



# **ENCURVADURA GLOBAL DE VIGAS ALVEOLARES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

**Daniel Braz Costa**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

**Engenharia Industrial**

ramo Engenharia Mecânica

**Novembro de 2020**





# **ENCURVADURA GLOBAL DE VIGAS ALVEOLARES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

**Daniel Braz Costa**

Dissertação apresentada à:

**Escola Superior da Tecnologia e Gestão**

**Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em:

**Engenharia Industrial**

Área de especialização em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Prof. Dr. Luís Manuel Ribeiro de Mesquita

**Novembro de 2020**

Dedico este trabalho à minha mãe

# Agradecimentos

Queria começar por agradecer à minha mãe Alice que sempre acreditou em mim e sempre me apoiou ao longo desta jornada. Também quero agradecer à minha companheira Tânia que me deu forças para nunca desistir e sempre me inspirou motivação.

Um especial agradecimento ao professor Luís Mesquita que me aceitou para a realização desta dissertação e sempre se mostrou disponível para ajudar e partilhar os seus conhecimentos. Mesmo após a minha mudança para o Luxemburgo o professor manteve-se presente ajudando-me a ultrapassar as dificuldades que surgiam ao longo do trabalho.

Um obrigado também aos meus amigos que sempre arranjaram tempo para mim, mesmo eu estando longe, continuaram presentes durante todo o meu trabalho e sempre me encorajaram a continuar.

Por fim, queria agradecer a todos os elementos da ACTinBlack Europe SARL, empresa onde atualmente desempenho a função de engenheiro mecânico, pelo apoio prestado ao longo deste ano.

# Resumo

As vigas alveolares são vigas metálicas que possuem aberturas no seu montante da alma. Usualmente, estas vigas são fabricadas a partir de vigas laminadas a quente de secção I, nas quais é feito um corte com um certo padrão ao longo do montante da alma, desta forma são obtidas duas secções T e posteriormente estas duas secções são deslocadas e soldadas para formar uma viga alveolar. Investigou-se o comportamento resistente das vigas alveolares pelos métodos de elementos finitos através do *software* ANSYS. Foi escolhida uma viga de perfil IPE 220 de aço S355 como viga parental e foram investigadas vigas alveolares de diferentes comprimentos e com diferentes parâmetros geométricos, tais como, a altura final da secção transversal, o diâmetro das aberturas e os espaçamentos entre aberturas, fornecidos pelo catálogo da ArcelorMittal. Foram realizadas um total de 356 simulações, nas quais todas foram realizadas com um carregamento uniformemente distribuído aplicado no banzo superior, a carga foi aumentada de forma incremental até ao momento que a viga sofresse de um colapso. Foram realizadas simulações à temperatura ambiente 20 [°C] e a temperaturas elevadas de 500, 600 e 700 [°C]. No modelo foram implementadas as imperfeições geométricas e materiais de acordo com literaturas. Teve-se como objetivo principal verificar os momentos resistentes à encurvadura lateral torsional e comparar com os resultados obtidos através Eurocódigo 3 parte 1-2 sendo necessário recorrer ao Eurocódigo 3 parte 1-1, também foi feita a comparação entre os resultados numéricos e os resultados obtidos através da proposta de Vila Real. Foram analisados os modos de colapso ocorrentes das vigas alveolares, visto que estas podem sofrer de uma instabilidade global ou local. De forma suplementar fizeram-se simulações de vigas sólidas, estando estas sujeitas às mesmas condições que as das vigas alveolares. Para as vigas alveolares conclui-se que existe divergência entre os resultados obtidos de forma numérica e os resultados obtidos pela norma. Quando os resultados são comparados em relação à sua esbelteza verifica-se uma maior concordância entre os resultados dos momentos resistentes. Notou-se também que o modo de colapso para as vigas mais curtas dá-se pelo mecanismo de Vierendeel sendo que com o aumento do comprimento passamos a verificar a encurvadura lateral torsional. Para as vigas sólidas verifica-se concordância entre os resultados numéricos e os resultados analíticos.

Palavras Chave: Vigas alveolares, instabilidade global e local, temperaturas elevadas, método dos elementos finitos, Eurocódigo 3

# Abstract

Cellular beams are metal beams that have openings in their web. Usually, these beams are manufactured from hot-rolled I-section members, in which a cut is made with a certain pattern along the web, thus there are two T-sections and later these two sections are moved and welded to form a cellular beam. The resistant behavior of cellular beams was investigated by finite element methods using the ANSYS software. An IPE 220 profile beam made of S355 steel was chosen as the paternal beam and cellular beams of different lengths and with different geometric parameters were investigated, such as the final height of the cross section, the diameter of the web openings and the spacing between openings, provided by ArcelorMittal catalog. A total of 356 simulations were carried out, in which all were executed with a uniform distributed load applied on the upper flange, the load was increased incrementally until the instance the beam suffered a collapse. Simulations were performed at room temperature 20 [° C] and at high temperatures of 500, 600 and 700 [° C]. In the model, geometric and material imperfections were implemented according to literatures. The main goal was to verify the moment of resistance to lateral torsional buckling and to compare with the results obtained through Eurocode 3 part 1-2, being necessary to make use of the Eurocode 3 part 1-1. A comparison was also made between the numerical results and the results obtained through the Vila Real proposal. The occurring failure modes of the cellular beams were analyzed, as they can suffer from global or local failure modes. In addition, simulations of solid beams were made, considering the same conditions in the model as the cellular beams. For cellular beams it is concluded that there is a divergence between the results obtained in numerical form and the results obtained by the Eurocode 3. When the results are compared in relation to their slenderness, there is a greater agreement between the results of the moment of resistance. It was also noted that the failure mode for the shortest beams is due to the Vierendeel mechanism, and with the increase in length, we can verify the lateral torsional buckling. For solid beams, between the numerical and the analytical results there is agreement.

Keywords: Cellular beams, global and local instability, high temperatures, finite element method, Eurocode 3

# Índice

---

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>XIV</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1    CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2    ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	3
<b>CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>4</b>
2.1    PROCESSO DE FABRICAÇÃO .....	4
2.2    PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.....	5
2.3    TENSÕES RESIDUAIS .....	8
2.3.1    Vigas Sólidas .....	9
2.3.2    Vigas Alveolares .....	10
2.4    INSTABILIDADE LOCAL E GLOBAL DE VIGAS ALVEOLARES .....	11
2.4.1    Encurvadura lateral torsional .....	11
2.4.2    Mecanismo de Vierendeel.....	12
2.4.3    Encurvadura do montante da alma .....	13
2.5    ESTADO DA ARTE .....	13
<b>CAPÍTULO 3: VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA SEGUNDO OS MÉTODOS SIMPLIFICADOS DO EUROCÓDIGO .....</b>	<b>23</b>
3.1    INTRODUÇÃO.....	23
3.2    PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DO AÇO AO CARBONO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA 23	
3.2.1    Propriedades de resistência e de deformação .....	24
3.2.2    Propriedades térmicas.....	27

---

3.3	VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA PARA VIGAS SÓLIDAS E ALVEOLARES À TEMPERATURA AMBIENTE	29
3.3.1	<i>Vigas Sólidas</i> .....	29
3.3.2	<i>Vigas alveolares</i> .....	33
3.4	VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA PARA VIGAS SÓLIDAS E ALVEOLARES A ELEVADAS TEMPERATURAS.....	35
3.4.1	<i>Momento plástico resistente da secção transversal</i> .....	35
3.4.2	<i>Encurvadura lateral torsional</i> .....	36
3.4.3	<i>Proposta Vila Real</i> .....	37
3.5	RESISTÊNCIA PLÁSTICA DAS VIGAS SÓLIDAS E ALVEOLARES .....	38
<b>CAPÍTULO 4: ANÁLISE NUMÉRICA DAS VIGAS À TEMPERATURA AMBIENTE E ELEVADAS TEMPERATURAS .....</b>		<b>41</b>
4.1	CASOS ESTUDADOS .....	41
4.2	MODELAÇÃO NUMÉRICA EM ANSYS .....	42
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS MÉTODOS SIMPLIFICADOS E NUMÉRICOS .....	47
4.3.1	<i>Momento crítico das vigas sólidas e alveolares</i> .....	48
4.3.2	<i>Análise do modo de colapso das vigas alveolares</i> .....	51
4.3.3	<i>Comparação dos resultados numéricos com as curvas de encurvadura do Eurocódigo61</i>	
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO.....</b>		<b>96</b>
5.1	CONCLUSÃO .....	96
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	97
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>99</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>101</b>

## Lista de figuras

---

Figura 1 - Aplicações de vigas alveolares .....	2
Figura 2 - Modos de instabilidade local: a) Encurvadura do montante da alma b) Mecanismo de flexão Vierendeel .....	2
Figura 3 - Três etapas de produção de um viga alveolar / Método de fabrico de Westok ....	5
Figura 4 - Nomenclatura dos elementos da viga alveolar .....	6
Figura 5 - Simbologia dos parâmetros geométricos da viga alveolar - vista frontal.....	6
Figura 6 - Simbologia dos parâmetros geométricos da viga alveolar - secção transversal ou secção 2-Tê.....	7
Figura 7 – Nomenclatura dos elementos da viga sólida.....	7
Figura 8 - Simbologia dos parâmetros geométricos da viga sólida - vista frontal.....	8
Figura 9 - Simbologia dos parâmetros geométricos da viga alveolar – secção transversal .....	8
Figura 10 - Padrão de tensões residuais de vigas sólidas de secção I laminadas a quente: (a) de acordo com ECCS; (b) de acordo com Young.....	9
Figura 11 - Padrão de tensões residuais para vigas alveolares sem tensões na alma.....	10
Figura 12 - Encurvadura lateral torsional de uma viga alveolar .....	11
Figura 13 - Abordagem 2-Tê para cálculo da resistência à ELT .....	12
Figura 14 – Mecanismo de Vierendeel numa viga alveolar: (a) falha Vierendeel, (b) rótulas plásticas .....	12
Figura 15 - Encurvadura do montante da alma: (a) forma assumida pela encurvadura do montante da alma (b) linha de compressão .....	13
Figura 16 – Padrão das tensões residuais de vigas laminadas a quente de secção I de acordo com o ECCS. ....	14

Figura 17 – Processo de fabrico das vigas casteladas e das vigas alveolares: (a) corte do montante da alma; (b) soldadura das vigas casteladas; (c) corte adicional das aberturas circulares para as geometrias CS2. ....	15
Figura 18 – Tensões residuais medidas nas geometrias CS1 e CS3: (a) no montante da alma; (b) na secção Tê. ....	15
Figura 19 - Tensões residuais medidas nas geometrias CS2: (a) no montante da alma; (b) na secção Tê. ....	16
Figura 20 - Comparação de resultados dos momentos resistentes obtidos pelo ABAQUS e EC3 - Carregamento uniformemente distribuído. ....	17
Figura 21 – Resistência à ELT: comparação dos valores numericamente obtidos $\chi_{abq}$ com as curvas de encurvadura. ....	18
Figura 22 – Relação tensões-extensões para o aço carbono a temperaturas elevadas. ....	24
Figura 23 – Relação tensões-extensões do aço carbono S355 a elevadas temperaturas ....	25
Figura 24 - Fator de redução $k_y, \theta$ do aço carbono a temperaturas elevadas .....	27
Figura 25 - Extensão térmica relativa do aço carbono em função da temperatura. ....	28
Figura 26 - Resistência plástica da secção transversal das vigas sólidas em estudo para as diferentes temperaturas .....	39
Figura 27 - Resistência plástica da secção 2-Tê das vigas alveolares para as diferentes temperaturas variando a sua altura H .....	39
Figura 28 - Resistência plástica da secção 2-Tê das vigas alveolares para as diferentes temperaturas variando o tamanho das aberturas $d_0$ .....	40
Figura 29 - - Resistência plástica da secção 2-Tê das vigas alveolares para as diferentes temperaturas variando o espaçamento entre aberturas S .....	40
Figura 30 - Elemento finito SHELL181 .....	43
Figura 31 - Carga uniformemente distribuída no modelo de uma viga alveolar .....	43
Figura 32 - Representação da malha do MR .....	44
Figura 33 - Condições de fronteira implementadas sem acoplamentos dos nós no modelo de uma viga alveolar .....	45
Figura 34 - Condições de fronteira com os acoplamentos entre nós implementados numa viga alveolar .....	45
Figura 35 - Modo de instabilidade para a imperfeição geométrica em (a) viga alveolar (b) viga sólida .....	46
Figura 36 - Padrão de tensões residuais implementado em vigas alveolares .....	47

Figura 37 - Padrão de tensões residuais implementado em vigas sólidas .....	47
Figura 38 – Momento crítico dos resultados obtidos pelo Eurocódigo 3 e pelo método numérico para as vigas sólidas em relação a H.....	48
Figura 39 - Momento crítico dos resultados obtidos pelo Eurocódigo 3 e pelo método numérico para as vigas alveolares em relação a H.....	49
Figura 40 - Momento crítico dos resultados obtidos pelo Eurocódigo 3 e pelo método numérico para as vigas alveolares em relação a $d_0$ .....	50
Figura 41 - Momento crítico dos resultados obtidos pelo Eurocódigo 3 e pelo método numérico para as vigas alveolares em relação a S .....	50
Figura 42 – Curva do momento crítico – comparação entre resultados numéricos e analítico de forma normalizada .....	51
Figura 43 - Distribuição das tensões Von Misses do caso MR: (a) L=1 [m] 20 [C°], (b) L=1 [m] 700 [C°], (c) L=10 [m] 20 [C°], (d) L=10 [m] 700 [C°].....	52
Figura 44 – Vista lateral - Distribuição das tensões Von Misses do caso MR 10[m] 700 [C°].....	53
Figura 45 - Distribuição das tensões Von Misses do caso H=1,4h: (a) L=1 [m] 20 [C°], (b) L=1 [m] 700 [C°], (c) L=10 [m] 20 [C°], (d) L=10 [m] 700 [C°].....	54
Figura 46 - Distribuição das tensões Von Misses do caso H=1,6h: (a) L=1 [m] 20 [C°], (b) L=1 [m] 700 [C°], (c) L=10 [m] 20 [C°], (d) L=10 [m] 700 [C°].....	55
Figura 47 - Distribuição das tensões Von Misses para $d_0=1,1h$ : (a) L=1 [m] 20 [C°], (b) L=1 [m] 700 [C°], (c) L=10 [m] 20 [C°], (d) L=10 [m] 700 [C°].....	56
Figura 48 - Distribuição das tensões Von Misses para $d_0=1,3h$ : (a) L=1 [m] 20 [C°], (b) L=1 [m] 700 [C°], (c) L=10 [m] 20 [C°], (d) L=10 [m] 700 [C°].....	57
Figura 49 - Distribuição das tensões Von Misses para $S=1,1d_0$ : (a) L=1 [m] 20 [C°], (b) L=1 [m] 700 [C°], (c) L=10 [m] 20 [C°], (d) L=10 [m] 700 [C°].....	58
Figura 50 - Distribuição das tensões Von Misses para $S=1,3d_0$ : (a) L=1 [m] 20 [C°], (b) L=1 [m] 700 [C°], (c) L=10 [m] 20 [C°], (d) L=10 [m] 700 [C°].....	59
Figura 51 – Gráfico do deslocamento lateral e vertical das vigas alveolares do caso MR: (a) DL a 20 [C°], (b) DV a 20 [C°], (c) DL a 600 [C°], (d) DV a 600 [C°].....	60
Figura 52 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS - 20[C°].....	61
Figura 53 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS - 500[C°].....	62
Figura 54 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS - 600[C°].....	62

Figura 55 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS - 700[°C] .....	62
Figura 56 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS- 1,4h - 20[°C].....	64
Figura 57 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS- 1,4h - 500[°C].....	64
Figura 58 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS- 1,4h - 600[°C].....	65
Figura 59 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS- 1,4h - 700[°C].....	65
Figura 60 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS- 1,5h - 20[°C].....	67
Figura 61 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS- 1,5h - 500[°C].....	67
Figura 62 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS- 1,5h - 600[°C].....	67
Figura 63 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS- 1,5h - 700[°C].....	68
Figura 64 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS- 1,6h - 20[°C].....	69
Figura 65 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS- 1,6h - 500[°C].....	69
Figura 66 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS- 1,6h - 600[°C].....	70
Figura 67 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS- 1,6h - 700[°C].....	70
Figura 68 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso MR - 20[°C].....	72
Figura 69 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso MR - 500[°C].....	73
Figura 70 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso MR - 600[°C].....	73
Figura 71 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso MR - 700[°C].....	73

Figura 72 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,4h - 20[°C] .....	75
Figura 73 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,4h - 500[°C] .....	76
Figura 74 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,4h - 600[°C] .....	76
Figura 75 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,4h - 700[°C] .....	76
Figura 76 - Colapso pelo mecanismo de Vierendeel - H=1,4h 1 [m] 500 [°C] (Tensões Von Misses).....	77
Figura 77 - Colapso pelo mecanismo de Vierendeel - H=1,4h 2 [m] 20 [°C] (Tensões Von Misses).....	77
Figura 78 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,6h - 20[°C] .....	79
Figura 79 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,6h - 500[°C] .....	80
Figura 80 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,6h - 600[°C] .....	80
Figura 81 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,6h - 700[°C] .....	80
Figura 82 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso d0=1,1h - 20[°C].....	82
Figura 83 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso d0=1,1h - 500[°C].....	83
Figura 84 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso d0=1,1h - 600[°C].....	83
Figura 85 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso d0=1,1h - 700[°C].....	83
Figura 86 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso d0=1,3h - 20[°C].....	85
Figura 87 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso d0=1,3h - 500[°C].....	86
Figura 88 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso d0=1,3h - 600[°C].....	86

Figura 89 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $d_0=1,3h$  - 700[°C] ..... 86

Figura 90 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,1d_0$  - 20[°C] ..... 88

Figura 91 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,1d_0$  - 500[°C] ..... 89

Figura 92 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,1d_0$  - 600[°C] ..... 89

Figura 93 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,1d_0$  - 700[°C] ..... 89

Figura 94 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,3d_0$  - 20[°C] ..... 91

Figura 95 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,3d_0$  - 500[°C] ..... 92

Figura 96 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,3d_0$  - 600[°C] ..... 92

Figura 97 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,3d_0$  - 700[°C] ..... 92

## Lista de tabelas

---

Tabela 1 - Variações dos parâmetros geométricos de acordo com a sua aplicação .....	5
Tabela 2 - Coeficientes $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ , $\varepsilon$ e $\eta$ .....	20
Tabela 3 – Fatores de redução para a relação tensões-extensões do aço carbono a temperaturas elevadas .....	26
Tabela 4 – Valores dos fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura .....	31
Tabela 5 – Curvas de encurvadura lateral para secções transversais .....	31
Tabela 6 – Fatores de correção $kc$ .....	31
Tabela 7 – Coeficiente dependente da carga e da condição de restrição .....	32
Tabela 8 – Fatores de correção $kc$ .....	37
Tabela 9 - Resultados obtidos da resistência plástica através dos métodos simplificados para cada caso.....	38
Tabela 10 - Casos estudados para vigas alveolares e vigas sólidas .....	42
Tabela 11 - Condições de fronteira e os seus graus de liberdade.....	45
Tabela 12 - Graus de liberdade dos acoplamentos entre nós .....	45
Tabela 13 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso VS.....	63
Tabela 14 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso VS-1,4h .....	66
Tabela 15 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso VS-1,5h .....	68
Tabela 16 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso VS-1,6h .....	71
Tabela 17 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso MR.....	74
Tabela 18 - Razão entre o momento resistente do ANSYS e do EC3, calculado de acordo com a esbelteza do ANSYS do caso MR .....	75
Tabela 19 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso H=1,4h.....	78

---

Tabela 20 - Razão entre o momento resistente do ANSYS e do EC3, calculado de acordo com a esbelteza do ANSYS do caso $H=1,4h$ .....	79
Tabela 21 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso $H=1,6h$ .....	81
Tabela 22 - Razão entre o momento resistente do ANSYS e do EC3, calculado de acordo com a esbelteza do ANSYS do caso $H=1,6h$ .....	82
Tabela 23 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso $d0=1,1h$ .....	84
Tabela 24 - Razão entre o momento resistente do ANSYS e do EC3, calculado de acordo com a esbelteza do ANSYS do caso $d0=1,1h$ .....	85
Tabela 25 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso $d0=1,3h$ .....	87
Tabela 26 - Razão entre o momento resistente do ANSYS e do EC3, calculado de acordo com a esbelteza do ANSYS do caso $d0=1,3h$ .....	88
Tabela 27 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso $S=1,1d0$ .....	90
Tabela 28 - Razão entre o momento resistente do ANSYS e do EC3, calculado de acordo com a esbelteza do ANSYS do caso $S=1,1d0$ .....	91
Tabela 29 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso $S=1,3d0$ .....	93
Tabela 30 - Razão entre o momento resistente do ANSYS e do EC3, calculado de acordo com a esbelteza do ANSYS do caso $S=1,3d0$ .....	94

# Nomenclatura

---

## Letras do alfabeto latino

$b$	largura da/o flange/banzo;
$c_a$	calor específico do aço;
$C_1, C_2$	coeficientes dependentes das cargas aplicadas;
$d_0$	diâmetro da abertura;
$E$	módulo de Young
$E_{a,\theta}$	inclinação da reta que representa o domínio elástico em temperaturas elevadas $\theta_a$ ;
$f$	fator de correção do coeficiente de redução $\chi_{LT}$ ;
$f_{p,\theta}$	tensão limite de proporcionalidade em temperaturas elevadas $\theta_a$ ;
$f_y$	tensão de cedência à temperatura ambiente 20 [°C];
$f_{y,\theta}$	tensão de cedência efetiva em temperaturas elevadas $\theta_a$ ;
$G$	módulo de corte;
$h$	altura da secção transversal da viga paterna;
$H$	altura final da secção transversal;
$h_w$	altura da secção transversal desconsiderando a espessura das flanges;
$h_{wt}$	altura da secção Tê desconsiderando a espessura da flange;
$I_t$	constante de torção;
$I_w$	constante de empenamento;

---

$I_z$	momento de inércia da secção segundo o eixo de Z;
$I_{y,2T}$	momento de inércia da secção 2-Tê segundo o eixo de Y;
$I_{y,1T}$	momento de inércia da secção 1-Tê segundo o eixo de Y;
$I_{z,2T}$	momento de inércia da secção 2-Tê segundo o eixo de Z;
$I_{z,1T}$	momento de inércia da secção 1-Tê segundo o eixo de Z;
$I_{w,2T}$	constante de empenamento da secção 2-Tê;
$I_{t,2T}$	constante torsional da secção 2-Tê;
$k, k_w$	fatores efetivos de comprimento;
$k_c$	fator de correção dependente da distribuição de momentos;
$k_{E,\theta}$	fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico em temperaturas elevadas $\theta_a$ ;
$k_{p,\theta}$	fator de redução para a tensão limite de proporcionalidade em temperaturas elevadas $\theta_a$ ;
$k_{y,\theta}$	fator de redução para a tensão de cedência efetiva em temperaturas elevadas $\theta_a$ ;
$k_{y,\theta,com}$	fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura máxima no banzo comprimido no instante de $t$ ;
$k_{E,\theta,com}$	fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura máxima no banzo comprimido no instante de $t$ ;
$l$	comprimento à temperatura ambiente 20 [°C]
$L$	comprimento total da viga [m];
$M_{b,Rd}$	momento resistente à encurvadura lateral torsional a elevadas temperaturas no instante $t$ ;
$M_{b,fi,t,Rd}$	momento resistente à encurvadura lateral torsional a elevadas temperaturas no instante $t$ ;
$M_{cr}$	momento crítico elástico para a encurvadura lateral;

---

$M_{fi,\theta,Rd}$	momento resistente plástico da secção transversal em temperaturas elevadas $\theta_a$ ;
$M_{pl,Rd}$	momento resistente plástico da secção transversal à temperatura ambiente 20 [°C];
$r$	raio de concordância entre a flange e o montante da alma;
$S$	espaçamento entre aberturas;
$S_0$	largura do montante da alma entre aberturas;
$t_f$	espessura da/o flange/banzo;
$t_w$	espessura do montante da alma;
$W_{pl}$	módulo plástico da secção transversal;
$W_{pl,2T}$	módulo plástico da secção 2-Tê;
$W_y$	módulo de flexão;
$z_g$	distância entre o ponto de aplicação da carga e o centro geométrico;

### Letras do alfabeto grego

$\alpha$	fator de imperfeição dependente de $f_y$ ;
$\alpha_{LT}$	fator de imperfeição;
$\gamma_{M,fi}$	coeficiente parcial de segurança em situação de incêndio;
$\gamma_{M0}$	coeficiente parcial de segurança;
$\gamma_{M1}$	coeficiente parcial de segurança para as propriedades materiais;
$\Delta l$	alongamento provocado pela temperatura;
$\varepsilon_{p,\theta}$	extensão limite de proporcionalidade em temperaturas elevadas $\theta_a$ ;
$\varepsilon_{t,\theta}$	extensão limite para o patamar de cedência em temperaturas elevadas $\theta_a$ ;
$\varepsilon_{u,\theta}$	extensão última em temperaturas elevadas $\theta_a$ ;
$\varepsilon_{y,\theta}$	extensão de cedência em temperaturas elevadas $\theta_a$ ;

$\theta_a$	temperatura do aço;
$\lambda_a$	condutibilidade térmica do aço;
$\bar{\lambda}_{LT}$	esbelteza normalizada para a encurvadura lateral;
$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	esbelteza normalizada para a encurvadura lateral em temperaturas elevadas;
$\rho_a$	massa específica do aço;
$\sigma_{res,máx}$	valor da tensão residual máxima;
$\Phi_{LT}$	valor para determinação do coeficiente de redução $\chi_{LT}$ ;
$\Phi_{LT,\theta,com}$	valor para determinação do coeficiente de redução $\chi_{LT,fi}$ ;
$\chi_{LT}$	coeficiente de redução para a encurvadura lateral torsional;
$\chi_{LT,fi}$	coeficiente de redução para a encurvadura lateral torsional em situação de incêndio;
$\chi_{LT,mod}$	coeficiente de redução modificado para a encurvadura lateral torsional;
$\chi_{LT,fi,mod}$	coeficiente de redução modificado para a encurvadura lateral torsional em situação de incêndio;
$\Psi$	razão entre os momentos aplicados nas extremidades da viga;

## Abreviaturas

EC3	Eurocódigo 3
ECCS	<i>European Convention for Construction Steelwork</i>
ELT	Encurvadura lateral torsional
DL	Deslocamento lateral
DV	Deslocamento vertical
MR	Modelo de referência das vigas alveolares

# Capítulo 1: Introdução

---

## *1.1 Contextualização*

As vigas de aço com aberturas na alma que também são conhecidas como vigas alveolares, são vigas tipicamente fabricadas a partir de perfis de secção I de aço laminado. Por norma, esses perfis de aço são cortados de forma longitudinal e de acordo com um certo padrão. As duas metades obtidas são separadas e posteriormente soldadas pelas juntas de secção reta dando origem a uma nova viga com perfurações na alma. Deste modo, a altura da alma das vigas alveolares será de 40 a 60% superior à secção laminada que lhes dá origem, o que resulta num maior uso económico do material por existir um aumento de rigidez no seu plano de flexão, [1].

O uso de vigas alveolares permite uma nova expressão arquitetónica. As estruturas tornam-se mais leves e os vãos são aumentados. Existe também a funcionalidade de usar estas aberturas da alma para instalações técnicas. A transmissão de uma aparência de leveza destas vigas alveolares, combinadas com a sua elevada resistência, nunca cessa a inspiração de arquitetos para novas formas estruturais.

Todas estas características contribuem para que as vigas alveolares apresentem diversos campos de aplicação, tendo em conta que as principais são estruturas para sistemas de piso e de coberturas, ver Figura 1, [2].

As vigas alveolares são vigas frequentemente utilizadas em projetos de estruturas de aço, mas os Eurocódigo 3 não fornece muita informação para o dimensionamento destas vigas alveolares, versão ENV 1993-1-1:1992/A2 em Anexo N,[3]. Existe uma proposta que pretende complementar a norma existente sobre a verificação de segurança de vigas alveolares, EN 1993-1-13, no entanto esta proposta ainda não se encontra em circulação, [4].

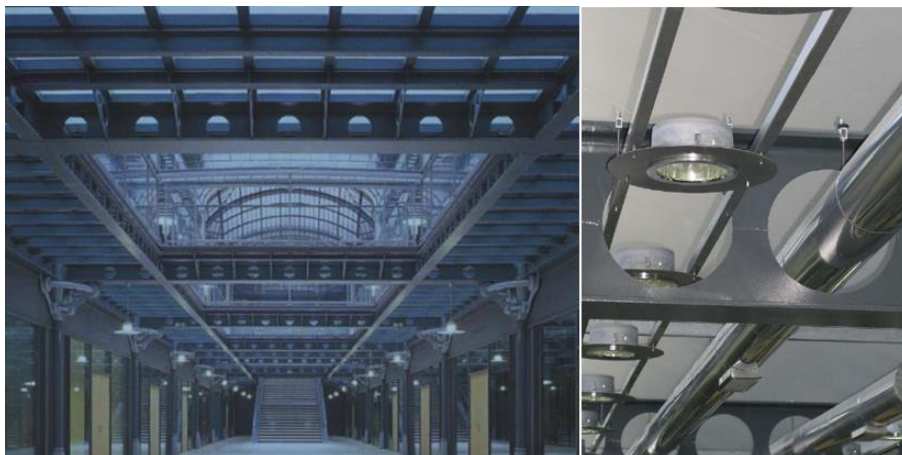


Figura 1 - Aplicações de vigas alveolares,[2].

Contudo, havendo descontinuidade nas almas das vigas alveolares, podem ocorrer modos de falhas locais, tais como, a encurvadura do montante da alma (*web-post buckling*) ou o mecanismo de flexão de Vierendeel nas secções perfuradas, [5].

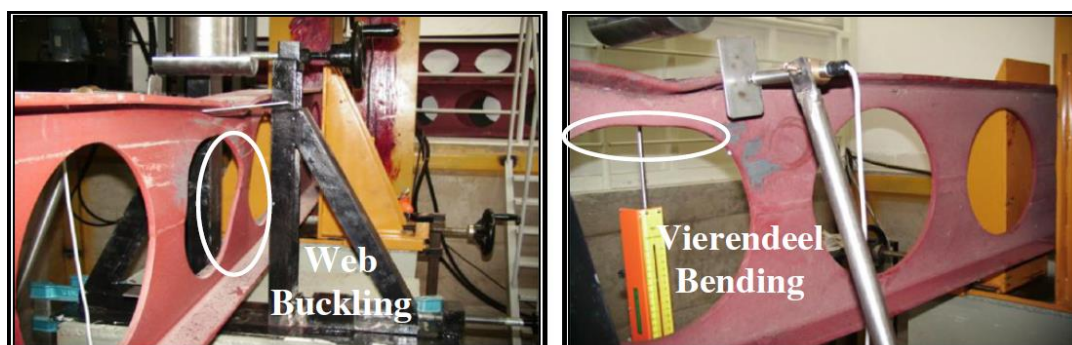


Figura 2 - Modos de instabilidade local: a) Encurvadura do montante da alma b) Mecanismo de flexão Vierendeel,[6]

Tal como nas vigas sólidas as vigas alveolares também podem sofrer de instabilidade global conhecido por encurvadura lateral torsional. Este tipo de instabilidade já é conhecido nas vigas sólidas, contudo, havendo aberturas na alma e havendo processos de fabrico adicionais em relação às vigas sólidas, é preciso tomar em conta esses fatores quando é calculada a resistência à encurvadura lateral torsional destas vigas.

## **1.2 Organização da tese**

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo é referente à introdução, onde é exposta uma breve contextualização sobre o tema da tese.

No segundo capítulo encontra-se o estado da arte, é feita uma descrição do processo de fabrico das vigas alveolares e é feita a caracterização das mesmas. Também são descritos os modos de colapso existentes para estas vigas e são descritos e explicados padrões de tensões residuais. Por fim, encontra-se o estado da arte onde são mencionados trabalhos realizados em torno do tema desta dissertação, por outros autores.

O capítulo 3 demonstra as propriedades termomecânicas do aço e são expostos os passos para o dimensionamento da resistência à encurvadura lateral torsional das vigas sólidas e alveolares, à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas, de acordo com o Eurocódigo 3 parte 1-1 e Eurocódigo 3 parte 1-2. Por fim, é feita uma explicação da proposta de Vila Real que também foi utilizada neste trabalho para comparar aos resultados obtidos através das simulações.

No capítulo 4 é feita uma descrição geral do modelo implementado no ANSYS para as simulações que foram efetuadas. São explicados todos os casos que foram investigados e são apresentados os resultados onde estes são devidamente comentados e comparados com os resultados obtidos pela norma e pela proposta de Vila Real.

Por último, para o capítulo 5 é feita uma conclusão geral onde é explicado o que foi observado na realização deste trabalho. Neste capítulo também é feita uma sugestão de trabalhos futuros relacionado com o tema desta dissertação.

## Capítulo 2: Estado da arte

---

### *2.1 Processo de fabricação*

As vigas alveolares são produzidas a partir de vigas sólidas e estas podem ser obtidas de três métodos diferentes.

Para o primeiro método, são feitos cortes de forma individual para obtenção de aberturas no montante da alma a partir de vigas laminadas a quente de secção I.

Existe também um método onde três placas são soldadas para obtenção de uma viga de secção I, essas três placas são referentes ao montante da alma, a flange superior e flange inferior. Neste método as aberturas podem ser cortadas no montante da alma antes ou depois de se formar a secção I.

O terceiro método de fabrico consiste em cortar uma viga laminada a quente de secção I com um certo padrão de corte ao longo do montante da alma, desta forma, são obtidas duas secções Tê que posteriormente são deslocadas e soldadas para formar uma viga alveolar, [7]. Com este método é possível obter uma viga com 40 – 60% mais alta a partir da secção paterna, o que resulta em vigas com maior momento de inércia, mas, sem aumento no seu peso, [8]. Este método de fabrico é o método mais comum de produzir vigas alveolares e também pode ser denominado pelo método de fabrico de Westok. Na Figura 3 podem ser observadas as três etapas de produção que resultam numa viga alveolar.

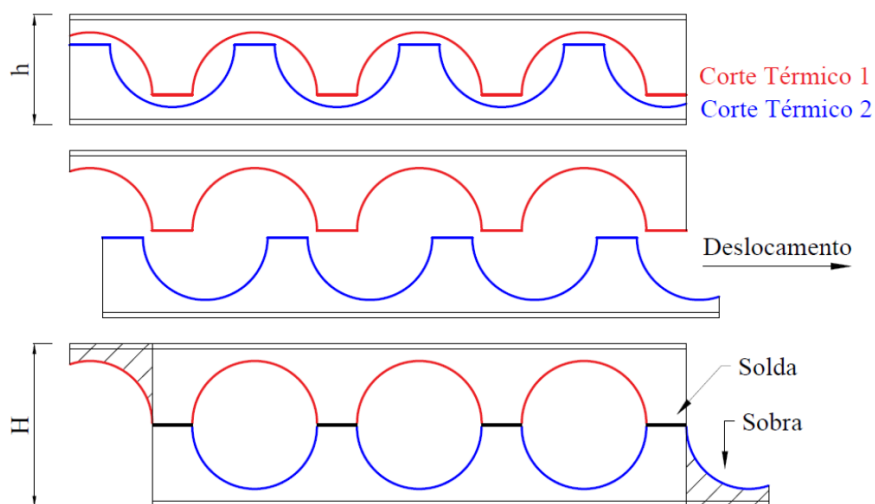


Figura 3 - Três etapas de produção de um viga alveolar / Método de fabrico de Westok, [9]

## 2.2 Parâmetros geométricos

As vigas alveolares são vigas que têm aberturas circulares na alma, estas vigas são normalmente produzidas a partir de vigas sólidas de secção I. Com a mesma viga sólida é possível obter diferentes vigas alveolares, pois os parâmetros geométricos dependem da forma em que é feito a linha de corte no seu processo de fabricação. Os parâmetros geométricos, tais como a altura final da viga  $H$ , diâmetro da abertura na alma  $d_0$  e o espaçamento entre aberturas  $S$ , variam conforme a aplicação do projeto em questão, essas variações em função da sua aplicação podem ser encontradas na Tabela 1, onde  $h$  representa a altura da viga sólida que dá origem à viga alveolar.

Tabela 1 - Variações dos parâmetros geométricos de acordo com a sua aplicação, [10]

Aplicação	Objetivo	Parâmetros geométricos		
		$H$	$d_0$	$S$
Telhados/ Passadiços/ Estruturas de suporte de longo vão para telhados	Otimização da relação altura/peso	1,4 – 1,6h	1,0 – 1,3h	1,1 – 1,3 $d_0$
Pisos/ Estruturas de estacionamento/ Estruturas marítimas	Otimização da relação carregamento/peso	1,3 – 1,4h	0,8 – 1,1h	1,2 – 1,7 $d_0$

Neste trabalho o foco será estudar as vigas alveolares, sendo assim deve ser feita a definição da nomenclatura e simbologia usada para cada elemento das vigas alveolares. A Figura 4 demonstra uma vista frontal e uma vista de secção que toma como referência o centro de uma das aberturas da viga, essa secção corte demonstrada também pode ser designada como secção 2-Tê. Já as Figura 5 e Figura 6 mostram a simbologia utilizada para cada parâmetro geométrico da viga alveolar, vista frontal e secção transversal ou secção 2-Tê, respectivamente.

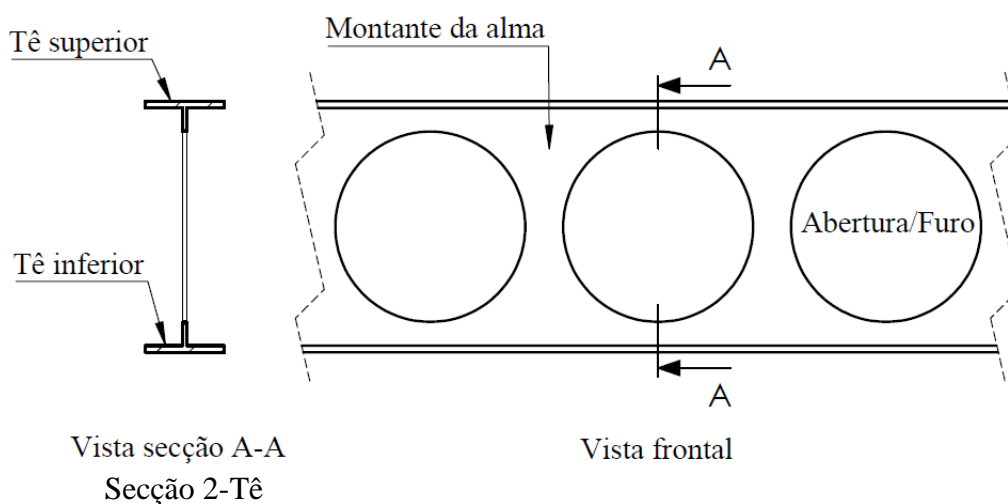


Figura 4 - Nomenclatura dos elementos da viga alveolar

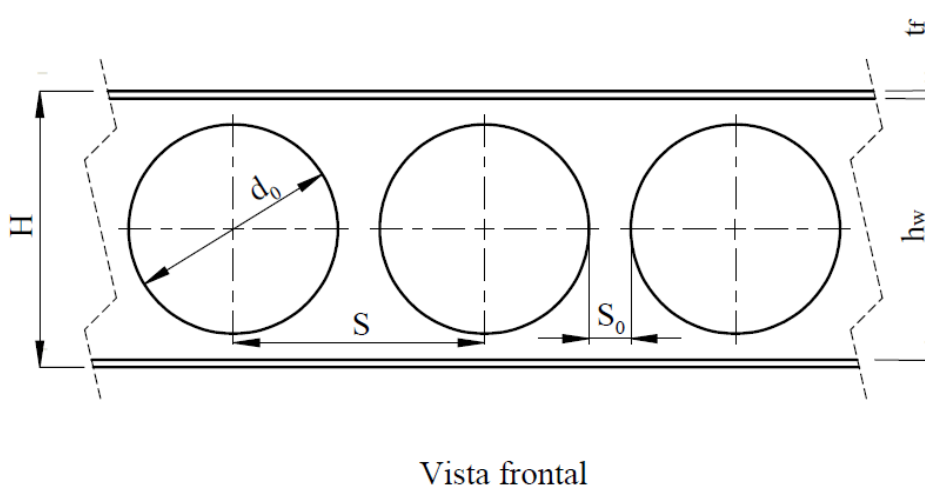


Figura 5 - Simbologia dos parâmetros geométricos da viga alveolar - vista frontal

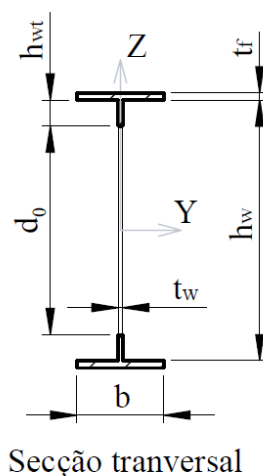


Figura 6 - Simbologia dos parâmetros geométricos da viga alveolar - secção transversal ou secção 2-Tê

Como nesta tese também vão ser mencionadas as vigas sólidas de perfil em I, da mesma forma deve ser feita a devida definição da nomenclatura e simbologia destas vigas. A Figura 7 demonstra uma vista frontal e a sua nomenclatura. Já a Figura 8 e Figura 9 mostram a simbologia utilizada para cada parâmetro geométrico da viga sólida, vista frontal e secção transversal, respetivamente.

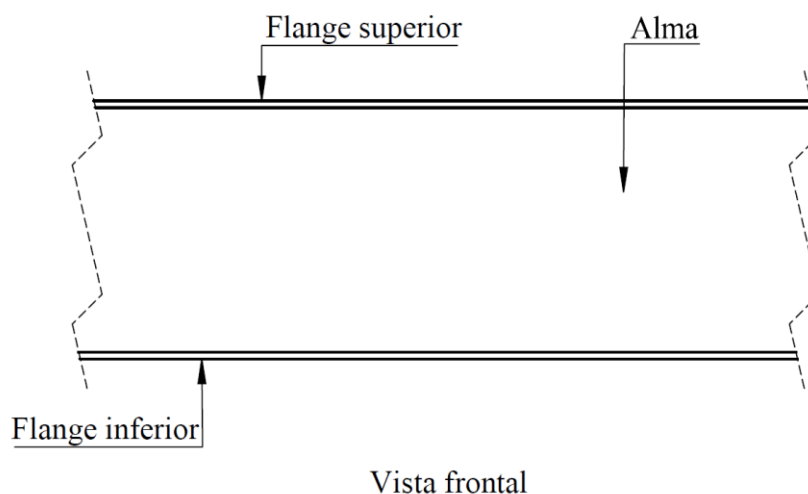
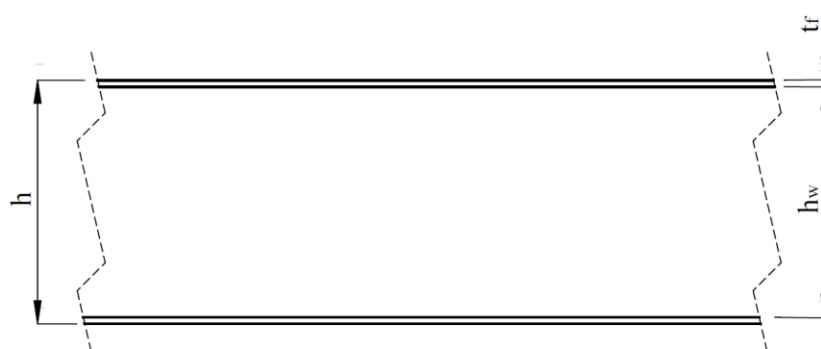
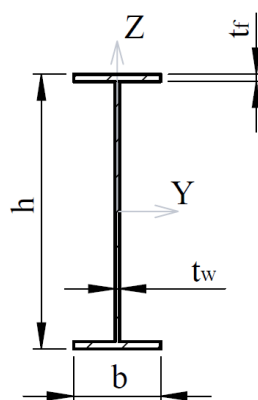


Figura 7 – Nomenclatura dos elementos da viga sólida



Vista frontal

Figura 8 - Simbologia dos parâmetros geométricos da viga sólida - vista frontal



Secção transversal

Figura 9 - Simbologia dos parâmetros geométricos da viga alveolar – secção transversal

### 2.3 Tensões residuais

As tensões residuais são tensões internas existentes em membros de aço que não estejam sujeitos a carregamentos externos, conseqüentemente, eles estão sempre em equilíbrio estático. Tensões residuais podem ser induzidos em vigas de aço através do seu processo de fabricação, sendo que a origem das tensões residuais pode ser dividida em duas partes. Primeiramente, as tensões residuais podem ser de origem térmica, devido ao seu arrefecimento desigual e à correspondente deformação plástica diferenciada no membro. A outra origem, tensões residuais podem ser de natureza mecânica, quando as vigas são laminadas a frio, [7].

### 2.3.1 Vigas Sólidas

A presença de tensões residuais em vigas sólidas tem vindo a ser estudada extensivamente para os casos da resistência ao mecanismo de flexão e para a resistência à encurvadura lateral torsional. Foi demonstrado que a presença de tensões residuais têm um efeito prejudicial na resistência à encurvadura global para vigas de secção I, [11]. Na Figura 10 podem ser encontrados dois tipos de padrões de tensões residuais, estes padrões de tensões residuais são referentes a vigas sólidas de secção I laminadas a quente, ou seja, a origem das tensões residuais é proveniente dos efeitos térmicos do processo de fabricação.

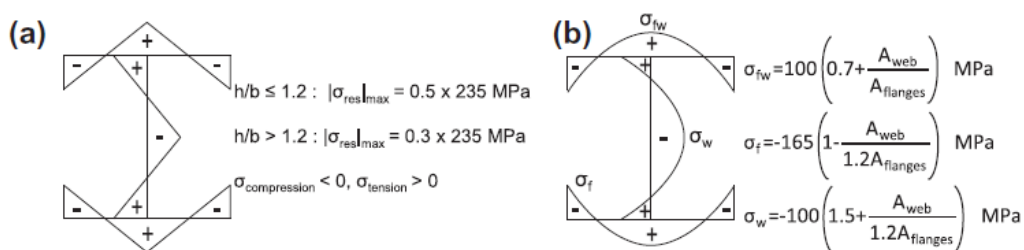


Figura 10 - Padrão de tensões residuais de vigas sólidas de secção I laminadas a quente: (a) de acordo com ECCS; (b) de acordo com Young, [11]

A distribuição triangular demonstrada na Figura 10 (a), que demonstra o padrão de tensões residuais proposto pela *European Convention for Construction Steelwork* (ECCS) em 1984, é frequentemente utilizada em simulações numéricas. Este padrão de tensões residuais faz a variação da intensidade das tensões de acordo com os parâmetros geométricas da viga e as tensões variam de uma forma linear. As equações (1) e (2) definem o valor de tensões residuais máximo  $\sigma_{res,m\acute{a}x}$  que deve ser usado tendo em consideração os parâmetros geométricos da viga em questão, onde  $f_y$  é a tensão de cedência.

Se  $h/b \leq 1.2$ , então:

$$\sigma_{res,m\acute{a}x} = 0.5 \times f_y \quad (1)$$

Se  $h/b > 1.2$  então:

$$\sigma_{res,m\acute{a}x} = 0.3 \times f_y \quad (2)$$

### 2.3.2 Vigas Alveolares

Para as vigas alveolares não há um modelo genérico que se possa aplicar tensões residuais em quaisquer vigas alveolares provenientes de diferentes perfis de vigas sólidas ou, ainda, para diferentes classes de aço. Por consequência, é habitual encontrar diferentes considerações nas pesquisas acadêmicas da forma de implementar as tensões residuais, [9].

Numa pesquisa, o padrão das tensões residuais utilizado para as simulações das vigas alveolares, foi o padrão de tensões residuais tipicamente utilizado em vigas duplamente simétricas de secção I laminadas a quente (Figura 10a). Foi assumido que durante o processo de fabrico das vigas alveolares, o corte na alma da viga sólida parental foi cuidadosamente realizado, consequentemente foi considerado que não houve alterações para as tensões residuais dessas vigas alveolares, [12].

Existe um padrão de tensões residuais para vigas alveolares que foi considerado para a realização das simulações desta dissertação, onde o valor das tensões residuais para o banzo se mantém da mesma forma que para as vigas sólidas laminadas a quente de secção I. Para a alma das vigas alveolares foi considerada uma distribuição de tensões residuais nula, assumindo que a existência das aberturas na alma faça a dissipação da restrição da alma. Na Figura 1 pode ser observado esse padrão de tensões residuais, [9, 13, 14]

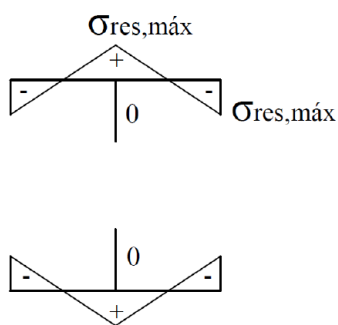


Figura 11 - Padrão de tensões residuais para vigas alveolares sem tensões na alma, [9]

Para obtenção dos valores de  $\sigma_{res,máx}$  deverá ser usado a equação (1) ou (2), dependendo das propriedades geométricas do perfil.

