha
 /RELOT

!ACOPLAMENTOS**!PERFIL x CONECTOR****!SELECIONAR NÓS DE CONTATO PERFIL X CONECTOR**

ESEL,S,MAT,,1,5,4
 ALLSEL,BELOW,ELEM
 NSEL,R,LOC,Y,dt-tfs/2,dt
 NSEL,R,LOC,Z,-sby/2,sby/2
 NSEL,U,LOC,Z,0

!VINCULAR NÓS COINCIDENTES

CPINTF,ALL,tfs/2+0.1

!CONCRETO x CONECTOR**!SELECIONAR NÓS DE CONTATO CONCRETO x CONECTOR**

ESEL,S,MAT,,2,5,3
 ALLSEL,BELOW,ELEM
 NSEL,R,LOC,Y,dt+sbl/4,dt+sbl+sbLCab
 NSEL,R,LOC,Z,-sby/2,sby/2
 NSEL,U,LOC,Z,0

!VINCULAR NÓS COINCIDENTES

CPINTF,UX,0.0001,
 CPINTF,UZ,0.0001,

!SELECIONAR NÓS DO CONCRETO x CONECTOR (SÓ A CABEÇA)

NSEL,R,LOC,Y,dt+sbl
 CPINTF,UY,0.0001,

ALLSEL,ALL
 EPLOT

!ARMADURA x CONCRETO**!SELECIONAR NÓS DO CONCRETO E ARMADURA**

ESEL,S,MAT,,2,7,5
 ALLSEL,BELOW,ELEM
 NSEL,R,LOC,Y,dt+sbl/2

!VINCULAR NÓS COINCIDENTES

CPINTF,ALL,0.01

!CONDIÇÕES DE CONTORNO**!1º apoio**

nrel,s,loc,x,0,
 nrel,r,loc,y,0,tfi/2
 D,ALL,UX,0,
 D,ALL,UY,0,
 D,ALL,UZ,0,
 nrel,s,loc,x,sSBx2/2
 nrel,r,loc,y,0,tfi/2
 D,ALL,UY,0,
 D,ALL,UZ,0,

!2º apoio

nrel,s,loc,x,lb,
 nrel,r,loc,y,0,tfi/2
 D,ALL,UY,0,
 D,ALL,UZ,0,
 nrel,s,loc,x,lb-sSBx2/2
 nrel,r,loc,y,0,tfi/2
 D,ALL,UY,0,
 D,ALL,UZ,0,

ALLSEL,ALL
/REPLOT

!CARGAS

!PESO PRÓPRIO
ACEL,0,9.81,0
AUTOTS,1
TIME,1
DELTIM,1/10,1/100,1/10
LSWRITE,1,
OUTRES,ALL,ALL

!SOBRECARGA

NSEL,S,LOC,Z,-bfs/2,bfs/2
NSEL,R,LOC,Y,dt+tc
*GET,nn,NODE,0,COUNT,
F,ALL,FY,-(carga)/nn
AUTOTS,1
TIME,1
ALLSEL,ALL
DELTIM,1/10,1/100,1/10
ALLSEL,ALL
LSWRITE,1,

!CARGA TÉRMICA

*DO,i,1,60,1
AUTOTS,1
TIME,i
DELTIM,1,0.1,1
OUTRES,ERASE
OUTRES,NSOL,ALL
OUTRES,RSOL,ALL
OUTRES,STRS,ALL
OUTRES,EPEL,ALL
OUTRES,EPTH,ALL
OUTRES,EPPL,ALL
ALLSEL,ALL

LDREAD,TEMP,,i*60,,'TermicoShellM01','rth' !leitura do arquivo .rth gerado
em um modelo com análise térmica em com a mesma malha do modelo em questão.

LSWRITE,i+1,

*ENDDO

ALLSEL,ALL
EPLOT
SAVE

!SOLUÇÃO

ALLSEL,ALL
/solu
LSSOLVE,1,61,1 !1,40,1

!RESULTADOS

/POST1
SET,,1

!LER RESULTADOS

/POST26
NUMVAR,200

!GERAR ARQUIVO .txt COM RESULTADOS DOS DESLOCAMENTOS
!NÓ DO CENTRO DA VIGA

```

NSEL,S,LOC,X,lb/2
NSEL,R,LOC,Y,tfi/2
NSEL,R,LOC,Z,0

```

```

*get,Nmeio,NODE,,NUM,MIN
ALLSEL
NSOL,2,Nmeio,U,Y,Nmeio_DATA

```

```

!SALVAR VETOR TEMPO
time_size=tmax/1
*DEL,time_array !vetor tempo
*DIM,time_array,TABLE,time_size,1
VGET,time_array(1,0),1

```

```

!SALVAR VARIÁVEIS EM REPORT_DESLOC.TXT
*CREATE,scratch,gui
*DEL,_P26_EXPORT !post26
*DIM,_P26_EXPORT,TABLE,time_size,1 !1 nós x 1 seções = 1 dado em cada tempo
VGET,_P26_EXPORT(1,0),1
VGET,_P26_EXPORT(1,1),2

```

```

!GERAR ARQUIVO .txt
/OUTPUT,'REPORT_DESLOC','TXT','!'
*VWRITE,'TIME','Desloc_Centro'
%C, %C
*VWRITE,_P26_EXPORT(1,0),_P26_EXPORT(1,1)
%G, %G
/OUTPUT,TERM
*END

/INPUT,scratch,gui

```