## 2.4 Instabilidade local e global de vigas alveolares

O comportamento estrutural das vigas alveolares sob flexão é significativamente mais complexo do que as vigas sólidas de perfil em I. As vigas alveolares podem apresentar os mesmos modos de falha das vigas regulares, além de outros modos de falhas específicos às vigas alveolares, tais como a encurvadura do montante da alma e mecanismo de Vierendeel, estes são considerados os modos de falha dominantes, [15].

### 2.4.1 Encurvadura lateral torsional

Encurvadura lateral torsional (ELT) pode ocorrer para membros relativamente longos. Devido ao aumento da altura, vigas alveolares são mais suscetíveis à encurvadura lateral torsional do que vigas sólidas. Este modo de falha ocorre para vigas no qual a flange comprimida é insuficientemente suportada lateralmente, Figura 12.



Figura 12 - Encurvadura lateral torsional de uma viga alveolar, [7]

Atualmente, existem duas abordagens para o cálculo à resistência ELT. Contudo, ambas abordagens apresentam resultados conflituosos: a primeira (1-Tê) é muito conservativa, enquanto a segunda abordagem (2-Tê) poderá ser insegura. Na segunda abordagem a resistência de uma viga alveolar à ELT pode ser calculado tal como para as vigas sólidas, mas devem ser utilizadas as propriedades da secção transversal referentes ao centro das aberturas da alma como demonstrado na Figura 13, [1]. Neste trabalho foi utilizado a segunda abordagem para o cálculo da resistência à ELT das vigas alveolares.

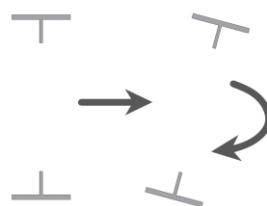


Figura 13 - Abordagem 2-Tê para cálculo da resistência à ELT

#### 2.4.2 Mecanismo de Vierendeel

A flexão de Vierendeel é o modo de falha dominante em vigas de aço com aberturas. O mecanismo de Vierendeel envolve três fatores interagindo, nomeadamente a força axial, a força de corte e o momento fletor de Vierendeel.

Para uma viga de aço com aberturas como demonstrado na Figura 14 (a), a força de corte transversalmente à abertura causa momentos secundários (Momento de Vierendeel) nas secções Tê. Interações dos momentos secundários com o momento de encurvadura global e as forças de corte é chamado mecanismo de Vierendeel. Geralmente, é assumido que a interação forma quatro rótulas plásticas Figura 14 (b).

Para prevenir a falha de Vierendeel na secção onde existe uma abertura, a resistência do momento de Vierendeel dos Tês deve exceder o momento fletor de Vierendeel, [16].

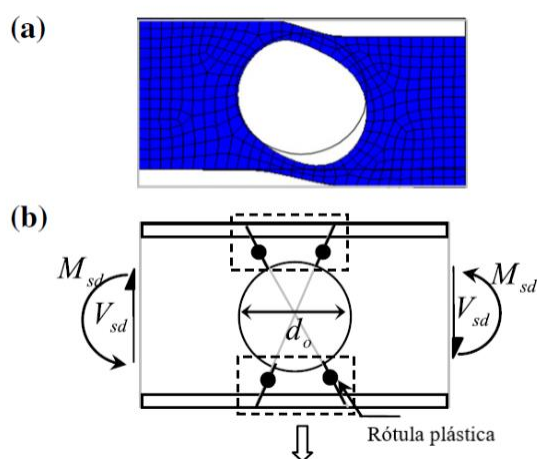


Figura 14 – Mecanismo de Vierendeel numa viga alveolar: (a) falha Vierendeel, (b) rótulas plásticas, [16]

### 2.4.3 Encurvadura do montante da alma

A encurvadura do montante da alma é a perda de estabilidade do montante da alma causado por tensões de compressão devido à força de corte. Durante este fenómeno, o montante da alma torce sobre o seu eixo vertical, dessa forma é assumida a forma demonstrada na Figura 15, [15].

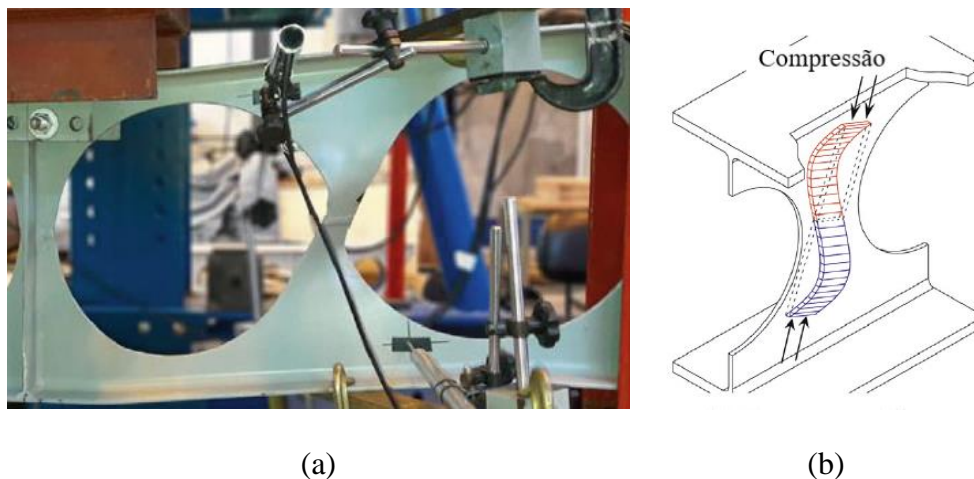


Figura 15 - Encurvadura do montante da alma: (a) forma assumida pela encurvadura do montante da alma (b) linha de compressão, [15]

## 2.5 Estado da arte

Jaqueline Alves da Silva, [9], realizou um estudo numérico de vigas alveolares para diferentes geometrias, variando o diâmetro do furo, o espaçamento entre furos e a altura final do perfil. Foi considerando uma viga paterna IPE 500 para criação das diferentes vigas alveolares. As simulações foram realizadas para temperatura ambiente e para temperaturas elevadas. O objetivo deste trabalho era estudar a influência dos parâmetros geométricos na resistência das vigas, identificar os modos de colapso mais ocorrentes, averiguar o efeito das tensões residuais no momento de colapso e comparar os resultados numéricos com a norma do Eurocódigo 3 parte 1-1 e parte 1-2. A autora conclui que, de uma forma geral, os modos de colapso estavam mais associados ao comprimento da viga do que aos parâmetros geométricos relativos à abertura. Foi verificado que em vigas mais curtas o modo de colapso era local enquanto nas vigas mais compridas o modo de colapso manifestava-se pela encurvadura lateral torsional. O modo de colapso local mais ocorrente foi a encurvadura do

montante da alma. Em média, os resultados numéricos correspondiam a 53,8% do momento resistente obtido pela norma do EC3 considerando a metodologia 2-Tê. Em relação às influências das tensões residuais, foram realizadas simulações onde foram implementados dois padrões de tensões residuais. Um padrão de tensões residuais tomava em consideração tensões na alma enquanto o outro era livre de tensões na alma. Para ambos os padrões as tensões residuais nos banzos foram consideradas da mesma forma, a qual adota uma distribuição triangular onde as tensões residuais máximas são dependentes da tensão de cedência. Conclui-se que não existiram diferenças significativas no momento resistente pela inclusão de tensões residuais na alma, nem houve alterações nos modos de colapso. Dessa maneira, existiu uma preferência para a realização das simulações em ANSYS pelo padrão de tensões residuais mais simplificado que não toma em consideração tensões na alma.

A resistência à encurvadura global de vigas laminadas a quente de secção I é negativamente influenciada pela presença de tensões residuais, que são geradas durante o processo de fabrico destas vigas. É esperado que os efeitos térmicos ocorridos durante a produção de vigas alveolares e vigas casteladas irão influenciar as tensões residuais já existentes nas vigas laminadas a quente de secção I, Figura 16.

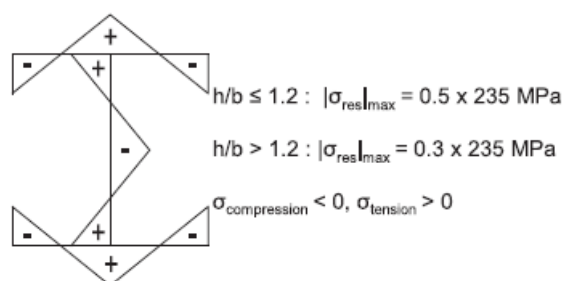


Figura 16 – Padrão das tensões residuais de vigas laminadas a quente de secção I de acordo com o ECCS,[11].

Delphine Sonck et al, [11], através de ensaios experimentais, investigaram as tensões residuais em vigas alveolares e vigas casteladas. Nos ensaios experimentais, que foram efetuados na *Ghent University*, foram usadas quatro vigas casteladas e duas vigas alveolares feitas a partir de seis IPE160 vigas de aço. Foram usadas três geometrias e foram produzidos dois membros para cada geometria. As geometrias CS1 e CS3 tinham aberturas hexagonais (vigas casteladas) e CS2 tinha aberturas circulares (vigas alveolares). As geometrias CS1 e CS3 foram fabricadas de acordo com o procedimento padrão, que consiste em cortar o

montante da alma através do processo de oxicorte. As duas metades obtidas são deslocadas e novamente soldadas pelas juntas dando origem a uma viga castelada, ver Figura 17a e b.



Figura 17 – Processo de fabrico das vigas casteladas e das vigas alveolares: (a) corte do montante da alma; (b) soldadura das vigas casteladas; (c) corte adicional das aberturas circulares para as geometrias CS2,[11].

As geometrias CS2 tinham aberturas circulares no montante da alma. Para estes ensaios as vigas alveolares não foram fabricadas de um modo padrão, estes membros foram feitos através de cortes circulares em torno das aberturas hexagonais de vigas casteladas anteriormente produzidas com geometrias CS1, Figura 177 (c). Os resultados das medições das tensões residuais das vigas casteladas podem ser vistas na Figura 18 e das vigas alveolares na Figura 19.

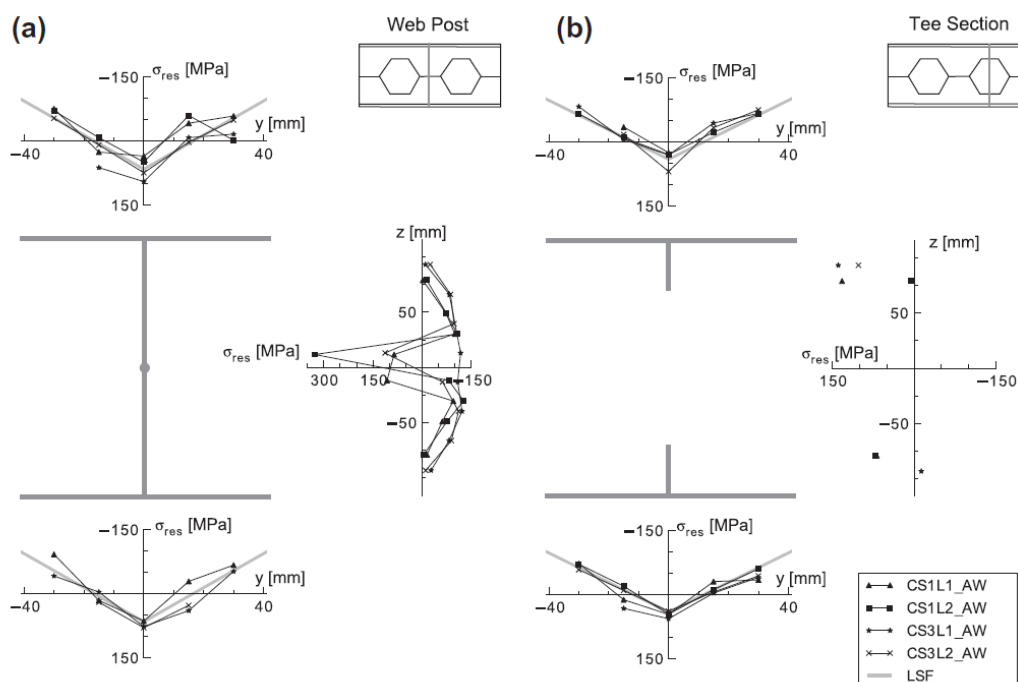


Figura 18 – Tensões residuais medidas nas geometrias CS1 e CS3: (a) no montante da alma; (b) na secção Tê,[11].

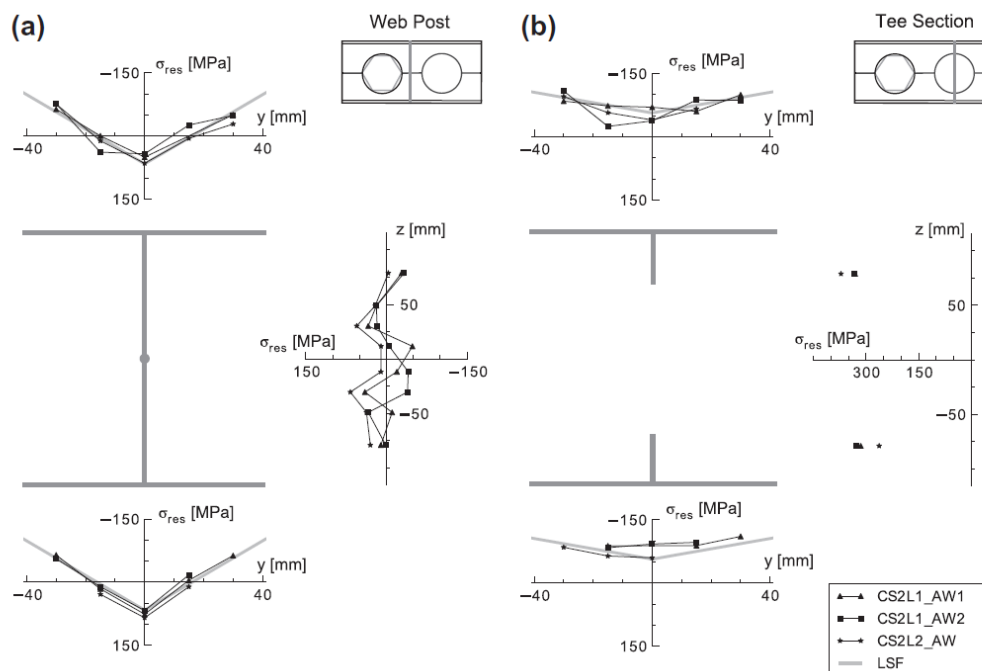


Figura 19 - Tensões residuais medidas nas geometrias CS2: (a) no montante da alma; (b) na secção Tê,[11].

É esperado que o comportamento da encurvadura global das vigas alveolares e das vigas casteladas seja diferente do que às das vigas sem perfurações na alma que lhes dá origem, devido ao efeito das geometrias modificadas e da influência dos processos de produção das imperfeições presentes. A influência dos processos de produção nas tensões residuais do banzo foi possível observar com clareza: na secção do montante da alma e nas secções Tê as tensões residuais por compressão do banzo aumentaram tanto nas vigas alveolares como nas vigas casteladas. O efeito prejudicial dos processos de produção foi ainda mais elevado para as vigas alveolares que foram fabricadas para estes ensaios de um modo não-padrão, devido ao calor libertado através do processo de corte para criar as aberturas circulares, onde houve uma maior aproximação nos banzos durante este processo para a fabricação destas vigas alveolares, [11].

Felipe Ferreira et al, [17], investigaram o comportamento à encurvadura lateral torsional de vigas alveolares. Realizaram um estudo paramétrico, recorrendo ao *software* ABAQUS, de vigas alveolares com diferentes parâmetros geométricos para diferentes tipos de carregamentos. No estudo, as vigas alveolares estavam simplesmente apoiadas com apoios em forquilha nas extremidades e foram submetidas a um momento uniforme, a uma carga concentrada a meio vão e a um carregamento uniformemente distribuído. Os autores

compararam os resultados obtidos com *standards* internacionais e com a possível atualização do EC3. A constante torsional não foi calculada pela metodologia 2-Tê mas sim por uma constante torsional média  $I_{t,2T,média}$  onde o número de aberturas e a alma sem furações é tomada em consideração para os cálculos.

$$I_{t,2T,média} = 0.9 \frac{nd_0}{L} I_{t,2T} + \left(1 - 0.9 \frac{nd_0}{L}\right) I_t \quad (3)$$

Onde  $n$  representa o número de aberturas existentes na viga alveolar,  $I_{t,2T}$  é o cálculo da constante torsional feito no centro das aberturas (metodologia 2-Tê) e  $I_t$  é o cálculo da constante torsional onde a secção transversal não tem furações. A Figura 20 demonstra os resultados obtidos através do ABAQUS e do EC3 de forma normalizada para um carregamento uniformemente distribuído.

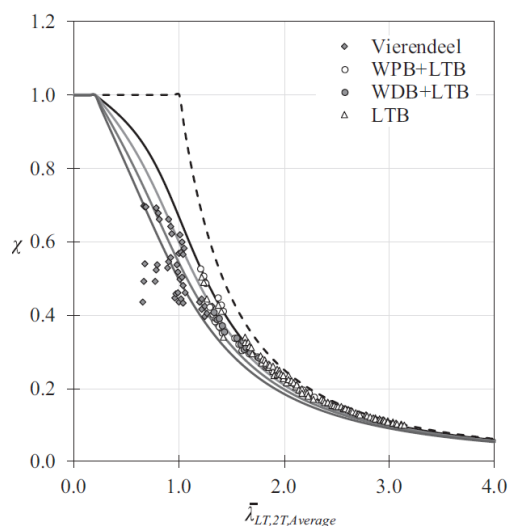


Figura 20 - Comparação de resultados dos momentos resistentes obtidos pelo ABAQUS e EC3 - Carregamento uniformemente distribuído, [17]

Na figura fica evidente que as vigas de menor esbelteza sofreram de uma instabilidade local, nomeadamente o mecanismo de Vierendeel, como demonstrado na legenda da figura.

Delphine Sonck e Jan Belis, [1], também analisaram o comportamento da encurvadura lateral-torsional (*lateral-torsional buckling*) em vigas alveolares, estando estas sujeitas a um momento de flexão constante. Sonck e Belis estudaram a encurvadura lateral-torsional de uma vasta variedade de geometrias nas vigas alveolares, para isto, foi usado um modelo numérico através do *software* ABAQUS que foi validado posteriormente pela comparação

de resultados experimentais efetuadas na *Ghent University e University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland*. Para o estudo numérico foram tomadas em consideração as imperfeições geométricas e as imperfeições materiais, o aço escolhido foi o aço S235. Para o estudo numérico, os autores decidiram usar um valor de  $L/1000$  como imperfeição geométrica. Para as imperfeições materiais foram usados dois padrões de tensões residuais, um padrão que leva em conta as tensões residuais causadas pelo processo de produção das vigas alveolares, e outro padrão que corresponde às tensões residuais das vigas sólidas que dão origem a estas vigas alveolares. Os padrões das tensões residuais usados neste estudo, foram retirados de trabalhos anteriormente feitos [7, 11]. Os autores referiram que se tivesse de ser proposto uma curva de encurvadura para todas as secções, então a curva c daria de uma forma geral resultados satisfatórios. Foram comparadas as simulações feitas com os diferentes padrões de tensões residuais, na Figura 21 é possível observar que a influência do processo de produção diminui a resistência à encurvadura por aproximadamente uma curva de encurvadura. Em relação à Figura 21 a figura à esquerda foi obtida durante o estudo paramétrico deste próprio artigo, onde foi usado um padrão de tensões residuais modificado,[1]. A figura à direita foi obtida num estudo paramétrico realizado similar ao da figura da esquerda, onde o padrão de tensões residuais original foi usado,[13].

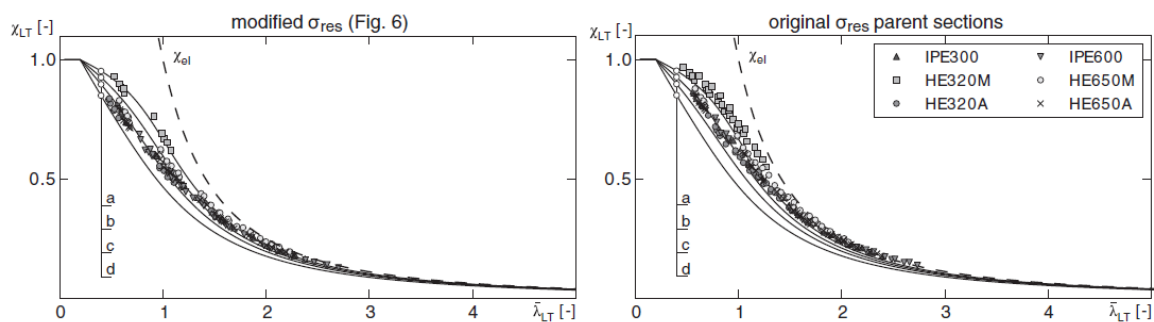


Figura 21 – Resistência à ELT: comparação dos valores numericamente obtidos  $\chi_{abq}$  com as curvas de encurvadura.

Verificou-se que as modificações das tensões residuais conduziram a uma diminuição da resistência à encurvadura, [1].

Grilo et al, [15], apresentaram um estudo sobre o comportamento estrutural de vigas alveolares, focado na encurvadura local do montante da alma (*web-post buckling*), com

objetivo principal de propor uma nova fórmula para o cálculo da resistência ao corte em vigas alveolares em que é ocorrido o fenômeno da encurvadura local do montante da alma. Foram feitos ensaios experimentais e análises numéricas. Os modelos numéricos foram criados através do software ABAQUS. Nos ensaios experimentais foram aplicadas forças na flange superior de cada viga e simultaneamente através de um aparelho, o deslocamento transversal foi bloqueado para que estas vigas não sofressem de uma encurvadura lateral torsional, mas sim, de uma encurvadura local do montante da alma. Os resultados dos ensaios experimentais serviram para a calibração dos modelos numéricos. As Equações (4) e (5) representam as equações propostas, que servem para o cálculo da resistência ao corte  $V_{h,Rk}$  e  $V_{v,Rk}$  (horizontal e vertical, respetivamente) para o fenômeno da encurvadura local do montante da alma.

$$V_{h,Rk} = V_{h,pl} \chi \quad (4)$$

Para a resistência ao corte vertical:

$$V_{v,Rk} = V_{h,Rk} \left( \frac{2 y_0}{S} \right) \quad (5)$$

Um coeficiente de redução  $\chi$  foi usado na determinação da resistência de corte horizontal, este coeficiente de redução é parametrizado pela geometria e pelas propriedades do aço. Onde, o coeficiente de redução é determinado pela equação (6) e (7):

- Para  $\lambda_0 \geq 1.0$ :

$$\chi = \frac{\alpha}{\lambda_0^\beta} \leq 1.0 \quad (6)$$

- Para  $\lambda_0 < 1.0$ :

$$\chi = \gamma \varepsilon^{(\lambda_0^\eta)} \leq 1.0 \quad (7)$$

Nestas equações, os coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon$  e  $\eta$  são demonstradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon$  e  $\eta$ , [15]

$d_0/H$	$s/d_0$	Coefficient					$d_0/H$	$s/d_0$	Coefficient				
		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\varepsilon$	$\eta$			$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\varepsilon$	$\eta$
0.5	1.1	0.759	1.35	1.15	0.660	3.5	0.7	1.1	0.849	1.47	1.08	0.786	4.5
	1.2	0.730	1.39	1.42	0.514	2.1		1.2	0.844	1.44	1.11	0.760	3.9
	1.3	0.780	1.40	1.16	0.672	3.5		1.3	0.903	1.39	1.15	0.785	4.0
	1.4	0.840	1.42	1.26	0.667	2.7		1.4	0.980	1.34	1.12	0.870	3.0
	1.5	0.916	1.40	1.09	0.840	5.0		1.5	1.130	1.33	-	-	-
0.6	1.1	0.798	1.42	1.14	0.700	3.5	0.8	1.1	0.888	1.46	1.09	0.815	4.0
	1.2	0.791	1.42	1.13	0.700	3.8		1.2	0.901	1.42	1.14	0.790	3.5
	1.3	0.836	1.40	1.10	0.760	4.5		1.3	1.020	1.42	-	-	-
	1.4	0.909	1.36	1.15	0.790	3.3		1.4	1.175	1.42	-	-	-
	1.5	0.970	1.31	1.09	0.890	4.5		1.5	1.285	1.36	-	-	-

As geometrias das vigas alveolares com  $d_0/H$  igual a 0,5, 0,6, 0,7 e 0,8 e  $s/d_0$  igual a 1,1, 1,2, 1,3, 1,4 e 1,5, e  $H/d$  a variar em incrementos de 0,1 a partir de 1,1 até ao valor máximo geometricamente viável, foram verificadas.

Os resultados obtidos pela formulação proposta mostraram diferenças de até 13% quando comparados com os resultados obtidos através dos modelos numéricos, [15].

Também Pattamad Panedpojaman et al, [18], investigaram a encurvadura local do montante da alma para vigas alveolares simétricas e assimétricas com objetivo de propor uma nova formulação para o cálculo da resistência ao corte destas vigas alveolares para este modo de falha. Os autores utilizaram dados experimentais, obtidos através de outras literaturas, para validar o modelo do montante da alma conseguido através de um *software* de elementos finitos para que posteriormente pudesse ser usado no estudo paramétrico. Para este modelo foram tomadas em consideração as imperfeições geométricas e as imperfeições materiais. Foram feitas 390 simulações de modelos do montante da alma onde foram considerados os seguintes parâmetros:

- Aço do tipo S355 com uma tensão de cedência de 355 MPa;
- Vigas laminadas: IPE200, HEA200, HEB200, IPE400, HEA400, HEB400, IPE600, HEA600 e HEB600. As relações das esbeltezas  $d/t_w$  para estas secções são 35,7, 29,2, 22,2, 46,5, 35,5, 29,6, 50,0, 45,4, e 38,7 respetivamente;
- Relação entre diâmetro das aberturas e altura da viga que dará origem às vigas alveolares  $d_0/d$ : 0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2;
- Relação do espaçamento  $s/d_0$ : 1,1, 1,2, 1,35, 1,5, 1,65, 1,8.

Foi observado que a altura da secção  $Tê$  é um parâmetro chave na diferenciação dos modos de falha entre a encurvadura local do montante da alma e o mecanismo de flexão de

Vierendeel. As vigas de maior esbelteza causam uma diminuição acentuada na resistência de corte, enquanto a resistência de corte aumenta com as secções Tês mais altos e com o montante da alma de maior espessura. Feita a comparação dos resultados das simulações de elementos finitos, a nova formulação subestima a resistência de corte para as vigas alveolares com geometrias de pequenas aberturas e montantes da alma de baixas espessuras. No caso das vigas pouco esbeltas a nova formulação sobrevaloriza o valor da resistência, [18].

Sebastian Durif et al, [19], realizaram um estudo sobre o comportamento de vigas alveolares curvas e assimétricas em situações normais e em situações de incêndio através de um modelo analítico e posteriormente através de um modelo de elemento finito. Os autores realizaram este estudo com finalidade de validar o modelo analítico através da comparação deste modelo com o modelo de elementos finitos executado através do *software* SAFIR. Foram usados três tipos de configurações para esta análise: vigas alveolares curvas com apoio duplo; vigas alveolares assimétricas com apoio duplo; vigas alveolares assimétricas em consola. As abordagens analíticas que predizem a resistência das vigas alveolares baseiam-se na comparação entre as forças internas em torno de cada abertura e as resistências locais. As forças internas foram obtidas a partir do momento da encurvadura global, força de corte e força axial. Dois principais modos de falha locais foram considerados: o mecanismo Vierendeel e a encurvadura do montante da alma. Os métodos analíticos usados para este estudo são geralmente utilizados para vigas alveolares retas. Foram feitas adaptações para abranger o caso das vigas curvas ou assimétricas.

O estudo comparativo apontou para muitos resultados, primeiramente a exatidão do modelo analítico diminui quando o modo de falha é a encurvadura do montante da alma em comparação com o modo de falha de Vierendeel. A adaptação do modelo analítico para vigas alveolares curvas mostra diferenças a rondar os 5% para o modo de cedência de Vierendeel e por volta dos 20% para a encurvadura do montante da alma, quando comparadas com o modelo de elementos finitos. Além disso, foi observado que o principal parâmetro influente na precisão do modelo é a espessura do montante da alma, estando este ligado à influência de um dos modos de falhas. Nas vigas alveolares assimétricas, o modelo analítico é menos preciso para a encurvadura do montante da alma. As diferenças entre o modelo analítico e o modelo numérico atingiram entre 20 a 30%. A precisão diminui com a espessura do montante da alma e com o aumento da relação da altura máxima e mínima do perfil ( $H_0/H_f$ ). Depois de uma análise dos resultados obtidos, os autores concluem que o modelo analítico

pode ser considerado validado referindo que este modelo pode ser usado como forma de *pre-design*.

A adaptação do modelo analítico a temperaturas elevadas demonstrou uma boa precisão em comparação ao modelo de elementos finitos. Foi observado que o modo de falha predominante em condições de elevadas temperaturas foi a encurvadura do montante da alma e tal como em situações normais o parâmetro mais influente da precisão do modelo analítico, para vigas alveolares assimétricas ou curvas, é a espessura do montante da alma. O valor médio de todas as diferenças permanece próximo do modelo numérico (<10%) o que permite considerar a abordagem analítica, para vigas alveolares assimétricas ou curvas em situações de incêndio, validada,[19].

## **Capítulo 3: Verificação de segurança segundo os métodos simplificados do Eurocódigo**

---

### ***3.1 Introdução***

Os Eurocódigos estruturais constituem um conjunto de Normas Europeias (EN) relativas ao projeto de estruturas e de outras obras, realizadas com diferentes materiais. Estas normas devem ser cumpridas para que se garanta a segurança do projeto em causa.

Existe uma grande necessidade de se saber a resistência à encurvadura das vigas submetidas a cargas e a elevadas temperaturas pois é vital garantir que as vigas que sejam projetadas para edifícios estejam preparadas para as cargas que irão ser aplicadas e também para situação de incêndio.

O Eurocódigo 3 parte 1-1 estabelece os princípios de base para o projeto de estruturas de aço, [20], esta parte do EC3 permite a obtenção dos valores de resistência em relação à encurvadura lateral torsional à temperatura ambiente. O Eurocódigo 3 parte 1-2 trata do projeto de estruturas de aço em situação acidental de exposição ao fogo e destina-se a ser utilizada em conjunto com o EC3 parte 1-1, [21].

### ***3.2 Propriedades mecânicas e térmicas do aço ao carbono em função da temperatura***

As propriedades mecânicas do aço ao carbono alteram-se em função da temperatura e para calcular a resistência das vigas com variações de temperaturas é preciso saber de que forma o material se comporta quando são aplicadas elevadas temperaturas a estas vigas.

### 3.2.1 Propriedades de resistência e de deformação

As propriedades de resistência e de deformação do aço a temperaturas elevadas deverão ser obtidas a partir da relação tensões-extensões representadas na Figura 22. Na Figura 23 é possível observar a relação tensões-extensões para aço carbono S355 a elevadas temperaturas.

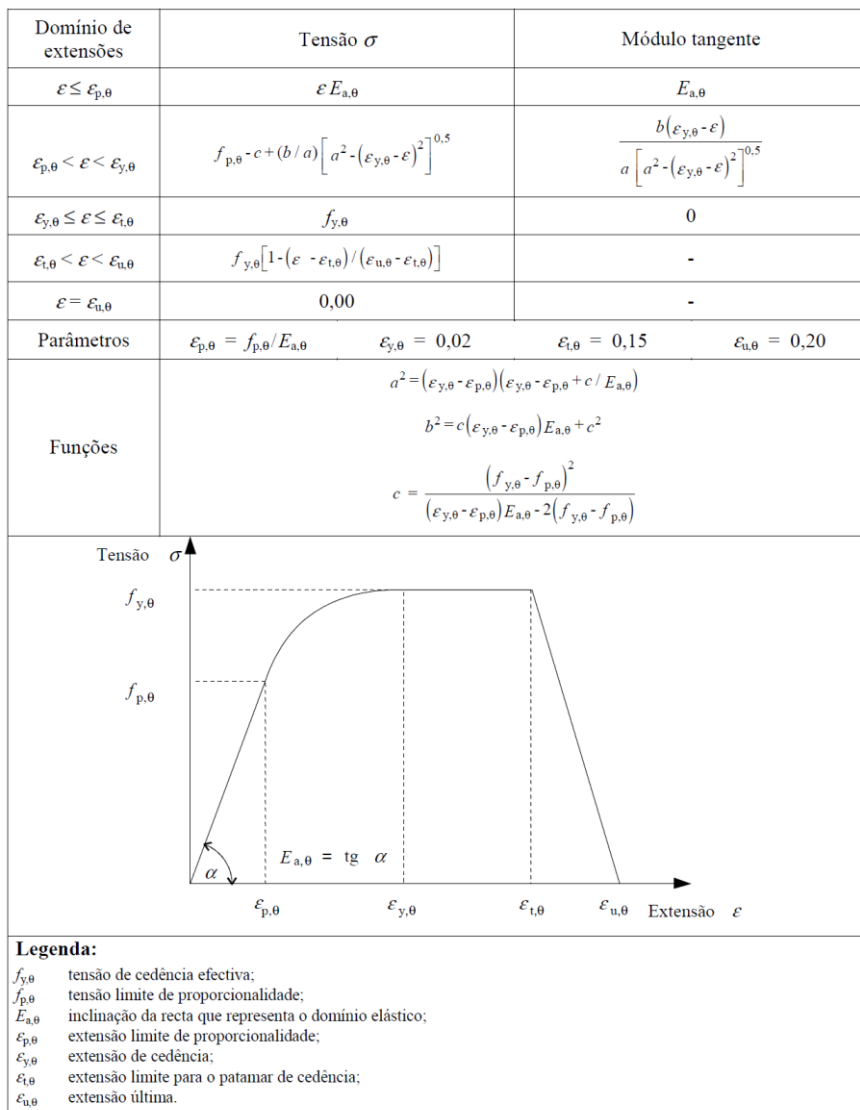


Figura 22 – Relação tensões-extensões para o aço carbono a temperaturas elevadas,[21].

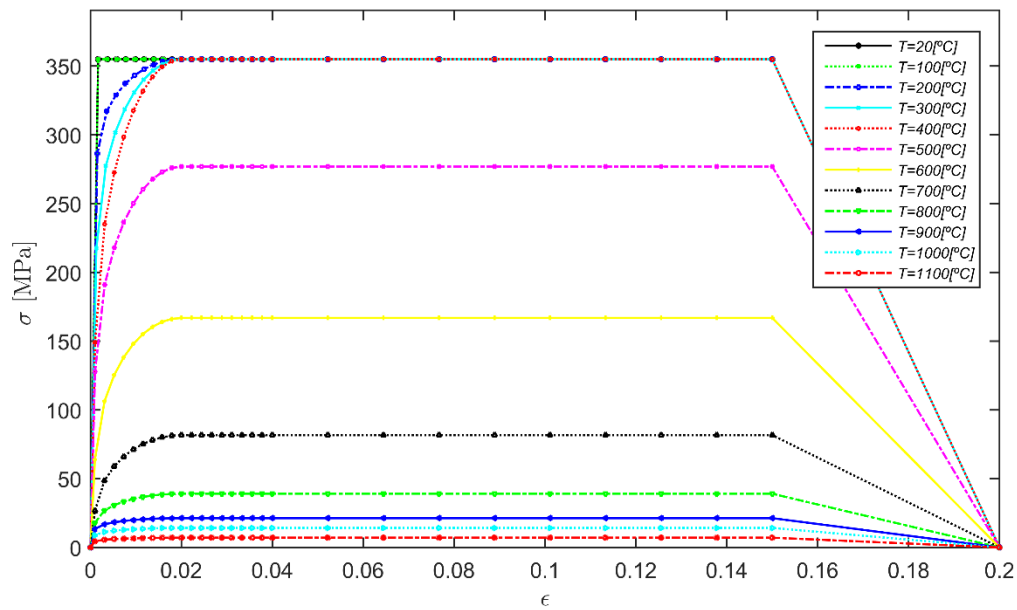


Figura 23 – Relação tensões-extensões do aço carbono S355 a elevadas temperaturas

Na Tabela 3 é possível consultar os valores dos fatores de redução para a tensão de cedência efetiva  $k_{y,\theta}$ , para a tensão limite de proporcionalidade  $k_{p,\theta}$  e para a inclinação da reta que representa o domínio elástico  $k_{E,\theta}$  para temperaturas elevadas.

Tabela 3 – Fatores de redução para a relação tensões-extensões do aço carbono a temperaturas elevadas,[21]

Temperatura do aço $\theta_a$	Factores de redução à temperatura $\theta_a$ referidos ao valor de $f_y$ ou $E_a$ a 20 °C		
	Factor de redução (referido a $f_y$ ) para a tensão de cedência efectiva $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Factor de redução (referido a $f_y$ ) para a tensão limite de proporcionalidade $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Factor de redução (referido a $E_a$ ) para a inclinação da recta que representa o domínio elástico $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,0000

Na Figura 24 também é possível observar a variação do fator de redução  $k_{y,\theta}$  redução para a relação tensões-extensões do aço carbono a temperaturas elevadas. Na figura também é possível observar uma validação deste fator com vigas sólidas de vários comprimentos para as diferentes temperaturas demonstrando coerência com o fator de redução  $k_{y,\theta}$ .

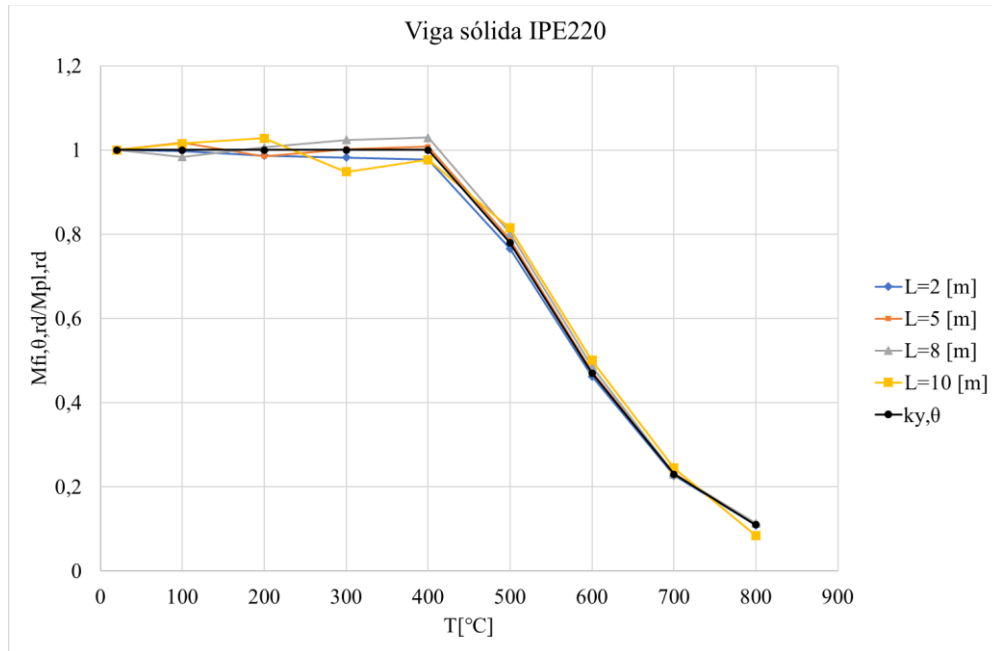


Figura 24 - Fator de redução  $k_{y,\theta}$  do aço carbono a temperaturas elevadas

### 3.2.1.1 Massa específica

A massa específica do aço  $\rho_a$  não varia de acordo com a temperatura e será um valor constante,  $\rho_a = 7850 [kg/m^3]$ .

### 3.2.2 Propriedades térmicas

#### 3.2.2.1 Extensão térmica

A extensão térmica do aço  $\Delta l/l$  deverá ser determinada a partir das seguintes expressões:

- para  $20 [^\circ\text{C}] \leq \theta_a < 750 [^\circ\text{C}]$ :

$$\frac{\Delta l}{l} = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 \times 10^{-4} \quad (8)$$

- para  $750 [^{\circ}\text{C}] \leq \theta_a < 860 [^{\circ}\text{C}]$ :

$$\frac{\Delta l}{l} = 1,1 \times 10^{-2} \quad (9)$$

- para  $860 [^{\circ}\text{C}] \leq \theta_a < 1200 [^{\circ}\text{C}]$ :

$$\frac{\Delta l}{l} = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3} \quad (10)$$

Onde  $l$  é o comprimento a uma temperatura de  $20 [^{\circ}\text{C}]$ ,  $\Delta l$  representa o alongamento introduzido pela temperatura e  $\theta_a$  é a temperatura do aço [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Na Figura 25 é representada a variação da extensão térmica relativa do aço carbono em função da temperatura.

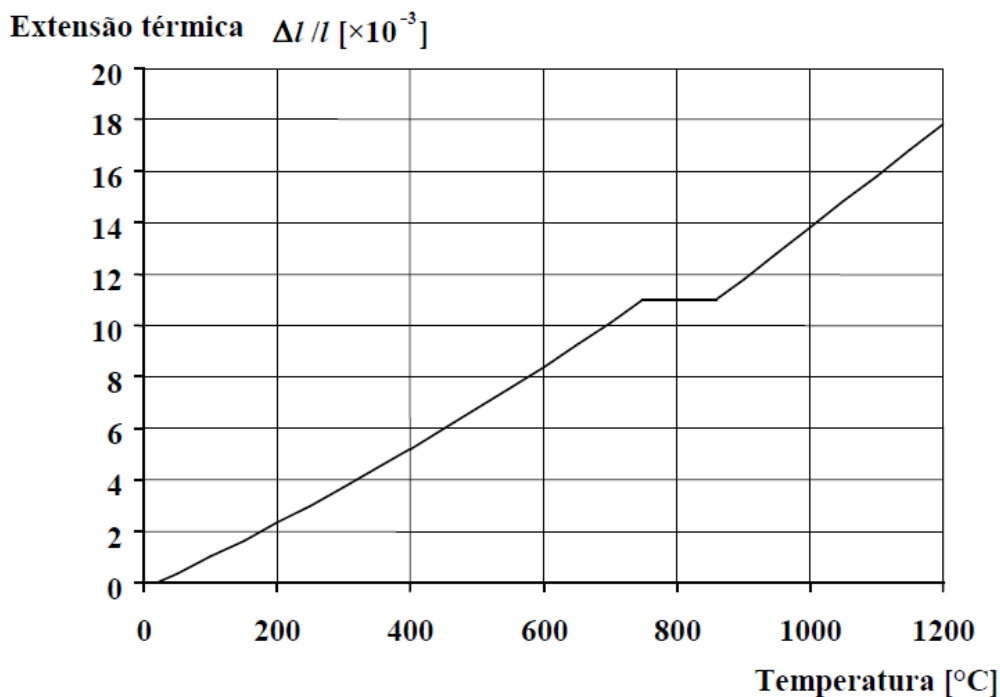


Figura 25 - Extensão térmica relativa do aço carbono em função da temperatura,[21]

### 3.3 Verificação de segurança para vigas sólidas e alveolares à temperatura ambiente

#### 3.3.1 Vigas Sólidas

Para a verificação de segurança das vigas sólidas para a encurvadura lateral torsional à temperatura ambiente devem ser cumpridas normas que estão referidas no Eurocódigo 3 parte 1-1,[20].

##### 3.3.1.1 Momento plástico resistente da secção transversal

O valor do cálculo do momento resistente plástico  $M_{pl,Rd}$  de uma secção transversal de Classe 1 ou 2 em relação a um dos seus eixos principais é determinado do seguinte modo:

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl}f_y}{\gamma_{M0}} \quad (11)$$

Onde  $W_{pl}$  representa o módulo plástico da secção transversal,  $f_y$  é a tensão de cedência do aço em questão e  $\gamma_{M0}$  é o coeficiente de segurança parcial e o valor recomendado pelo Eurocódigo para  $\gamma_{M0}$  é o seguinte:

$$\gamma_{M0} = 1$$

##### 3.3.1.2 Encurvadura lateral torsional

No sentido de verificar a resistência à encurvadura lateral torsional de uma viga sólida através do Eurocódigo 3 parte 1-1 deve ser calculado o momento resistente à encurvadura  $M_{b,Rd}$  de uma viga sem bloqueio lateral. Para isso deverá ser usada a Equação (12)

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT}W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (12)$$

Onde  $\chi_{LT}$  é o coeficiente de redução para a encurvadura lateral torsional.  $W_y$  é o módulo de flexão.  $f_y$  é a tensão de cedência do aço e  $\gamma_{M1}$  é o fator de segurança parcial para as propriedades materiais onde  $\gamma_{M1} = 1$ .

O módulo de flexão  $W_y$  deve ser considerado de forma adequada do seguinte modo:

$$W_y = W_{pl} \text{ para as secções transversais das Classes 1 ou 2.}$$

Onde  $W_{pl}$  é o módulo plástico das vigas sólidas e é calculado pela seguinte Equação (13),[10].

$$\begin{aligned}
 W_{pl} = & \frac{(t_w \times h^2)}{4} + (b - t_w) \times (h - t_f) \times t_f \\
 & + \left( \left( \frac{(4 - \pi)}{2} \right) \times r^2 \right) \times (h - 2 \times t_f) \\
 & + \left( \frac{(3 \times \pi - 10)}{3} \right) \times r^3
 \end{aligned} \tag{13}$$

Para as secções laminadas ou secções soldadas equivalentes que são sujeitas à flexão o Eurocódigo aponta as Equações (14) e (18) para o cálculo do coeficiente de redução para a resistência à encurvadura lateral  $\chi_{LT}$  e a esbelteza normalizada  $\bar{\lambda}_{LT}$ , respetivamente.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \tag{14}$$

em que:

$$\phi_{LT} = 0.5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \tag{15}$$

O valor do fator de imperfeição  $\alpha_{LT}$  deve ser consultado na Tabela 4 considerando a sua curva de encurvadura que pode ser classificada de acordo com a Tabela 5.

Para ter em conta a distribuição de momentos fletores entre os travamentos laterais dos elementos, o coeficiente de redução  $\chi_{LT}$  poderá ser modificado da seguinte forma:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \tag{16}$$

Para o coeficiente de redução modificado  $\chi_{LT,mod}$  o valor de  $f$  deverá tomar os seguintes valores:

$$f = 1 - 0,5 \times (1 - k_c) \times [1 - 2 \times (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \text{ mas } f \leq 1,0 \tag{17}$$

Onde o  $k_c$  é um fator de correção que assume o seu valor de acordo com a distribuição de momentos aplicada na viga em questão. Esse valor pode ser consultado na Tabela 6.









Tabela 4 – Valores dos fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura,[20]

Curva de encurvadura	a	b	c	d
Factor de imperfeição $\alpha_{LT}$	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabela 5 – Curvas de encurvadura lateral para secções transversais, [20]

Secção transversal	Limites	Curva de encurvadura
Secções em I laminadas	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Secções em I soldadas	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

Tabela 6 – Fatores de correção  $k_c$ , [20]

Distribuição de momentos	$k_c$
 $\psi = 1$	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

Para a esbelteza normalizada temos:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (18)$$

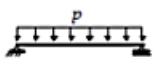

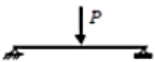

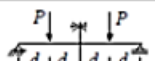

Para secções transversais duplamente simétricas o momento crítico elástico  $M_{cr}$  pode ser calculado através da Equação (19). Para o uso deste método a condição de restrição em cada extremidade da viga deve restringir o movimento lateral e a rotação em torno do eixo longitudinal.

O momento crítico elástico para a encurvadura  $M_{cr}$  deve ser calculado como demonstrado na Equação (19), de acordo com, [22].

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right\} \quad (19)$$

Onde  $C_1$  e  $C_2$  são coeficientes dependentes das cargas aplicadas e das condições de restrição como demonstrado na Tabela 7.  $k$  e  $k_w$  são fatores efetivos de comprimento.  $E$  é o módulo de Young e este deve assumir um valor de 210000 N/mm<sup>2</sup>.  $G$  é o módulo de corte (80770 N/mm<sup>2</sup>).  $I_z$  é o momento de menor inércia da secção.  $I_t$  é a constante de torsão e  $I_w$  é a constante de empenamento.

Tabela 7 – Coeficiente dependente da carga e da condição de restrição, [22]

Condições de restrição e carregamentos	Diagrama de momentos	$k_z$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
		1.0	1.12	0.45	0.525
		0.5	0.97	0.36	0.478
		1.0	1.35	0.59	0.411
		0.5	1.05	0.48	0.338
		1.0	1.04	0.42	0.562
		0.5	0.95	0.31	0.539

Para um caso comum em condições normais de apoio nas extremidades (apoio em forquilha),  $k$  e  $k_w$  tomam o valor igual a 1,0.

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \left\{ \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right\} \quad (20)$$

Quando o diagrama do momento fletor é constante ao longo de um segmento de um membro delimitado por restrições laterais, ou quando a carga transversal é aplicada no centro de corte, então  $C_2 z_g = 0$ .

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 G I_t}{\pi^2 E I_z}} \quad (21)$$

### 3.3.2 Vigas alveolares

Para verificar o momento resistente à ELT, o momento resistente plástico da secção transversal e o momento crítico das vigas alveolares devemos ter em consideração a sua geometria e calcular devidamente as propriedades geométricas destas vigas com furações, é utilizada a metodologia 2-Tê [7]. As propriedades são calculadas no centro do furo considerado a secção transversal igual a secção 2-Tê. É necessário examinar os momentos de inércia segundo os eixos de Y e de Z, a constante de empenamento  $I_{w,2T}$  e a constante torsional  $I_{t,2T}$ . Posteriormente, com as propriedades geométricas devidamente calculadas o módulo plástico da secção  $W_{pl,2T}$ , o momento crítico elástico e o momento resistente à encurvadura podem ser obtidos.

Para o momento de inércia segundo eixo de Y tem-se a Equação (22).

$$I_{y,2T} = 2 I_{y,1T} \quad (22)$$

Onde  $I_{y,1T}$ ,

$$I_{y,1T} = \left( \frac{(b t_f^3)}{12} + (t_f \times b) \left( \frac{d_0}{2} + h_{wt} + \frac{t_f}{2} \right)^2 \right) + \left( \frac{(t_w h_{wt}^3)}{12} + (t_w \times h_{wt}) \left( \frac{d_0}{2} + \frac{h_{wt}}{2} \right)^2 \right) \quad (23)$$

Onde  $I_{y,1T}$  representa o momento de inércia segundo o eixo de Y em 1 dos Tês da viga, calculado na secção transversal coincidente com o centro da furação.

Para calcular o momento de inércia segundo o eixo de Z temos a Equação (24).

$$I_{z,2T} = 2 I_{z,1T} \quad (24)$$

Onde  $I_{z,1T}$ ,

$$I_{z,1T} = \frac{(t_f b^3)}{12} + \frac{(h_{wt} t_w^3)}{12} \quad (25)$$

Onde  $I_{z,1T}$  representa o momento de inércia segundo o eixo de Z em 1 dos tees da viga, calculado na secção transversal coincidente com o centro da furação.

A constante de empenamento  $I_{w,2T}$  é calculada de acordo com a Equação (26),[17].

$$I_{w,2T} = \frac{I_{z,2T} \times (H - t_f)^2}{4} \quad (26)$$

A Equação (27) serve para calcular a constante torsional  $I_{t,2T}$ , calculada no centro de uma das aberturas de uma viga alveolar, [23].

$$I_{t,2T} = \frac{2}{3}b \times t_f^3 + \frac{1}{3} \times (H - 2 \times t_f - d_0) \times t_w^3 \quad (27)$$

O módulo plástico da secção para vigas alveolares  $W_{pl,2T}$  deve ser calculada de acordo com as propriedades geométricas da viga alveolar,  $W_{pl,2T}$  é calculado na secção 2-Tê coincidente com o centro de uma das aberturas, Equação (28).

$$W_{pl,2T} = W_{pl} - d_0 \times t_w \times \frac{d_0}{4} \quad (28)$$

### 3.4 Verificação de segurança para vigas sólidas e alveolares a elevadas temperaturas

O Eurocódigo 3 parte 1-2 oferece os meios necessários para a verificação da resistência de estruturas de aço em situações de elevadas temperaturas,[21].

#### 3.4.1 Momento plástico resistente da secção transversal

O valor de cálculo do momento resistente plástico  $M_{fi,\theta,Rd}$  de uma secção transversal da Classe 1 ou da Classe 2 com uma temperatura uniforme  $\theta_a$  deverá ser determinado a partir da Equação (29),[21]:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} [\gamma_{M0}/\gamma_{M,fi}] M_{pl,Rd} \quad (29)$$

Onde  $k_{y,\theta}$  é o fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura  $\theta_a$  e podem ser consultados na Tabela 3.  $M_{pl,Rd}$  é o valor do cálculo do momento plástico resistente da secção transversal, de acordo com EN 1993-1-1,[20].  $\gamma_{M,fi}$  é o fator de segurança parcial em situação de incêndio e deve assumir o valor de 1.

### 3.4.2 Encurvadura lateral torsional

Para calcular o valor do momento resistente à encurvadura lateral torsional a elevadas temperaturas  $M_{b,fi,t,Rd}$  no instante de  $t$  de um elemento sem travamento lateral com uma secção transversal da Classe 1 ou da Classe 2 deverá ser usada a Equação (30).

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{pl} k_{y,\theta,com} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (30)$$

Onde o fator de redução para a tensão de cedência do aço  $k_{y,\theta,com}$  à temperatura máxima no banzo comprimido  $\theta_{a,com}$  atingida no instante de  $t$  está definido na Tabela 3 e o fator de redução  $\chi_{LT,fi}$  pode ser determinado a partir da seguinte equação:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}} \quad (31)$$

com

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2 \right] \quad (32)$$

e

$$\alpha = 0.65 \sqrt{235/f_y} \quad (33)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} [k_{y,\theta,com}/k_{E,\theta,com}]^{0.5} \quad (34)$$

O fator de redução para a inclinação da reta  $k_{E,\theta,com}$  que representa o domínio elástico à temperatura máxima do aço no banzo comprimido  $\theta_{a,com}$  atingido no instante  $t$  pode ser consultado na Tabela 3,[21].

### 3.4.3 Proposta Vila Real

O EN 1993-1-2, [21], não toma em consideração a distribuição de momentos fletores entre os travamentos laterais. O mesmo não acontece para o EN 1993 1-1, [20], onde temos um fator de redução modificado  $\chi_{LT,mod}$  e tem em atenção a distribuição de momentos fletores entre os travamentos laterais. Vila Real et al, [24], realizaram um estudo numérico onde é demonstrado que é igualmente importante considerar um momento fletor não-uniforme para o cálculo da resistência à encurvadura lateral torsional em situação de incêndio tal como é considerado em temperatura ambiente. Foi proposto um coeficiente de redução modificado para a ELT  $\chi_{LT,fi,mod}$  em situação de incêndio dado pela Equação (35):

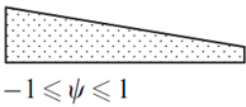


$$\chi_{LT,fi,mod} = \frac{\chi_{LT,fi}}{f} \text{ mas } \chi_{LT,fi,mod} \leq 1 \quad (35)$$

com

$$f = 1 - 0.5(1 - k_c) \quad (36)$$

Onde  $f$  depende do tipo de carregamento e o fator de correção  $k_c$  pode ser consultada na Tabela 8.

Tabela 8 – Fatores de correção  $k_c$ , [24]

	Distribuição de momentos	Secções Classe 1, 2, 3 $k_c$
A	 $-1 \leq \psi \leq 1$	$0.6 + 0.3\psi + 0.15\psi^2$ mas $k_c \leq 1$
B		0.79
C		0.91

Nota: para outros diagramas  $k_c = 1$ .

### 3.5 Resistência plástica das vigas sólidas e alveolares

Para o cálculo da resistência plástica das vigas foram utilizadas as expressões descritas nos capítulos 3.3 e 3.4. Esses resultados podem ser vistos na Tabela 1. O caso MR (modelo de referência) apresenta propriedades geométricas intermédias dos casos estudados para as vigas alveolares, onde  $H=1,5$ ,  $d_0=1,2h$  e  $S=1,2d_0$ .

Tabela 9 - Resultados obtidos da resistência plástica através dos métodos simplificados para cada caso

Caso	Tipo	H	$d_0$	S	$M_{pl,Rd}$ [kNm]
VS	Sólida	h	-	-	99
VS-1,4h	Sólida	1,4h	-	-	154,1
VS-1,5h	Sólida	1,5h	-	-	169,1
VS-1,6h	Sólida	1,6h	-	-	184,7
MR	Alveolar	1,5h	1,2h	$1,2d_0$	132,6
H=1,4h	Alveolar	1,4h	1,2h	$1,2d_0$	117,6
H=1,6h	Alveolar	1,6h	1,2h	$1,2d_0$	148,2
$d_0=1,1h$	Alveolar	1,5h	1,1h	$1,2d_0$	138,5
$d_0=1,3h$	Alveolar	1,5h	1,3h	$1,2d_0$	126,3
$S=1,1d_0$	Alveolar	1,5h	1,2h	$1,1d_0$	132,6
$S=1,3d_0$	Alveolar	1,5h	1,2h	$1,3d_0$	132,6

Nas vigas sólidas podemos verificar que a resistência plástica aumenta em função da altura do perfil. Isto deve-se ao facto de existir um aumento da área da secção transversal e assim o valor do módulo plástico é aumentado e consecutivamente o valor da resistência plástica da secção transversal. Na Figura 26 podemos comparar os valores da resistência plástica da secção transversal de forma gráfica, para as diferentes temperaturas e também são inseridos os valores do MR das vigas alveolares para propósitos de comparação.

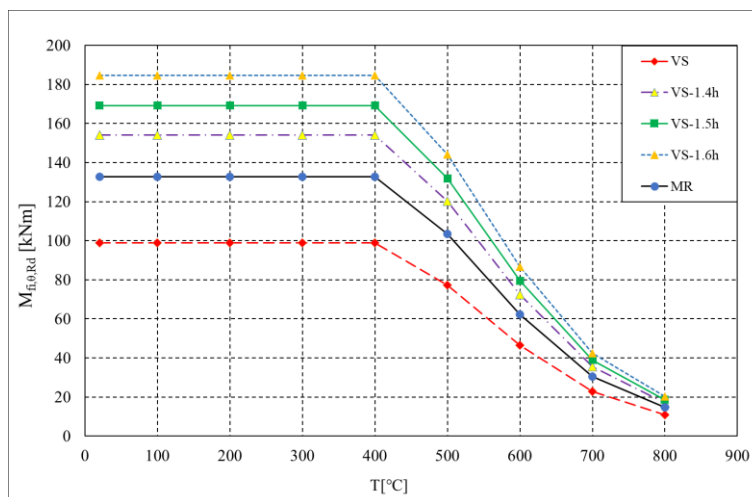


Figura 26 - Resistência plástica da secção transversal das vigas sólidas em estudo para as diferentes temperaturas

Para as vigas alveolares é preciso ter em atenção a forma de cálculo que foi utilizada para obtenção do valor do módulo plástico da secção, onde, por questões de simplificação, o módulo plástico foi calculado considerando apenas a secção 2-Tê ao longo de todo o comprimento da viga, tal como demonstrado na expressão (28). Assim sendo, é possível observar um aumento da resistência plástica quando o valor de H é aumentado, pois existe um aumento na área da secção 2-Tê, Figura 27.

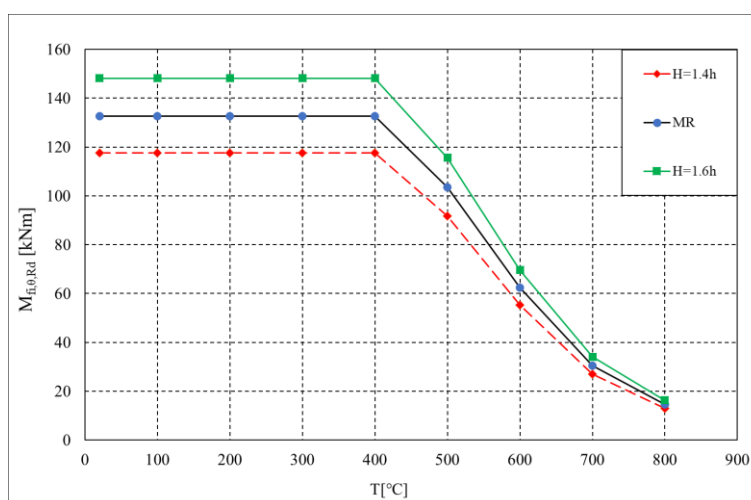


Figura 27 - Resistência plástica da secção 2-Tê das vigas alveolares para as diferentes temperaturas variando a sua altura H

Quando existe um aumento da dimensão da abertura  $d_0$  podemos verificar que existe uma diminuição da resistência plástica da secção transversal, isto deve-se ao facto de existir

uma diminuição da área da secção 2-Tê e dessa forma a obtenção do valor da capacidade resistente da secção será menor, Figura 28.

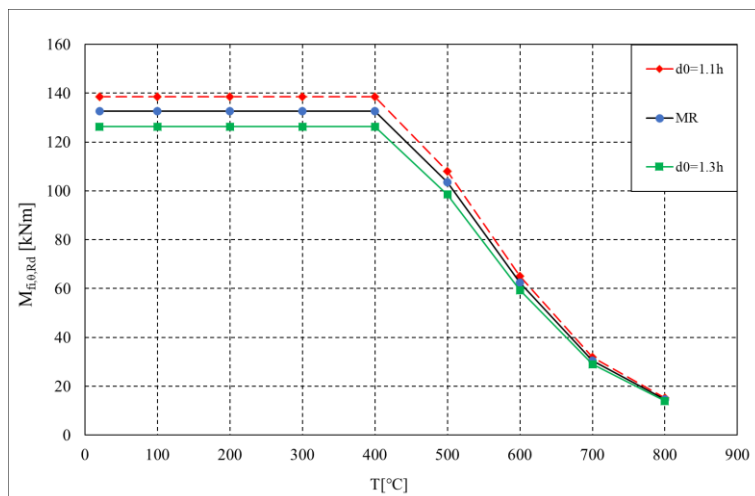


Figura 28 - Resistência plástica da secção 2-Tê das vigas alveolares para as diferentes temperaturas variando o tamanho das aberturas  $d_0$

Para os casos onde o valor do espaçamento entre aberturas  $S$  é alterado os valores da resistência plástica permanecem constantes, exatamente pela razão explicada acima, nestes casos apenas a largura do montante da alma é aumentada mas a área da secção 2-Tê permanece constante, pois não existe um aumento ou uma diminuição no tamanho das aberturas na alma o que faz com que o valor calculado de  $W_{pl,y,2T}$  seja constante e consecutivamente não irá existir uma diferença nos resultados obtidos para a resistência plástica. No gráfico da Figura 29 podemos verificar a sobreposição do valor da resistência plástica para os diferentes valores do espaçamento entre aberturas.

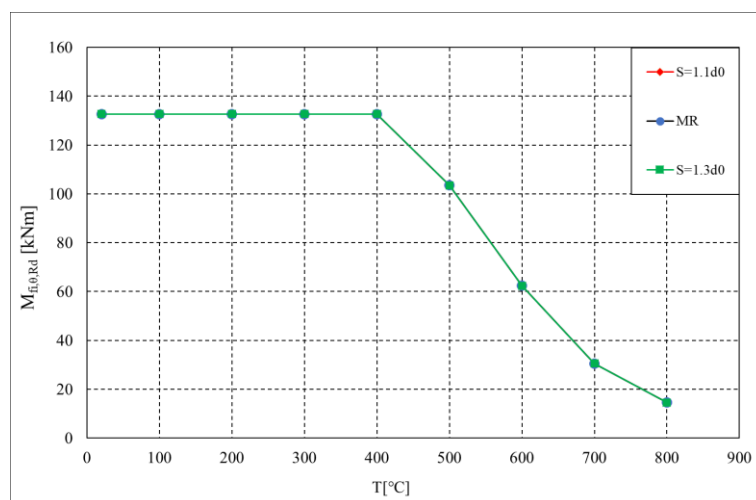


Figura 29 - - Resistência plástica da secção 2-Tê das vigas alveolares para as diferentes temperaturas variando o espaçamento entre aberturas  $S$

# Capítulo 4: Análise numérica das vigas à temperatura ambiente e elevadas temperaturas

---

## 4.1 Casos estudados

Esta dissertação tem como objetivo o estudo da instabilidade global e local de vigas alveolares em elevadas temperaturas através de um *software* de elementos finitos (ANSYS) e comparar os resultados numéricos com os métodos simplificados do Eurocódigo 1-1 e Eurocódigo 1-2. Através do catálogo da ArcelorMittal, [10] foi escolhido um perfil IPE 220 de aço S355 como viga paterna para a criação das vigas alveolares. Esta viga sólida apresenta as seguintes dimensões:

- $h = 220 \text{ mm}$
- $b = 110 \text{ mm}$
- $t_f = 9.2 \text{ mm}$
- $t_w = 5.9 \text{ mm}$

As vigas alveolares que foram estudadas apresentam as seguintes relações geométricas:

- $H = 1,4h, 1,5h, 1,6h$
- $d_0 = 1,1h, 1,2h, 1,3h$
- $S = 1,1d_0, 1,2d_0, 1,3d_0$

Onde  $H$  representa a altura da secção transversal,  $h$  a altura da secção transversal do perfil paterna,  $d_0$  o diâmetro de furação existente na alma e por fim,  $S$  o espaçamento dado entre as furações existentes na alma.

Foram também realizadas simulações de vigas sólidas com as mesmas propriedades geométricas  $H$ , sendo que estas vigas não têm furações na sua alma. Posto isto, estudaram-se as vigas sólidas com as propriedades geométricas  $H$ :

- $H = h, 1,4h, 1,5h, 1,6h$

A Tabela 10 demonstra todos os casos estudados com os diferentes tipos de vigas, propriedades geométricas e temperaturas. Como já mencionado anteriormente, o caso MR (modelo de referência) apresenta propriedades geométricas intermédias dos casos estudados para as vigas alveolares, onde  $H=1,5$ ,  $d_0=1,2h$  e  $S=1,2d_0$ . Este modelo servirá para comparação de resultados, tal como o próprio nome indica, será um modelo de referência.

Tabela 10 - Casos estudados para vigas alveolares e vigas sólidas

Caso	Tipo	H	$d_0$	S	L[m]	$\theta_a$ [°C]
VS	Sólida	h	-	-	1-10	20,500-700
VS-1,4h	Sólida	1,4h	-	-	1-10	20,500-700
VS-1,5h	Sólida	1,5h	-	-	1-10	20,500-700
VS-1,6h	Sólida	1,6h	-	-	1-10	20,500-700
MR	Alveolar	1,5h	1,2h	$1,2d_0$	1-3,5,7,9,10	20,500-700
H=1,4h	Alveolar	1,4h	1,2h	$1,2d_0$	1-3,5,7,9,10	20,500-700
H=1,6h	Alveolar	1,6h	1,2h	$1,2d_0$	1-3,5,7,9,10	20,500-700
$d_0=1,1h$	Alveolar	1,5h	1,1h	$1,2d_0$	1-3,5,7,9,10	20,500-700
$d_0=1,3h$	Alveolar	1,5h	1,3h	$1,2d_0$	1-3,5,7,9,10	20,500-700
$S=1,1d_0$	Alveolar	1,5h	1,2h	$1,1d_0$	1-3,5,7,9,10	20,500-700
$S=1,3d_0$	Alveolar	1,5h	1,2h	$1,3d_0$	1-3,5,7,9,10	20,500-700

Para as temperaturas elevadas optou-se por estudar casos de 500, 600 e 700 [°C], pois estas representam temperaturas críticas. Para que fosse possível comparar a resistência de encurvadura entre vigas sem estarem submetidas a elevadas temperaturas também se realizaram simulações onde foi aplicada temperatura ambiente de 20[°C].

No total, realizaram-se 356 simulações de vigas alveolares e vigas sólidas

#### 4.2 Modelação numérica em ANSYS

O *software* de elementos finitos ANSYS foi usado para investigar o momento fletor resistente das secções transversais e também para determinar o momento resistente à encurvadura lateral torsional, das vigas sólidas como das vigas alveolares. Para os modelos numéricos foi usado o elemento finito SHELL181. Este elemento finito apresenta quatro nós

com seis graus de liberdade por nó que são translações e rotações nos eixos de X, Y e Z, respetivamente Figura 30.

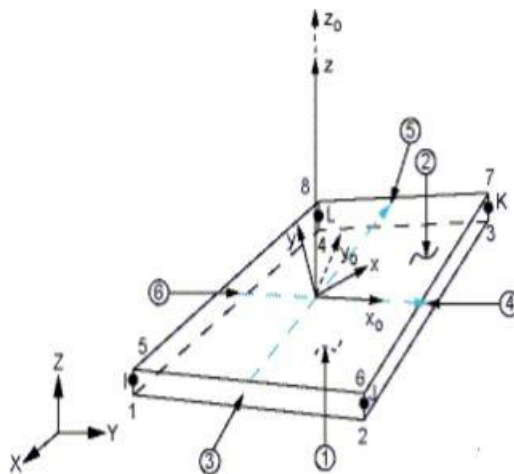


Figura 30 - Elemento finito SHELL181,[25]

As propriedades adotadas para estes modelos foram 210 GPa para o módulo de elasticidade, uma tensão de cedência  $f_y$  de 355 MPa e um coeficiente de Poisson no valor de 0.3. Foi aplicada uma carga uniformemente distribuída nos nós (Figura 31) variando de forma linear de acordo com o tempo ( $q = 100t$ ) e uma distribuição de temperatura constante em todos os elementos. Foram criadas placas de extremidade para assegurar que a plastificação não ocorresse nas extremidades das vigas junto aos apoios. Optou-se por aplicar uma malha com um tamanho de 0.02 [m], na Figura 32 é representada a malha com as propriedades geométricas do modelo de referência.

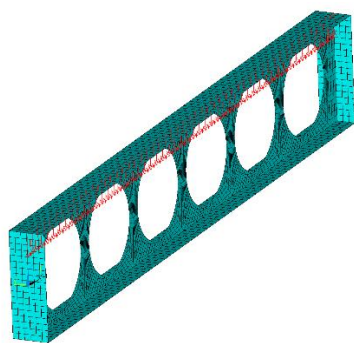


Figura 31 - Carga uniformemente distribuída no modelo de uma viga alveolar

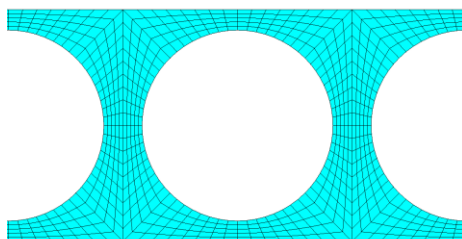


Figura 32 - Representação da malha do MR

As condições de fronteira foram aplicadas para a viga simplesmente apoiada, foram adicionados apoios de forquilha nas extremidades das vigas e para que fosse possível obter resultados de forma simétrica foi implementado uma restrição a meio vão de forma a impedir o deslocamento da secção transversal no sentido do comprimento da viga Figura 33. A Tabela 11 demonstra os graus de liberdade existentes para as condições de fronteira aplicadas.

Como esta tese está focada em estudar a resistência à encurvadura lateral torsional de vigas alveolares ainda foram adicionadas outras restrições para tentar garantir que a viga sofresse este tipo de colapso, foram feitos acoplamentos entre nós localizados na secção transversal e nas secções 2-Tê ao longo da viga, ou seja, os acoplamentos foram aplicadas sempre com espaçamento de  $S/2$  entre eles, como demonstrado na Figura 34. O comando que foi utilizado para esta implementação de restrições é o comando CP, nos Anexos A pode ser encontrado a estrutura do código utilizado para a elaboração de todo o modelo em ANSYS e pode ser observada a forma de implementação deste comando. Estes acoplamentos entre nós têm a função de restringir os deslocamentos da rotação em torno do eixo de X (Figura 9) entre os nós selecionados. Na Tabela 12 são demonstrados os graus de liberdade existentes entre os nós de cada acoplamento feito.

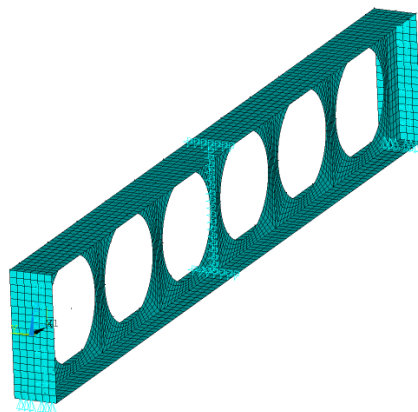


Figura 33 - Condições de fronteira implementadas sem acoplamentos dos nós no modelo de uma viga alveolar

Tabela 11 - Condições de fronteira e os seus graus de liberdade

Localização no eixo de X [m]	UX	UY	UZ	ROTX	ROTY	ROTZ
0 (origem da viga)	Livre	Fixo	Fixo	Livre	Livre	Livre
L/2 (meio vão)	Fixo	Livre	Livre	Livre	Livre	Livre
L (fim da viga)	Livre	Fixo	Livre	Livre	Livre	Livre

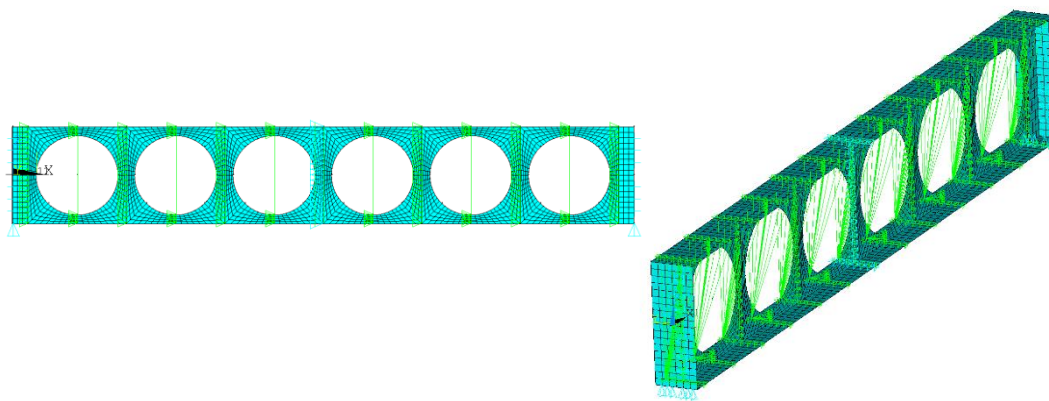


Figura 34 - Condições de fronteira com os acoplamentos entre nós implementados numa viga alveolar

Tabela 12 - Graus de liberdade dos acoplamentos entre nós

UX	UY	UZ	ROTX	ROTY	ROTZ
Livre	Livre	Livre	Fixo	Livre	Livre

Foram implementadas imperfeições geométricas segundo o método de valores e vetores próprios através do primeiro modo de instabilidade global da viga que acompanha a configuração de meia curva sinusoidal, este modo de instabilidade apresentava sempre o comportamento da encurvadura lateral torsional. Assim, são incluídas deformações nos banzos e na alma. Para todos os modelos o valor da imperfeição geométrica implementado foi com uma amplitude máxima de  $L/1000$  a meio vão, tanto para vigas sólidas como para vigas alveolares. O modo de instabilidade para a aplicação da imperfeição geométrica pode ser observado na Figura 35 e nos Anexos E podem ser consultados todos os modos de instabilidade utilizados para a implementação das imperfeições geométricas de todas as simulações realizadas deste trabalho.

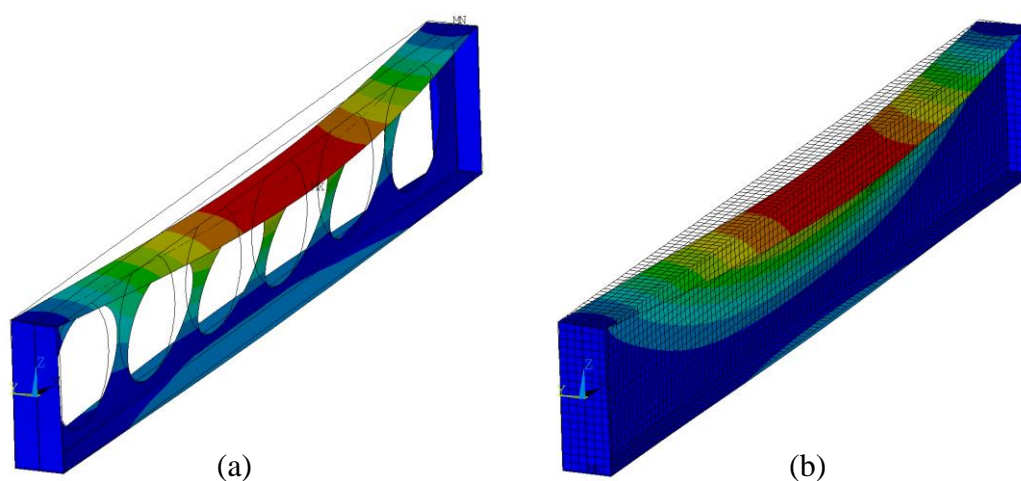


Figura 35 - Modo de instabilidade para a imperfeição geométrica em (a) viga alveolar (b) viga sólida

Para as imperfeições do material, em relação as vigas alveolares optou-se por utilizar um padrão de tensões residuais onde as tensões máximas equivalem a 30% da tensão de cedência dos material e onde a alma está livre de tensões devido a consideração da libertação de tensões durante o processo de corte para a abertura das almas tal como descritos na secção 2.3.2 , a Figura 36 demonstra este tipo de padrão de tensões residuais aplicado no modelo de elementos finitos para vigas alveolares. É de acrescentar que é de extrema importância a consideração de imperfeições materiais para uma correta análise de resistência das vigas, especialmente nos banzos, pois são estes elementos que estão submetidos a elevados esforços de compressão e tração quando as vigas estão sujeitas a carregamentos.

Para as vigas sólidas, o padrão de tensões residuais utilizado para a implementação das imperfeições materiais segue o padrão descrito pela ECCS, onde as tensões máximas aplicadas correspondem a 30% da tensão de cedência do material, estas tensões estão

aplicadas tanto nos banzos como na alma tal como descrito na secção 2.3.1 , é possível observar este padrão de tensões residuais implementada numa viga sólida no modelo de elementos finitos na Figura 37.

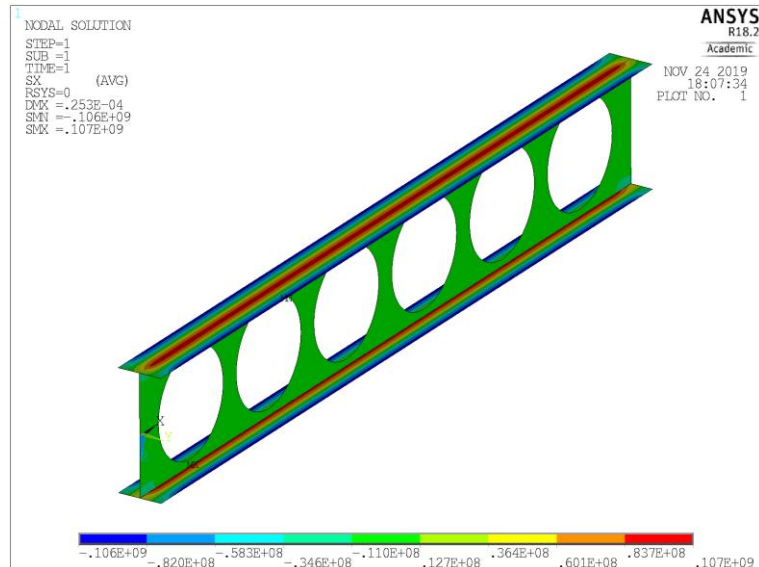


Figura 36 - Padrão de tensões residuais implementado em vigas alveolares

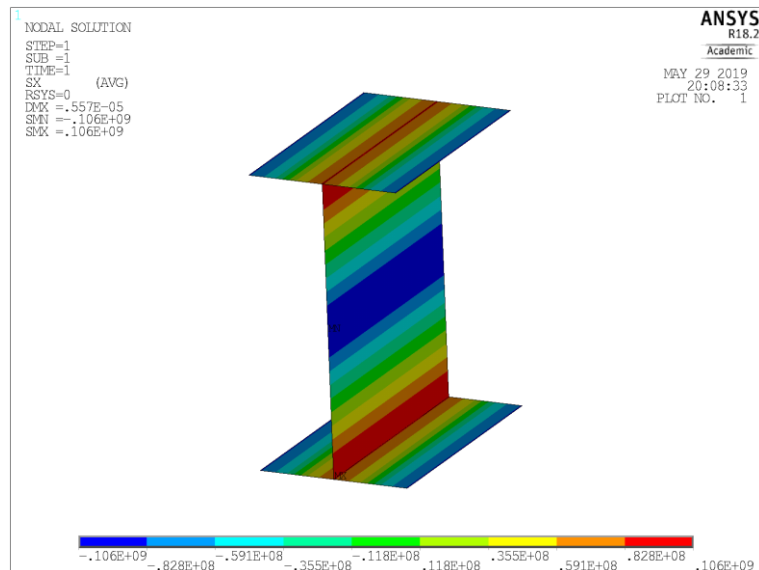


Figura 37 - Padrão de tensões residuais implementado em vigas sólidas

### 4.3 Análise dos resultados dos métodos simplificados e numéricos

Foram realizadas simulações conforme descritas no capítulo acima para todos os casos mencionados no capítulo 4.1 , para a possível análise das resistências das vigas em estudo. Para além das simulações realizadas em ANSYS também foram utilizados os métodos simplificados do Eurocódigo 3 parte 1-1 e parte 1-2. Como já foi anteriormente

mencionado as vigas sólidas também foram analisadas para este estudo, mas não são o foco principal deste trabalho, elas foram analisadas unicamente para ter um ponto de comparação entre vigas alveolares e vigas sólidas.

#### 4.3.1 Momento crítico das vigas sólidas e alveolares

Foram calculados os momentos críticos para os casos em estudo das vigas alveolares e vigas sólidas, estes momentos críticos foram obtidos através do valor da carga crítica que é fornecido pela análise do modo de instabilidade. Também foram calculados os momentos críticos pelos métodos simplificados tal como descrito na secção 3.3.1.2 e 3.3.2 . O momento crítico para as vigas sólidas é calculado de acordo com a sua secção transversal enquanto que para as vigas alveolares o momento crítico é calculado apenas tomando em consideração a secção 2-Tê, ou seja, para os cálculos analíticos existe um desprezo do montante da alma que une a secção Tê superior da secção Tê inferior, seguindo desta maneira a metodologia 2-Tê. Todos os valores dos momentos críticos obtidos de forma numérica e analítica podem ser consultados em Anexos B.

Na Figura 38 é demonstrado como a altura da secção diferencia os valores do momento crítico para as vigas sólidas. Consegue-se perceber que quanto maior a altura da secção da viga maior será o valor do momento crítico. É feita uma comparação entre os resultados obtidos pelo ANSYS e pelos métodos simplificados do Eurocódigo 3.

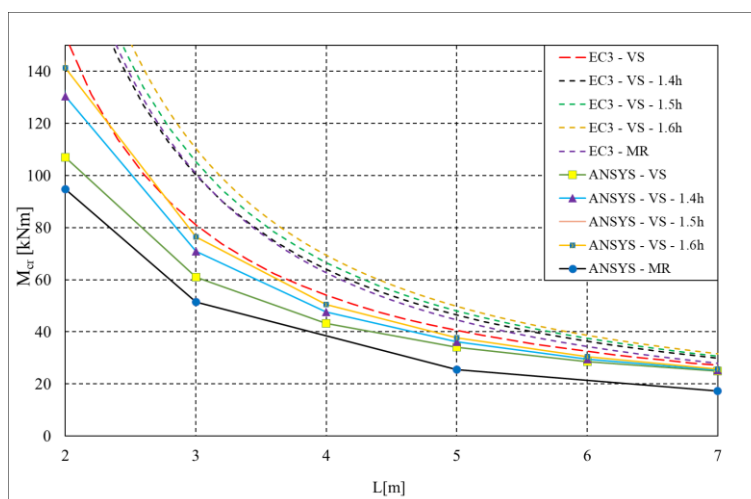


Figura 38 – Momento crítico dos resultados obtidos pelo Eurocódigo 3 e pelo método numérico para as vigas sólidas em relação a H

A mesma comparação foi feita para as vigas alveolares, é possível observar o mesmo comportamento, quanto maior a altura da secção da viga alveolar maior será o valor do momento crítico, mas fica evidente que para os casos em estudo a influência da altura da secção das vigas alveolares não cria uma diferença tão significativa para o momento crítico quando comparado com a das vigas sólidas, Figura 39.

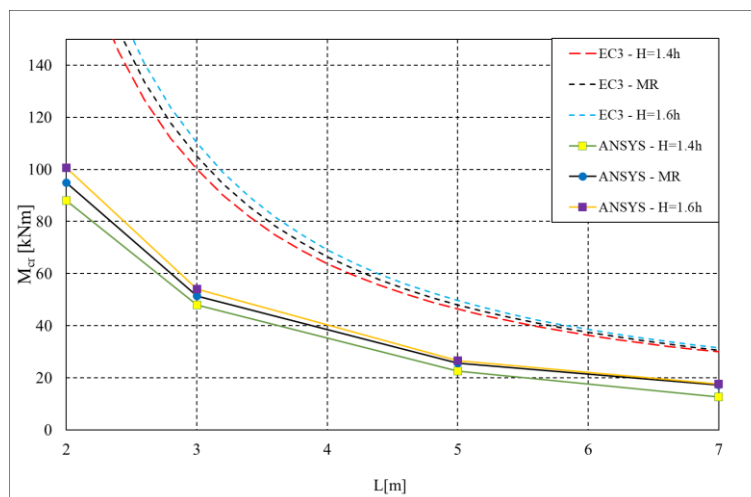


Figura 39 - Momento crítico dos resultados obtidos pelo Eurocódigo 3 e pelo método numérico para as vigas alveolares em relação a H

Na Figura 40 estão apresentados os resultados numéricos e analíticos dos momentos críticos onde o parâmetro geométrico  $d_0$  é variado. O momento crítico obtido analiticamente foi calculado tendo em consideração a secção 2-Tê. Os resultados numéricos apresentam diferenças mínimas e pode afirmar-se que para os casos em estudo o parâmetro geométrico  $d_0$  pouco altera a curva do momento crítico. Mesmo para os resultados analíticos obteve-se uma diferença insignificante e podemos dizer que para os casos em estudo a alteração do parâmetro geométrico  $d_0$  praticamente não influencia a curva do momento crítico.

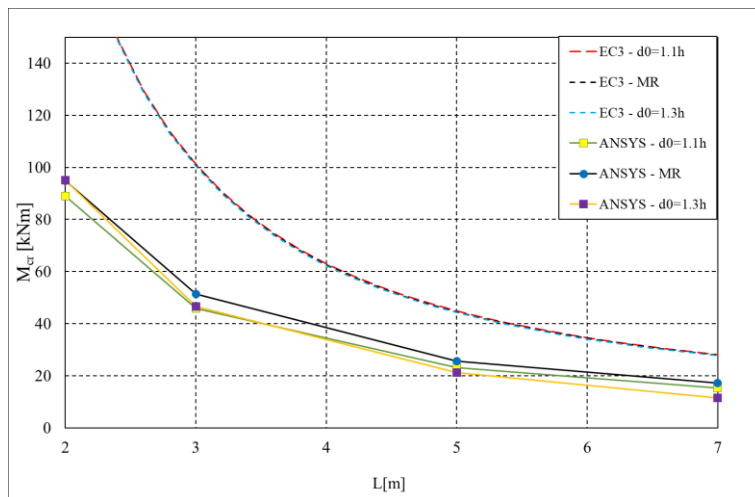


Figura 40 - Momento crítico dos resultados obtidos pelo Eurocódigo 3 e pelo método numérico para as vigas alveolares em relação a  $d_0$

Quando analisamos o momento crítico dos dados obtidos numericamente onde o espaçamento entre aberturas é variado é possível observar que existem menores diferenças entre  $S=1,3d_0$  e  $S=1,2d_0$  quando comparado com  $S=1,1d_0$  onde o valor do momento crítico é menor mas mais uma vez as diferenças entre os valores dos momentos críticos com os diferentes parâmetros geométricos são relativamente pequenas, pois as diferenças entre as propriedades geométricas em estudo também são relativamente pequenas.

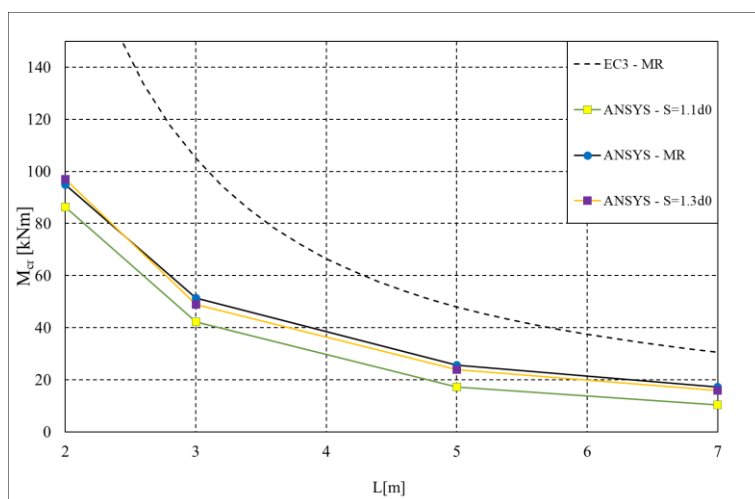


Figura 41 - Momento crítico dos resultados obtidos pelo Eurocódigo 3 e pelo método numérico para as vigas alveolares em relação a S

Fica claro que os valores do momento crítico obtidos através da análise numérica do ANSYS seguem a tendência de serem menores quando comparados com os valores obtidos de forma analítica pelas equações do Eurocódigo 3 que toma em consideração a secção 2-

Tê. Em resposta foi feito um gráfico onde se encontram todos os resultados obtidos do momento crítico das vigas sólidas e alveolares em estudo de forma normalizada e na Figura 42 podemos verificar conformidade entre os momentos críticos do método numérico e a curva do momento crítico obtida pelo Eurocódigo 3.

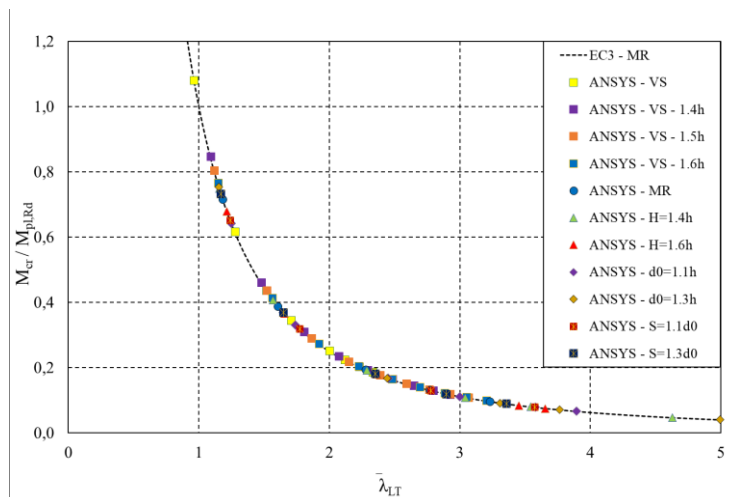


Figura 42 – Curva do momento crítico – comparação entre resultados numéricos e analítico de forma normalizada

#### 4.3.2 Análise do modo de colapso das vigas alveolares

Para uma melhor compreensão dos resultados numéricos em relação à resistência à encurvadura deve ser feito primeiramente uma análise dos modos de colapso que ocorrem, variando o comprimento e a temperatura. Para determinar o modo de colapso é verificado a deformada final com a distribuição das tensões Von Misses. Nos Anexos F podem ser analisadas todas as imagens da deformada final com a distribuição das tensões Von Misses para todos os casos em estudo das vigas alveolares.

Na Figura 43 estão representadas vigas do caso MR. É possível identificar dois diferentes modos de colapso. Para a viga de 1 [m] à temperatura ambiente, existe formação de rótulas plásticas em torno das aberturas e fica evidente que o modo de colapso dá-se pelo mecanismo de Vierendeel e não por encurvadura lateral torsional, verifica-se também que as tensões máximas correspondem ao valor da tensão de cedência do material. Com o aumento da temperatura a 700 [C°] consegue-se notar uma diminuição das tensões devido ao efeito da expansão térmica, contudo, ainda é possível identificar que existe formação de rótulas plásticas e que o mecanismo Vierendeel é o modo de colapso dominante para este caso. Este caso prova a ineficiência da implementação do acoplamento entre nós como

discutido no capítulo 4.2 que tinha como objetivo levar as vigas alveolares a sofrer um colapso por encurvadura lateral torsional. Com o aumento do comprimento o modo de colapso passa a se manifestar por encurvadura lateral torsional, Figura 45 (c) e (d). No caso da viga de 10 [m] a 700 [C°] a viga continua a sofrer encurvadura lateral torsional, a Figura 44 demonstra com clareza que a viga tem um comportamento de encurvadura lateral torsional. Devido à elevada temperatura e elevada esbelteza desta viga o colapso surge muito rapidamente, não permitindo a viga a experienciar grandes deslocamentos laterais e verticais.

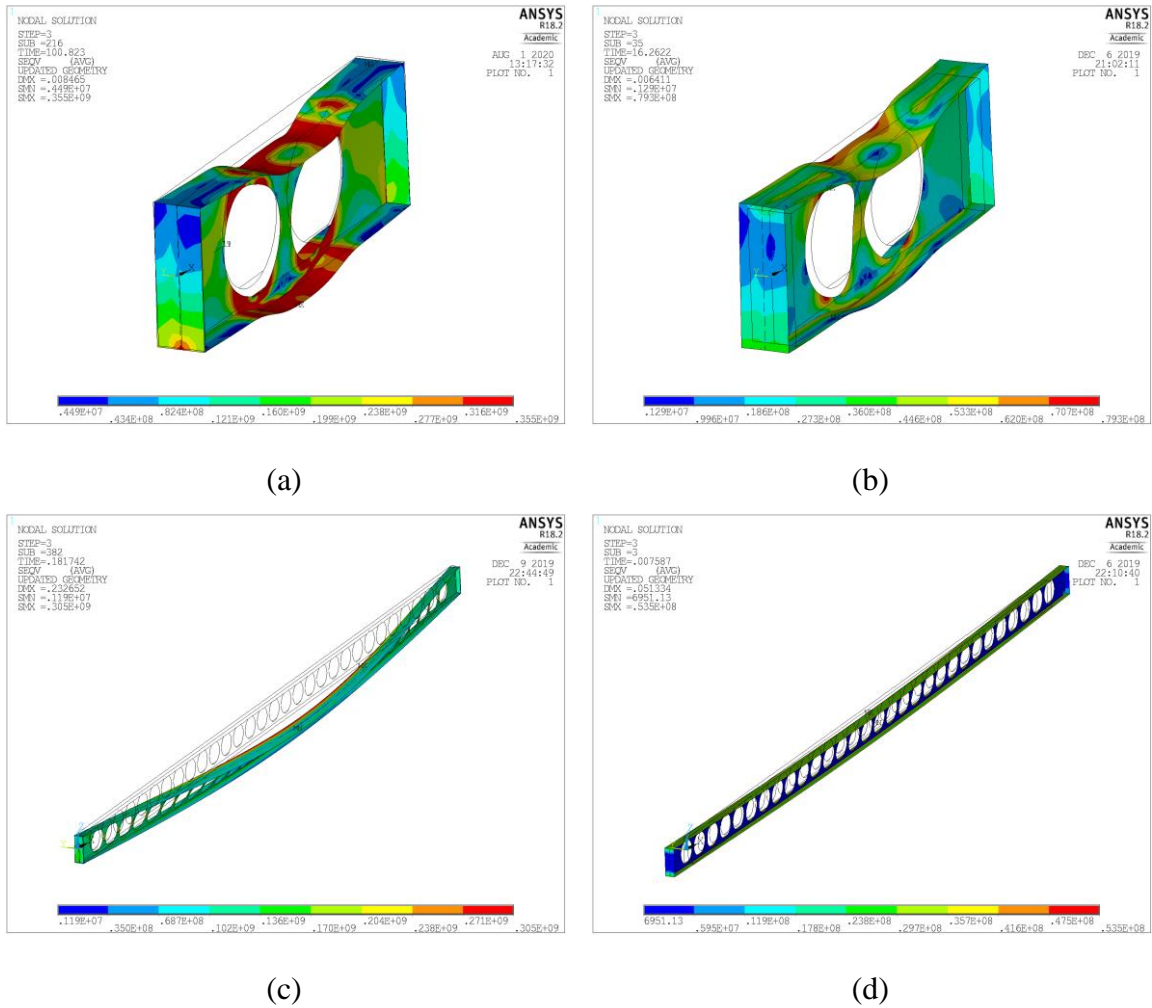


Figura 43 - Distribuição das tensões Von Mises do caso MR: (a) L=1 [m] 20 [C°], (b) L=1 [m] 700 [C°], (c) L=10 [m] 20 [C°], (d) L=10 [m] 700 [C°]

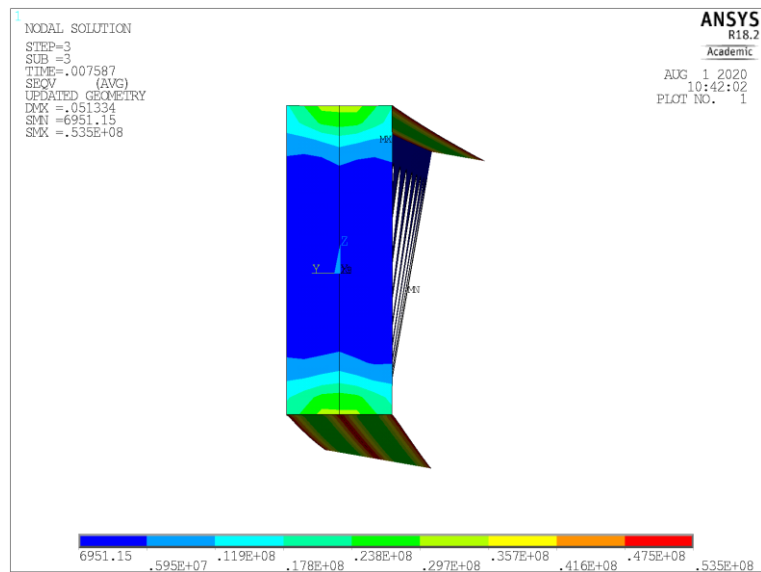


Figura 44 – Vista lateral - Distribuição das tensões Von Mises do caso MR 10[m] 700 [°C]

Para o caso  $H=1,4h$ , é possível identificar o mecanismo de Vierendeel para a viga de 1 [m] (Figura 45 (a)) e é verificado que a elevadas temperaturas esse o modo de colapso se mantém, mas com menos intensidade. O mesmo acontece para uma viga de 2 [m], mas para este caso existe uma transição do modo de colapso, com o aumento da temperatura o modo de colapso altera do mecanismo Vierendeel para encurvadura lateral torsional como demonstrado em Anexos F. Para os restantes casos onde o comprimento é aumentado identifica-se um colapso por encurvadura lateral torsional.

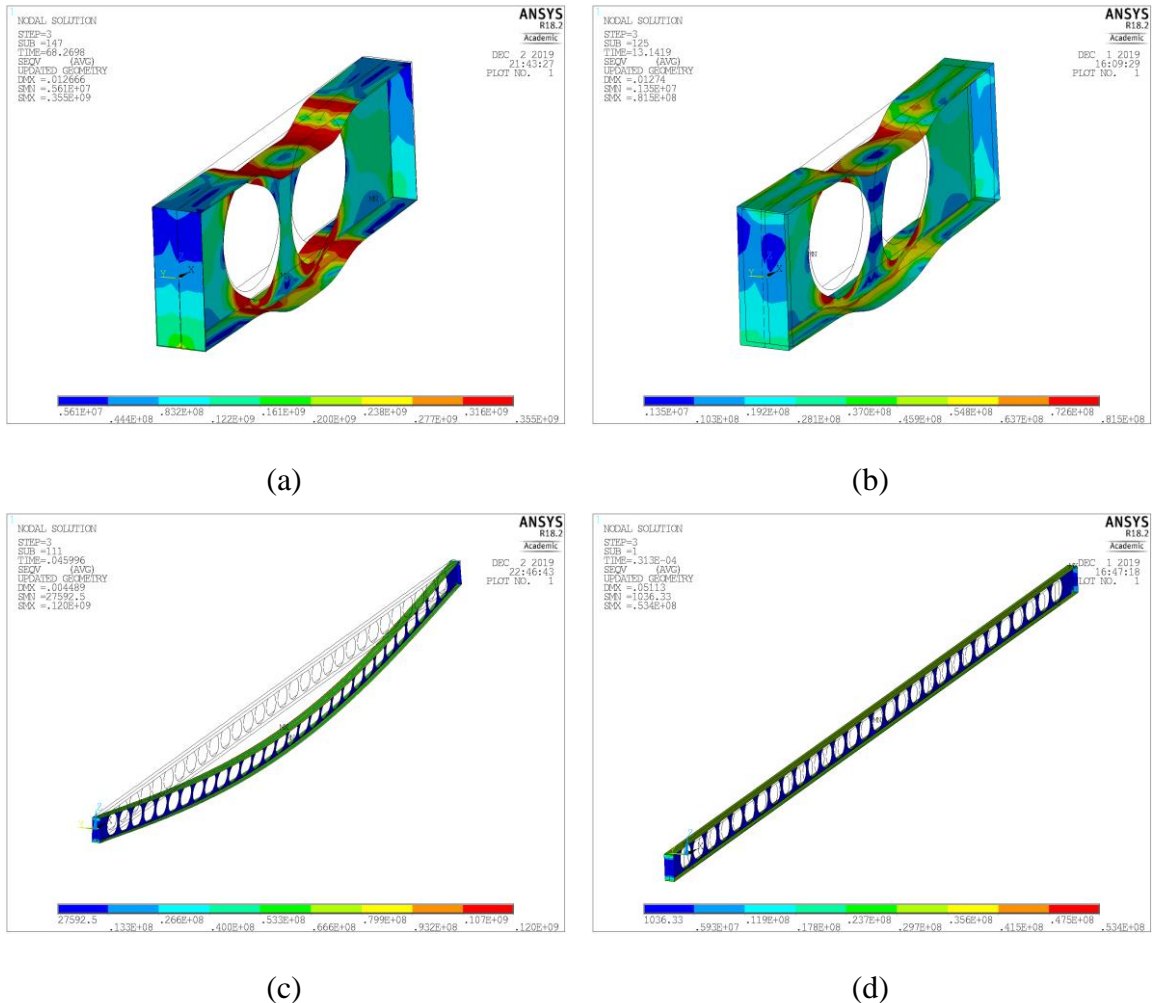


Figura 45 - Distribuição das tensões Von Mises do caso H=1,4h: (a) L=1 [m] 20 [C°], (b) L=1 [m] 700 [C°], (c) L=10 [m] 20 [C°], (d) L=10 [m] 700 [C°]

Na Figura 46 podemos observar o caso em estudo com maior altura de secção transversal, H=1,6h. Para a viga com menor esbelteza deste caso 1 [m] a viga continua a colapsar por formações de rótulas plásticas em redor das aberturas, isto acontece para temperatura ambiente até a uma temperatura de 700 [C°]. No caso da viga de 1 [m] com o aumento da temperatura também se verifica o aparecimento de tensões no montante da alma localizado entre as aberturas, desse modo, demonstrando vestígios de uma encurvadura do montante da alma. Para as vigas de maior comprimento, seja temperatura ambiente ou temperaturas elevadas, passamos a ter um colapso por encurvadura lateral torsional.

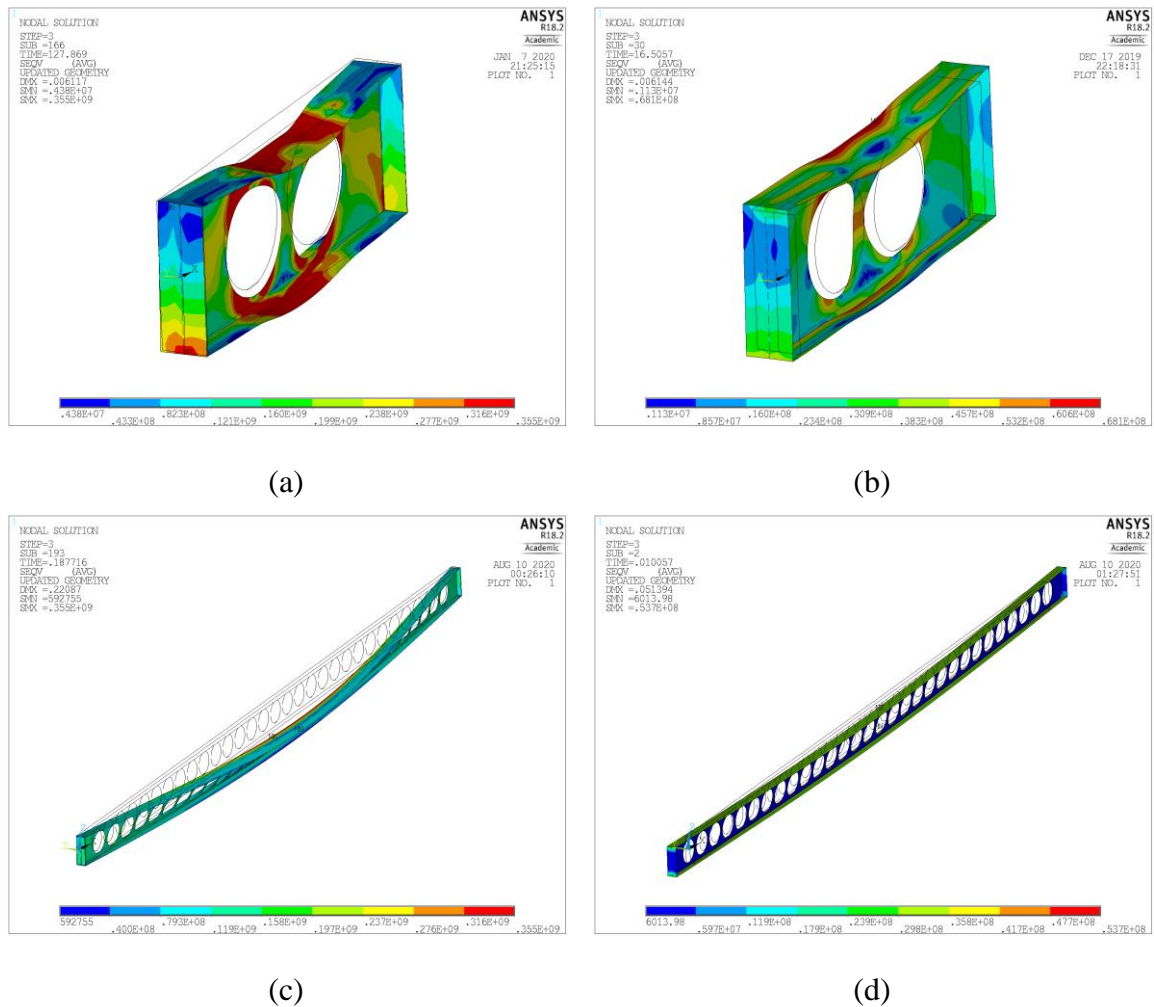


Figura 46 - Distribuição das tensões Von Misses do caso  $H=1,6h$ : (a)  $L=1$  [m]  $20$  [C°], (b)  $L=1$  [m]  $700$  [C°], (c)  $L=10$  [m]  $20$  [C°], (d)  $L=10$  [m]  $700$  [C°]

Para o caso  $d_0 = 1,1h$  com o comprimento de  $1$  [m] continuamos a encontrar a formações de rótulas plásticas em torno das aberturas fazendo com que a viga sofra de um colapso pelo mecanismo Vierendeel, isso prevalece com o aumento da temperatura embora seja com menos intensidade, Figura 47. É preciso acrescentar que também se encontram indícios de uma encurvadura do montante da alma pois é possível encontrar tensões no montante da alma entre as furações existentes. Quando o comprimento é aumentado o colapso dá-se por encurvadura lateral torsional.

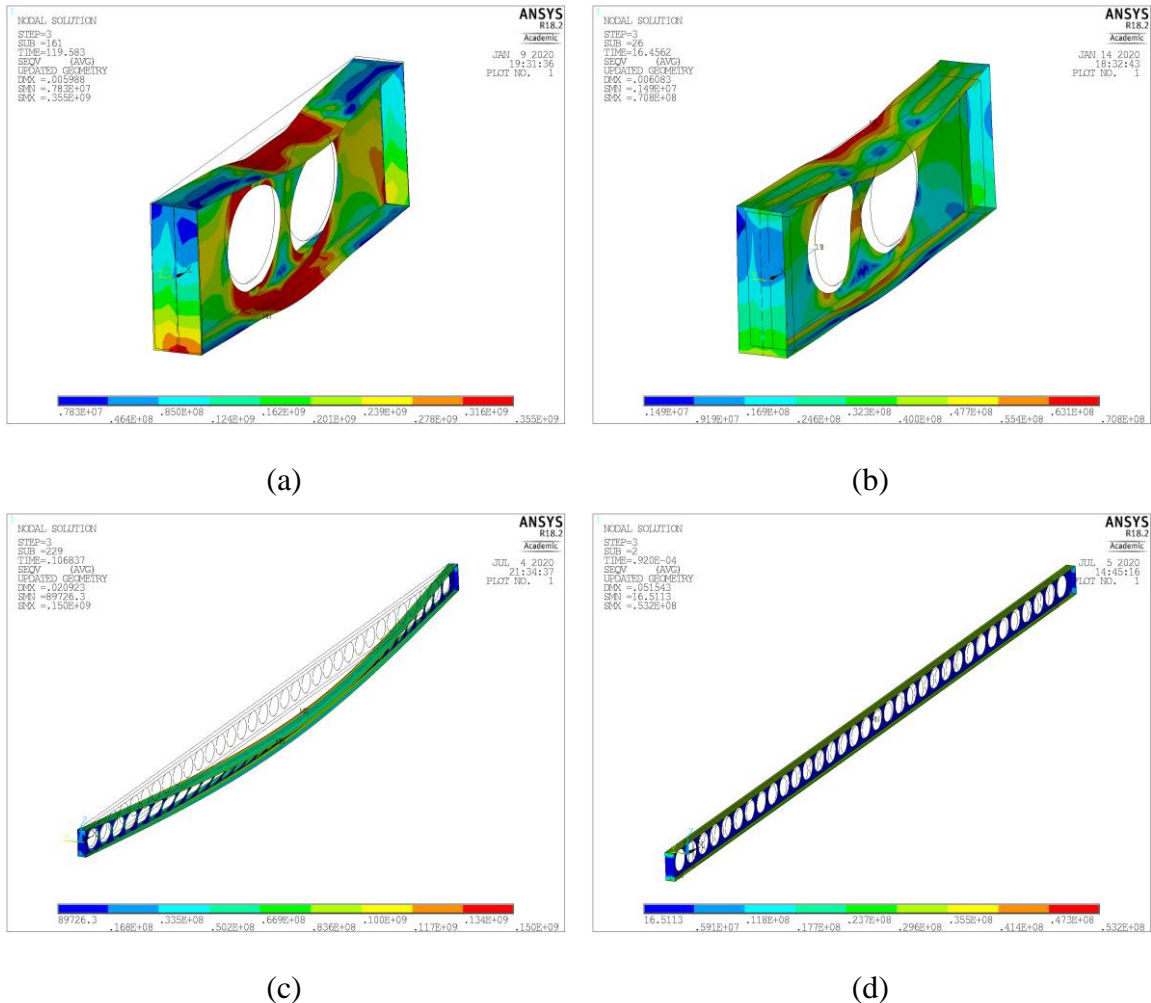


Figura 47 - Distribuição das tensões Von Mises para  $d_0=1,1h$ : (a)  $L=1$  [m]  $20$  [C°], (b)  $L=1$  [m]  $700$  [C°], (c)  $L=10$  [m]  $20$  [C°], (d)  $L=10$  [m]  $700$  [C°]

Quando o tamanho da abertura é aumentado fica evidente que o mecanismo de Vierendeel é o modo de colapso ocorrente, para a viga de  $1$  [m], prevalecendo mesmo para os casos de elevadas temperaturas como se pode ver na Figura 48. Para este caso, onde a abertura da alma corresponde a  $1.3h$ , também se verifica com clareza o mesmo modo de colapso local para a viga de  $2$  [m]. Com o aumento de temperatura passamos a verificar uma combinação entre o mecanismo de Vierendeel e a encurvadura lateral torsional, sendo que, quanto mais se aumenta a temperatura menos se verifica a formação de rótulas plásticas em redor das aberturas e passamos a encontrar mais evidências de uma encurvadura lateral torsional. Constata-se a encurvadura lateral torsional com o aumento do comprimento e com o aumento da temperatura.

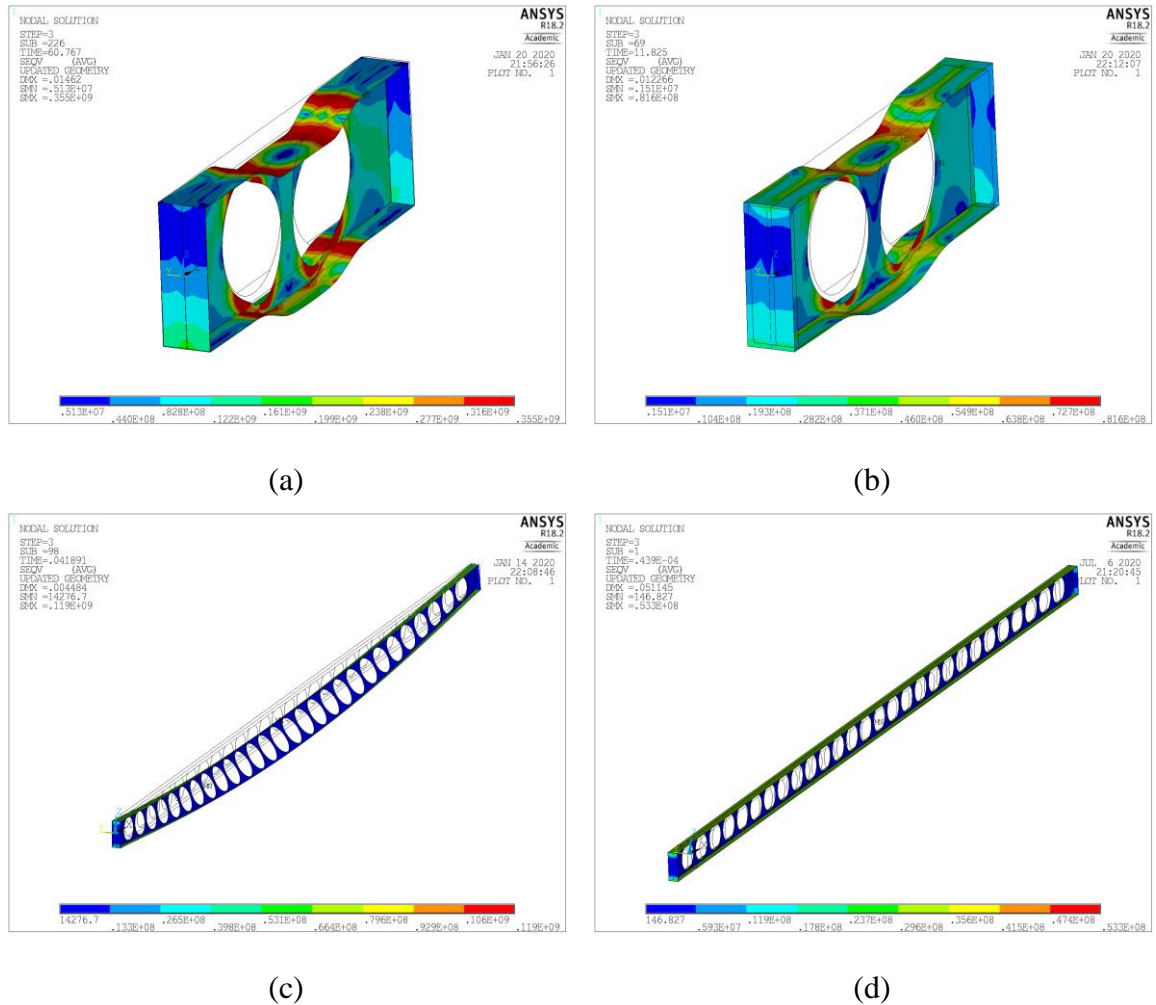


Figura 48 - Distribuição das tensões Von Mises para  $d_0=1,3h$ : (a)  $L=1$  [m] 20 [C°], (b)  $L=1$  [m] 700 [C°], (c)  $L=10$  [m] 20 [C°], (d)  $L=10$  [m] 700 [C°]

Para o caso  $S=1,1d_0$ , onde existe uma redução de espaçamento entre aberturas, para além da geração de rótulas plásticas em torno da abertura também se encontram tensões máximas na alma entre as furações, para a viga alveolar de 1 [m] à temperatura ambiente. Contudo, o modo de colapso continua a ser pelo mecanismo de Vierendeel e não por encurvadura do montante da alma, Figura 49. Com o aumento da temperatura consegue-se perceber que o modo de colapso altera do mecanismo de Vierendeel para a encurvadura do montante da alma como demonstrado na Figura 49. O mesmo acontece para a viga de 2 [m] mas com o aumento da temperatura o modo de colapso altera-se para encurvadura lateral torsional e não por encurvadura do montante da alma como na viga de 1 [m]. Para as vigas de maior comprimento o modo de colapso reinante é a encurvadura lateral torsional, tanto para temperatura ambiente como para elevadas temperaturas.

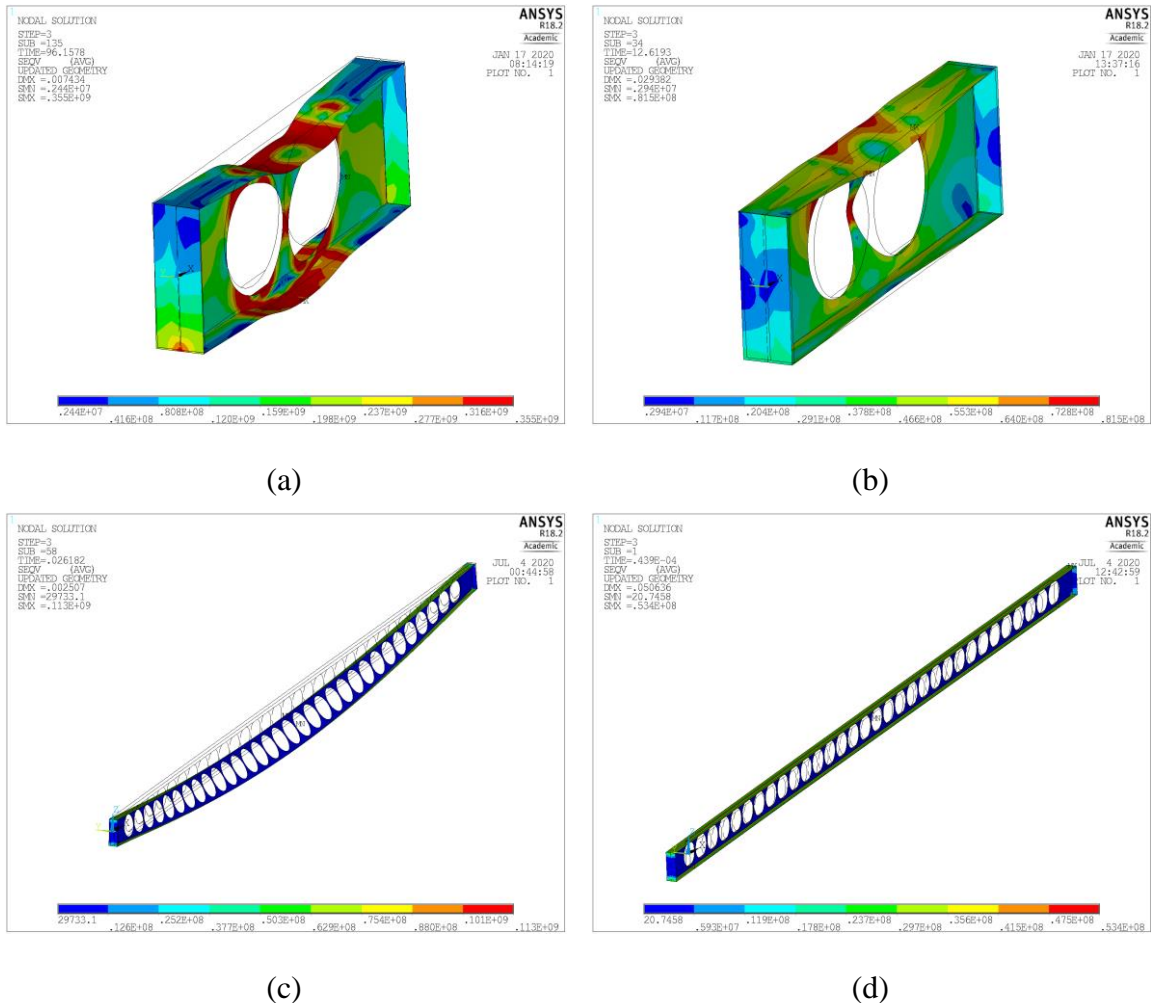


Figura 49 - Distribuição das tensões Von Mises para  $S=1,1d_0$ : (a)  $L=1$  [m]  $20$  [C°], (b)  $L=1$  [m]  $700$  [C°], (c)  $L=10$  [m]  $20$  [C°], (d)  $L=10$  [m]  $700$  [C°]

A Figura 50 demonstra o caso  $S=1.3d_0$ . Para a viga de  $1$  [m] o modo de colapso dá-se pelo mecanismo de Vierendeel, com o aumento da temperatura verifica-se uma diminuição desse efeito mas mesmo para este caso a  $700$  [°C] continuamos a verificar este modo de colapso local Figura 50. Com o aumento do comprimento o modo de colapso local passa a ser global, verificando-se a encurvadura lateral torsional para temperatura ambiente e elevadas temperaturas.

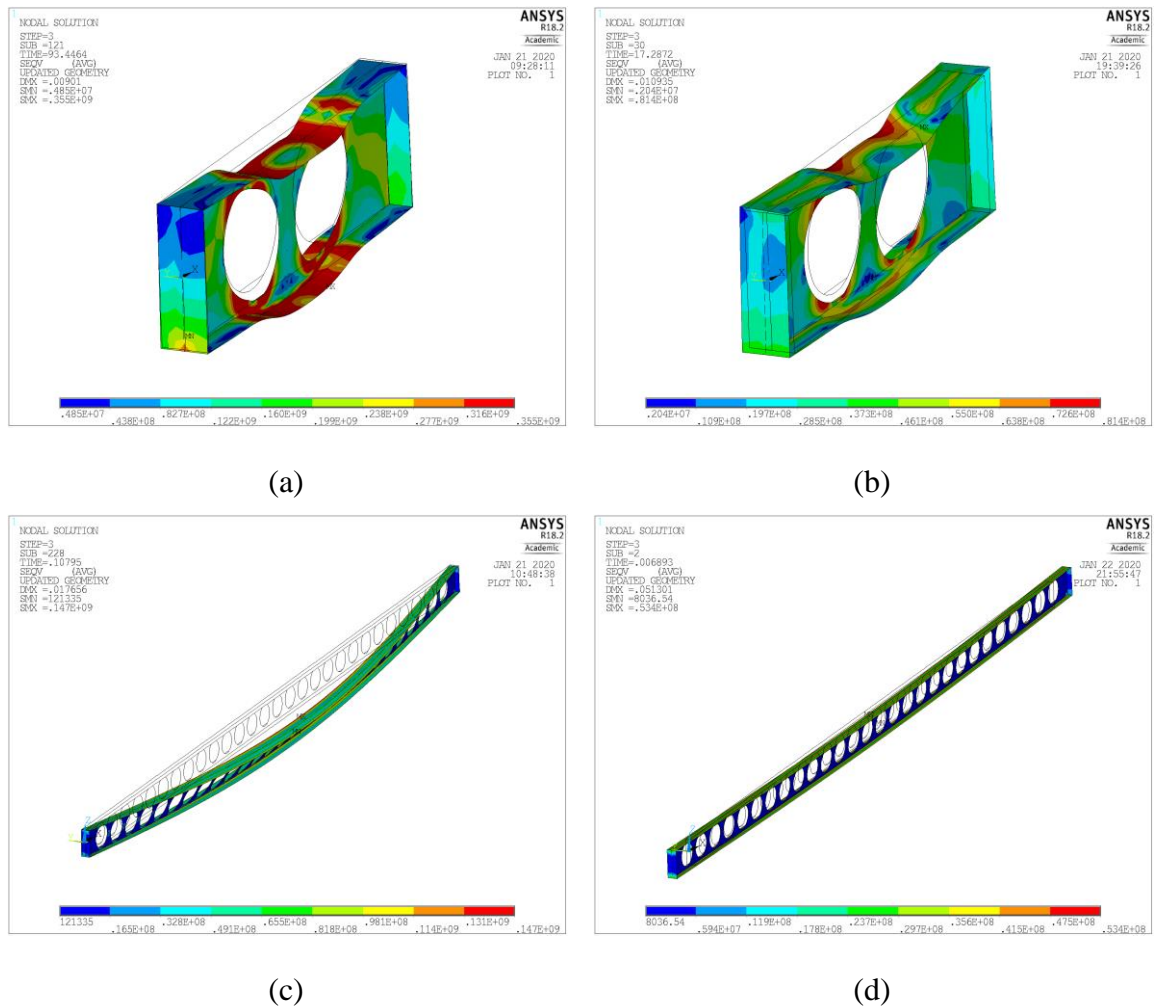


Figura 50 - Distribuição das tensões Von Mises para  $S=1,3d_0$ : (a)  $L=1$  [m]  $20$  [C°], (b)  $L=1$  [m]  $700$  [C°], (c)  $L=10$  [m]  $20$  [C°], (d)  $L=10$  [m]  $700$  [C°]

De um modo geral, conseguimos ver que as vigas menos esbeltas sofrem uma instabilidade local, em que o mecanismo Vierendeel é o modo de colapso dominante para vigas alveolares de menor comprimento dos casos em estudo. Quando existe um aumento do comprimento passamos a ter uma dissipação das tensões e a instabilidade local altera-se para uma instabilidade global, a encurvadura lateral torsional. A encurvadura lateral torsional é o modo de colapso mais frequente para os casos em estudo. Para a temperatura ambiente e em vigas pouco esbeltas constata-se tensões máximas iguais à tensão de cedência do material. Com o aumento da temperatura verifica-se a perda de intensidade das tensões e havendo mesmo casos em que o modo de colapso se altera de uma instabilidade local para uma instabilidade global.

A Figura 51 demonstra os gráficos dos deslocamentos laterais e verticais do caso MR para a temperatura ambiente e para uma temperatura de  $600$  [C°]. O nó da flange superior

localizado a meio vão foi o nó escolhido para retirar os valores dos deslocamentos. Quando ocorre o fenómeno da ELT é esperado que no momento de colapso o gráfico apresente uma assíntota horizontal, tanto para o deslocamento lateral como para o deslocamento vertical. Já para o caso do mecanismo de Vierendeel é esperado que exista um deslocamento lateral reduzido ou nenhum existindo sempre algum deslocamento vertical, isto deve-se ao facto de que a viga sofre de um deslocamento vertical pela existência das rótulas plásticas em redor das aberturas como constatado na Figura 43 (a). É possível observar esse fenómeno na Figura 51 para a viga de 1 [m]. Verifica-se o aumento dos deslocamentos com o aumento do comprimento e com o aumento da temperatura nos casos que sofrem de ELT. Para os casos em estudo, a temperatura de 700 [°C] tem um efeito bastante prejudicial tanto que para esta temperatura estas vigas não sofrem de grandes deslocamentos por elas colapsarem rapidamente com o valor de carga reduzido. Por esse motivo foi escolhido demonstrar o caso de 600 [°C]. Todos os gráficos dos deslocamentos podem ser encontrados em Anexos D.

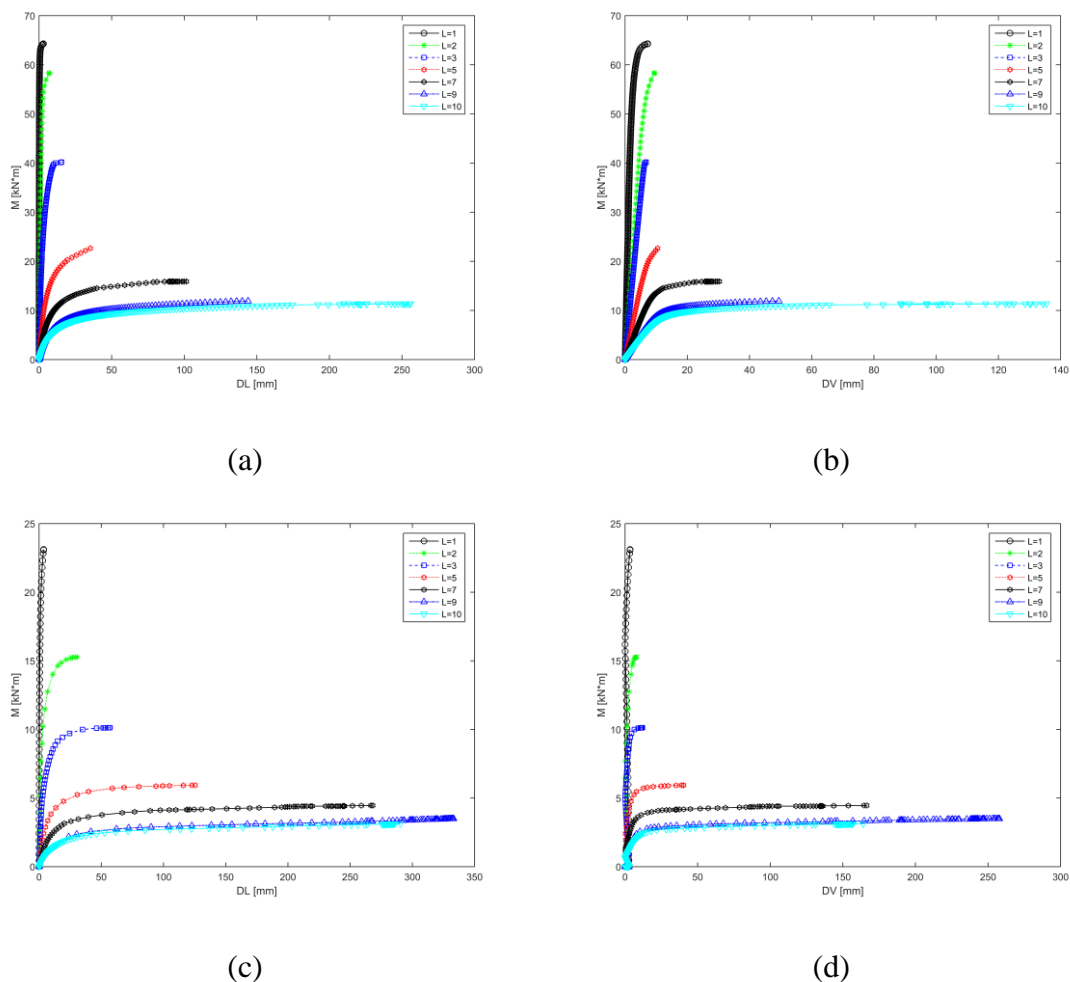


Figura 51 – Gráfico do deslocamento lateral e vertical das vigas alveolares do caso MR: (a) DL a 20 [°C], (b) DV a 20 [°C], (c) DL a 600 [°C], (d) DV a 600 [°C]

### 4.3.3 Comparação dos resultados numéricos com as curvas de encurvadura do Eurocódigo

Esta secção tem como objetivo a comparação dos resultados obtidos pelo ANSYS e pelos métodos simplificados do Eurocódigo 3, das vigas sólidas e das vigas alveolares. De modo complementar também foi feita uma comparação entre os resultados numéricos e dos resultados obtido através da proposta de Vila Real (3.4.3). Assim sendo, decidiu-se calcular todos os valores do momento resistente através do Eurocódigo parte 1-2, mesmo em casos de temperatura ambiente, pois a proposta de Vila Real é referente a essa parte do Eurocódigo. Nos Anexos C encontram-se as tabelas de resultados dos momentos resistentes e das esbeltezas para as vigas sólidas e vigas alveolares.

A Figura 52, Figura 53, Figura 54 e Figura 55 demonstram os resultados obtidos de forma numérica e simplificada das resistências de forma normalizada para diferentes temperaturas do caso VS. Verifica-se uma grande proximidade entre os resultados obtidos numericamente e dos métodos simplificados, sejam os resultados numéricos comparados com EC3 ou com a PVR. Consegue-se perceber que para a temperatura ambiente os valores resistentes conseguem estar acima da curva de encurvadura do EC3 acima da curva de encurvadura de PVR, indicando claramente que as vigas seriam seguras se fossem dimensionadas por ambos os métodos, mas existindo maior proximidade pela PVR. Para elevadas temperaturas verifica-se uma maior concordância dos resultados obtidos numericamente quando se compara as vigas mais esbeltas com a PVR e para vigas menos esbeltas existe uma maior proximidade da curva encurvadura do EC3. A Tabela 13 demonstra a relação entre as resistências obtidas pelo ANSYS com a PVR e com o EC3.

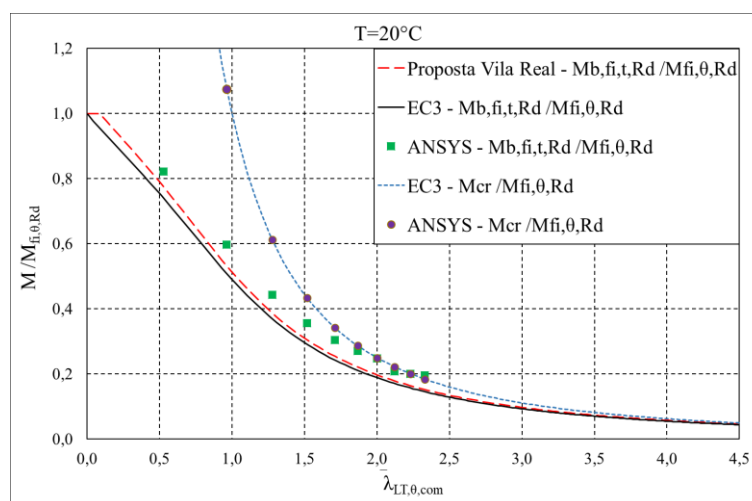


Figura 52 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS - 20[°C]

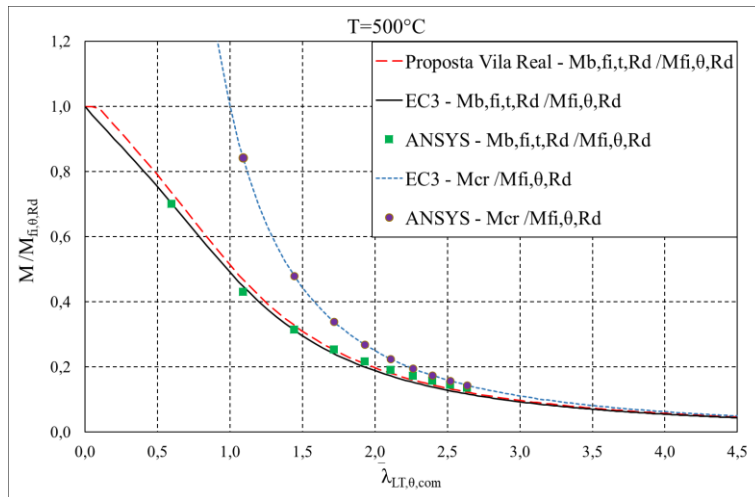


Figura 53 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS - 500[°C]

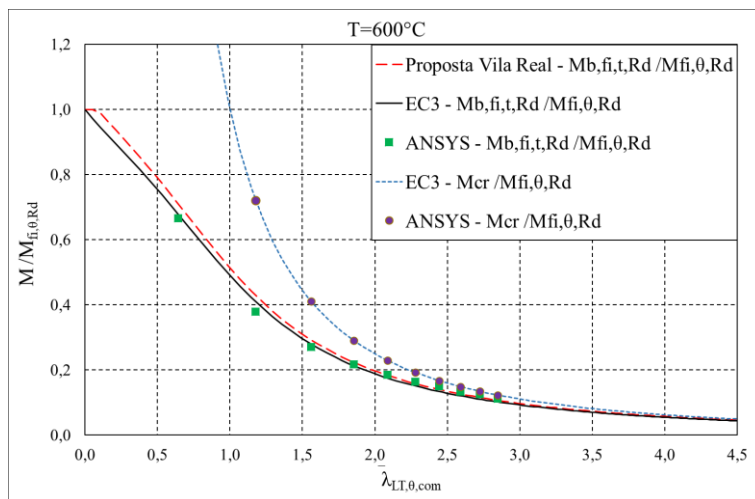


Figura 54 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS - 600[°C]

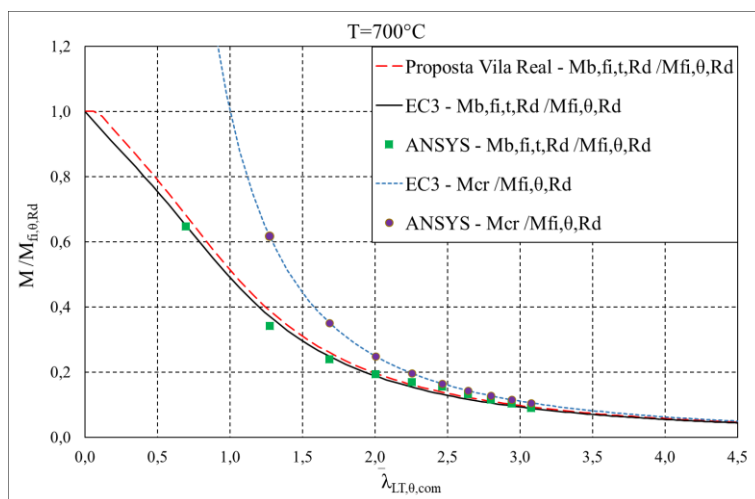


Figura 55 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS - 700[°C]

Em média, os resultados do momento resistente obtidos pelo ANSYS apresentam um valor de 100,1% quando comparado com EC3 e 95,5% quando comparado com a PVR. Se fizermos uma média das relações para as vigas de 1 a 5 [m] obtemos uma relação de 85,9% em relação à PVR e 89,9% para o EC3. Para as vigas mais esbeltas, de 6 a 10 [m], o valor do momento resistente do ANSYS apresenta um valor médio de 105,2% do valor resistente obtido pela PVR e 110,2% do EC3, desta forma comprova-se uma maior aproximação dos resultados obtidos para as vigas mais esbeltas tal como comentado no parágrafo anterior. Na Tabela 13 encontram-se os momentos resistentes para cada comprimento e temperatura deste caso e é demonstrado a relação entre o momento resistente do ANSYS e EC3. Também se encontra o mesmo tipo de relação entre os valores do ANSYS e a PVR.

Tabela 13 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso VS

VS										
20[°C]										
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3
1	81,80	81,80	78,10	1,000	1,047	53,40	61,30	58,60	0,871	0,911
2	59,50	61,40	58,70	0,969	1,014	32,80	43,10	41,20	0,761	0,796
3	44,00	45,70	43,70	0,963	1,007	24,10	30,40	29,10	0,793	0,828
4	35,40	35,50	33,90	0,997	1,044	19,40	23,00	21,90	0,843	0,886
5	30,20	28,90	27,60	1,045	1,094	16,50	18,40	17,60	0,897	0,938
6	26,90	24,40	23,30	1,102	1,155	14,60	15,40	14,70	0,948	0,993
7	24,70	21,10	20,10	1,171	1,229	13,20	13,20	12,60	1,000	1,048
8	20,70	18,60	17,80	1,113	1,163	12,00	11,60	11,10	1,034	1,081
9	20,00	16,70	15,90	1,198	1,258	11,00	10,40	9,90	1,058	1,111
10	19,40	15,10	14,40	1,285	1,347	10,40	9,38	8,95	1,109	1,162
600[°C]										
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3
1	30,60	36,00	34,40	0,850	0,890	14,60	17,10	16,30	0,854	0,896
2	17,50	24,20	23,10	0,723	0,758	7,71	10,90	10,40	0,707	0,741
3	12,50	16,60	15,80	0,753	0,791	5,41	7,27	6,94	0,744	0,780
4	10,00	12,30	11,80	0,813	0,847	4,36	5,34	5,10	0,816	0,855
5	8,53	9,79	9,35	0,871	0,912	3,83	4,21	4,02	0,910	0,953
6	7,58	8,14	7,77	0,931	0,976	3,52	3,49	3,33	1,009	1,057
7	6,92	6,98	6,66	0,991	1,039	2,97	2,98	2,85	0,997	1,042
8	6,11	6,12	5,84	0,998	1,046	2,63	2,61	2,49	1,008	1,056
9	5,76	5,45	5,21	1,057	1,106	2,35	2,32	2,22	1,013	1,059
10	5,14	4,92	4,70	1,045	1,094	2,03	2,10	2,00	0,967	1,015
700[°C]										
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3
1	30,60	36,00	34,40	0,850	0,890	14,60	17,10	16,30	0,854	0,896
2	17,50	24,20	23,10	0,723	0,758	7,71	10,90	10,40	0,707	0,741
3	12,50	16,60	15,80	0,753	0,791	5,41	7,27	6,94	0,744	0,780
4	10,00	12,30	11,80	0,813	0,847	4,36	5,34	5,10	0,816	0,855
5	8,53	9,79	9,35	0,871	0,912	3,83	4,21	4,02	0,910	0,953
6	7,58	8,14	7,77	0,931	0,976	3,52	3,49	3,33	1,009	1,057
7	6,92	6,98	6,66	0,991	1,039	2,97	2,98	2,85	0,997	1,042
8	6,11	6,12	5,84	0,998	1,046	2,63	2,61	2,49	1,008	1,056
9	5,76	5,45	5,21	1,057	1,106	2,35	2,32	2,22	1,013	1,059
10	5,14	4,92	4,70	1,045	1,094	2,03	2,10	2,00	0,967	1,015

Para o caso VS-1,4h, onde a altura da secção é aumentada, é possível verificar proximidade dos resultados numéricos com os resultados dos métodos simplificados. Todas as temperaturas apresentam ter um comportamento semelhante, observa-se uma maior proximidade dos resultados obtidos do ANSYS com a curva de encurvadura do EC3, para as vigas menos esbeltas, enquanto para os casos mais esbeltos os pontos tendem a ser mais próximos do método proposto por Vila Real.

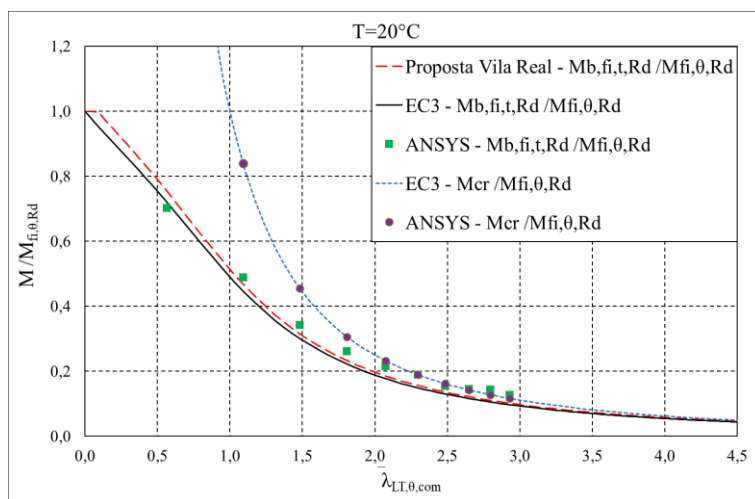


Figura 56 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS-1,4h - 20[°C]

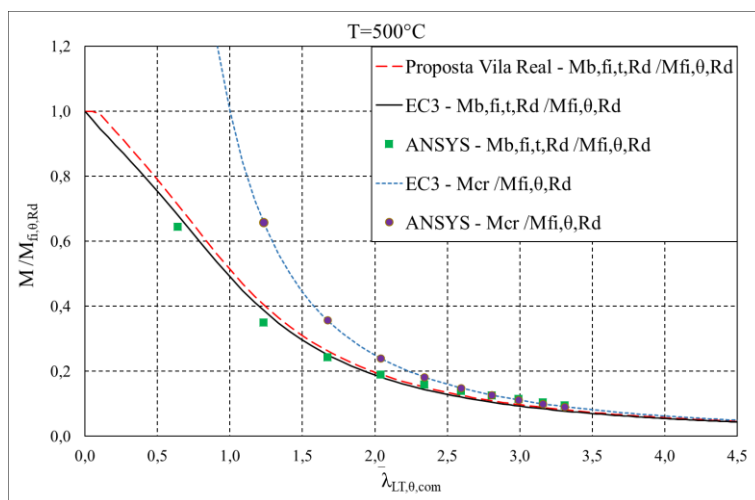


Figura 57 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS-1,4h - 500[°C]

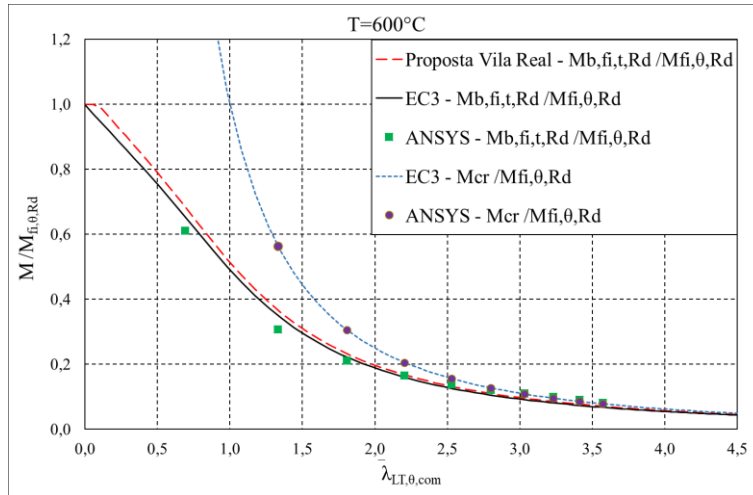


Figura 58 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS-1,4h - 600[°C]

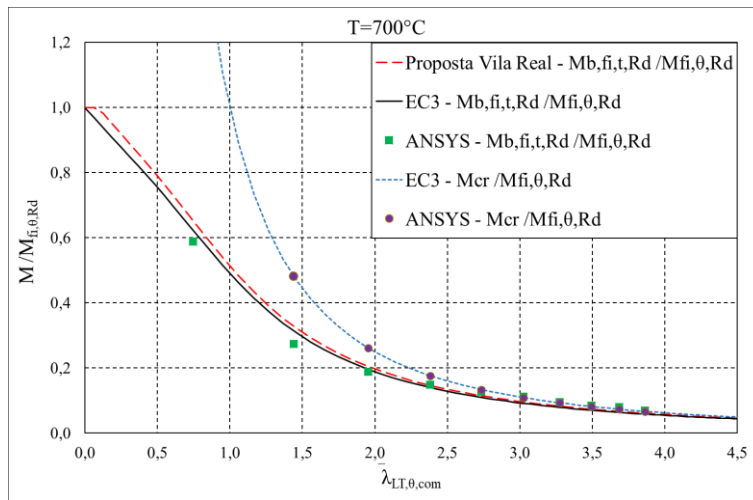


Figura 59 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS-1,4h - 700[°C]

Os resultados adquiridos através do ANSYS apresentam uma resistência de 95,4% em relação ao momento resistente do EC3 e 91,1% quando comparado com a PVR, em média. Para as vigas de 1 a 5 [m] obtemos uma relação de 79% em relação à PVR e 82,7% para o EC3. Para as vigas de 6 a 10 [m], o valor do momento resistente do ANSYS apresenta um valor médio de 103,1% do valor do momento resistente obtido pela PVR e 108,1% do EC3. Na Tabela 14 encontram-se os detalhes destas relações e os momentos resistentes para cada viga.

Tabela 14 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso VS-1,4h

VS-1,4h										
20[°C]										
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS
	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3
1	109,00	125,00	120,00	0,872	0,908	76,70	93,50	89,30	0,820	0,859
2	76,10	89,30	85,30	0,852	0,892	41,70	61,80	59,00	0,675	0,707
3	53,30	62,00	59,20	0,860	0,900	29,00	40,50	38,70	0,716	0,749
4	40,70	45,40	43,40	0,896	0,938	22,50	28,90	27,60	0,779	0,815
5	33,70	35,50	33,90	0,949	0,994	18,90	22,30	21,30	0,848	0,887
6	29,50	29,00	27,70	1,017	1,065	16,60	18,10	17,30	0,917	0,960
7	24,20	24,60	23,50	0,984	1,030	14,90	15,30	14,60	0,974	1,021
8	22,60	21,40	20,40	1,056	1,108	13,60	13,20	12,60	1,030	1,079
9	22,40	18,90	18,10	1,185	1,238	12,40	11,70	11,10	1,060	1,117
10	19,80	17,00	16,20	1,165	1,222	11,40	10,50	9,99	1,086	1,141
600[°C]										
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS
	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3
1	43,80	54,70	52,30	0,801	0,837	20,70	25,90	24,70	0,799	0,838
2	22,10	34,40	32,80	0,642	0,674	9,61	15,40	14,70	0,624	0,654
3	15,10	21,90	20,90	0,689	0,722	6,63	9,52	9,09	0,696	0,729
4	11,80	15,40	14,70	0,766	0,803	5,24	6,63	6,34	0,790	0,826
5	9,93	11,80	11,30	0,842	0,879	4,46	5,05	4,82	0,883	0,925
6	8,72	9,54	9,11	0,914	0,957	3,95	4,07	3,89	0,971	1,015
7	7,90	8,02	7,66	0,985	1,031	3,35	3,42	3,26	0,980	1,028
8	7,17	6,94	6,62	1,033	1,083	2,98	2,95	2,82	1,010	1,057
9	6,49	6,12	5,84	1,060	1,111	2,79	2,60	2,48	1,073	1,125
10	5,87	5,48	5,23	1,071	1,122	2,45	2,32	2,22	1,056	1,104
700[°C]										

Para as vigas sólidas que apresentam uma altura da secção igual a 1,5h, não se verificam grandes diferenças quando comparado com os casos anteriores. Volta-se a observar um comportamento de aproximação entre os resultados numéricos e resultados analíticos. Para as vigas menos esbeltas os pontos encontram-se ligeiramente inferiores à curva de encurvadura do EC3, enquanto para as vigas mais esbeltas encontramos os pontos mais acima e mais próximos da curva de encurvadura calculada pela proposta de Vila Real.

Encontra-se uma relação média dos momentos resistentes do ANSYS de 96,3% quando comparado com os resultados numéricos obtidos através do EC3 e 92% quando comparado com a PVR. Em média, para as vigas de 1 a 5 [m] obtemos uma relação de 77,9% do momento resistente do ANSYS em relação à PVR e 81,5% para o EC3. Para as vigas de 6 a 10 [m], o valor do momento resistente do ANSYS apresenta um valor médio de 106% do valor do momento resistente obtido pela PVR e 111% do EC3, Tabela 15.

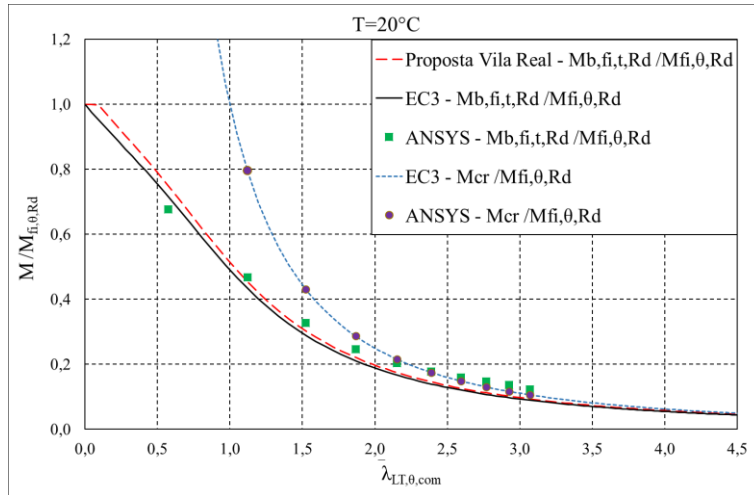


Figura 60 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS-1,5h - 20[°C]

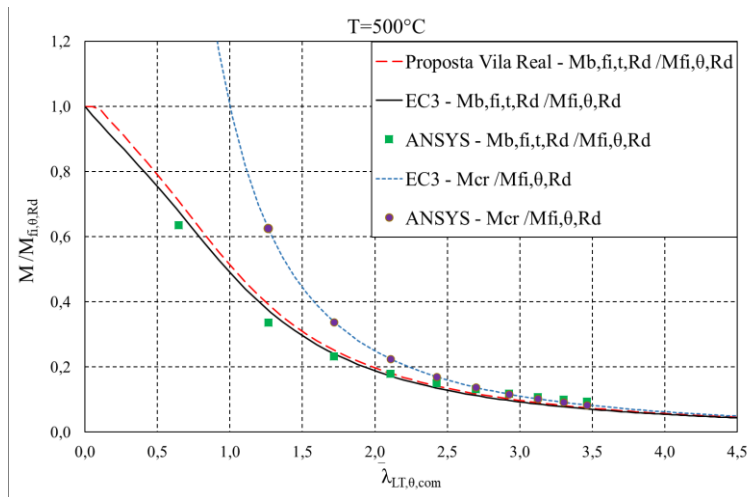


Figura 61 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS-1,5h - 500[°C]

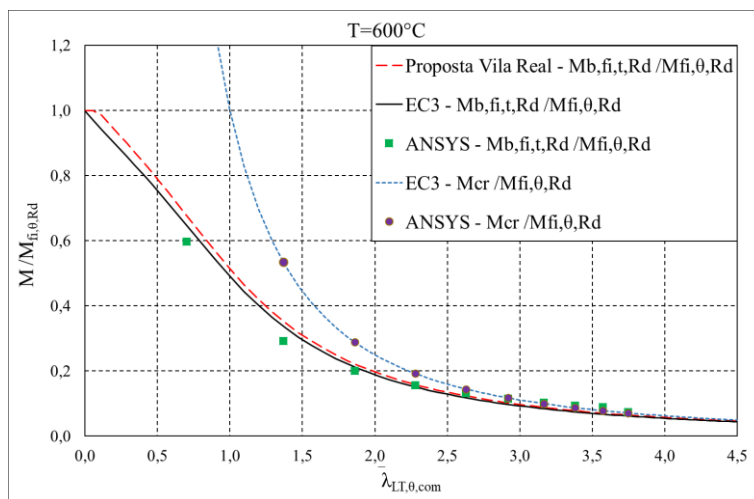


Figura 62 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS-1,5h - 600[°C]

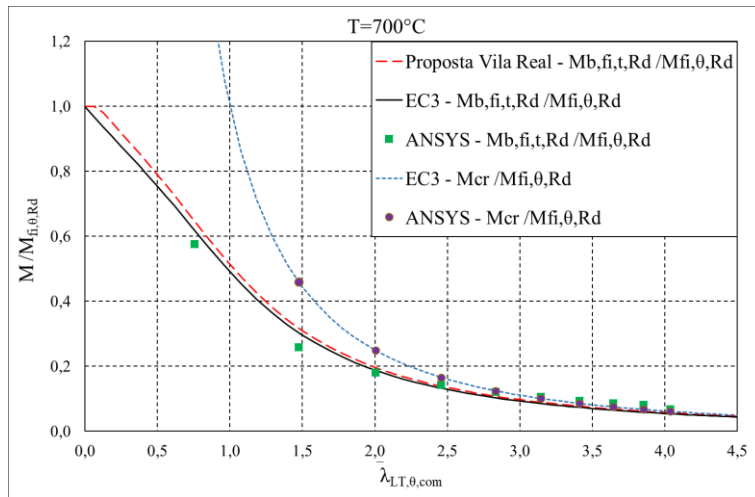


Figura 63 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS-1,5h - 700[°C]

Tabela 15 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso VS-1,5h

VS-1,5h										
L [m]	20[°C]					500[°C]				
	$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3
1	116,00	137,00	131,00	0,847	0,885	82,90	102,00	97,60	0,813	0,849
2	79,90	96,60	92,30	0,827	0,866	43,90	66,70	63,70	0,658	0,689
3	55,80	66,10	63,10	0,844	0,884	30,30	43,10	41,20	0,703	0,735
4	42,10	47,90	45,80	0,879	0,919	23,50	30,50	29,10	0,770	0,808
5	34,80	37,10	35,40	0,938	0,983	19,60	23,30	22,20	0,841	0,883
6	30,40	30,20	28,80	1,007	1,056	17,20	18,80	17,90	0,915	0,961
7	27,30	25,50	24,30	1,071	1,123	15,40	15,80	15,10	0,975	1,020
8	25,00	22,00	21,10	1,136	1,185	14,00	13,60	13,00	1,029	1,077
9	23,40	19,50	18,60	1,200	1,258	13,10	12,00	11,50	1,092	1,139
10	21,00	17,40	16,70	1,207	1,257	12,20	10,70	10,20	1,140	1,196
L [m]	600[°C]					700[°C]				
	$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3
1	47,10	59,70	57,10	0,789	0,825	22,20	28,20	27,00	0,787	0,822
2	23,10	37,00	35,30	0,624	0,654	9,95	16,50	15,80	0,603	0,630
3	15,90	23,20	22,20	0,685	0,716	6,93	10,10	9,65	0,686	0,718
4	12,40	16,20	15,50	0,765	0,800	5,48	6,97	6,65	0,786	0,824
5	10,40	12,30	11,70	0,846	0,889	4,66	5,26	5,02	0,886	0,928
6	9,09	9,89	9,45	0,919	0,962	4,08	4,22	4,03	0,967	1,012
7	8,13	8,29	7,91	0,981	1,028	3,61	3,53	3,37	1,023	1,071
8	7,44	7,14	6,82	1,042	1,091	3,30	3,03	2,90	1,089	1,138
9	7,02	6,28	6,00	1,118	1,170	3,12	2,67	2,55	1,169	1,224
10	5,79	5,61	5,36	1,032	1,080	2,61	2,38	2,27	1,097	1,150

Para o último caso das vigas sólidas, VS-1,6h, olhando para os gráficos apresentados na Figura 64, Figura 65, Figura 66 e Figura 67 é averiguado o mesmo comportamento como nos casos anteriores. Os resultados numéricos apresentam concordância com os resultados analíticos. De um modo geral, conseguimos novamente perceber que o método proposto por Vila Real apresenta ter uma maior aproximação dos resultados numéricos para os casos mais esbeltos, para todas as temperaturas estudadas.

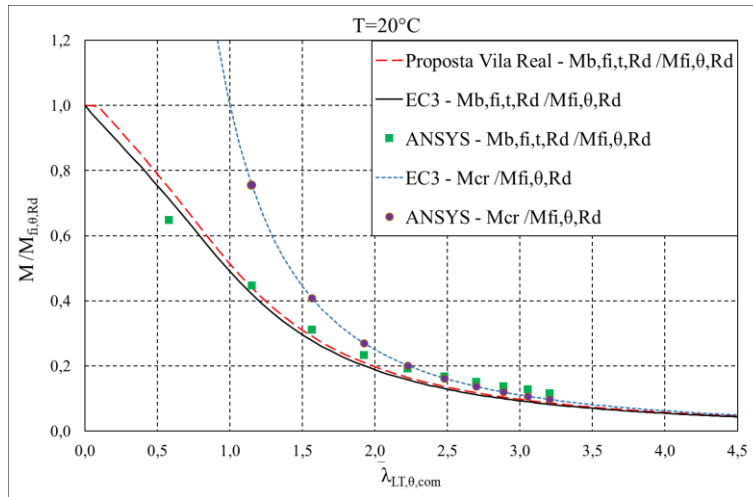


Figura 64 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS-1,6h - 20[°C]

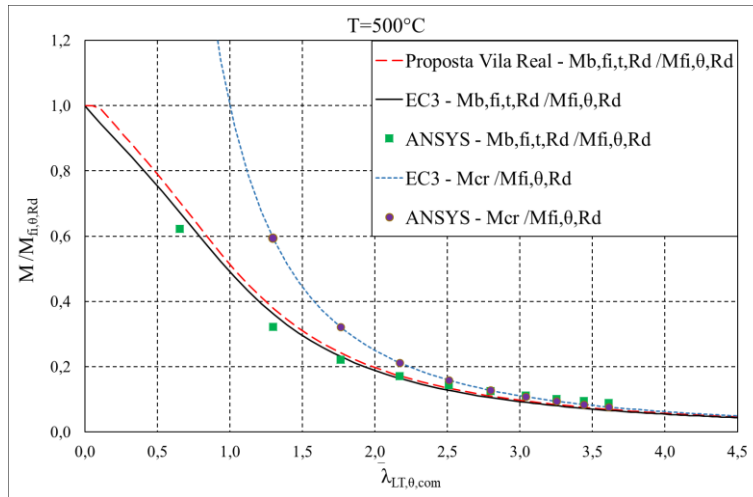


Figura 65 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS-1,6h - 500[°C]

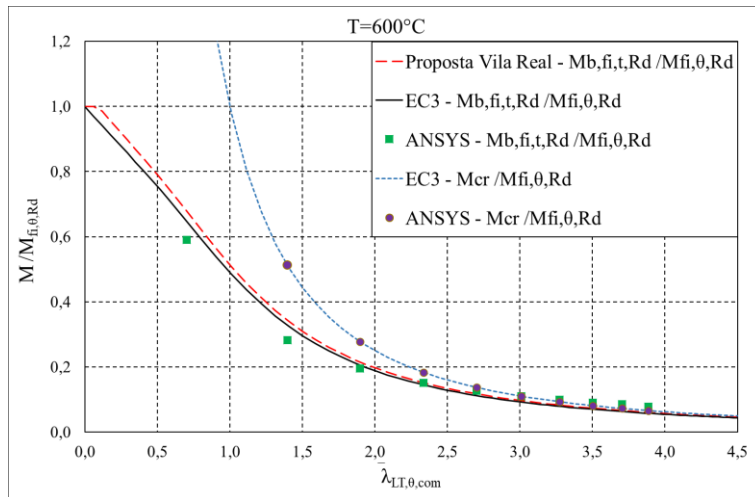


Figura 66 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS-1,6h - 600[°C]

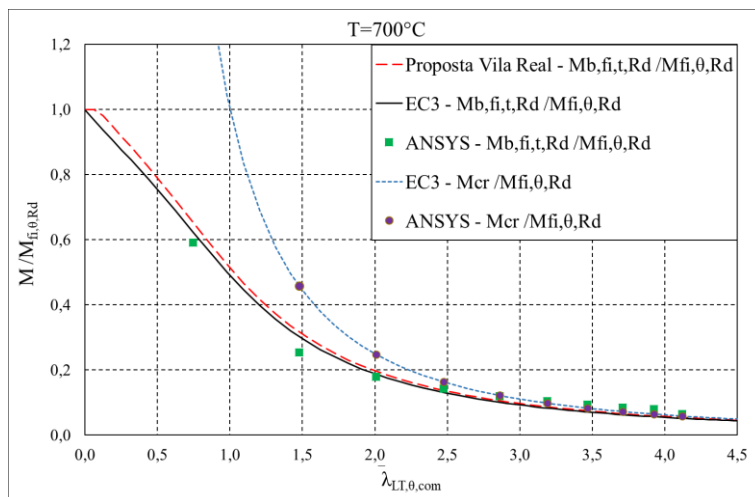


Figura 67 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas sólidas do caso VS-1,6h - 700[°C]

Observa-se uma relação média no valor de 96% do momento resistente obtido de forma numérica quando comparado com os valores obtidos através dos métodos simplificados do EC3. Quando a mesma relação é feita com a PVR tem se uma relação média de 91,7%. Para as vigas menos esbeltas, consideradas entre 1 e 5 [m], a relação entre ANSYS e PVR é de 76,6% e para a relação entre ANSYS e EC3 a média é 80,2%. O momento resistente do ANSYS para as vigas entre 6 e 10 [m], apresentam um valor médio de 106,8% em relação à PVR. O momento resistente do ANSYS apresenta um rácio de 111,9% do momento resistente do EC3 para as vigas mais esbeltas, Tabela 16.

Tabela 16 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso VS-1,6h

VS-1,6h										
20[°C]										
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3
1	121,00	149,00	142,00	0,812	0,852	88,80	111,00	106,00	0,800	0,838
2	83,60	104,00	99,40	0,804	0,841	45,90	71,60	68,40	0,641	0,671
3	58,20	70,30	67,20	0,828	0,866	31,60	45,80	43,70	0,690	0,723
4	43,70	50,50	48,20	0,865	0,907	24,40	32,00	30,60	0,763	0,797
5	36,00	38,70	37,00	0,930	0,973	20,40	24,30	23,20	0,840	0,879
6	31,30	31,30	29,90	1,000	1,047	17,80	19,50	18,60	0,913	0,957
7	28,10	26,30	25,10	1,068	1,120	15,90	16,30	15,60	0,975	1,019
8	25,80	22,70	21,70	1,137	1,189	14,50	14,00	13,40	1,036	1,082
9	24,00	20,00	19,10	1,200	1,257	13,60	12,30	11,80	1,106	1,153
10	21,80	17,90	17,10	1,218	1,275	12,60	11,00	10,50	1,145	1,200
600[°C]										
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3
1	50,30	64,90	62,00	0,775	0,811	23,70	30,70	29,30	0,772	0,809
2	24,10	39,70	37,90	0,607	0,636	10,20	17,70	16,90	0,576	0,604
3	16,60	24,60	23,50	0,675	0,706	7,22	10,70	10,20	0,675	0,708
4	12,90	17,00	16,20	0,759	0,796	5,70	7,31	6,98	0,780	0,817
5	10,80	12,80	12,20	0,844	0,885	4,82	5,48	5,23	0,880	0,922
6	9,44	10,30	9,79	0,917	0,964	4,19	4,37	4,17	0,959	1,005
7	8,46	8,55	8,16	0,989	1,037	3,74	3,64	3,47	1,027	1,078
8	7,75	7,34	7,01	1,056	1,106	3,39	3,12	2,98	1,087	1,138
9	7,27	6,44	6,15	1,129	1,182	3,20	2,73	2,61	1,172	1,226
10	6,66	5,75	5,49	1,158	1,213	2,62	2,44	2,33	1,074	1,124
700[°C]										
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3
1	50,30	64,90	62,00	0,775	0,811	23,70	30,70	29,30	0,772	0,809
2	24,10	39,70	37,90	0,607	0,636	10,20	17,70	16,90	0,576	0,604
3	16,60	24,60	23,50	0,675	0,706	7,22	10,70	10,20	0,675	0,708
4	12,90	17,00	16,20	0,759	0,796	5,70	7,31	6,98	0,780	0,817
5	10,80	12,80	12,20	0,844	0,885	4,82	5,48	5,23	0,880	0,922
6	9,44	10,30	9,79	0,917	0,964	4,19	4,37	4,17	0,959	1,005
7	8,46	8,55	8,16	0,989	1,037	3,74	3,64	3,47	1,027	1,078
8	7,75	7,34	7,01	1,056	1,106	3,39	3,12	2,98	1,087	1,138
9	7,27	6,44	6,15	1,129	1,182	3,20	2,73	2,61	1,172	1,226
10	6,66	5,75	5,49	1,158	1,213	2,62	2,44	2,33	1,074	1,124

Para as vigas sólidas fica claro que com o aumento da altura da secção transversal o momento resistente à encurvadura lateral torsional também aumenta. Os resultados numéricos e analíticos, seja pelo EC3 ou pela PVR, exibem resultados bastante aproximados. Foi possível observar uma maior aproximação dos resultados numéricos com os resultados analíticos quando comparado com o EC3 para vigas menos esbeltas. Por outro lado, para as vigas mais compridas os pontos do momento resistente à ELT obtidos através do ANSYS tendem a aproximar-se mais dos resultados analíticos conseguidos pela PVR, geralmente para todas as temperaturas. Em conclusão para as vigas sólidas, embora ligeiramente, obteve-se maior aproximação entre os resultados numéricos e os resultados analíticos conseguidos pelos métodos simplificados do EC3 do que pela PVR.

Para as vigas alveolares utilizou-se a mesma metodologia de comparação dos resultados. Na Figura 68, Figura 69, Figura 70 e Figura 71 estão expostos os gráficos dos momentos resistentes do modelo referência MR, onde estão apresentados os pontos obtidos pelos métodos numéricos e as curvas de encurvadura adquiridas de forma analítica em relação à esbelteza, para as diferentes temperaturas. Para a temperatura ambiente, as vigas alveolares apresentam estar um pouco acima da curva de encurvadura do EC3, havendo maior proximidade da curva de encurvadura pela PVR, podemos então afirmar que se as vigas fossem dimensionadas por ambos os métodos, estas estariam seguras. No mesmo gráfico, onde a temperatura é de 20 [°C], a viga de 1 [m] aparenta ter um comportamento anormal relativamente ao seu momento resistente quando comparado às vigas de comprimentos maiores. Isso deve-se ao facto desta viga não sofrer uma instabilidade global mas local, a viga de 1 [m] para o caso MR é afetada pelo mecanismo de Vierendeel enquanto as restantes vigas têm um comportamento de encurvadura lateral torsional, tal como discutido no tópico 4.3.2 . Quando se aumenta a temperatura, para as vigas menos esbeltas, os pontos tendem a estar um pouco abaixo da curva do EC3. Com o aumento do comprimento tende a existir uma maior aproximação entre os resultados numéricos e analíticos. Para as vigas que foram submetidas a 700 [°C] encontramos as vigas mais esbeltas mais distantes das curvas de encurvadura, estando estas abaixo destas curvas, isto pode ser devido à elevada esbelteza que estas vigas possuem combinado com as elevadas temperaturas que estão submetidas e desse modo têm um momento resistente à ELT inferior.

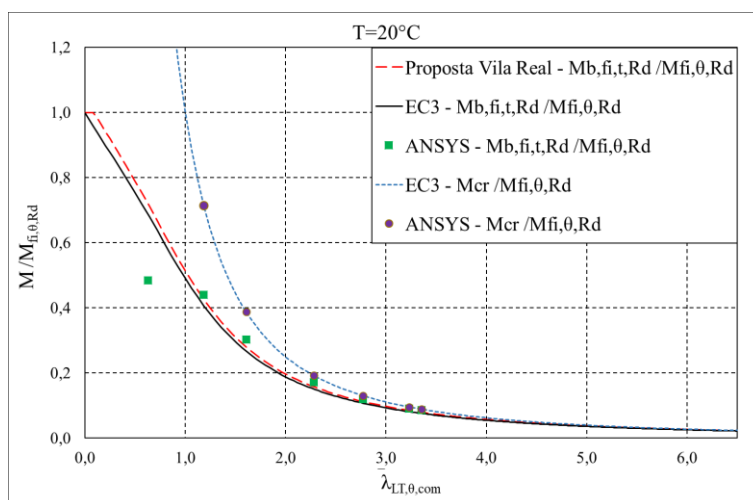


Figura 68 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso MR - 20[°C]

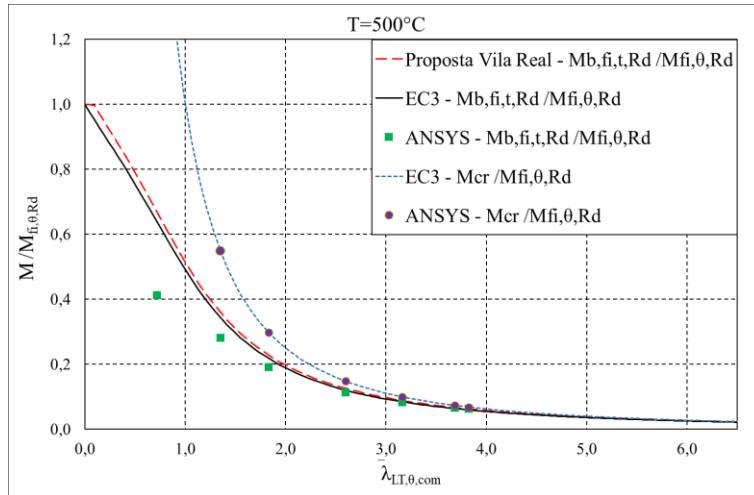


Figura 69 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso MR - 500[°C]

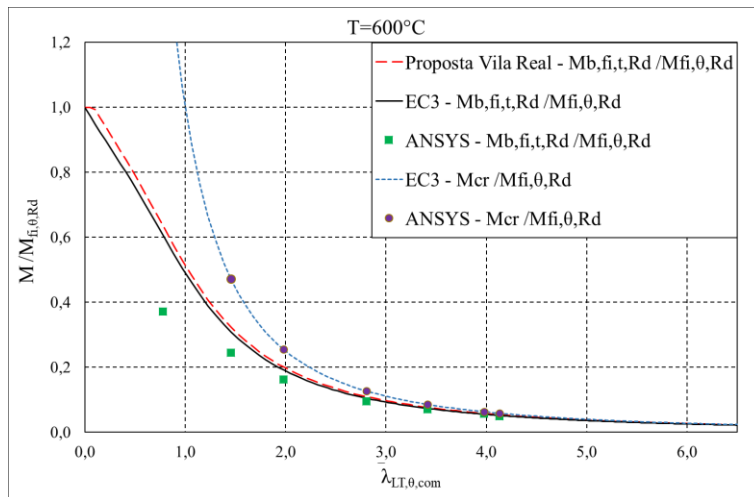


Figura 70 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso MR - 600[°C]

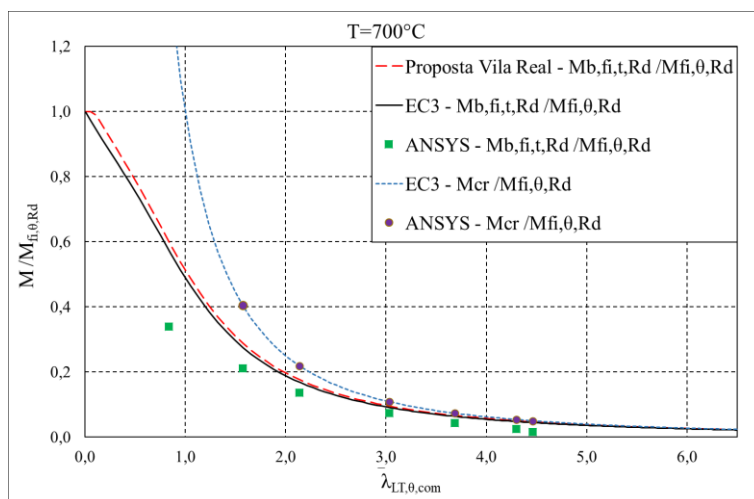


Figura 71 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso MR - 700[°C]

Na Tabela 17 conseguimos observar os resultados dos momentos resistentes do caso MR obtidos através do ANSYS, EC3 e pela PVR. Também se encontram as relações entre as resistências obtidas de forma numérica e analítica. Em média, os resultados do ANSYS apresentam uma resistência de 57,7% em relação à do EC3 e tendo uma resistência de 55,1% quando comparado com a resistência obtida pela PVR. Podemos ver que para a viga de 10 [m] a 700 [°C], a resistência do ANSYS representa um valor de 23,6% em relação à norma e 22,5% em relação à proposta.

Tabela 17 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso MR

		MR									
		20[°C]					500[°C]				
L		$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
[m]		ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS
		[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3
1		64,30	110,94	105,95	0,580	0,607	42,80	83,39	79,64	0,513	0,537
2		58,40	82,60	78,89	0,707	0,740	29,10	58,01	55,40	0,502	0,525
3		40,20	58,66	56,02	0,685	0,718	19,80	38,82	37,08	0,510	0,534
5		22,70	33,27	31,77	0,682	0,714	11,70	21,00	20,06	0,557	0,583
7		15,90	22,67	21,65	0,701	0,734	8,62	14,10	13,46	0,611	0,640
9		12,10	17,22	16,45	0,703	0,736	6,90	10,64	10,16	0,649	0,679
10		11,40	15,40	14,71	0,740	0,775	6,53	9,49	9,06	0,688	0,721
		600[°C]					700[°C]				
L		$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
[m]		ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS
		[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3
1		23,10	49,00	46,79	0,471	0,494	10,40	23,30	22,25	0,446	0,467
2		15,30	32,54	31,08	0,470	0,492	6,44	14,71	14,05	0,438	0,458
3		10,10	21,06	20,11	0,480	0,502	4,17	9,22	8,81	0,452	0,474
5		5,93	11,13	10,63	0,533	0,558	2,25	4,77	4,56	0,471	0,493
7		4,46	7,42	7,08	0,601	0,630	1,34	3,16	3,02	0,424	0,444
9		3,54	5,58	5,33	0,635	0,665	0,76	2,37	2,26	0,322	0,338
10		3,12	4,97	4,75	0,628	0,657	0,48	2,11	2,01	0,225	0,236

A Tabela 18 traduz numericamente os resultados apresentados dos gráficos do caso MR, onde o momento resistente do EC3 é calculado em função da esbelteza obtida pelo ANSYS em vez de estar calculado em relação ao comprimento, dessa maneira obtemos a razão entre os momentos resistentes de forma normalizada. As razões estão apresentadas de forma percentual. Desta forma fica evidente que existe uma maior aproximação dos resultados. Em média, esta relação apresenta um valor de 85% para este caso.

Tabela 18 - Razão entre o momento resistente do ANSYS e do EC3, calculado de acordo com a esbelteza do ANSYS do caso MR

L [m]	MR							
	20[°C]		500[°C]		600[°C]		700[°C]	
	$\bar{\lambda}_{LT}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]
1	0,630	70,6%	0,718	64,7%	0,776	61,0%	0,838	59,2%
2	1,183	108,0%	1,349	81,7%	1,457	79,3%	1,573	76,6%
3	1,606	113,3%	1,831	87,7%	1,978	84,5%	2,136	81,0%
5	2,279	113,0%	2,599	93,9%	2,807	90,8%	3,032	80,7%
7	2,772	111,7%	3,160	98,5%	3,413	97,2%	3,687	68,9%
9	3,232	112,1%	3,685	104,5%	3,980	102,7%	4,299	52,2%
10	3,356	113,1%	3,826	105,9%	4,132	97,1%	4,463	34,9%

Os gráficos dos momentos resistentes do caso H=1,4h estão expostos na Figura 72, Figura 73, Figura 74 e Figura 75. Para a temperatura ambiente verifica-se que a viga de 1 e 2 [m] não seguem a mesma tendência que as outras vigas, isso deve-se ao seu modo de instabilidade que, ao contrário das outras vigas, não se dá pela encurvadura lateral torsional, mas sim pelo mecanismo de Vierendeel, secção (4.3.2 ). Verifica-se que com a diminuição da altura H e com um comprimento reduzido a viga é mais suscetível ao modo de colapso local pois o caso de 1 [m] tem um valor do momento resistente bastante inferior à curva de encurvadura do EC3. A Figura 76 e Figura 77 demonstram dois casos distintos de diferentes temperaturas e comprimentos onde se pode verificar a ocorrência do mecanismo Vierendeel. Com o aumento da temperatura é possível verificar que esse efeito é diminuído e os pontos começam a ter um comportamento semelhante à curva do EC3, embora alguns dos casos se encontrem inseguros por se localizarem abaixo da curva do EC3.

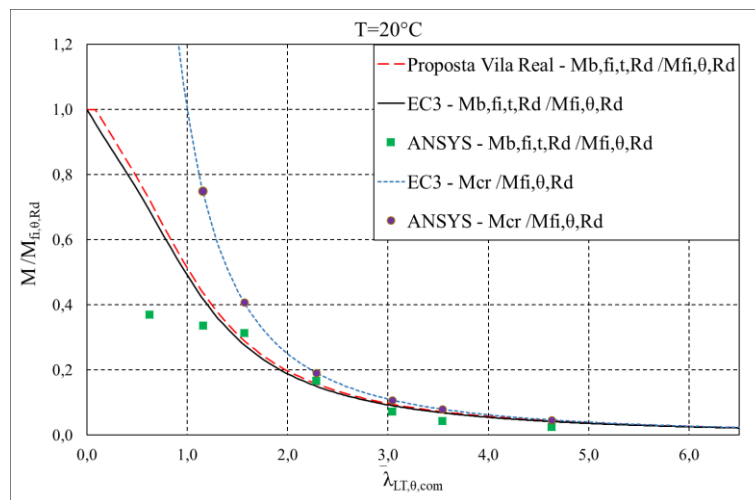


Figura 72 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,4h - 20[°C]

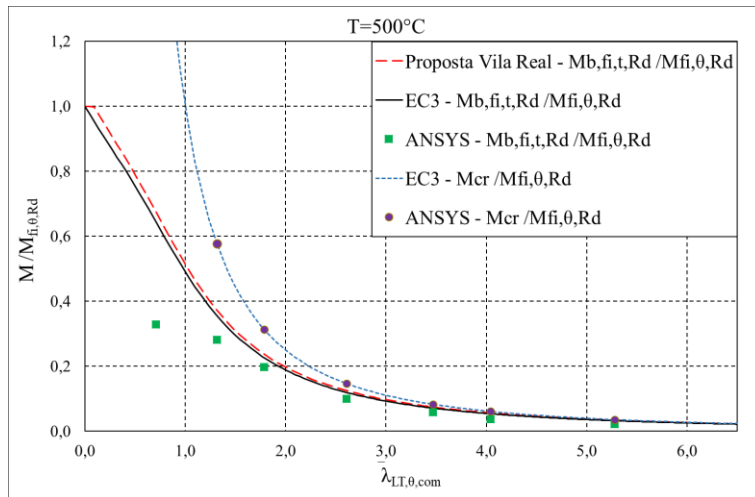


Figura 73 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,4h - 500[°C]

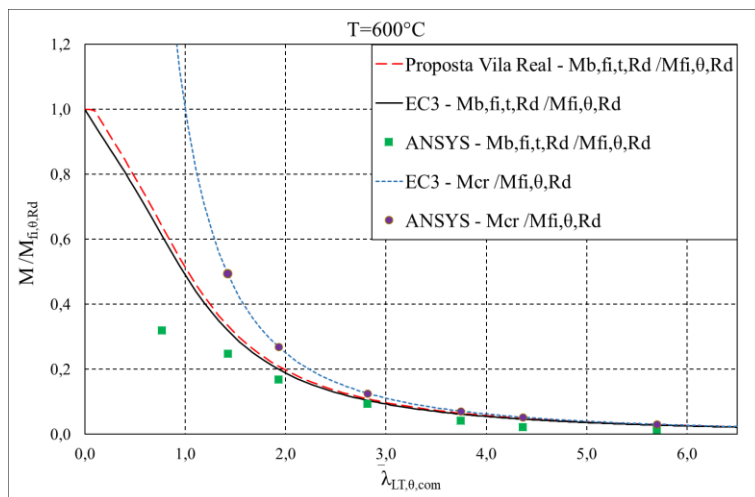


Figura 74 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,4h - 600[°C]

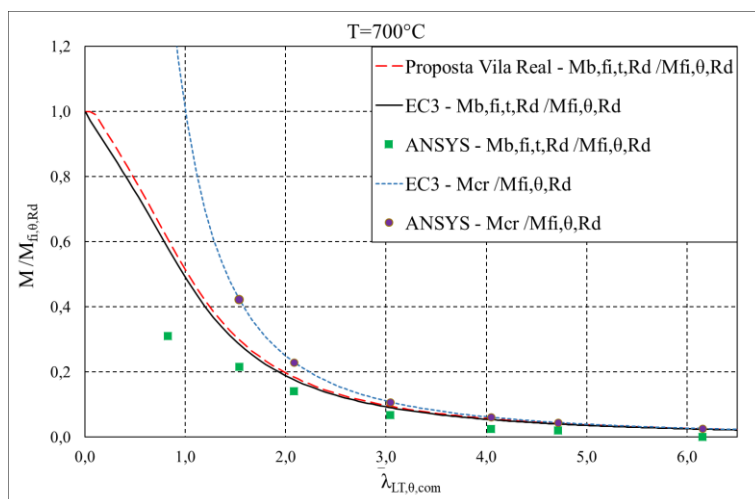


Figura 75 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,4h - 700[°C]

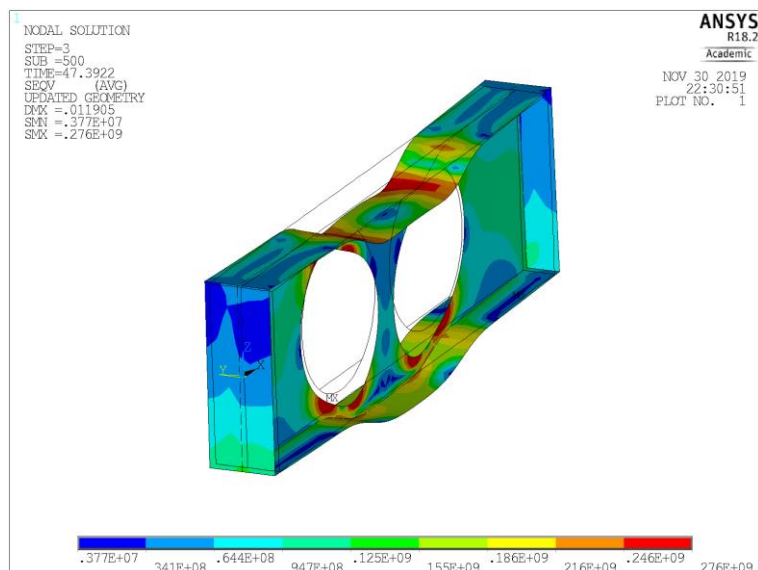


Figura 76 - Colapso pelo mecanismo de Vierendeel - H=1,4h 1 [m] 500 [°C] (Tensões Von Misses)

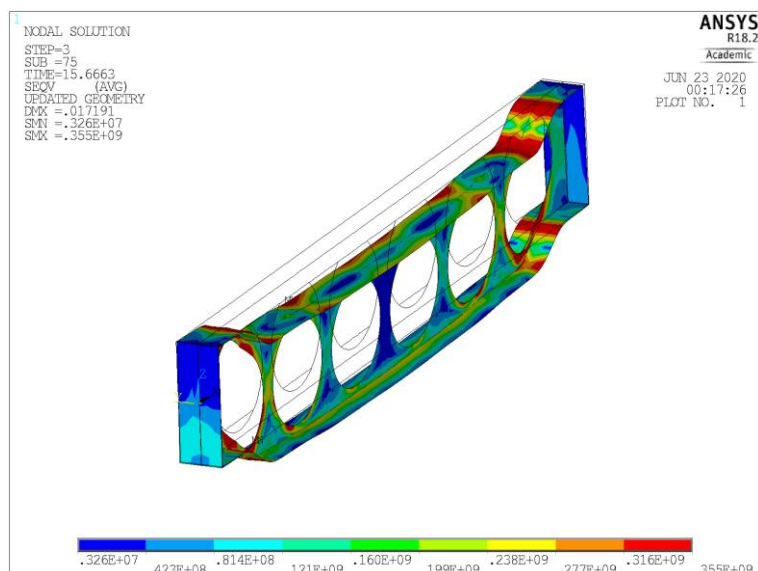


Figura 77 - Colapso pelo mecanismo de Vierendeel - H=1,4h 2 [m] 20 [°C] (Tensões Von Misses)

O momento resistente obtido numericamente apresenta em média 39.9% do momento resistente do EC3 e quando comparado à proposta de Vila Real esse valor decresce ligeiramente para 38.1%. Na Tabela 19 fica claro que existe um decréscimo na relação dos momentos resistentes para os casos mais esbeltos, considerando as vigas com comprimentos de 7, 9 e 10 [m], para temperatura ambiente e temperaturas elevadas.

Tabela 19 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso H=1,4h

H=1,4h										
20[°C]										
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS
	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3
1	43,50	99,00	94,55	0,439	0,460	30,20	74,52	71,17	0,405	0,424
2	39,60	74,77	71,40	0,530	0,555	25,70	52,75	50,37	0,487	0,510
3	36,90	54,05	51,62	0,683	0,715	18,20	35,96	34,34	0,506	0,530
5	19,60	31,41	30,00	0,624	0,653	9,14	19,90	19,00	0,459	0,481
7	8,57	21,69	20,71	0,395	0,414	5,32	13,52	12,91	0,393	0,412
9	5,04	16,61	15,86	0,304	0,318	3,43	10,27	9,81	0,334	0,350
10	2,88	14,89	14,22	0,193	0,203	2,04	9,19	8,77	0,222	0,232
600[°C]										
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS
	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3
1	17,70	43,83	41,85	0,404	0,423	8,38	20,87	19,93	0,402	0,421
2	13,70	29,68	28,34	0,462	0,483	5,85	13,45	12,85	0,435	0,455
3	9,33	19,56	18,68	0,477	0,500	3,81	8,58	8,20	0,444	0,465
5	5,14	10,56	10,09	0,487	0,510	1,85	4,54	4,33	0,408	0,427
7	2,30	7,12	6,80	0,323	0,338	0,66	3,04	2,90	0,217	0,227
9	1,25	5,39	5,15	0,232	0,243	0,54	2,29	2,19	0,237	0,248
10	0,81	4,82	4,60	0,169	0,177	0,00	2,05	1,95	0,001	0,001

Uma diminuição de 2,2 [cm] da altura da secção transversal para o caso H=1,4h resulta em média num momento resistente de 27,2% inferior quando comparado com o caso MR.

Na Tabela 20 estão apresentadas as razões de forma percentual entre os momentos resistentes do ANSYS e do EC3, calculados em função da esbelteza do ANSYS do caso H=1,4h. Esta tabela traduz os resultados apresentados dos gráficos do caso H=1,4h. O momento resistente do ANSYS apresenta um valor médio de 71,1% do momento resistente do EC3, de forma normalizada.

Tabela 20 - Razão entre o momento resistente do ANSYS e do EC3, calculado de acordo com a esbelteza do ANSYS do caso H=1,4h

L [m]	H=1,4h							
	20[°C]		500[°C]		600[°C]		700[°C]	
	$\bar{\lambda}_{LT}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]
1	0,621	53,6%	0,708	53,7%	0,765	55,1%	0,826	42,0%
2	1,156	80,3%	1,318	87,9%	1,423	86,5%	1,537	45,6%
3	1,567	113,0%	1,786	98,9%	1,929	95,9%	2,084	46,5%
5	2,287	110,9%	2,608	95,6%	2,817	102,6%	3,043	42,7%
7	3,043	80,4%	3,470	93,6%	3,747	77,6%	4,048	22,7%
9	3,543	62,5%	4,039	80,1%	4,362	56,2%	4,712	24,9%
10	4,628	58,7%	5,277	79,0%	5,699	60,7%	6,156	0,1%

Na Figura 78, Figura 79, Figura 80 e Figura 81 encontram-se os gráficos dos momentos resistentes de forma normalizada para o caso H=1,6h. Para a temperatura ambiente, os pontos encontram-se acima da curva de encurvadura do EC3 e também acima da curva gerada pela PVR, o que significa que estas vigas estariam seguras se fossem dimensionadas por ambos os métodos. Apenas a viga de 1 [m] tem um comportamento anormal para esta temperatura, isso acontece devido ao modo de colapso não se dar pela encurvadura lateral torsional, mas sim, pelo mecanismo de Vierendeel. Com o aumento da temperatura, as vigas de menor esbelteza encontram-se mais afastadas da curva de encurvadura da norma, mas com o aumento do comprimento os pontos obtidos através do ANSYS tendem a ter maior concordância com os métodos simplificados.

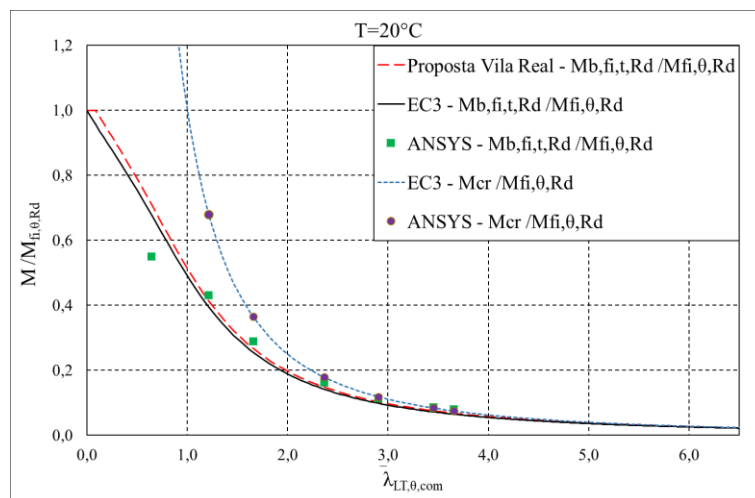


Figura 78 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,6h - 20[°C]

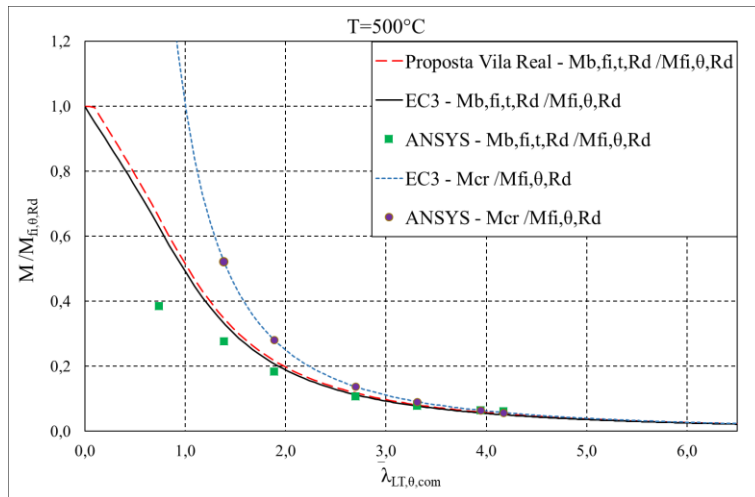


Figura 79 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,6h - 500[°C]

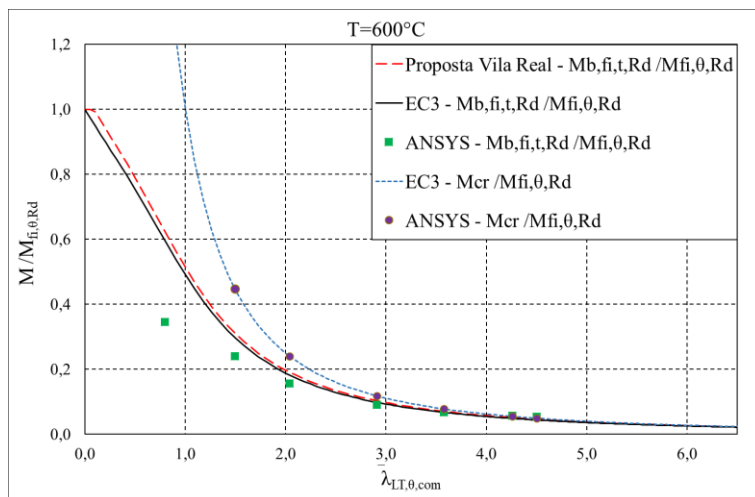


Figura 80 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,6h - 600[°C]

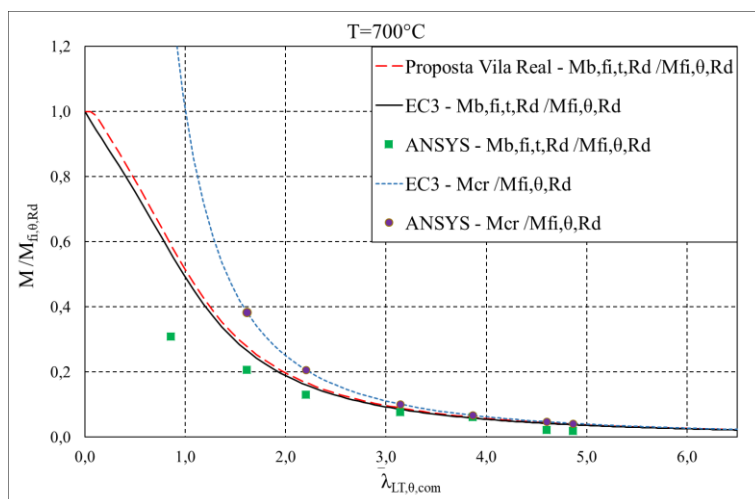


Figura 81 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso H=1,6h - 700[°C]

Os momentos resistentes conseguidos pelo ANSYS apresentam em média 59,9% da resistência do EC3 e obteve-se uma resistência média de 57,2% em relação à proposta de Vila Real. Percebe-se que existe uma aproximação dos momentos resistentes do ANSYS em relação aos momentos resistentes obtidos analiticamente com o aumento da altura da secção transversal.

Com um aumento de 2,2 [cm] da altura da secção transversal, em relação ao caso MR, constata-se um aumento da resistência à encurvadura no valor de 10%.

Na Tabela 22 estão apresentadas as razões de forma percentual entre os momentos resistentes do ANSYS e do EC3, calculados em função da esbelteza do ANSYS do caso H=1,6h. Para esta comparação o ANSYS apresenta 87,3% do momento resistente do EC3, em média.

Tabela 21 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso H=1,6h

		H=1,6h									
		20[°C]					500[°C]				
L		$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
[m]		ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS
		[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3
1		81,50	123,20	117,65	0,662	0,693	44,50	92,49	88,32	0,481	0,504
2		63,90	90,53	86,45	0,706	0,739	32,00	63,31	60,46	0,505	0,529
3		42,90	63,26	60,41	0,678	0,710	21,20	41,68	39,80	0,509	0,533
5		24,00	35,10	33,52	0,684	0,716	12,50	22,10	21,11	0,566	0,592
7		16,80	23,64	22,57	0,711	0,744	9,12	14,67	14,01	0,622	0,651
9		12,70	17,83	17,03	0,712	0,746	7,45	10,99	10,50	0,678	0,710
10		11,80	15,90	15,19	0,739	0,774	7,16	9,78	9,34	0,732	0,767
		600[°C]					700[°C]				
L		$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$				
[m]		ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS
		[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3
1		24,00	54,29	51,85	0,442	0,463	10,50	25,79	24,63	0,407	0,426
2		16,70	35,43	33,83	0,471	0,494	7,02	15,97	15,25	0,440	0,460
3		10,90	22,56	21,54	0,483	0,506	4,45	9,86	9,41	0,452	0,473
5		6,34	11,70	11,17	0,542	0,568	2,64	5,01	4,79	0,527	0,552
7		4,73	7,71	7,36	0,614	0,642	2,12	3,28	3,14	0,646	0,676
9		3,94	5,76	5,50	0,684	0,716	0,77	2,45	2,34	0,316	0,331
10		3,74	5,12	4,89	0,730	0,764	0,63	2,17	2,07	0,290	0,304

Tabela 22 - Razão entre o momento resistente do ANSYS e do EC3, calculado de acordo com a esbelteza do ANSYS do caso H=1,6h

L [m]	H=1,6h							
	20[°C]		500[°C]		600[°C]		700[°C]	
	$\bar{\lambda}_{LT}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]
1	0,645	81,2%	0,736	61,2%	0,795	57,8%	0,858	54,8%
2	1,214	109,4%	1,384	83,4%	1,495	80,7%	1,615	77,7%
3	1,655	113,4%	1,887	88,4%	2,038	85,4%	2,202	81,5%
5	2,363	114,1%	2,694	95,5%	2,909	92,5%	3,142	90,6%
7	2,904	115,1%	3,312	101,5%	3,576	100,6%	3,863	106,3%
9	3,454	119,3%	3,943	114,4%	4,258	116,0%	4,599	53,8%
10	3,656	122,4%	4,168	122,1%	4,501	122,1%	4,862	48,6%

Para o caso  $d_0=1,1h$ , em temperatura ambiente, pode-se dizer que existe concordância entre os pontos obtidos através do ANSYS quando comparado com a curva do EC3 e a PVR. Novamente, para a viga alveolar de 1 [m], o momento resistente encontra-se abaixo da curva de encurvadura do EC3. O reduzido valor resistente desta viga deve-se ao modo de colapso, que não se dá por ELT, mas sim pelo mecanismo de Vierendeel. Com o aumento da temperatura as vigas pouco esbeltas, tendem a encontrar-se abaixo da curva do EC3, mas com o aumento do comprimento os pontos tendem a encontrar-se com as curvas de encurvadura, pois também se aproximam do momento crítico.

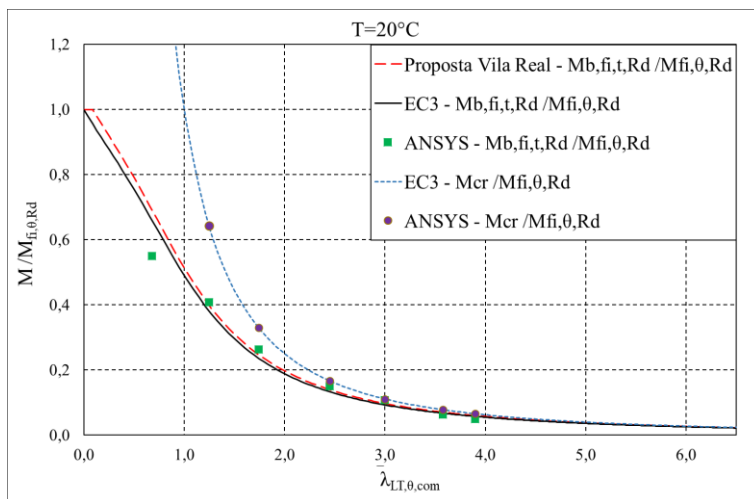


Figura 82 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $d_0=1,1h - 20[°C]$

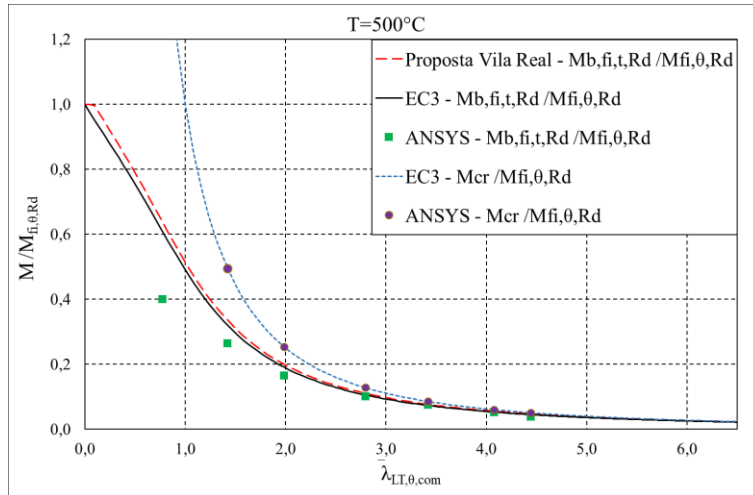


Figura 83 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $d_0=1,1h - 500[^{\circ}\text{C}]$

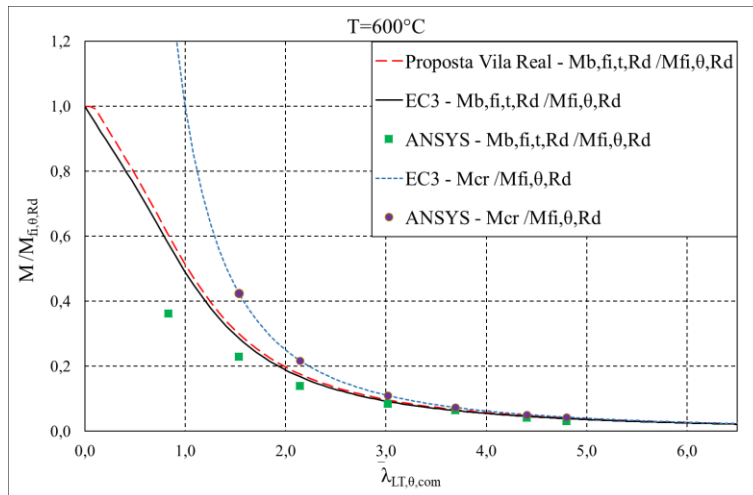


Figura 84 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $d_0=1,1h - 600[^{\circ}\text{C}]$

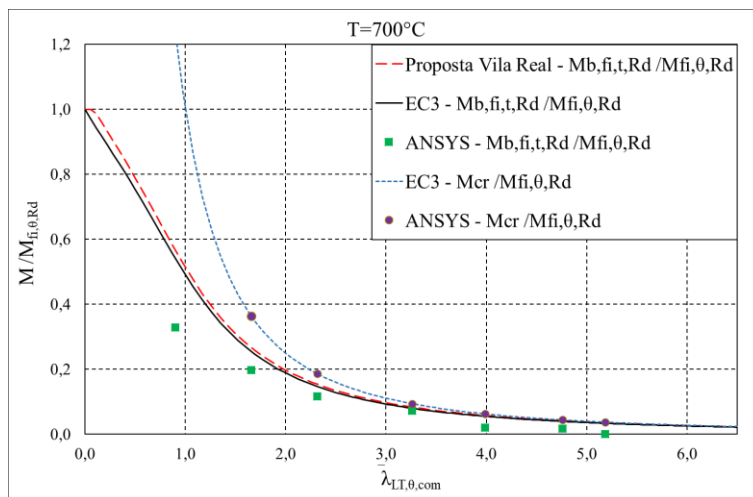


Figura 85 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $d_0=1,1h - 700[^{\circ}\text{C}]$

A média do momento resistente à encurvadura do ANSYS exibe um valor de 48,9% do momento resistente da norma. Para a relação entre o momento resistente do ANSYS e a PVR, tem-se uma média de 46,7%, Tabela 23.

Com uma diminuição de 2,2 [cm] do diâmetro das aberturas  $d_0$ , o momento resistente médio é menor no valor de 3,7%, quando comparado com o caso MR. Podemos afirmar que esta alteração geométrica não tem um grande impacto na sua resistência à encurvadura em relação ao caso MR.

Na Tabela 24 estão apresentadas as razões de forma percentual entre os momentos resistentes do ANSYS e do EC3, calculados em função da esbelteza do ANSYS do caso  $d_0=1,1h$ . Em média, o momento resistente do ANSYS é de 85,7% em relação ao momento resistente do EC3, de forma normalizada.

Tabela 23 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso  $d_0=1,1h$

Tabela 23 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso $d_0=1,1h$											
$d_0=1,1h$											
20[°C]					500[°C]						
L	$M_{b,fi,t,Rd}$				$M_{b,fi,t,Rd}$						
[m]	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS	
	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3	
1	76,20	115,18	110,00	0,662	0,693	43,30	86,48	82,59	0,501	0,524	
2	56,40	84,95	81,13	0,664	0,695	28,50	59,46	56,79	0,479	0,502	
3	36,40	59,83	57,14	0,608	0,637	17,90	39,48	37,70	0,453	0,475	
5	20,90	33,75	32,23	0,619	0,648	10,90	21,28	20,32	0,512	0,536	
7	15,00	22,98	21,95	0,653	0,683	8,21	14,28	13,64	0,575	0,602	
9	8,74	17,46	16,68	0,501	0,524	5,65	10,78	10,29	0,524	0,549	
10	6,80	15,62	14,91	0,435	0,456	4,15	9,61	9,18	0,432	0,452	
600[°C]					700[°C]						
L	$M_{b,fi,t,Rd}$				$M_{b,fi,t,Rd}$						
[m]	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS	
	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3	
1	23,60	50,77	48,48	0,465	0,487	10,50	24,12	23,04	0,435	0,456	
2	15,00	33,29	31,79	0,451	0,472	6,29	15,02	14,34	0,419	0,439	
3	9,12	21,38	20,42	0,427	0,447	3,74	9,35	8,93	0,400	0,419	
5	5,52	11,27	10,76	0,490	0,513	2,30	4,83	4,61	0,476	0,499	
7	4,26	7,51	7,17	0,567	0,594	0,66	3,20	3,06	0,207	0,217	
9	2,74	5,65	5,39	0,485	0,508	0,55	2,40	2,29	0,228	0,239	
10	2,01	5,03	4,81	0,399	0,418	0,01	2,14	2,04	0,003	0,003	

Tabela 24 - Razão entre o momento resistente do ANSYS e do EC3, calculado de acordo com a esbelteza do ANSYS do caso  $d_0=1,1h$

L [m]	$d_0=1,1h$							
	20[°C]		500[°C]		600[°C]		700[°C]	
	$\bar{\lambda}_{LT}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]
1	0,676	83,2%	0,770	65,7%	0,832	62,9%	0,899	60,8%
2	1,247	106,9%	1,422	82,6%	1,536	80,3%	1,659	77,5%
3	1,740	111,3%	1,983	86,6%	2,142	83,4%	2,314	79,7%
5	2,450	113,1%	2,793	95,3%	3,017	92,1%	3,259	90,3%
7	2,999	116,2%	3,419	103,6%	3,692	102,9%	3,988	37,7%
9	3,577	93,5%	4,078	99,0%	4,404	92,1%	4,758	43,5%
10	3,896	85,2%	4,442	85,2%	4,797	79,1%	5,182	0,5%

A Figura 86, Figura 87, Figura 88 e Figura 89 representam os gráficos dos momentos resistentes de forma normalizada para o caso  $d_0=1,3h$ , onde a abertura da alma é máxima dos casos em estudo. Para este caso, à temperatura ambiente, existe apenas um ponto acima da curva de encurvadura, correspondente à viga de 3 [m]. A viga de 1 e 2 [m] não sofre ELT, tal como discutido na secção 4.3.2 assim, o desvio dos pontos é justificado. Novamente, o caso da viga de menor comprimento é a viga mais suscetível ao mecanismo de Vierendeel, o reduzido comprimento em conjunto com as aberturas de valor máximo dos casos em estudo influência de modo negativo o momento resistente. Pelos gráficos também se percebe que para este tipo de geometria as vigas mais compridas apresentam um valor de esbelteza bastante elevado, por esse motivo, não são esperados elevados momentos resistentes para estas vigas.

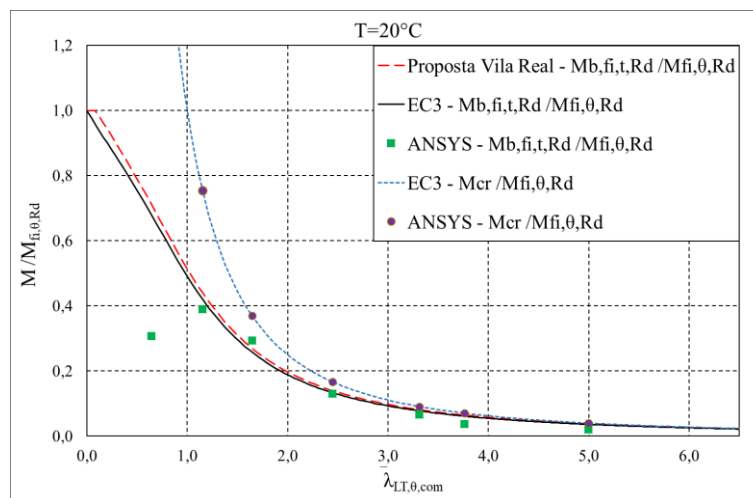


Figura 86 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $d_0=1,3h$  - 20[°C]

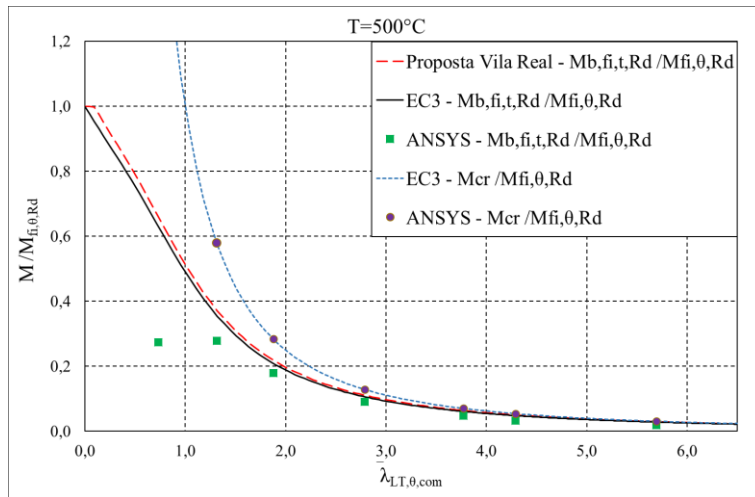


Figura 87 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $d_0=1,3h - 500[^\circ\text{C}]$

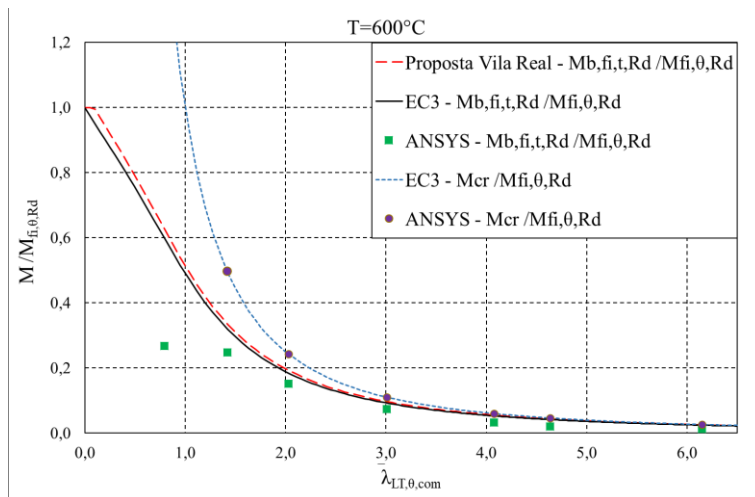


Figura 88 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $d_0=1,3h - 600[^\circ\text{C}]$

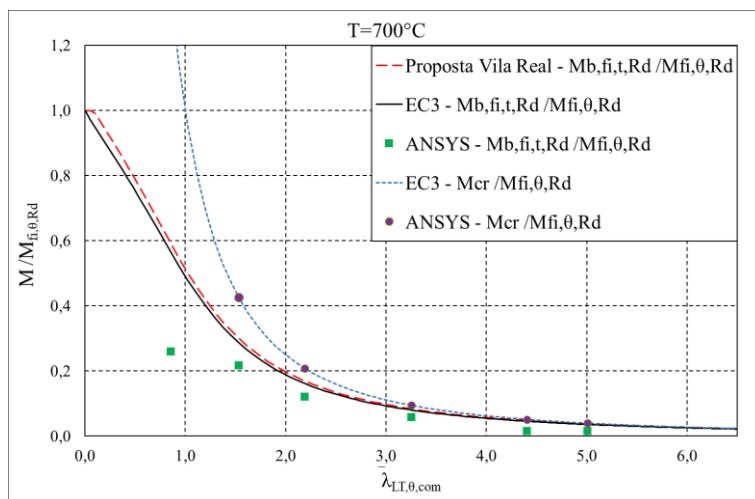


Figura 89 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $d_0=1,3h - 700[^\circ\text{C}]$

Em média, o momento resistente à encurvadura obtido numericamente corresponde a 36,1% da resistência da norma e 34,5% da PVR. Na Tabela 25 observa-se um afastamento dos rácios com o aumento do comprimento e o aumento da temperatura.

Tabela 25 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso  $d_0=1,3h$

		$d_0=1,3h$									
		20[°C]					500[°C]				
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$					
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	
1	38,70	106,29	101,50	0,364	0,381	27,00	79,99	76,39	0,338	0,353	
2	49,10	79,98	76,38	0,614	0,643	27,50	56,37	53,84	0,488	0,511	
3	37,00	57,35	54,76	0,645	0,676	17,60	38,08	36,37	0,462	0,484	
5	16,50	32,74	31,27	0,504	0,528	8,97	20,71	19,77	0,433	0,454	
7	8,37	22,34	21,33	0,375	0,392	4,69	13,90	13,28	0,337	0,353	
9	4,73	16,97	16,21	0,279	0,292	3,25	10,49	10,02	0,310	0,324	
10	2,62	15,18	14,49	0,173	0,181	1,81	9,36	8,94	0,193	0,203	
		600[°C]					700[°C]				
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$					$M_{b,fi,t,Rd}$					
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	
1	15,90	47,04	44,92	0,338	0,354	7,54	22,40	21,39	0,337	0,353	
2	14,70	31,70	30,27	0,464	0,486	6,30	14,36	13,71	0,439	0,459	
3	8,96	20,69	19,76	0,433	0,453	3,53	9,08	8,67	0,389	0,407	
5	4,39	10,98	10,49	0,400	0,419	1,72	4,71	4,50	0,365	0,382	
7	1,90	7,32	6,99	0,260	0,272	0,48	3,12	2,98	0,153	0,160	
9	1,18	5,50	5,25	0,215	0,225	0,48	2,34	2,23	0,206	0,216	
10	0,75	4,90	4,68	0,153	0,161	0,00	2,08	1,99	0,001	0,001	

Para  $d_0=1,3h$ , onde o diâmetro da abertura corresponde a 28,6 [cm], constata-se uma diminuição do momento resistente em relação ao MR, no valor de 28,6%, em média. Fica claro que esta configuração geométrica tem um impacto notável no valor resistente à encurvadura. A dimensão destas aberturas facilita o colapso das vigas menos esbeltas por modos de instabilidade local.

Na Tabela 26 estão apresentados os rácios entre os momentos resistentes do ANSYS e do EC3, calculados em função da esbelteza do ANSYS do caso  $d_0=1,3h$ . Em média, o momento resistente obtido através do ANSYS é de 67,9% em relação ao momento resistente do EC3, de forma normalizada.

Tabela 26 - Razão entre o momento resistente do ANSYS e do EC3, calculado de acordo com a esbelteza do ANSYS do caso  $d_0=1,3h$

L [m]	$d_0=1,3h$							
	20[°C]		500[°C]		600[°C]		700[°C]	
	$\bar{\lambda}_{LT}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]
1	0,642	45,1%	0,732	43,4%	0,790	44,6%	0,854	45,9%
2	1,152	92,6%	1,314	78,2%	1,419	77,1%	1,533	75,6%
3	1,646	113,8%	1,877	85,4%	2,026	81,8%	2,189	75,0%
5	2,444	97,7%	2,787	85,7%	3,010	80,0%	3,251	73,6%
7	3,309	85,1%	3,773	78,0%	4,075	60,6%	4,402	35,9%
9	3,763	60,9%	4,290	68,6%	4,633	47,8%	5,005	46,1%
10	4,995	57,5%	5,696	65,5%	6,151	52,1%	6,645	0,4%

Para um espaçamento entre aberturas  $S$  igual a  $1,1d_0$ , em temperatura ambiente, é visível que os resultados do momento resistente obtidos pelo ANSYS estão abaixo da curva de encurvadura, com exceção da viga de 3 [m]. As vigas de 1 e 2 [m] sofrem de uma instabilidade local, sendo que se verificou a existência de dois modos de colapsos locais, o mecanismo de Vierendeel e a encurvadura do montante da alma, 4.3.2 . De um modo geral, com o aumento da temperatura verifica-se que a maioria dos pontos estão abaixo da curva de encurvadura da norma, Figura 90, Figura 91, Figura 92 e Figura 93. É de esperar que a configuração da geometria deste caso seja mais suscetível ao colapso, pois a largura do montante da alma entre as aberturas  $S_0$  é extremamente reduzida ( $S_0= 2,64$  [cm]).

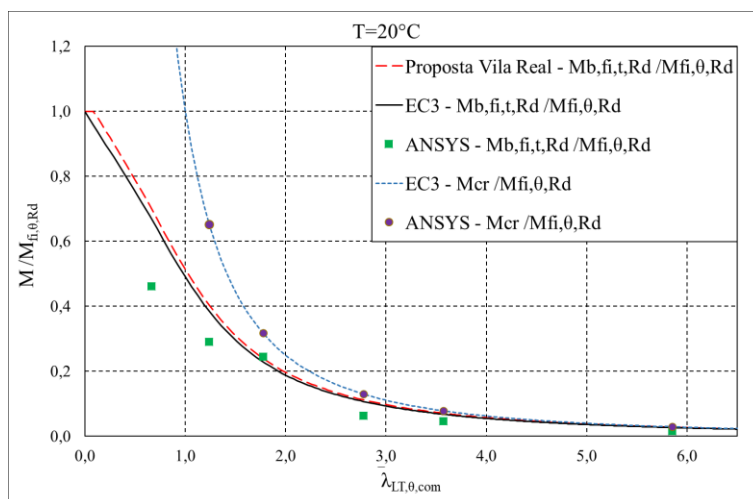


Figura 90 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,1d_0 - 20[^\circ C]$

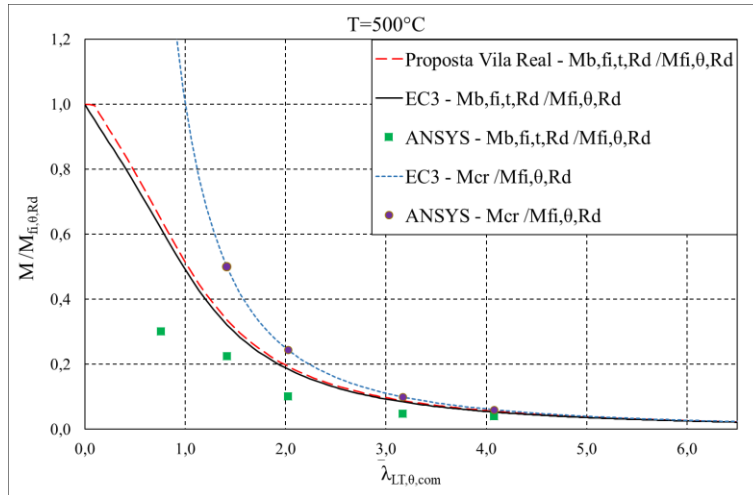


Figura 91 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,1d_0 - 500[^{\circ}\text{C}]$

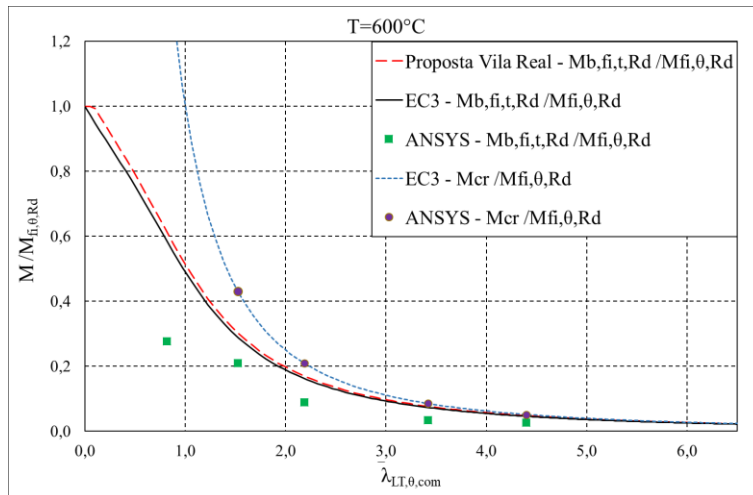


Figura 92 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,1d_0 - 600[^{\circ}\text{C}]$

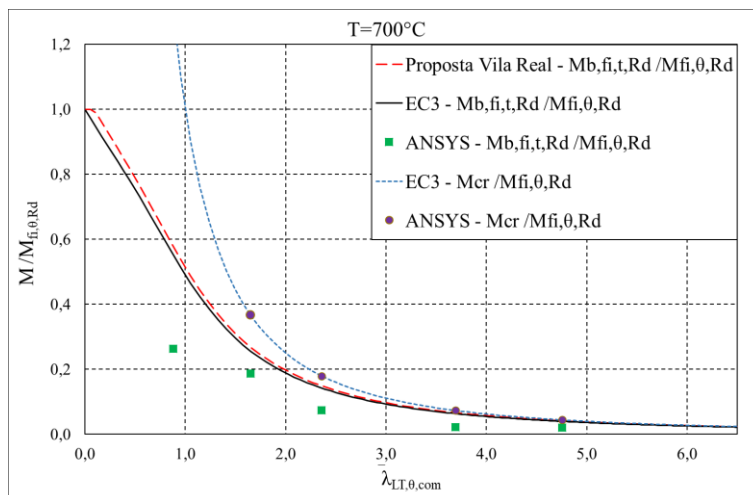


Figura 93 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,1d_0 - 700[^{\circ}\text{C}]$

Em média, o momento resistente do ANSYS corresponde a 26,7% do momento resistente do EC3 e quando comparado com a PVR essa relação decresce para 25,5%. Na Tabela 27, percebe-se que com o aumento do comprimento existe um decréscimo da relação entre os momentos resistentes obtidos de forma numérica e os momentos resistentes conseguidos de forma analítica. Esse decréscimo, também se verifica com o aumento da temperatura.

Tabela 27 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso  $S=1,1d_0$

S=1,1d <sub>0</sub>										
20[°C]										
L [m]	M <sub>b,fi,t,Rd</sub>					M <sub>b,fi,t,Rd</sub>				
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3
1	61,30	110,94	105,95	0,553	0,579	31,10	83,39	79,64	0,373	0,391
2	38,50	82,60	78,89	0,466	0,488	23,20	58,01	55,40	0,400	0,419
3	32,60	58,66	56,02	0,556	0,582	10,40	38,82	37,08	0,268	0,281
5	8,47	33,27	31,77	0,255	0,267	5,03	21,00	20,06	0,239	0,251
7	6,23	22,67	21,65	0,275	0,288	4,10	14,10	13,46	0,291	0,305
9	2,15	17,22	16,45	0,125	0,131	1,55	10,64	10,16	0,146	0,153
10	1,61	15,40	14,71	0,105	0,109	1,14	9,49	9,06	0,120	0,126
600[°C]										
L [m]	M <sub>b,fi,t,Rd</sub>					M <sub>b,fi,t,Rd</sub>				
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3
1	17,20	49,00	46,79	0,351	0,368	8,04	23,30	22,25	0,345	0,361
2	13,00	32,54	31,08	0,399	0,418	5,72	14,71	14,05	0,389	0,407
3	5,53	21,06	20,11	0,263	0,275	2,28	9,22	8,81	0,247	0,259
5	2,18	11,13	10,63	0,196	0,205	0,67	4,77	4,56	0,141	0,148
7	1,63	7,42	7,08	0,220	0,230	0,63	3,16	3,02	0,201	0,210
9	0,61	5,58	5,33	0,109	0,114	0,00	2,37	2,26	0,001	0,001
10	0,49	4,97	4,75	0,099	0,104	0,00	2,11	2,01	0,001	0,001
700[°C]										
L [m]	M <sub>b,fi,t,Rd</sub>					M <sub>b,fi,t,Rd</sub>				
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS PVR	ANSYS EC3
1	17,20	49,00	46,79	0,351	0,368	8,04	23,30	22,25	0,345	0,361
2	13,00	32,54	31,08	0,399	0,418	5,72	14,71	14,05	0,389	0,407
3	5,53	21,06	20,11	0,263	0,275	2,28	9,22	8,81	0,247	0,259
5	2,18	11,13	10,63	0,196	0,205	0,67	4,77	4,56	0,141	0,148
7	1,63	7,42	7,08	0,220	0,230	0,63	3,16	3,02	0,201	0,210
9	0,61	5,58	5,33	0,109	0,114	0,00	2,37	2,26	0,001	0,001
10	0,49	4,97	4,75	0,099	0,104	0,00	2,11	2,01	0,001	0,001

Para o caso  $S=1,1d_0$ , onde o espaçamento entre aberturas corresponde ao mínimo dos casos em estudo, quando comparado ao caso MR obtém-se uma resistência à encurvadura inferior no valor de 35,4%, em média. Podemos afirmar que com esta configuração geométrica existe uma perda considerável na resistência em relação ao caso MR.

O momento resistente obtido através do ANSYS apresenta um valor médio de 64,7% em relação ao momento resistente do EC3, de forma normalizada para o caso  $S=1,1d_0$ . Este caso representa a média mais baixa de todos os casos em estudo para esta comparação.

Tabela 28 - Razão entre o momento resistente do ANSYS e do EC3, calculado de acordo com a esbelteza do ANSYS do caso  $S=1,1d_0$

L [m]	S=1,1d <sub>0</sub>							
	20[°C]		500[°C]		600[°C]		700[°C]	
	$\bar{\lambda}_{LT}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{ANSYS}{EC3}$ [%]
1	0,662	69,1%	0,755	48,6%	0,815	47,1%	0,881	47,8%
2	1,239	75,5%	1,413	69,5%	1,526	72,4%	1,648	72,9%
3	1,774	107,1%	2,023	54,6%	2,184	54,6%	2,360	52,4%
5	2,777	59,7%	3,166	57,7%	3,419	47,7%	3,694	34,7%
7	3,574	69,5%	4,074	74,8%	4,400	57,0%	4,753	52,4%
9	5,853	60,8%	6,674	72,3%	7,207	54,5%	7,671	0,6%
10	6,685	58,5%	7,621	68,4%	8,230	57,1%	8,890	0,7%

O caso  $S=1,3d_0$ , demonstra conformidade entre os resultados obtidos através do ANSYS e os resultados conseguidos pelos métodos analíticos, para a temperatura ambiente, com exceção da viga de 1 [m]. Essa viga sofre de um modo de colapso local, o mecanismo Vierendeel, e assim, é de esperar que este ponto se encontre abaixo da curva de encurvadura da norma. Com o aumento da temperatura é visto que as vigas de maior comprimento tendem a estar mais próximas da curva de encurvadura do EC3 e da PVR quando comparadas às vigas menos esbeltas. O mesmo não se verifica para o estudo que foi efetuado a uma temperatura de 700 [°C], conforme se tem averiguado para os casos anteriores. Para esta temperatura as vigas tendem a demonstrar uma baixa resistência à encurvadura lateral torsional.

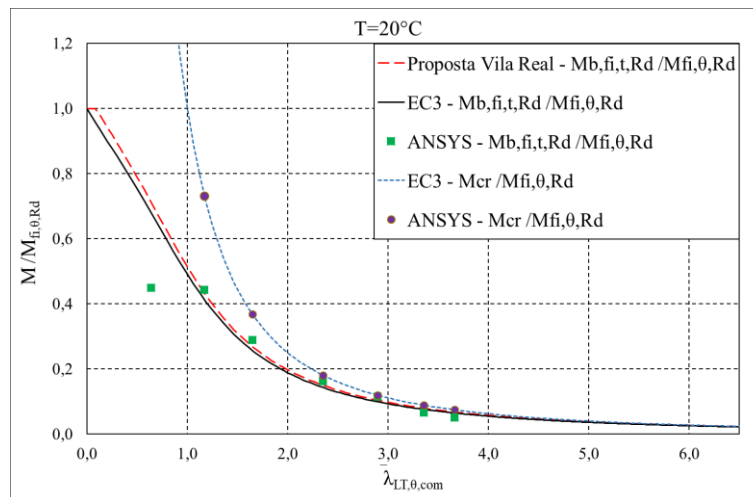


Figura 94 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,3d_0$  - 20[°C]

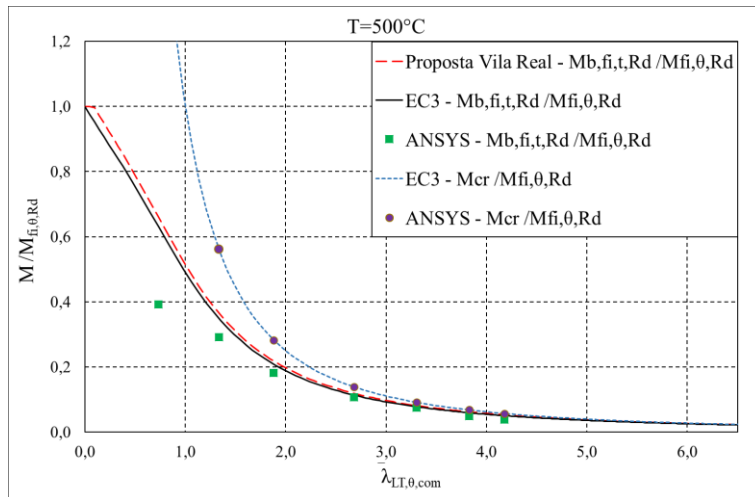


Figura 95 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,3d_0 - 500[^{\circ}\text{C}]$

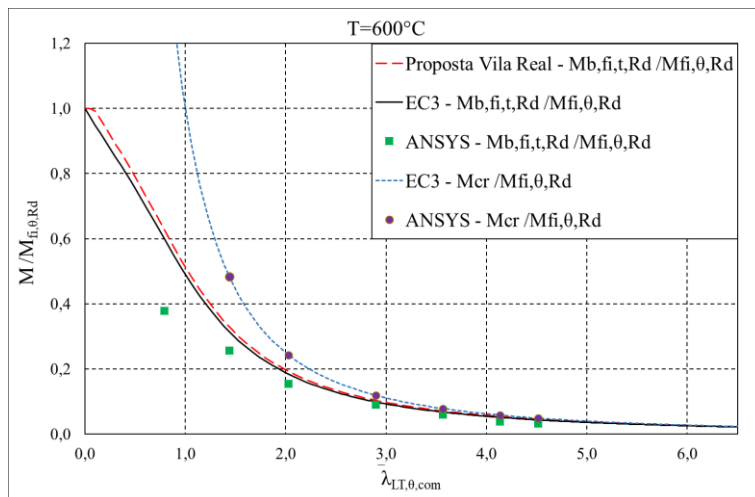


Figura 96 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,3d_0 - 600[^{\circ}\text{C}]$

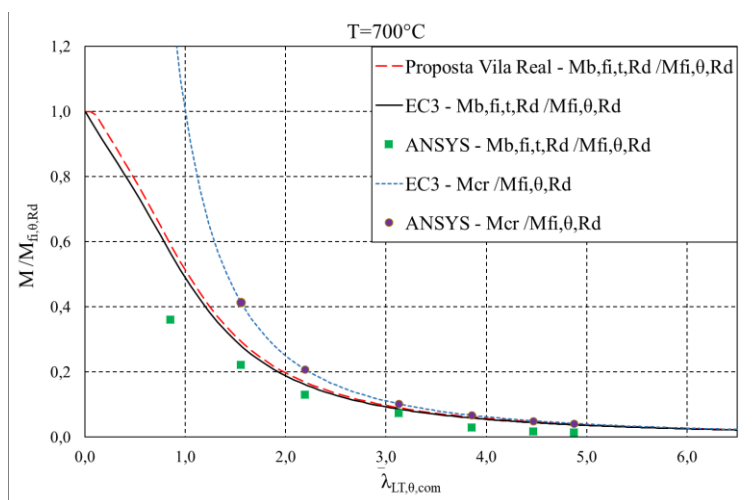


Figura 97 - Gráfico da resistência em relação à esbelteza das vigas alveolares do caso  $S=1,3d_0 - 700[^{\circ}\text{C}]$

Os momentos resistentes conseguidos através dos métodos numéricos apresentam em média 50,3% da resistência do EC3 e obteve-se uma resistência média no valor de 48% em relação à proposta de Vila Real. Existe um decréscimo destas relações com o aumento do comprimento e com o aumento da temperatura o rácio tende a não se alterar à exceção da temperatura ambiente.

Tabela 29 - Tabela de resultados dos momentos resistentes do caso  $S=1,3d_0$

S=1,3d <sub>0</sub>										
20[°C]										
L	M <sub>b,fi,t,Rd</sub>					M <sub>b,fi,t,Rd</sub>				
	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS
[m]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3
1	59,60	110,94	105,95	0,537	0,563	40,60	83,39	79,64	0,487	0,510
2	58,80	82,60	78,89	0,712	0,745	30,20	58,01	55,40	0,521	0,545
3	38,40	58,66	56,02	0,655	0,685	18,80	38,82	37,08	0,484	0,507
5	21,50	33,27	31,77	0,646	0,677	11,10	21,00	20,06	0,529	0,553
7	15,10	22,67	21,65	0,666	0,697	7,83	14,10	13,46	0,555	0,582
9	8,79	17,22	16,45	0,510	0,534	5,02	10,64	10,16	0,472	0,494
10	6,76	15,40	14,71	0,439	0,460	4,04	9,49	9,06	0,426	0,446
600[°C]										
L	M <sub>b,fi,t,Rd</sub>					M <sub>b,fi,t,Rd</sub>				
	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	ANSYS
[m]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3	[kNm]	[kNm]	[kNm]	PVR	EC3
1	23,60	49,00	46,79	0,482	0,504	11,00	23,30	22,25	0,472	0,494
2	16,00	32,54	31,08	0,492	0,515	6,79	14,71	14,05	0,462	0,483
3	9,63	21,06	20,11	0,457	0,479	3,96	9,22	8,81	0,430	0,450
5	5,61	11,13	10,63	0,504	0,528	2,27	4,77	4,56	0,475	0,498
7	3,74	7,42	7,08	0,504	0,528	0,89	3,16	3,02	0,282	0,296
9	2,36	5,58	5,33	0,423	0,443	0,52	2,37	2,26	0,219	0,230
10	2,00	4,97	4,75	0,402	0,421	0,43	2,11	2,01	0,204	0,214

Com um aumento entre o espaçamento das aberturas S, resultando numa largura do montante da alma de 7,92 [cm], obteve-se em média um momento resistente de 6% inferior quando comparado com o caso MR. Pode-se dizer que para este caso que o aumento do espaçamento não resulta numa diferença considerável do momento resistente. Esta ligeira redução do momento resistente pode ser justificada pela razão de existir uma maior aproximação das aberturas às extremidades da viga, desse modo, pode existir a perda de um ligeiro valor resistente à encurvadura lateral torsional.

O momento resistente obtido através do ANSYS apresenta um valor médio de 82% em relação ao momento resistente do EC3, quando a resistência é calculada em função da esbelteza que foi obtida através do ANSYS para o caso  $S=1,3d_0$ .

Tabela 30 - Razão entre o momento resistente do ANSYS e do EC3, calculado de acordo com a esbelteza do ANSYS do caso  $S=1,3d_0$

L [m]	S=1,3d <sub>0</sub>							
	20[°C]		500[°C]		600[°C]		700[°C]	
	$\bar{\lambda}_{LT}$ ANSYS	$\frac{\text{ANSYS}}{\text{EC3}}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{\text{ANSYS}}{\text{EC3}}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{\text{ANSYS}}{\text{EC3}}$ [%]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\frac{\text{ANSYS}}{\text{EC3}}$ [%]
1	0,641	66,0%	0,731	62,1%	0,789	63,0%	0,853	63,8%
2	1,169	107,4%	1,333	83,6%	1,440	81,5%	1,556	79,3%
3	1,648	112,6%	1,879	87,2%	2,029	83,9%	2,192	80,3%
5	2,352	113,4%	2,682	94,1%	2,896	90,7%	3,128	86,4%
7	2,898	115,3%	3,304	96,9%	3,568	88,6%	3,854	49,8%
9	3,357	87,4%	3,827	81,5%	4,133	73,3%	4,465	38,2%
10	3,665	79,0%	4,179	77,3%	4,513	73,5%	4,875	37,4%

De um modo geral, não se verificou um aumento significativo da resistência à encurvadura dos casos em estudo em relação ao modelo referência, sendo que, o único caso onde se verificou um valor médio da resistência aumentada, no valor de 10%, foi para o caso onde houve um aumento da altura da secção transversal, o caso  $H=1,6h$ . Existiram dois casos onde os resultados se assemelharam ao momento resistente à encurvadura do caso MR, onde houve uma resistência inferior de 3,7% e 6% para os casos  $d_0=1,1h$  e  $S=1,3d_0$ , respetivamente. É possível considerar que estas configurações geométricas são desprezíveis para um ganho ou perda de resistência, em relação ao modelo referência. Por outro lado, constataram-se casos onde a perda da resistência foi significativa, para os casos  $H=1,4$ ,  $d_0=1,3h$  e  $S=1,1d_0$ , onde a perda máxima da resistência atingiu um valor de 35,4%, para o caso onde o espaçamento entre aberturas era mínimo. Portanto, com a diminuição da altura da secção transversal H, com o aumento do diâmetro da abertura  $d_0$  e com a redução do espaçamento entre as aberturas S, podemos afirmar que existem efeitos prejudiciais a nível da resistência à encurvadura, isto também se deve ao fato destas tipo de geometrias serem mais suscetíveis a um colapso local para as vigas menos esbeltas.

Em média, os resultados numéricos do ANSYS em relação à norma do Eurocódigo 3 representam 45,6% do valor resistente, enquanto com a proposta de Vila Real a mesma

relação corresponde a 43,6% do valor resistente, isto é, para as vigas alveolares. Se for feita a mesma comparação para as vigas sólidas obtemos uma relação média no valor de 97%, em relação à norma. Os resultados numéricos do momento resistente das vigas sólidas corresponderam a 92,6% dos resultados obtidos pela proposta de Vila Real. Tanto para as vigas alveolares como para as vigas sólidas, podemos afirmar que existe uma maior aproximação entre os resultados numéricos e a norma. Se bem que se verificou para as vigas sólidas que existe um aumento da relação entre os resultados obtidos pelo ANSYS e os resultados conseguidos pela proposta para as vigas mais esbeltas, o mesmo não se verificou para as vigas alveolares. A relação entre o momento resistente do ANSYS e o momento resistente do EC3 de forma normalizada representa uma média de 76,2%, claramente existe uma maior aproximação entre os momentos resistentes quando o EC3 é calculado em relação à esbelteza obtida através do ANSYS.

Apesar de se verificar concordância ou aproximação entre os resultados do ANSYS com a curva de encurvadura de forma gráfica para as vigas alveolares, isso não se verifica quando é feita uma comparação entre resultados para as vigas do mesmo comprimento, à mesma temperatura e para o mesmo caso. Isso acontece porque os gráficos foram normalizados, na verdade os pontos não são comparados em relação ao seu comprimento, mas sim à sua esbelteza. Por norma, as esbeltezas obtidas através dos métodos simplificados apresentam ter esbeltezas superiores em relação ao *software* e dessa forma os resultados obtidos de forma numérica tendem a apresentar valores resistentes mais baixos quando é feita uma comparação direta dos resultados.

## Capítulo 5: Conclusão

---

### 5.1 Conclusão

No presente trabalho foi feita uma investigação numérica de vigas sólidas e vigas alveolares através do *software* ANSYS. Foi feita uma comparação entre os resultados numéricos com os resultados obtidos através dos métodos simplificados do Eurocódigo parte 1-2 e pela proposta de Vila Real, sendo que, foi necessário a utilização do Eurocódigo parte 1-1. A viga paterna usada para este estudo foi uma viga IPE220 com um tipo de aço S355. Foram realizadas um total 356 simulações com uma carga aplicada de maneira uniformemente distribuída.

As vigas alveolares colapsaram por modo local e global. Verificou-se que para vigas de menor comprimento o modo de colapso dominante é o mecanismo de Vierendeel. Com o aumento da temperatura o modo de colapso não tende a alterar-se, contudo, verifica-se uma perda de intensidade do efeito do modo de instabilidade local. Para as vigas de maior comprimento o modo de colapso principal é a encurvadura lateral torsional. De um modo geral, a configuração geométrica da altura da secção, da abertura das furações e do espaçamento entre furações não é o fator-chave que define a existência de um modo de colapso local ou global, sendo que, o comprimento da viga foi o fator mais relevante para o aparecimento de um modo de instabilidade local ou global.

Em relação ao momento resistente à encurvadura das vigas sólidas, como esperado, percebe-se que com o aumento da altura da secção transversal existe também um aumento da resistência à encurvadura. Para as vigas alveolares, foi feita uma comparação dos momentos resistentes em relação ao modelo referência. Com o aumento da altura da secção transversal para o caso  $H=1,6h$  verificou-se um aumento médio de 10% da resistência à encurvadura em relação ao momento resistente. Já para os casos  $S=1,3d_0$  e  $d_0=1,1$ , podemos afirmar que não existem variações significativas do momento resistente à encurvadura quando comparado com o caso modelo referência (MR), onde  $H=1.5h$ ,  $d_0=1,2$

---

e  $S=1,2d_0$ . Para os casos onde existiu um aumento do diâmetro da abertura da alma  $d_0$ , uma diminuição da altura da seção transversal  $H$  e uma diminuição do espaçamento entre as aberturas da alma  $S$ , em relação ao caso MR, verificaram-se perdas significativas do momento resistente à encurvadura, chegando a atingir uma perda de, aproximadamente, 35% do momento resistente médio, em relação ao modelo referência. Fica evidente que os parâmetros geométricos têm um papel fundamental na resistência à encurvadura das vigas alveolares.

Em média, o momento resistente à encurvadura das vigas alveolares, obtido através das simulações, representa um valor de 45,6% em relação ao momento resistente do Eurocódigo 3 parte 1-2 e 43,6% em relação ao momento resistente da proposta de Vila Real. Para as vigas sólidas, o momento resistente obtido numericamente representava um valor médio de 97% em relação ao momento resistente obtido através da norma e 92,6% em relação à proposta de Vila Real. Apesar de se tratar de uma ligeira diferença, para os casos em estudo, a metodologia que mais se aproxima ao valor do momento resistente à encurvadura, obtido através do ANSYS, é pela norma e não pela proposta de Vila Real. Contudo, é preciso referir que o momento resistente calculado, tanto pela proposta de Vila Real como pelo Eurocódigo 3, apresentam grande divergência quando comparado com os resultados obtidos através do *software*, para as vigas alveolares. Quando o momento resistente entre o ANSYS e do Eurocódigo 3 parte 1-2 são comparados de forma normalizada, ou seja, quando o momento resistente do Eurocódigo 3 é calculado com o valor da esbelteza obtida através do ANSYS e comparado diretamente, esta relação apresenta um valor de 76,2%, em média.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com a realização deste trabalho é possível dar algumas sugestões para trabalhos futuros.

Mais trabalhos deste tipo poderão ser realizados, tendo em consideração fazer uma alteração do tipo de carregamento aplicado, um padrão de tensões residuais diferente proposta por outras literaturas, um perfil IPE de outras dimensões, alterar os parâmetros geométricos de acordo com parâmetros existentes de um fornecedor de vigas alveolares.

Também pode realizar-se um estudo com foco nos modos de instabilidades locais, utilizar vários perfis de comprimentos mais curtos com vários parâmetros e observar como o modo de instabilidade varia de acordo com os parâmetros geométricos e o perfil escolhido.

Se existir a possibilidade de efetuar ensaios, comparar os resultados experimentais com os resultados obtidos de forma numérica deste trabalho e com os resultados obtidos através da norma do EC3.

## Referências

---

1. Sonck, D. and J. Belis, *Lateral–torsional buckling resistance of cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research, 2015. **105**: p. 119-128.
2. ArcelorMittal, *ACB Cellular Beams - Catalog of products*. 2018.
3. CEN, *ENV 1993-1-1:1992/A2: Projeto de estruturas de aço - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, Anexo N: Aberturas nas almas, Comitê Europeu de Normalização, Bruxelas, Bélgica*. 1992.
4. CEN, *Draft of EN 1993-1-13 - Steel beams with large web openings*. Comitê Europeu de Normalização, 2017.
5. Wang, P., X. Wang, and M. Liu, *Practical method for calculating the buckling temperature of the web-post in a cellular steel beam in fire*. Thin-Walled Structures, 2014. **85**: p. 441-455.
6. Erdal, F. and M.P. Saka, *Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research, 2013. **80**: p. 355-368.
7. Sonck, D.U., *Global Buckling of Castellated and Cellular Steel Beams and Columns*. 2014, Zurich.
8. Westock, K.M.U., *The Cellular Beam Pocket Guide*.
9. Silva, J.A.d., *Estudo numérico da estabilidade de vigas alveolares em situação de incêndio*, in *Escola Superior de Tecnologia e Gestão*. 2019, Instituto Politécnico de Bragança.
10. ArcelorMittal, *Sections and Merchant Bars*.
11. Sonck, D., R. Van Impe, and J. Belis, *Experimental investigation of residual stresses in steel cellular and castellated members*. Construction and Building Materials, 2014. **54**: p. 512-519.
12. Ellobody, E., *Nonlinear analysis of cellular steel beams under combined buckling modes*. Thin-Walled Structures, 2012. **52**: p. 66-79.
13. D.Sonck, N.Boissonnade, and R.V. Impe, *Instabilities of cellular members loaded in bending or compression*. Proceedings of the structural stability research council annual stability conference (SSRC2012), 2012.
14. Kwani, S. and P.K. Wijaya, *Lateral Torsional Buckling of Castellated Beams Analyzed using the Collapse Analysis*. Procedia Engineering, 2017. **171**: p. 813-820.
15. Grilo, L.F., et al., *Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research, 2018. **148**: p. 525-541.

- 
16. Panedpojaman, P., T. Thepchatri, and S. Limkatanyu, *Novel simplified equations for Vierendeel design of beams with (elongated) circular openings*. Journal of Constructional Steel Research, 2015. **112**: p. 10-21.
  17. Ferreira, F.P.V., A. Rossi, and C.H. Martins, *Lateral-torsional buckling of cellular beams according to the possible updating of EC3*. Journal of Constructional Steel Research, 2019. **153**: p. 222-242.
  18. Panedpojaman, P., T. Thepchatri, and S. Limkatanyu, *Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams*. Thin-Walled Structures, 2014. **76**: p. 92-104.
  19. Sebastien, D., B. AbdelHamid, and V. Olivier, - *Validation of an analytical model for curved and tapered cellular beams at normal and fire conditions*. 2013. - **57**(- 1).
  20. *NP EN 1993-1-1 Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. 2010.
  21. *NP EN 1993-1-2 Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço - Parte 1-2: Regras gerais Verificação da resistência ao fogo*. 2010.
  22. NCCI, *Elastic critical moment for lateral torsional buckling*. 2008.
  23. Sweedan, A.M.I., *Elastic lateral stability of I-shaped cellular steel beams*. Journal of Constructional Steel Research, 2011. **67**(2): p. 151-163.
  24. Vila Real, P.M.M., et al., *Lateral-torsional buckling of unrestrained steel beams under fire conditions: improvement of EC3 proposal*. Computers & Structures, 2004. **82**(20): p. 1737-1744.
  25. Kada, A.L., B.; Mesquita, L.M.R.; Bouchair, A., *Finite element analysis of steel beams with web apertures under fire condition*. ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING), (2016). **17:8**: p. p. 1035-1054.

## **Anexos**

ANEXO A – Estrutura do código de ANSYS utilizada para análise das vigas alveolares

ANEXO B – Tabela de resultados do valor do momento crítico e esbelteza normalizada do ANSYS e do Eurocódigo 3

ANEXO C – Tabela de resultados do valor do momento resistente à encurvadura e esbelteza normalizada do ANSYS, proposta de Vila Real e do Eurocódigo 3

ANEXO D – Gráficos dos deslocamentos laterais e verticais das vigas alveolares

ANEXO E – Modo de instabilidade das vigas alveolares

ANEXO F – Tensões Von Misses das vigas alveolares

ANEXO G – Deslocamentos laterais e verticais das vigas alveolares

ANEXO A – Estrutura do código de ANSYS utilizada para análise das vigas  
alveolares

!DEFINIÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO

!NÚMERO PAR DE ABERTURAS

!DEFINIÇÃO DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

\*SET,malha,0.02 !DIMENSÃO DA MALHA

ET,1,SHELL181

AESIZE,ALL,malha,

MSHAPE,0,2D

MSHKEY,1

AMESH,all

NUMMRG,ALL,0.001, , ,LOW

!CONDIÇÕES DE APOIO

DL,2, ,UZ,0

DL,1, ,UZ,0

DL,3, ,UY,0

DL,4, ,UY,0

!CONDIÇÃO DE SIMETRIA A MEIO VÃO

NSEL,S,LOC,x,L/2-0.00001,L/2+0.00001

D,ALL, , , , ,UX, , , , ,

ALLSEL,ALL

LSEL,S,LOC,X,L

LSEL,R,LOC,Z,-(H-tf)/2

DL,all, ,UZ,0

LSEL,S,LOC,X,L

LSEL,R,LOC,Y,0

DL,all, ,UY,0

ALLSEL,ALL

EPLT

! RESTRIÇÕES PARA TENTAR GARANTIR MODO DE INSTABILIDADE POR ELT  
(ACOMPLAMENTO ENTRE NÓS)

\*do,iset,1,N\*2-1

NSEL,S,LOC,x,iset\*S/2+w0-0.0001,iset\*S/2+w0+0.0001

CP,iset,ROTX,all

ALLSEL,ALL

\*enddo

NSEL,S,LOC,x,w0-0.0001,w0+0.0001

CP,iset+1,ROTX,all

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,x,L-w0-0.0001,L-w0+0.0001

CP,iset+2,ROTX,all

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,x,w0/2-0.0001,w0/2+0.0001

CP,iset+3,ROTX,all

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,x,L-w0/2-0.0001,L-w0/2+0.0001

CP,iset+4,ROTX,all

---

ALLSEL,ALL

!DEFINIÇÃO DE CARGA PARA ANÁLISE À ELT (Q=100t)

!DEFINIÇÃO DA IMPERFEIÇÃO GEOMÉTRICA  
! DEFINIÇÃO DE CARGA PARA OBTENÇÃO DO MODO DE INSTABILIDADE

NSEL,S,LOC,Z,(H-TF)/2  
NPLLOT  
NSEL,R,LOC,Y,0  
F,ALL,FZ, -1  
ALLSEL,ALL  
FINISH  
/SOL  
TUNIF,%tempera% ,  
SAVE  
ANTYPE,0  
OUTRES,ERASE  
OUTRES,ALL,ALL  
SOLVE

! ANÁLISE DE ENCURVADURA  
/SOL  
ANTYPE,1  
BUCOPT,LANB,10,0,0,CENTER  
MXPAND,10,0,1e9,1,0.001,  
SOLVE  
/POST1  
SET,FIRST  
/EFACET,1  
PLNSOL, U,SUM, 2,1.0

!FATOR DE ESCALA  
no\_cent=node(L/2,0,(h-tf)/2) !NÓ CENTRAL DO BANZO SUPERIOR  
! OBTENÇÃO DO DESLOCAMENTO DO NÓ CENTRAL DO BANZO SUPERIOR  
\*GET, desl\_no\_cent, NODE, no\_cent, U, Y  
Fescala=abs((L/1000)\*1/(desl\_no\_cent))

!DEFINIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS

!GUARDAR NÚMERO DAS LINHAS CENTRAIS DO BANZO SUPERIOR PARA APLICAR CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA NO LOADSTEP 3  
\*SET,nrows, 2\*N+2  
LSEL,NONE  
LSEL,S,LOC,Z,(H-TF)/2  
NPLLOT  
LSEL,R,LOC,Y,0  
NPLLOT  
\*dim,linearray,array,nrows,1  
\*VGET, linearray, LINE, NoLines , LLIST, ,,, 4

!ATUALIZAR GEOMETRIA COM CURVATURA DA IMPERFEIÇÃO GEOMÉTRICA SEGUINDO O FATOR DE ESCALA

!SOLUÇÃO DO MODELO  
!LOADSTEP 1 - APLICAR IMPERFEIÇÃO GEOMÉTRICA E TENSÕES RESIDUAIS  
/SOL  
ANTYPE,0  
NLGEOM,1

```
DELTIM,0.0000001,0.00000001,0.000001
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,1
TIME,1e-6
SAVE
LSWRITE,1,
```

```
! LOADSTEP 2 - APLICAR TEMPERATURA
```

```
/PREP7
FDELE,all
TUNIF,%tempera% ,
/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,1
DELTIM,0.0000001,0.00000001,0.000001
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,1
TIME,2e-6
SAVE
LSWRITE,2,
```

```
!LOADSTEP 3 - APLICAR CARGA ATÉ COLAPSO
```

```
/PREP7
LSEL,NONE
LSEL,A,,linearray(1:nrows,1)
NSLL,S,1
NPLOT
F,ALL,FZ, %CARGA%
ALLSEL,ALL
FINISH
/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,1
DELTIM,1,1e-7,%stepmax%
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,1
TIME,100
SAVE
LSWRITE,3,

LSSOLVE,1,3,1,
```

## ANEXO B – Tabela de resultados do valor do momento crítico e esbelteza normalizada do ANSYS e do Eurocódigo 3

CASO	20 [°C]					500 [°C]			
	L [m]	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT}$ EC3	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3
VS	1	358,00	533,00	0,527	0,431	215,00	320,00	0,596	0,491
	2	107,00	153,00	0,965	0,803	64,20	92,10	1,090	0,916
	3	61,00	81,00	1,278	1,106	36,60	48,60	1,444	1,260
	4	43,20	54,00	1,518	1,353	25,90	32,40	1,715	1,543
	5	34,10	40,50	1,709	1,563	20,50	24,30	1,930	1,782
	6	28,60	32,50	1,866	1,746	17,20	19,50	2,108	1,991
	7	24,90	27,10	2,001	1,910	14,90	16,30	2,261	2,178
	8	22,10	23,30	2,121	2,059	13,30	14,00	2,397	2,348
	9	20,00	20,50	2,230	2,198	12,00	12,30	2,520	2,506
	10	18,30	18,30	2,332	2,327	11,00	11,00	2,634	2,653
CASO	600 [°C]					700 [°C]			
L [m]	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3	
VS	1	111,00	165,00	0,644	0,531	46,50	69,30	0,696	0,573
	2	33,20	47,60	1,178	0,989	13,90	20,00	1,273	1,068
	3	18,90	25,10	1,560	1,361	7,93	10,50	1,687	1,470
	4	13,40	16,80	1,854	1,666	5,62	7,03	2,004	1,800
	5	10,60	12,60	2,086	1,925	4,43	5,27	2,256	2,079
	6	8,87	10,10	2,278	2,150	3,72	4,22	2,463	2,323
	7	7,71	8,41	2,444	2,352	3,23	3,53	2,642	2,541
	8	6,86	7,24	2,590	2,536	2,88	3,03	2,800	2,739
	9	6,20	6,35	2,724	2,706	2,60	2,66	2,944	2,923
	10	5,68	5,67	2,847	2,865	2,38	2,38	3,078	3,095

CASO	20 [°C]					500 [°C]			
	L [m]	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT}$ EC3	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3
VS-1,4h	1	487,00	737,00	0,565	0,457	292,00	442,00	0,638	0,521
	2	130,00	201,00	1,092	0,876	78,30	120,00	1,233	0,999
	3	70,90	100,00	1,481	1,241	42,50	60,10	1,673	1,415
	4	47,70	63,90	1,807	1,552	28,60	38,40	2,040	1,770
	5	36,20	46,50	2,073	1,821	21,70	27,90	2,341	2,077
	6	29,50	36,40	2,295	2,057	17,70	21,80	2,592	2,346
	7	25,20	30,00	2,484	2,268	15,10	18,00	2,805	2,586
	8	22,20	25,50	2,649	2,460	13,30	15,30	2,991	2,804
	9	19,90	22,20	2,796	2,636	11,90	13,30	3,157	3,005
	10	18,10	19,70	2,929	2,800	10,90	11,80	3,308	3,192
CASO	600 [°C]					700 [°C]			
	L [m]	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3
VS-1,4h	1	151,00	228,00	0,690	0,563	63,30	95,80	0,745	0,608
	2	40,40	62,20	1,332	1,079	17,00	26,10	1,440	1,166
	3	22,00	31,00	1,807	1,528	9,22	13,00	1,953	1,650
	4	14,80	19,80	2,204	1,911	6,19	8,31	2,382	2,065
	5	11,20	14,40	2,529	2,243	4,70	6,04	2,734	2,423
	6	9,15	11,30	2,800	2,533	3,84	4,73	3,026	2,736
	7	7,81	9,29	3,030	2,793	3,28	3,89	3,275	3,017
	8	6,87	7,90	3,231	3,029	2,88	3,31	3,493	3,272
	9	6,17	6,88	3,411	3,245	2,59	2,88	3,687	3,506
	10	5,62	6,09	3,573	3,447	2,36	2,56	3,862	3,724

CASO	20 [°C]					500 [°C]			
	L [m]	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT}$ EC3	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3
VS-1,5h	1	520,00	789,00	0,574	0,463	312,00	473,00	0,647	0,528
	2	136,00	213,00	1,121	0,891	81,60	128,00	1,265	1,016
	3	73,60	105,00	1,523	1,268	44,20	63,10	1,719	1,446
	4	49,00	66,60	1,867	1,594	29,40	40,00	2,106	1,817
	5	36,90	48,10	2,152	1,876	22,10	28,80	2,428	2,139
	6	29,90	37,50	2,390	2,125	18,00	22,50	2,696	2,422
	7	25,40	30,70	2,592	2,347	15,30	18,40	2,925	2,676
	8	22,30	26,00	2,769	2,548	13,40	15,60	3,124	2,906
	9	20,00	22,60	2,926	2,734	12,00	13,60	3,301	3,117
	10	18,20	20,00	3,068	2,906	10,90	12,00	3,462	3,314
CASO	600 [°C]					700 [°C]			
	L [m]	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3
VS-1,5h	1	161,00	244,00	0,700	0,570	67,50	103,00	0,755	0,616
	2	42,20	66,00	1,369	1,098	17,70	27,70	1,475	1,186
	3	22,80	32,60	1,860	1,562	9,57	13,70	2,005	1,687
	4	15,20	20,60	2,280	1,962	6,37	8,66	2,457	2,120
	5	11,40	14,90	2,628	2,310	4,80	6,25	2,832	2,495
	6	9,28	11,60	2,918	2,616	3,89	4,87	3,145	2,826
	7	7,88	9,52	3,166	2,890	3,31	3,99	3,412	3,121
	8	6,91	8,07	3,381	3,138	2,90	3,39	3,645	3,390
	9	6,19	7,02	3,573	3,366	2,59	2,94	3,851	3,636
	10	5,63	6,21	3,747	3,579	2,36	2,60	4,039	3,866

CASO	20 [°C]					500 [°C]			
	L [m]	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT}$ EC3	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3
VS-1,6h	1	556,00	840,00	0,580	0,469	333,00	504,00	0,654	0,535
	2	141,00	225,00	1,150	0,906	84,80	135,00	1,297	1,033
	3	76,40	110,00	1,564	1,294	45,90	66,20	1,763	1,475
	4	50,50	69,30	1,924	1,632	30,30	41,60	2,169	1,861
	5	37,70	49,70	2,226	1,928	22,60	29,80	2,510	2,198
	6	30,40	38,60	2,480	2,188	18,20	23,10	2,796	2,495
	7	25,70	31,50	2,696	2,422	15,40	18,90	3,040	2,761
	8	22,40	26,60	2,885	2,634	13,50	16,00	3,253	3,003
	9	20,00	23,10	3,053	2,828	12,00	13,90	3,442	3,225
	10	18,20	20,40	3,204	3,009	10,90	12,20	3,612	3,431
CASO	600 [°C]				700 [°C]				
	L [m]	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3	$M_{cr}$ ANSYS [kNm]	$M_{cr}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3
VS-1,6h	1	172,00	261,00	0,704	0,577	72,20	109,00	0,745	0,624
	2	43,80	69,80	1,395	1,115	18,40	29,30	1,478	1,205
	3	23,70	34,20	1,897	1,593	9,93	14,30	2,010	1,721
	4	15,60	21,50	2,334	2,010	6,56	9,01	2,473	2,171
	5	11,70	15,40	2,701	2,374	4,90	6,46	2,861	2,564
	6	9,42	12,00	3,008	2,695	3,95	5,01	3,188	2,911
	7	7,97	9,76	3,271	2,982	3,34	4,09	3,466	3,221
	8	6,96	8,25	3,500	3,243	2,92	3,46	3,709	3,503
	9	6,21	7,16	3,704	3,483	2,61	3,00	3,924	3,762
	10	5,64	6,32	3,887	3,705	2,37	2,65	4,118	4,003

CASO		20 [°C]				500 [°C]				
L [m]	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$		
	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3		
MR	1	334,00	782,00	0,630	0,412	201,00	469,00	0,718	0,470	
	2	94,80	208,00	1,183	0,799	56,90	125,00	1,349	0,911	
	3	51,40	101,00	1,606	1,148	30,90	60,40	1,831	1,308	
	5	25,50	44,60	2,279	1,725	15,30	26,70	2,599	1,967	
	7	17,30	27,90	2,772	2,179	10,40	16,80	3,160	2,485	
	9	12,70	20,30	3,232	2,554	7,62	12,20	3,685	2,912	
	10	11,80	17,90	3,356	2,720	7,07	10,80	3,826	3,102	
	CASO		600 [°C]				700 [°C]			
	L [m]	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
		ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	
MR	1	104,00	242,00	0,776	0,507	43,50	102,00	0,838	0,548	
	2	29,40	64,40	1,457	0,984	12,30	27,00	1,573	1,063	
	3	15,90	31,20	1,978	1,413	6,69	13,10	2,136	1,526	
	5	7,91	13,80	2,807	2,124	3,32	5,80	3,032	2,294	
	7	5,35	8,66	3,413	2,683	2,24	3,63	3,687	2,899	
	9	3,94	6,30	3,980	3,145	1,65	2,64	4,299	3,397	
	10	3,65	5,56	4,132	3,35	1,53	2,33	4,463	3,618	

CASO		20 [°C]				500 [°C]				
L [m]	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$		
	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3		
H=1,4h	1	305,00	730,00	0,621	0,401	183,00	438,00	0,708	0,458	
	2	88,10	195,00	1,156	0,776	52,80	117,00	1,318	0,885	
	3	47,90	95,50	1,567	1,110	28,70	57,30	1,786	1,266	
	5	22,50	42,90	2,287	1,657	13,50	25,70	2,608	1,889	
	7	12,70	27,10	3,043	2,083	7,62	16,30	3,470	2,375	
	9	9,37	19,80	3,543	2,435	5,62	11,90	4,039	2,776	
	10	5,49	17,50	4,628	2,591	3,29	10,50	5,277	2,954	
	CASO		600 [°C]				700 [°C]			
	L [m]	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
		ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	
H=1,4h	1	94,50	226,00	0,765	0,494	39,60	94,90	0,826	0,534	
	2	27,30	60,50	1,423	0,956	11,40	25,40	1,537	1,032	
	3	14,90	29,60	1,929	1,367	6,23	12,40	2,084	1,476	
	5	6,97	13,30	2,817	2,04	2,92	5,57	3,043	2,203	
	7	3,94	8,40	3,747	2,565	1,65	3,52	4,048	2,771	
	9	2,90	6,15	4,362	2,998	1,22	2,58	4,712	3,238	
	10	1,70	5,43	5,699	3,190	0,71	2,28	6,156	3,446	

CASO		20 [°C]				500 [°C]				
L [m]	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$		
	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3		
H=1,6h	1	356,00	834,00	0,645	0,422	214,00	500,00	0,736	0,481	
	2	101,00	220,00	1,214	0,820	60,30	132,00	1,384	0,935	
	3	54,10	106,00	1,655	1,182	32,50	63,60	1,887	1,348	
	5	26,60	46,30	2,363	1,788	15,90	27,80	2,694	2,039	
	7	17,60	28,80	2,904	2,269	10,50	17,30	3,312	2,587	
	9	12,40	20,80	3,454	2,666	7,44	12,50	3,943	3,04	
	10	11,10	18,30	3,656	2,843	6,65	11,00	4,168	3,241	
	CASO		600 [°C]				700 [°C]			
	L [m]	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
		ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	
H=1,6h	1	110,00	259,00	0,795	0,519	46,30	108,00	0,858	0,561	
	2	31,20	68,30	1,495	1,010	13,10	28,60	1,615	1,091	
	3	16,80	32,90	2,038	1,456	7,03	13,80	2,202	1,572	
	5	8,23	14,40	2,909	2,202	3,45	6,02	3,142	2,379	
	7	5,45	8,92	3,576	2,794	2,28	3,74	3,863	3,018	
	9	3,84	6,46	4,258	3,283	1,61	2,71	4,599	3,547	
	10	3,44	5,68	4,501	3,500	1,44	2,38	4,862	3,781	

CASO		20 [°C]				500 [°C]				
L [m]	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$		
	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3		
$d_0=1,1h$	1	303,00	783,00	0,676	0,421	182,00	470,00	0,770	0,480	
	2	89,00	208,00	1,247	0,816	53,40	125,00	1,422	0,930	
	3	45,80	101,00	1,740	1,170	27,50	60,70	1,983	1,334	
	5	23,10	44,90	2,450	1,757	13,80	26,90	2,793	2,003	
	7	15,40	28,20	2,999	2,217	9,24	16,90	3,419	2,528	
	9	10,80	20,50	3,577	2,597	6,49	12,30	4,078	2,961	
	10	9,12	18,10	3,896	2,765	5,47	10,90	4,442	3,153	
	CASO		600 [°C]				700 [°C]			
	L [m]	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
		ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	
$d_0=1,1h$	1	94,00	243,00	0,832	0,518	39,40	102,00	0,899	0,560	
	2	27,60	64,50	1,536	1,004	11,60	27,10	1,659	1,085	
	3	14,20	31,30	2,142	1,441	5,95	13,10	2,314	1,557	
	5	7,15	13,90	3,017	2,163	3,00	5,83	3,259	2,336	
	7	4,77	8,73	3,692	2,730	2,00	3,66	3,988	2,949	
	9	3,36	6,37	4,404	3,197	1,41	2,67	4,758	3,454	
	10	2,83	5,61	4,797	3,405	1,19	2,35	5,182	3,678	

CASO		20 [°C]				500 [°C]				
L [m]	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$		
	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3		
$d_0=1,3h$	1	307,00	781,00	0,642	0,402	184,00	469,00	0,732	0,458	
	2	95,10	207,00	1,152	0,781	57,10	124,00	1,314	0,890	
	3	46,60	100,00	1,646	1,122	28,00	60,20	1,877	1,279	
	5	21,10	44,30	2,444	1,689	12,70	26,60	2,787	1,926	
	7	11,50	27,70	3,309	2,136	6,92	16,60	3,773	2,435	
	9	8,92	20,10	3,763	2,505	5,35	12,10	4,290	2,856	
	10	5,06	17,70	4,995	2,668	3,04	10,60	5,696	3,042	
	CASO		600 [°C]				700 [°C]			
	L [m]	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
		ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	
$d_0=1,3h$	1	95,00	242,00	0,790	0,495	39,90	102,00	0,854	0,535	
	2	29,50	64,30	1,419	0,961	12,40	26,90	1,533	1,038	
	3	14,50	31,10	2,026	1,381	6,06	13,00	2,189	1,492	
	5	6,55	13,70	3,010	2,080	2,75	5,76	3,251	2,247	
	7	3,57	8,58	4,075	2,630	1,50	3,60	4,402	2,841	
	9	2,77	6,24	4,633	3,084	1,16	2,62	5,005	3,331	
	10	1,57	5,50	6,151	3,286	0,66	2,31	6,645	3,549	

CASO		20 [°C]				500 [°C]				
L [m]	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$		
	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3		
S=1,1d <sub>0</sub>	1	302,00	782,00	0,662	0,412	181,00	469,00	0,755	0,470	
	2	86,40	208,00	1,239	0,799	51,80	125,00	1,413	0,911	
	3	42,10	101,00	1,774	1,148	25,30	60,40	2,023	1,308	
	5	17,20	44,60	2,777	1,725	10,30	26,70	3,166	1,967	
	7	10,40	27,90	3,574	2,179	6,23	16,80	4,074	2,485	
	9	3,87	20,30	5,853	2,554	2,32	12,20	6,674	2,912	
	10	2,97	17,90	6,685	2,720	1,78	10,80	7,621	3,102	
	CASO		600 [°C]				700 [°C]			
	L [m]	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
		ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	
S=1,1d <sub>0</sub>	1	93,80	242,00	0,815	0,507	39,30	102,00	0,881	0,548	
	2	26,80	64,40	1,526	0,984	11,20	27,00	1,648	1,063	
	3	13,10	31,20	2,184	1,413	5,48	13,10	2,360	1,526	
	5	5,33	13,80	3,419	2,124	2,24	5,80	3,694	2,294	
	7	3,22	8,66	4,400	2,683	1,35	3,63	4,753	2,899	
	9	1,20	6,30	7,207	3,145	0,52	2,64	7,671	3,397	
	10	0,92	5,56	8,230	3,350	0,39	2,33	8,890	3,618	

CASO		20 [°C]				500 [°C]				
L [m]	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$		
	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3		
S=1,3d <sub>0</sub>	1	323,00	782,00	0,641	0,412	194,00	469,00	0,731	0,470	
	2	97,00	208,00	1,169	0,799	58,20	125,00	1,333	0,911	
	3	48,80	101,00	1,648	1,148	29,30	60,40	1,879	1,308	
	5	24,00	44,60	2,352	1,725	14,40	26,70	2,682	1,967	
	7	15,80	27,90	2,898	2,179	9,48	16,80	3,304	2,485	
	9	11,80	20,30	3,357	2,554	7,06	12,20	3,827	2,912	
	10	9,88	17,90	3,665	2,720	5,93	10,80	4,179	3,102	
	CASO		600 [°C]				700 [°C]			
	L [m]	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{cr}$	$M_{cr}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
		ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	
S=1,3d <sub>0</sub>	1	100,00	242,00	0,789	0,507	42,00	102,00	0,853	0,548	
	2	30,10	64,40	1,440	0,984	12,60	27,00	1,556	1,063	
	3	15,10	31,20	2,029	1,413	6,35	13,10	2,192	1,526	
	5	7,43	13,80	2,896	2,124	3,12	5,80	3,128	2,294	
	7	4,90	8,66	3,568	2,683	2,05	3,63	3,854	2,899	
	9	3,65	6,30	4,133	3,145	1,53	2,64	4,465	3,397	
	10	3,06	5,56	4,513	3,350	1,28	2,33	4,875	3,618	

ANEXO C – Tabela de resultados do valor do momento resistente à encurvadura e esbelteza normalizada do ANSYS, proposta de Vila Real e do Eurocódigo 3

CASO		20 [°C]					500 [°C]				
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	
VS	1	81,80	81,80	78,10	0,527	0,431	53,40	61,30	58,60	0,596	0,491
	2	59,50	61,40	58,70	0,965	0,803	32,80	43,10	41,20	1,090	0,916
	3	44,00	45,70	43,70	1,278	1,106	24,10	30,40	29,10	1,444	1,260
	4	35,40	35,50	33,90	1,518	1,353	19,40	23,00	21,90	1,715	1,543
	5	30,20	28,90	27,60	1,709	1,563	16,50	18,40	17,60	1,930	1,782
	6	26,90	24,40	23,30	1,866	1,746	14,60	15,40	14,70	2,108	1,991
	7	24,70	21,10	20,10	2,001	1,910	13,20	13,20	12,60	2,261	2,178
	8	20,70	18,60	17,80	2,121	2,059	12,00	11,60	11,10	2,397	2,348
	9	20,00	16,70	15,90	2,230	2,198	11,00	10,40	9,90	2,520	2,506
	10	19,40	15,10	14,40	2,332	2,327	10,40	9,38	8,95	2,634	2,653
CASO		600 [°C]					700 [°C]				
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	
VS	1	30,60	36,00	34,40	0,644	0,531	14,60	17,10	16,30	0,696	0,573
	2	17,50	24,20	23,10	1,178	0,989	7,71	10,90	10,40	1,273	1,068
	3	12,50	16,60	15,80	1,560	1,361	5,41	7,27	6,94	1,687	1,470
	4	10,00	12,30	11,80	1,854	1,666	4,36	5,34	5,10	2,004	1,800
	5	8,53	9,79	9,35	2,086	1,925	3,83	4,21	4,02	2,256	2,079
	6	7,58	8,14	7,77	2,278	2,150	3,52	3,49	3,33	2,463	2,323
	7	6,92	6,98	6,66	2,444	2,352	2,97	2,98	2,85	2,642	2,541
	8	6,11	6,12	5,84	2,590	2,536	2,63	2,61	2,49	2,800	2,739
	9	5,76	5,45	5,21	2,724	2,706	2,35	2,32	2,22	2,944	2,923
	10	5,14	4,92	4,70	2,847	2,865	2,03	2,10	2,00	3,078	3,095

CASO	20 [°C]						500 [°C]					
	L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$ ANSYS [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ PVR [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT}$ EC3	$M_{b,fi,t,Rd}$ ANSYS [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ PVR [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3	
VS-1,4h	1	109,00	125,00	120,00	0,565	0,457	76,70	93,50	89,30	0,638	0,521	
	2	76,10	89,30	85,30	1,092	0,876	41,70	61,80	59,00	1,233	0,999	
	3	53,30	62,00	59,20	1,481	1,241	29,00	40,50	38,70	1,673	1,415	
	4	40,70	45,40	43,40	1,807	1,552	22,50	28,90	27,60	2,040	1,770	
	5	33,70	35,50	33,90	2,073	1,821	18,90	22,30	21,30	2,341	2,077	
	6	29,50	29,00	27,70	2,295	2,057	16,60	18,10	17,30	2,592	2,346	
	7	24,20	24,60	23,50	2,484	2,268	14,90	15,30	14,60	2,805	2,586	
	8	22,60	21,40	20,40	2,649	2,460	13,60	13,20	12,60	2,991	2,804	
	9	22,40	18,90	18,10	2,796	2,636	12,40	11,70	11,10	3,157	3,005	
	10	19,80	17,00	16,20	2,929	2,800	11,40	10,50	9,99	3,308	3,192	
CASO	600 [°C]					700 [°C]						
	L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$ ANSYS [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ PVR [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3	$M_{b,fi,t,Rd}$ ANSYS [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ PVR [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3	
VS-1,4h	1	43,80	54,70	52,30	0,690	0,563	20,70	25,90	24,70	0,745	0,608	
	2	22,10	34,40	32,80	1,332	1,079	9,61	15,40	14,70	1,440	1,166	
	3	15,10	21,90	20,90	1,807	1,528	6,63	9,52	9,09	1,953	1,650	
	4	11,80	15,40	14,70	2,204	1,911	5,24	6,63	6,34	2,382	2,065	
	5	9,93	11,80	11,30	2,529	2,243	4,46	5,05	4,82	2,734	2,423	
	6	8,72	9,54	9,11	2,800	2,533	3,95	4,07	3,89	3,026	2,736	
	7	7,90	8,02	7,66	3,030	2,793	3,35	3,42	3,26	3,275	3,017	
	8	7,17	6,94	6,62	3,231	3,029	2,98	2,95	2,82	3,493	3,272	
	9	6,49	6,12	5,84	3,411	3,245	2,79	2,60	2,48	3,687	3,506	
	10	5,87	5,48	5,23	3,573	3,447	2,45	2,32	2,22	3,862	3,724	

CASO	20 [°C]						500 [°C]					
	L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$ ANSYS [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ PVR [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT}$ EC3	$M_{b,fi,t,Rd}$ ANSYS [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ PVR [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3	
VS-1,5h	1	116,00	137,00	131,00	0,574	0,463	82,90	102,00	97,60	0,647	0,528	
	2	79,90	96,60	92,30	1,121	0,891	43,90	66,70	63,70	1,265	1,016	
	3	55,80	66,10	63,10	1,523	1,268	30,30	43,10	41,20	1,719	1,446	
	4	42,10	47,90	45,80	1,867	1,594	23,50	30,50	29,10	2,106	1,817	
	5	34,80	37,10	35,40	2,152	1,876	19,60	23,30	22,20	2,428	2,139	
	6	30,40	30,20	28,80	2,390	2,125	17,20	18,80	17,90	2,696	2,422	
	7	27,30	25,50	24,30	2,592	2,347	15,40	15,80	15,10	2,925	2,676	
	8	25,00	22,00	21,10	2,769	2,548	14,00	13,60	13,00	3,124	2,906	
	9	23,40	19,50	18,60	2,926	2,734	13,10	12,00	11,50	3,301	3,117	
	10	21,00	17,40	16,70	3,068	2,906	12,20	10,70	10,20	3,462	3,314	
CASO	600 [°C]					700 [°C]						
	L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$ ANSYS [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ PVR [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3	$M_{b,fi,t,Rd}$ ANSYS [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ PVR [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3	
VS-1,5h	1	47,10	59,70	57,10	0,700	0,570	22,20	28,20	27,00	0,755	0,616	
	2	23,10	37,00	35,30	1,369	1,098	9,95	16,50	15,80	1,475	1,186	
	3	15,90	23,20	22,20	1,860	1,562	6,93	10,10	9,65	2,005	1,687	
	4	12,40	16,20	15,50	2,280	1,962	5,48	6,97	6,65	2,457	2,120	
	5	10,40	12,30	11,70	2,628	2,310	4,66	5,26	5,02	2,832	2,495	
	6	9,09	9,89	9,45	2,918	2,616	4,08	4,22	4,03	3,145	2,826	
	7	8,13	8,29	7,91	3,166	2,890	3,61	3,53	3,37	3,412	3,121	
	8	7,44	7,14	6,82	3,381	3,138	3,30	3,03	2,90	3,645	3,390	
	9	7,02	6,28	6,00	3,573	3,366	3,12	2,67	2,55	3,851	3,636	
	10	5,79	5,61	5,36	3,747	3,579	2,61	2,38	2,27	4,039	3,866	

CASO	20 [°C]						500 [°C]					
	L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$ ANSYS [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ PVR [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT}$ EC3	$M_{b,fi,t,Rd}$ ANSYS [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ PVR [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3	
VS-1,6h	1	121,00	149,00	142,00	0,580	0,469	88,80	111,00	106,00	0,654	0,535	
	2	83,60	104,00	99,40	1,150	0,906	45,90	71,60	68,40	1,297	1,033	
	3	58,20	70,30	67,20	1,564	1,294	31,60	45,80	43,70	1,763	1,475	
	4	43,70	50,50	48,20	1,924	1,632	24,40	32,00	30,60	2,169	1,861	
	5	36,00	38,70	37,00	2,226	1,928	20,40	24,30	23,20	2,510	2,198	
	6	31,30	31,30	29,90	2,480	2,188	17,80	19,50	18,60	2,796	2,495	
	7	28,10	26,30	25,10	2,696	2,422	15,90	16,30	15,60	3,040	2,761	
	8	25,80	22,70	21,70	2,885	2,634	14,50	14,00	13,40	3,253	3,003	
	9	24,00	20,00	19,10	3,053	2,828	13,60	12,30	11,80	3,442	3,225	
	10	21,80	17,90	17,10	3,204	3,009	12,60	11,00	10,50	3,612	3,431	
CASO	600 [°C]					700 [°C]						
	L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$ ANSYS [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ PVR [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3	$M_{b,fi,t,Rd}$ ANSYS [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ PVR [kNm]	$M_{b,fi,t,Rd}$ EC3 [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ ANSYS	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ EC3	
VS-1,6h	1	50,30	64,90	62,00	0,704	0,577	23,70	30,70	29,30	0,745	0,624	
	2	24,10	39,70	37,90	1,395	1,115	10,20	17,70	16,90	1,478	1,205	
	3	16,60	24,60	23,50	1,897	1,593	7,22	10,70	10,20	2,010	1,721	
	4	12,90	17,00	16,20	2,334	2,010	5,70	7,31	6,98	2,473	2,171	
	5	10,80	12,80	12,20	2,701	2,374	4,82	5,48	5,23	2,861	2,564	
	6	9,44	10,30	9,79	3,008	2,695	4,19	4,37	4,17	3,188	2,911	
	7	8,46	8,55	8,16	3,271	2,982	3,74	3,64	3,47	3,466	3,221	
	8	7,75	7,34	7,01	3,500	3,243	3,39	3,12	2,98	3,709	3,503	
	9	7,27	6,44	6,15	3,704	3,483	3,20	2,73	2,61	3,924	3,762	
	10	6,66	5,75	5,49	3,887	3,705	2,62	2,44	2,33	4,118	4,003	

CASO		20 [°C]					500 [°C]					
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$		
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3		
MR	1	64,30	110,94	105,95	0,630	0,412	42,80	83,39	79,64	0,718	0,470	
	2	58,40	82,60	78,89	1,183	0,799	29,10	58,01	55,40	1,349	0,911	
	3	40,20	58,66	56,02	1,606	1,148	19,80	38,82	37,08	1,831	1,308	
	5	22,70	33,27	31,77	2,279	1,725	11,70	21,00	20,06	2,599	1,967	
	7	15,90	22,67	21,65	2,772	2,179	8,62	14,10	13,46	3,160	2,485	
	9	12,10	17,22	16,45	3,232	2,554	6,90	10,64	10,16	3,685	2,912	
	10	11,40	15,40	14,71	3,356	2,720	6,53	9,49	9,06	3,826	3,102	
	CASO		600 [°C]					700 [°C]				
	L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
		ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	
MR	1	23,10	49,00	46,79	0,776	0,507	10,40	23,30	22,25	0,838	0,548	
	2	15,30	32,54	31,08	1,457	0,984	6,44	14,71	14,05	1,573	1,063	
	3	10,10	21,06	20,11	1,978	1,413	4,17	9,22	8,81	2,136	1,526	
	5	5,93	11,13	10,63	2,807	2,124	2,25	4,77	4,56	3,032	2,294	
	7	4,46	7,42	7,08	3,413	2,683	1,34	3,16	3,02	3,687	2,899	
	9	3,54	5,58	5,33	3,980	3,145	0,76	2,37	2,26	4,299	3,397	
	10	3,12	4,97	4,75	4,132	3,350	0,48	2,11	2,01	4,463	3,618	

CASO		20 [°C]					500 [°C]					
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$		
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3		
H=1,4h	1	43,50	99,00	94,55	0,621	0,401	30,20	74,52	71,17	0,708	0,458	
	2	39,60	74,77	71,40	1,156	0,776	25,70	52,75	50,37	1,318	0,885	
	3	36,90	54,05	51,62	1,567	1,110	18,20	35,96	34,34	1,786	1,266	
	5	19,60	31,41	30,00	2,287	1,657	9,14	19,90	19,00	2,608	1,889	
	7	8,57	21,69	20,71	3,043	2,083	5,32	13,52	12,91	3,470	2,375	
	9	5,04	16,61	15,86	3,543	2,435	3,43	10,27	9,81	4,039	2,776	
	10	2,88	14,89	14,22	4,628	2,591	2,04	9,19	8,77	5,277	2,954	
	CASO		600 [°C]					700 [°C]				
	L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
		ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	
H=1,4h	1	17,70	43,83	41,85	0,765	0,494	8,38	20,87	19,93	0,826	0,534	
	2	13,70	29,68	28,34	1,423	0,956	5,85	13,45	12,85	1,537	1,032	
	3	9,33	19,56	18,68	1,929	1,367	3,81	8,58	8,20	2,084	1,476	
	5	5,14	10,56	10,09	2,817	2,040	1,85	4,54	4,33	3,043	2,203	
	7	2,30	7,12	6,80	3,747	2,565	0,66	3,04	2,90	4,048	2,771	
	9	1,25	5,39	5,15	4,362	2,998	0,54	2,29	2,19	4,712	3,238	
	10	0,81	4,82	4,60	5,699	3,190	0,00	2,05	1,95	6,156	3,446	

CASO		20 [°C]					500 [°C]					
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$		
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3		
H=1,6h	1	81,50	123,20	117,65	0,645	0,422	44,50	92,49	88,32	0,736	0,481	
	2	63,90	90,53	86,45	1,214	0,820	32,00	63,31	60,46	1,384	0,935	
	3	42,90	63,26	60,41	1,655	1,182	21,20	41,68	39,80	1,887	1,348	
	5	24,00	35,10	33,52	2,363	1,788	12,50	22,10	21,11	2,694	2,039	
	7	16,80	23,64	22,57	2,904	2,269	9,12	14,67	14,01	3,312	2,587	
	9	12,70	17,83	17,03	3,454	2,666	7,45	10,99	10,50	3,943	3,040	
	10	11,80	15,90	15,19	3,656	2,843	7,16	9,78	9,34	4,168	3,241	
	CASO		600 [°C]					700 [°C]				
	L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
		ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	
H=1,6h	1	24,00	54,29	51,85	0,795	0,519	10,50	25,79	24,63	0,858	0,561	
	2	16,70	35,43	33,83	1,495	1,010	7,02	15,97	15,25	1,615	1,091	
	3	10,90	22,56	21,54	2,038	1,456	4,45	9,86	9,41	2,202	1,572	
	5	6,34	11,70	11,17	2,909	2,202	2,64	5,01	4,79	3,142	2,379	
	7	4,73	7,71	7,36	3,576	2,794	2,12	3,28	3,14	3,863	3,018	
	9	3,94	5,76	5,50	4,258	3,283	0,77	2,45	2,34	4,599	3,547	
	10	3,74	5,12	4,89	4,501	3,500	0,63	2,17	2,07	4,862	3,781	

CASO		20 [°C]					500 [°C]					
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$		
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3		
$d_0=1,1h$	1	76,20	115,18	110,00	0,676	0,421	43,30	86,48	82,59	0,770	0,480	
	2	56,40	84,95	81,13	1,247	0,816	28,50	59,46	56,79	1,422	0,930	
	3	36,40	59,83	57,14	1,740	1,170	17,90	39,48	37,70	1,983	1,334	
	5	20,90	33,75	32,23	2,450	1,757	10,90	21,28	20,32	2,793	2,003	
	7	15,00	22,98	21,95	2,999	2,217	8,21	14,28	13,64	3,419	2,528	
	9	8,74	17,46	16,68	3,577	2,597	5,65	10,78	10,29	4,078	2,961	
	10	6,80	15,62	14,91	3,896	2,765	4,15	9,61	9,18	4,442	3,153	
	CASO		600 [°C]					700 [°C]				
	L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
		ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	
$d_0=1,1h$	1	23,60	50,77	48,48	0,832	0,518	10,50	24,12	23,04	0,899	0,560	
	2	15,00	33,29	31,79	1,536	1,004	6,29	15,02	14,34	1,659	1,085	
	3	9,12	21,38	20,42	2,142	1,441	3,74	9,35	8,93	2,314	1,557	
	5	5,52	11,27	10,76	3,017	2,163	2,30	4,83	4,61	3,259	2,336	
	7	4,26	7,51	7,17	3,692	2,730	0,66	3,20	3,06	3,988	2,949	
	9	2,74	5,65	5,39	4,404	3,197	0,55	2,40	2,29	4,758	3,454	
	10	2,01	5,03	4,81	4,797	3,405	0,01	2,14	2,04	5,182	3,678	

CASO		20 [°C]					500 [°C]					
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$		
	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3		
$d_0=1,3h$	1	38,70	106,29	101,50	0,642	0,402	27,00	79,99	76,39	0,732	0,458	
	2	49,10	79,98	76,38	1,152	0,781	27,50	56,37	53,84	1,314	0,890	
	3	37,00	57,35	54,76	1,646	1,122	17,60	38,08	36,37	1,877	1,279	
	5	16,50	32,74	31,27	2,444	1,689	8,97	20,71	19,77	2,787	1,926	
	7	8,37	22,34	21,33	3,309	2,136	4,69	13,90	13,28	3,773	2,435	
	9	4,73	16,97	16,21	3,763	2,505	3,25	10,49	10,02	4,290	2,856	
	10	2,62	15,18	14,49	4,995	2,668	1,81	9,36	8,94	5,696	3,042	
	CASO		600 [°C]					700 [°C]				
	L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
		ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	ANSYS [kNm]	PVR [kNm]	EC3 [kNm]	ANSYS	EC3	
$d_0=1,3h$	1	15,90	47,04	44,92	0,790	0,495	7,54	22,40	21,39	0,854	0,535	
	2	14,70	31,70	30,27	1,419	0,961	6,30	14,36	13,71	1,533	1,038	
	3	8,96	20,69	19,76	2,026	1,381	3,53	9,08	8,67	2,189	1,492	
	5	4,39	10,98	10,49	3,010	2,080	1,72	4,71	4,50	3,251	2,247	
	7	1,90	7,32	6,99	4,075	2,630	0,48	3,12	2,98	4,402	2,841	
	9	1,18	5,50	5,25	4,633	3,084	0,48	2,34	2,23	5,005	3,331	
	10	0,75	4,90	4,68	6,151	3,286	0,00	2,08	1,99	6,645	3,549	

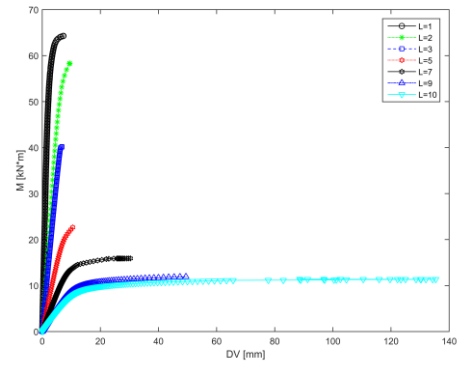
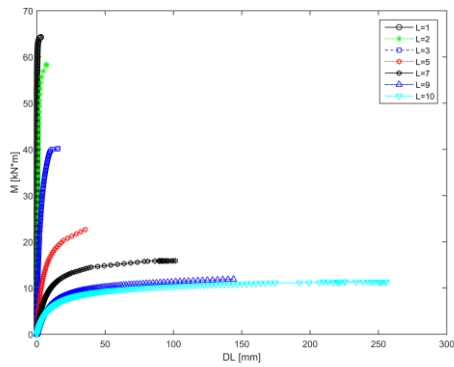
CASO		20 [°C]					500 [°C]					
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$		
	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	EC3	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	EC3		
	[kNm]	[kNm]	[kNm]			[kNm]	[kNm]	[kNm]				
S=1,1d <sub>0</sub>	1	61,30	110,94	105,95	0,662	0,412	31,10	83,39	79,64	0,755	0,470	
	2	38,50	82,60	78,89	1,239	0,799	23,20	58,01	55,40	1,413	0,911	
	3	32,60	58,66	56,02	1,774	1,148	10,40	38,82	37,08	2,023	1,308	
	5	8,47	33,27	31,77	2,777	1,725	5,03	21,00	20,06	3,166	1,967	
	7	6,23	22,67	21,65	3,574	2,179	4,10	14,10	13,46	4,074	2,485	
	9	2,15	17,22	16,45	5,853	2,554	1,55	10,64	10,16	6,674	2,912	
	10	1,61	15,40	14,71	6,685	2,720	1,14	9,49	9,06	7,621	3,102	
	CASO		600 [°C]					700 [°C]				
	L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
		ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	EC3	ANSYS	PVR	EC3	ANSYS	EC3	
[kNm]		[kNm]	[kNm]			[kNm]	[kNm]	[kNm]				
S=1,1d <sub>0</sub>	1	17,20	49,00	46,79	0,815	0,507	8,04	23,30	22,25	0,881	0,548	
	2	13,00	32,54	31,08	1,526	0,984	5,72	14,71	14,05	1,648	1,063	
	3	5,53	21,06	20,11	2,184	1,413	2,28	9,22	8,81	2,360	1,526	
	5	2,18	11,13	10,63	3,419	2,124	0,67	4,77	4,56	3,694	2,294	
	7	1,63	7,42	7,08	4,400	2,683	0,63	3,16	3,02	4,753	2,899	
	9	0,61	5,58	5,33	7,207	3,145	0,00	2,37	2,26	7,671	3,397	
	10	0,49	4,97	4,75	8,230	3,350	0,00	2,11	2,01	8,890	3,618	

CASO		20 [°C]					500 [°C]					
L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$		
	ANSYS [Nm]	PVR [Nm]	EC3 [Nm]	ANSYS	EC3	ANSYS [Nm]	PVR [Nm]	EC3 [Nm]	ANSYS	EC3		
S=1,3d <sub>0</sub>	1	59,60	110,94	105,95	0,641	0,412	40,60	83,39	79,64	0,731	0,470	
	2	58,80	82,60	78,89	1,169	0,799	30,20	58,01	55,40	1,333	0,911	
	3	38,40	58,66	56,02	1,648	1,148	18,80	38,82	37,08	1,879	1,308	
	5	21,50	33,27	31,77	2,352	1,725	11,10	21,00	20,06	2,682	1,967	
	7	15,10	22,67	21,65	2,898	2,179	7,83	14,10	13,46	3,304	2,485	
	9	8,79	17,22	16,45	3,357	2,554	5,02	10,64	10,16	3,827	2,912	
	10	6,76	15,40	14,71	3,665	2,720	4,04	9,49	9,06	4,179	3,102	
	CASO		600 [°C]					700 [°C]				
	L [m]	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$M_{b,fi,t,Rd}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	
		ANSYS [Nm]	PVR [Nm]	EC3 [Nm]	ANSYS	EC3	ANSYS [Nm]	PVR [Nm]	EC3 [Nm]	ANSYS	EC3	
S=1,3d <sub>0</sub>	1	23,60	49,00	46,79	0,789	0,507	11,00	23,30	22,25	0,853	0,548	
	2	16,00	32,54	31,08	1,440	0,984	6,79	14,71	14,05	1,556	1,063	
	3	9,63	21,06	20,11	2,029	1,413	3,96	9,22	8,81	2,192	1,526	
	5	5,61	11,13	10,63	2,896	2,124	2,27	4,77	4,56	3,128	2,294	
	7	3,74	7,42	7,08	3,568	2,683	0,89	3,16	3,02	3,854	2,899	
	9	2,36	5,58	5,33	4,133	3,145	0,52	2,37	2,26	4,465	3,397	
	10	2,00	4,97	4,75	4,513	3,350	0,43	2,11	2,01	4,875	3,618	

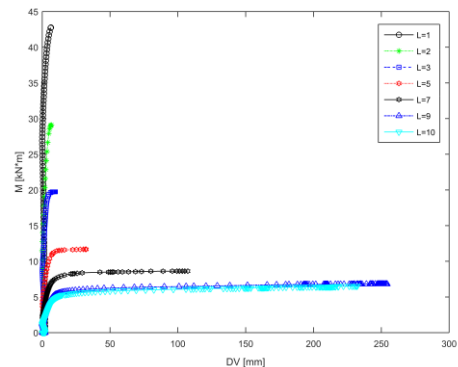
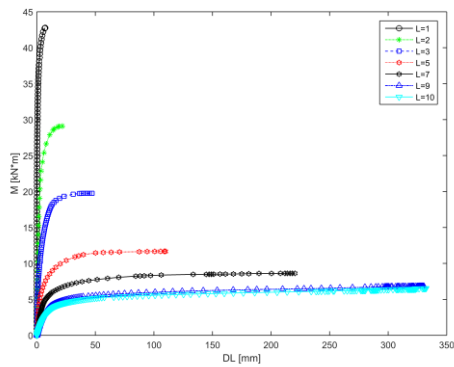
ANEXO D – Gráficos dos deslocamentos laterais e verticais das vigas alveolares

CASO - MR

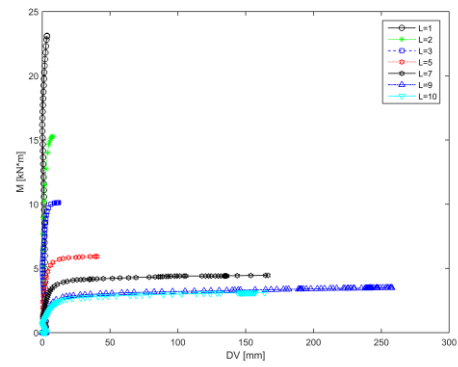
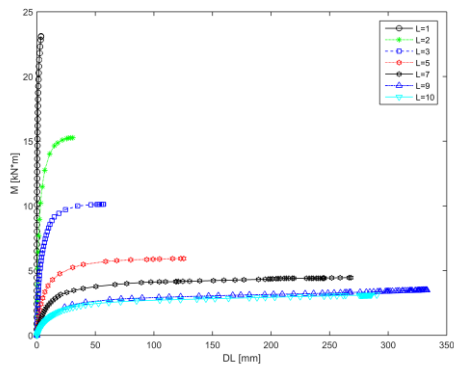
20 [°C]



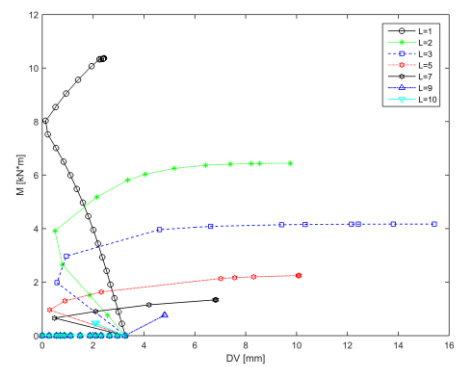
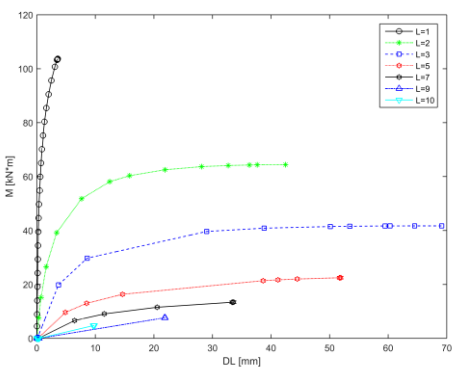
500 [°C]



600 [°C]

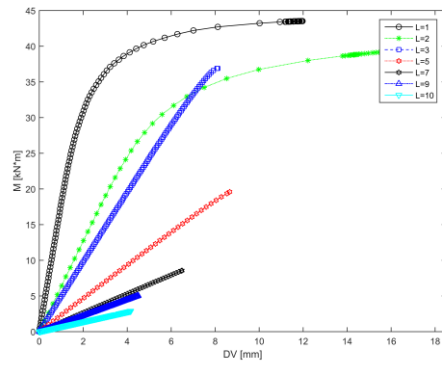
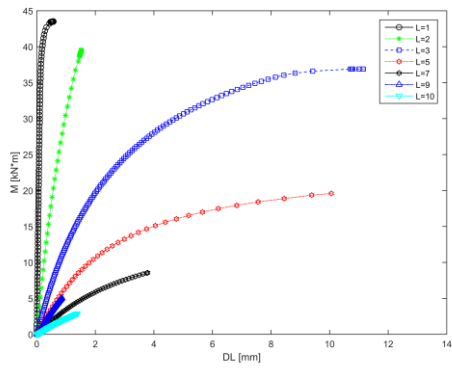


700 [°C]

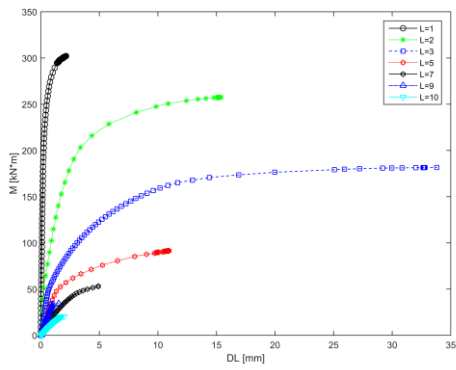


CASO - H=1,4h

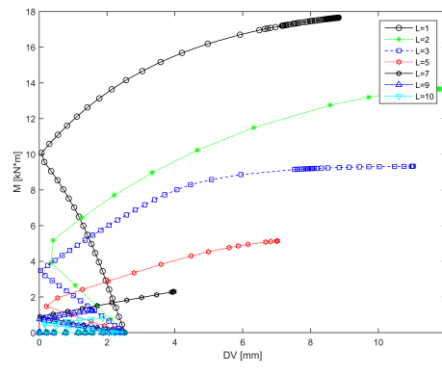
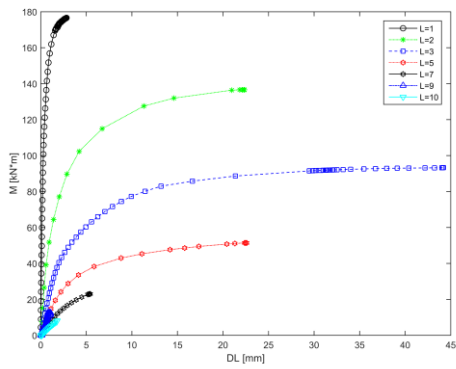
20 [°C]



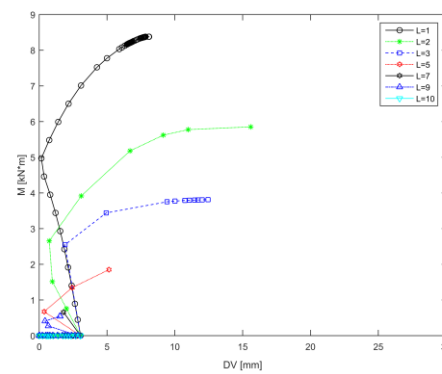
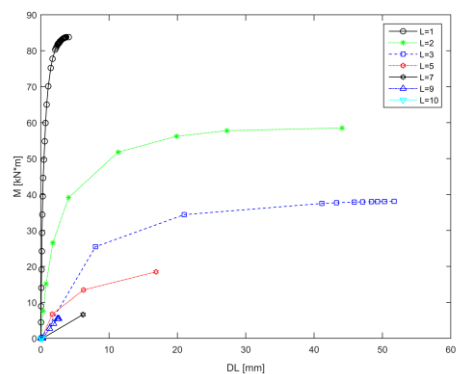
500 [°C]



600 [°C]

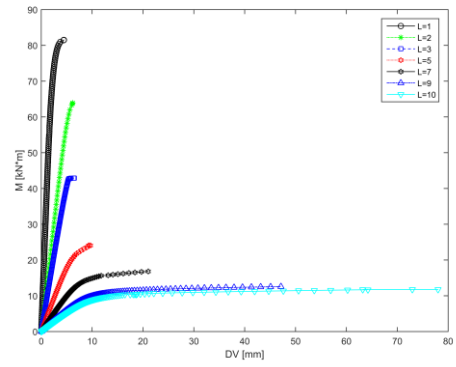
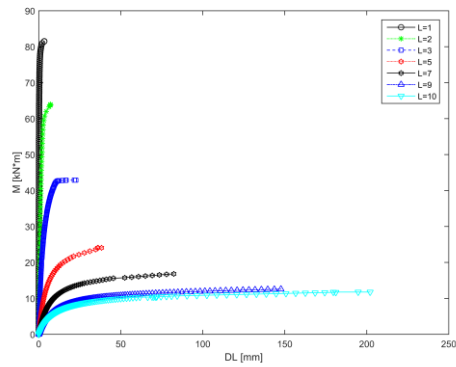


700 [°C]

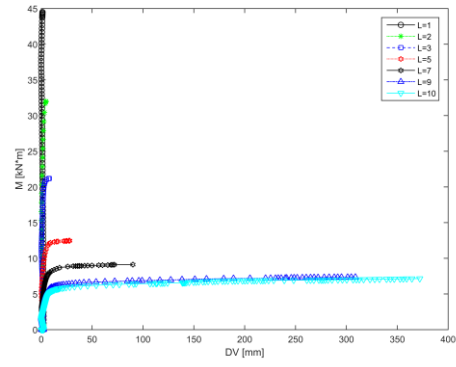
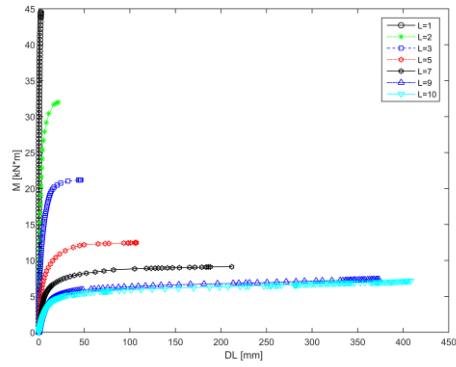


## CASO - H=1,6h

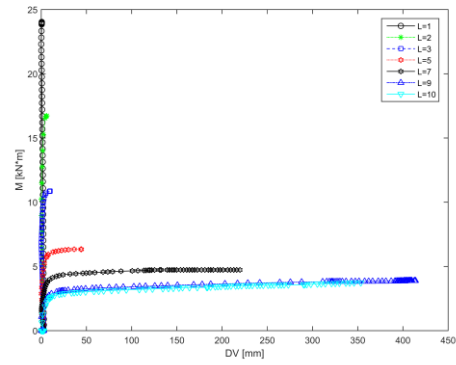
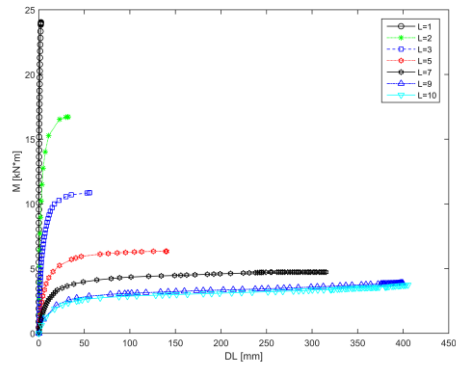
20 [°C]



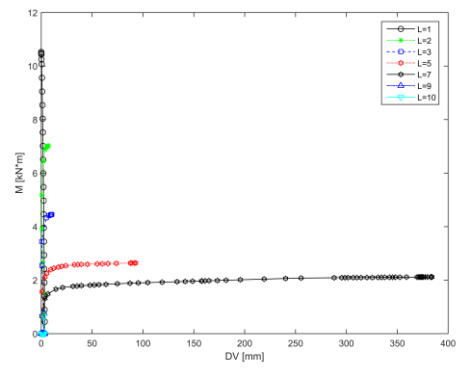
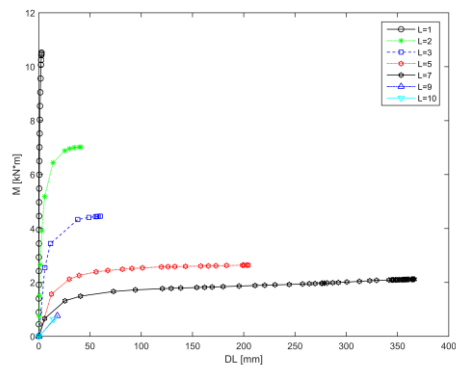
500 [°C]



600 [°C]

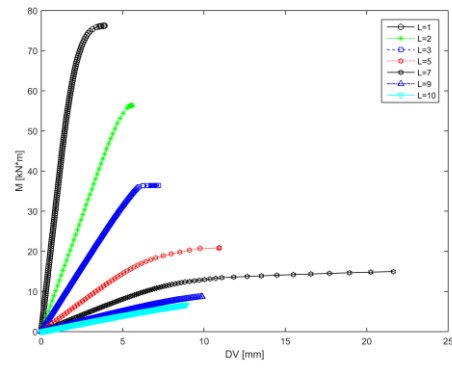
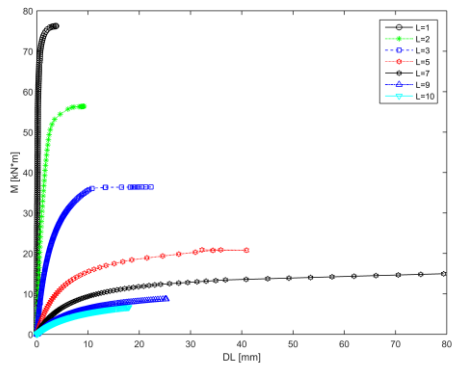


700 [°C]

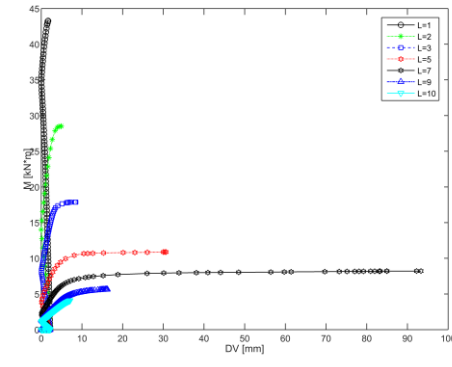
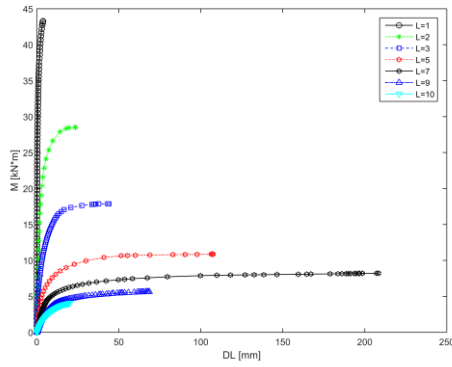


CASO -  $d_0=1,1h$

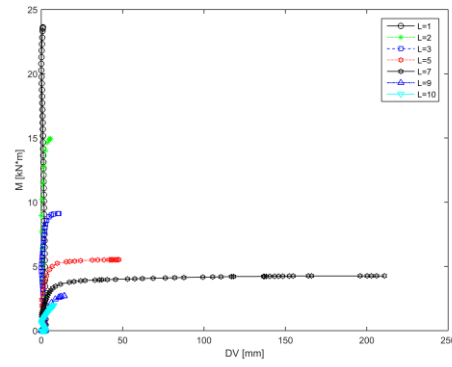
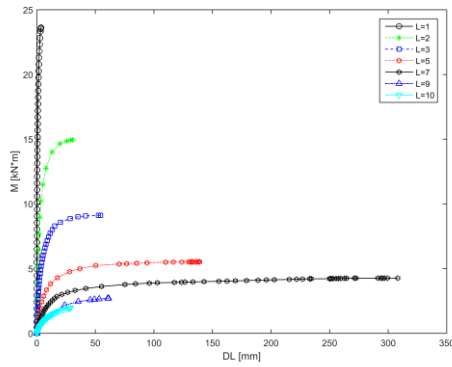
20 [°C]



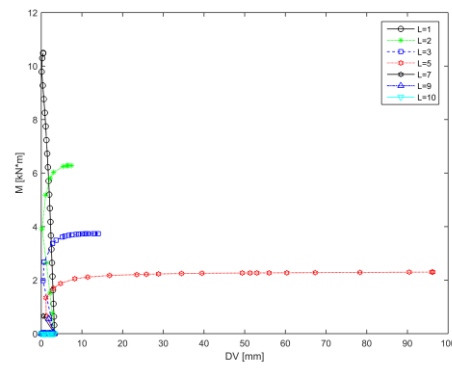
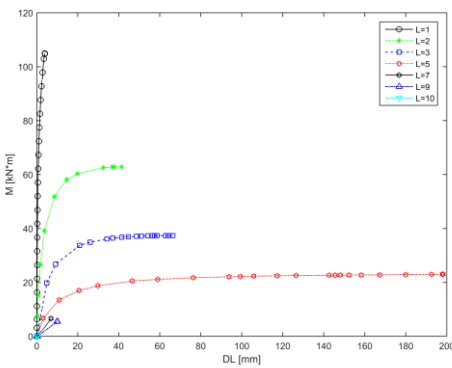
500 [°C]



600 [°C]

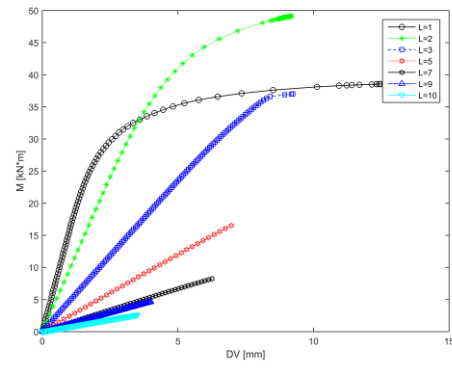
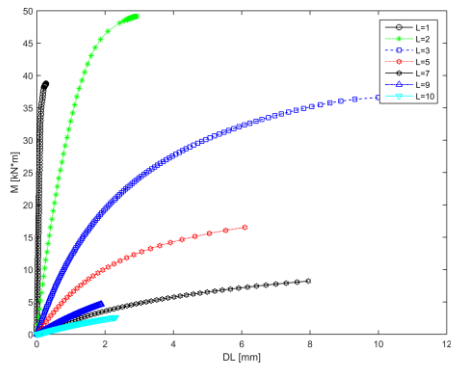


700 [°C]

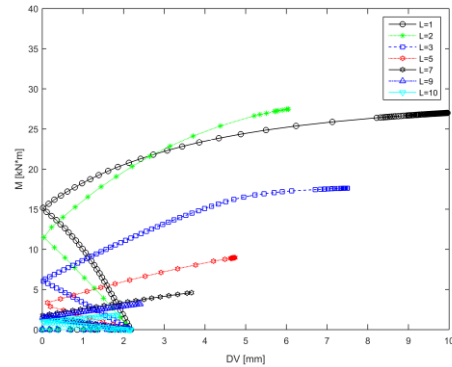
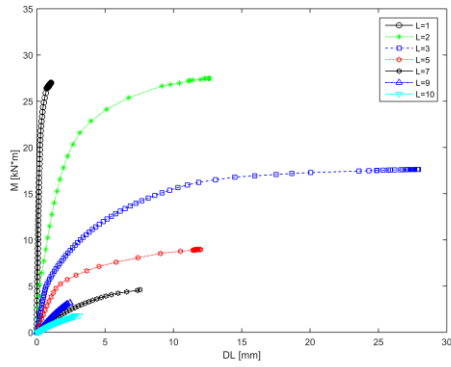


CASO -  $d_0=1,3h$

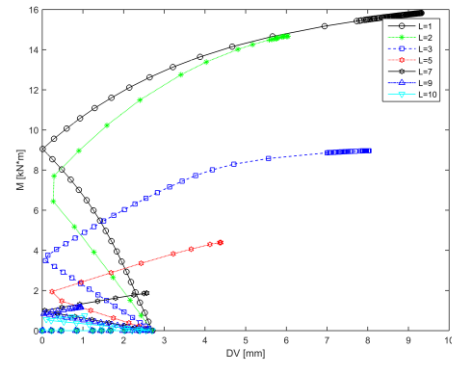
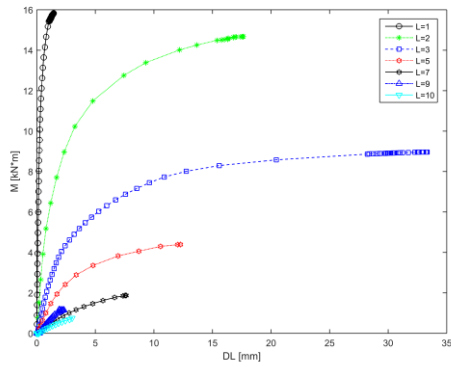
20 [°C]



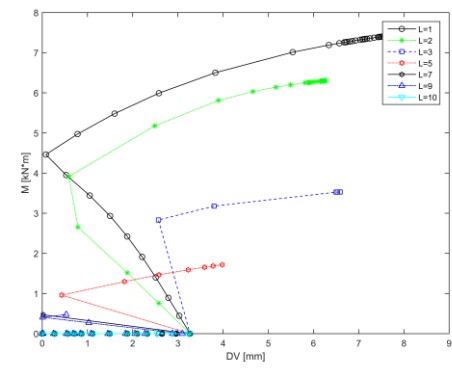
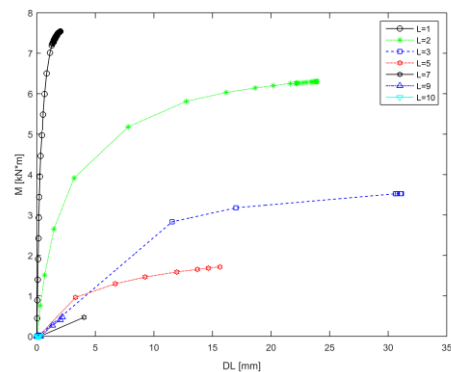
500 [°C]



600 [°C]

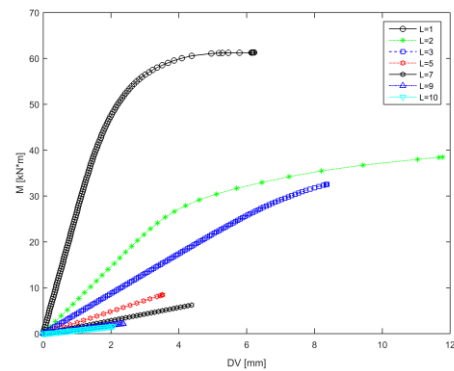
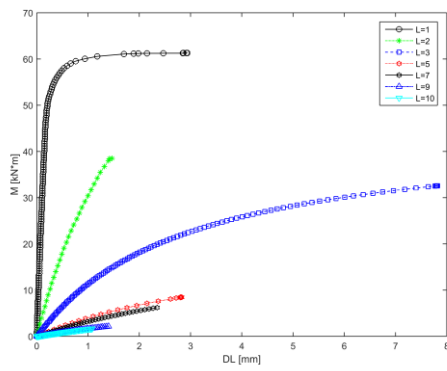


700 [°C]

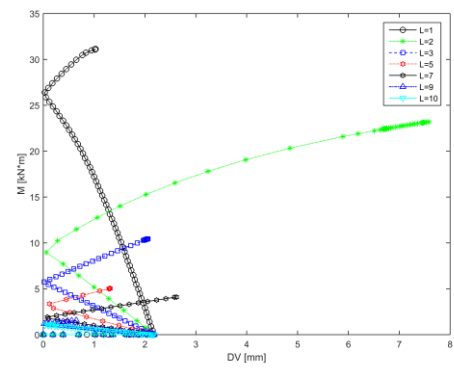
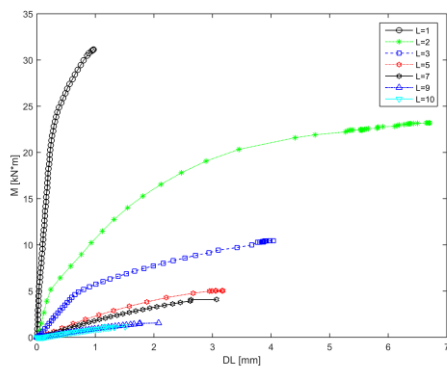


CASO -  $S=1,1d_0$

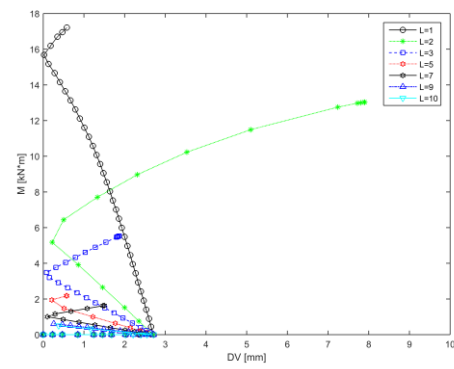
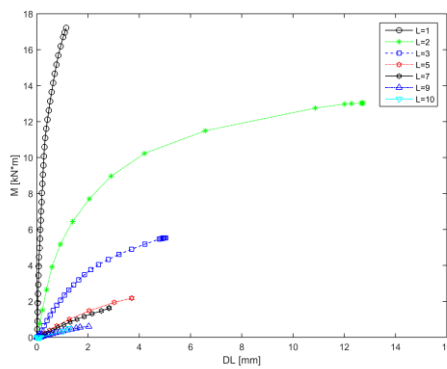
20 [°C]



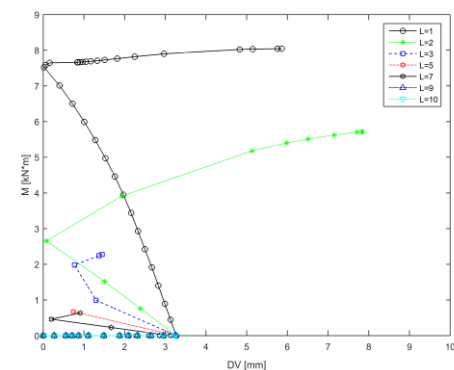
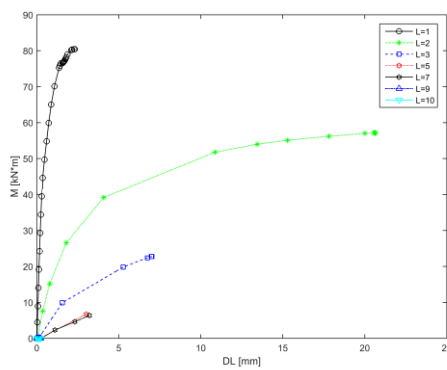
500 [°C]



600 [°C]

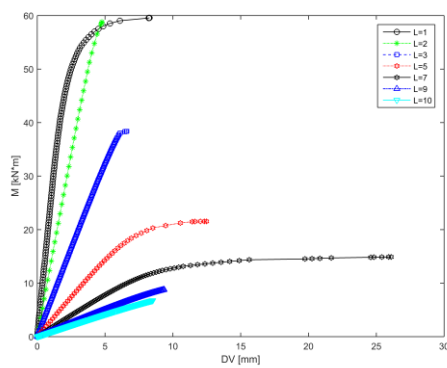
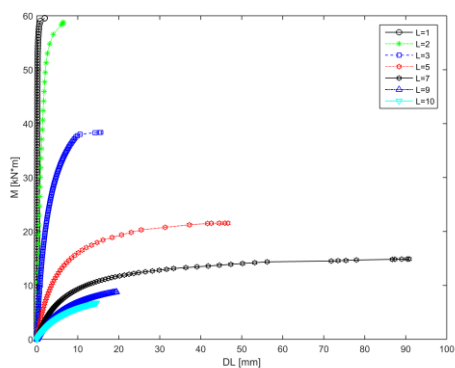


700 [°C]

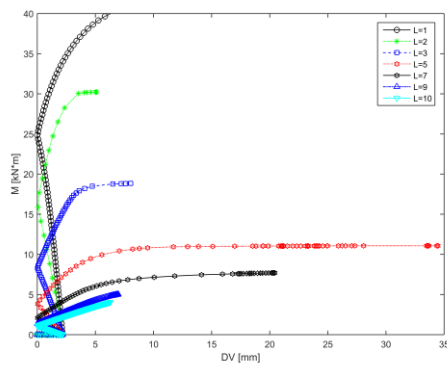
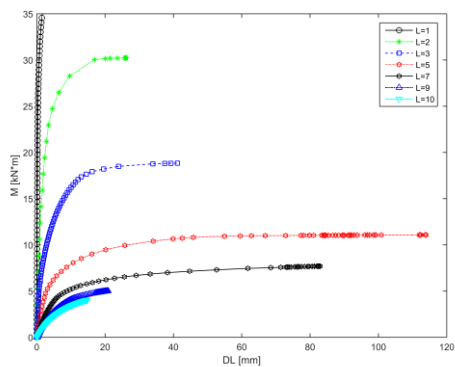


CASO - S=1,3d<sub>0</sub>

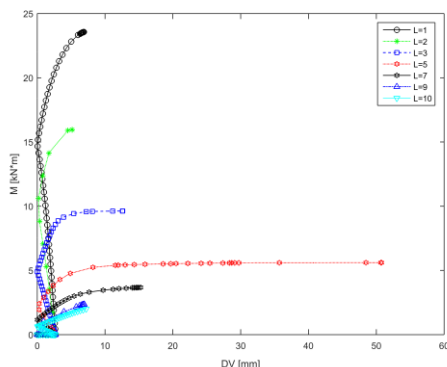
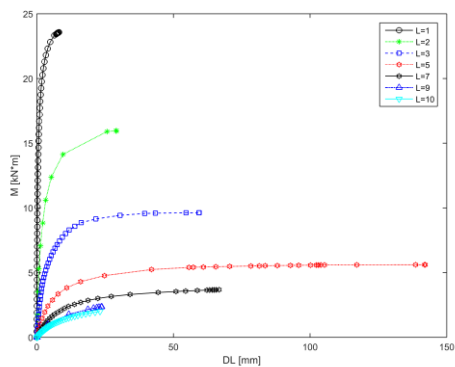
20 [°C]



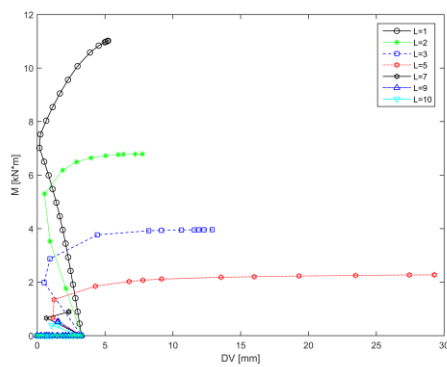
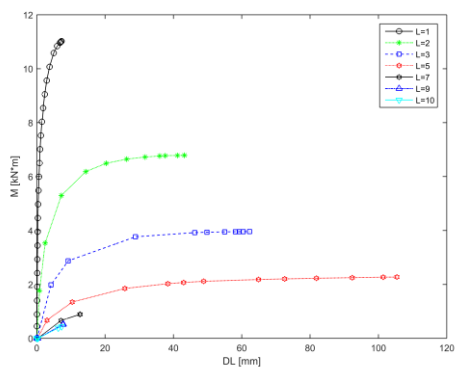
500 [°C]



600 [°C]

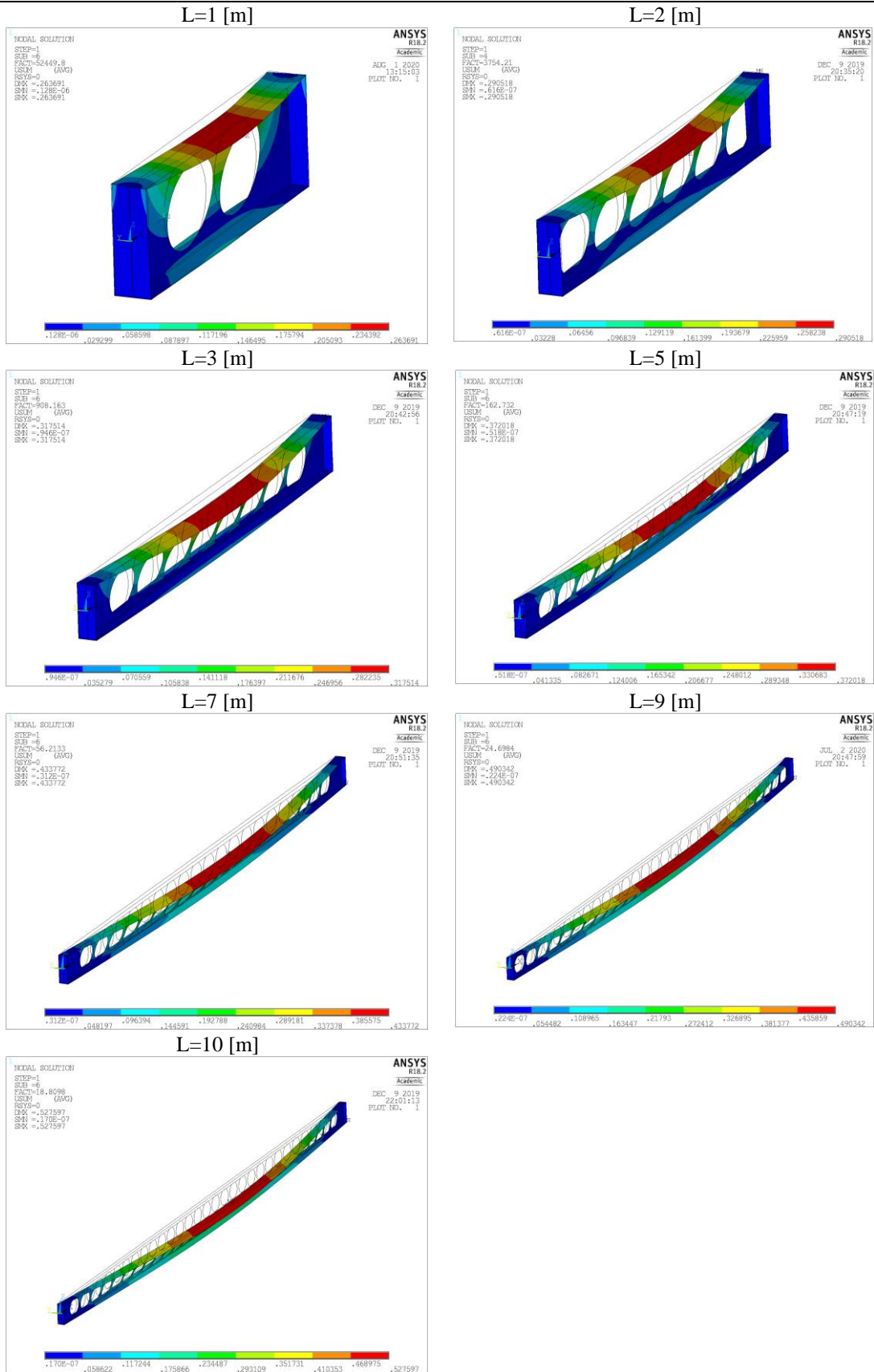


700 [°C]

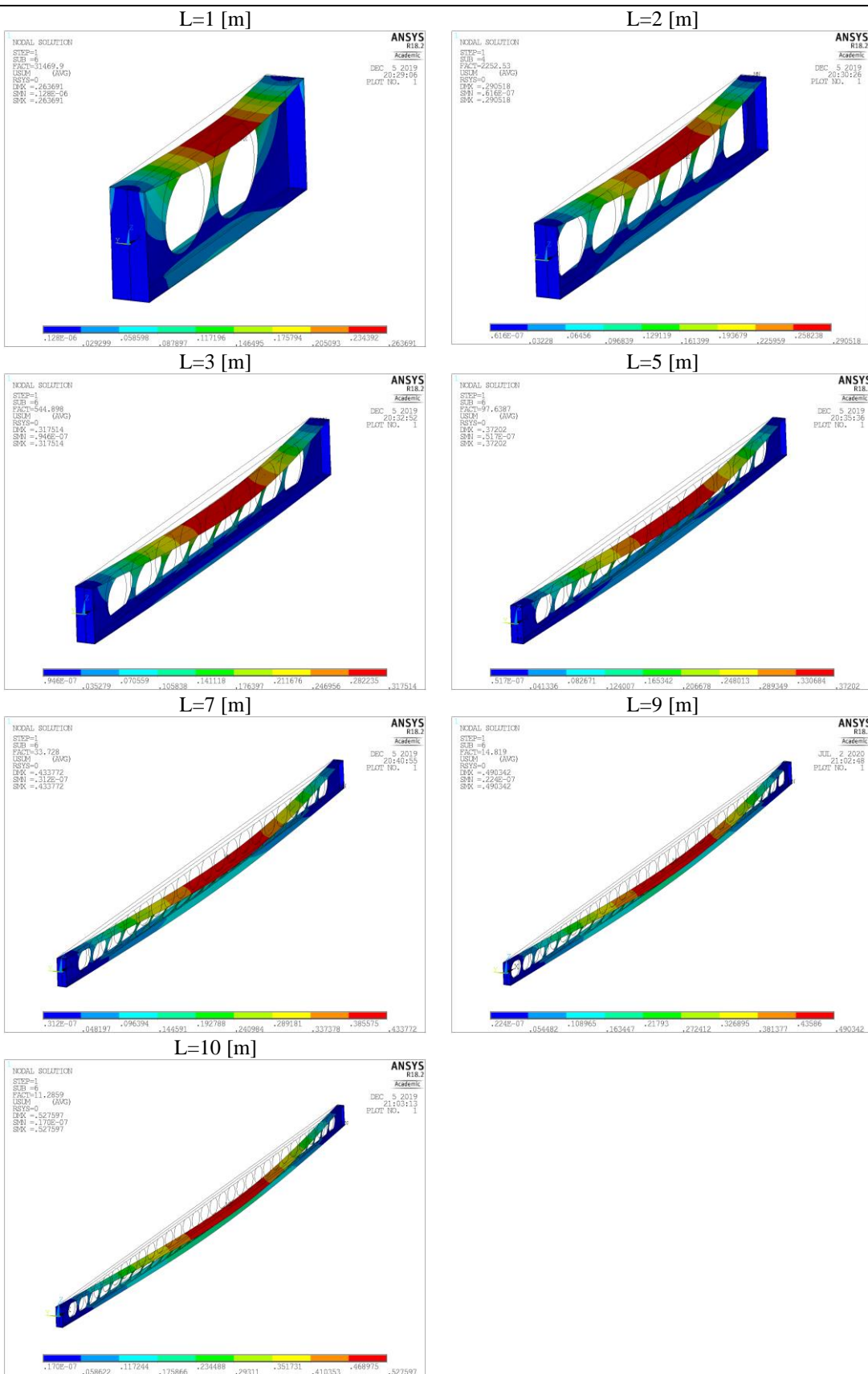


ANEXO E – Modo de instabilidade das vigas alveolares

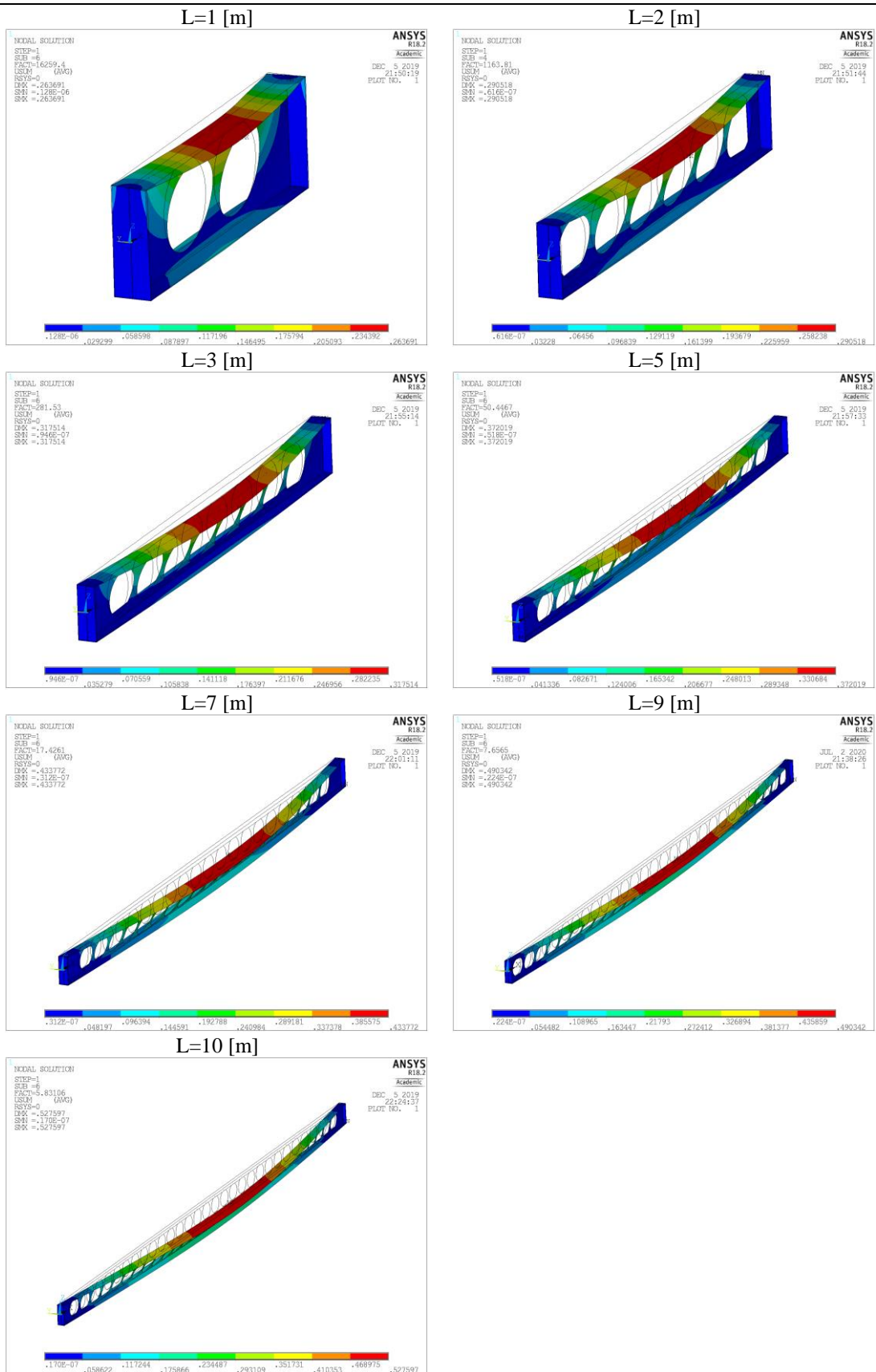
CASO - MR - 20 [°C]



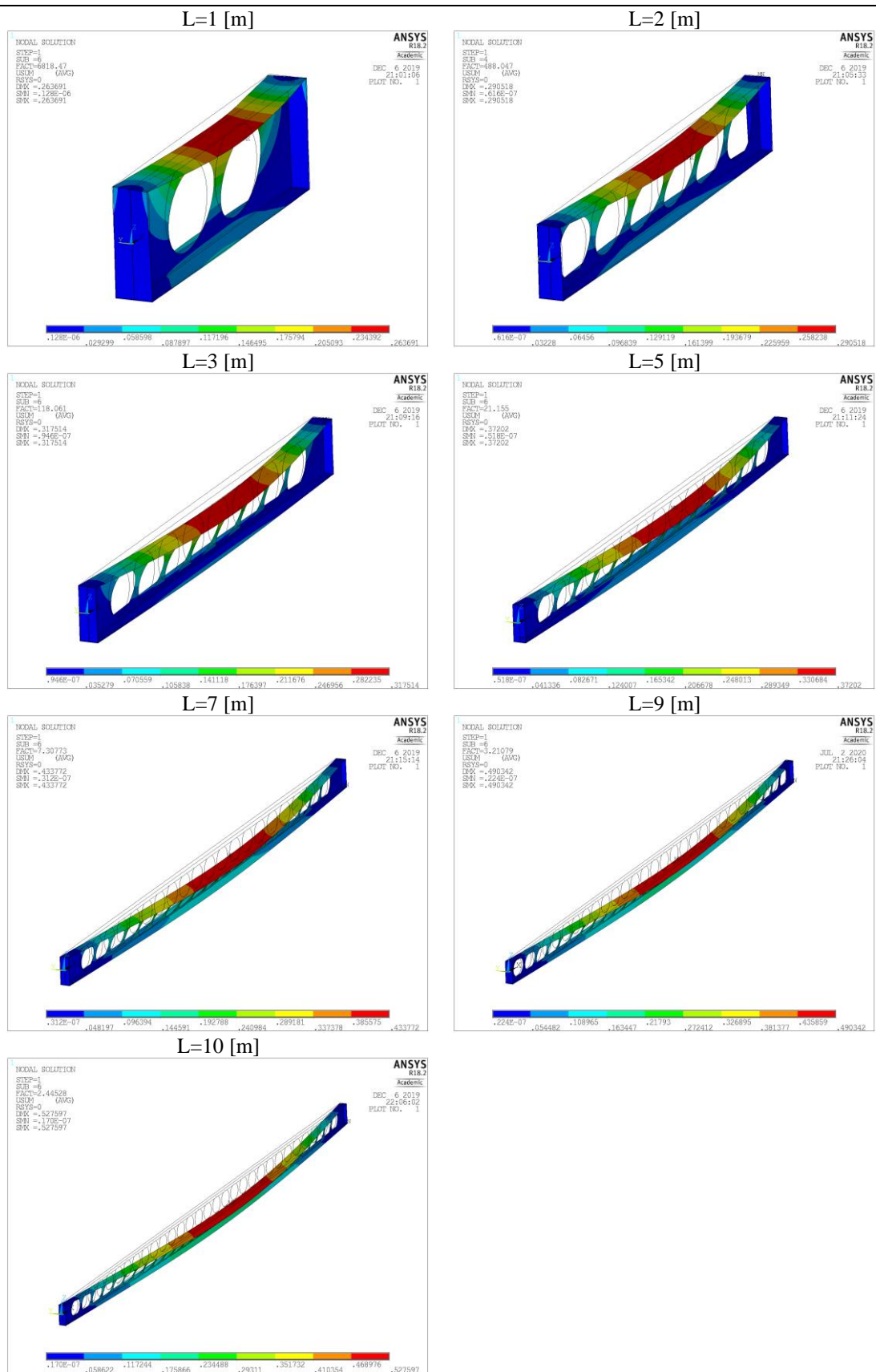
CASO - MR - 500 [°C]



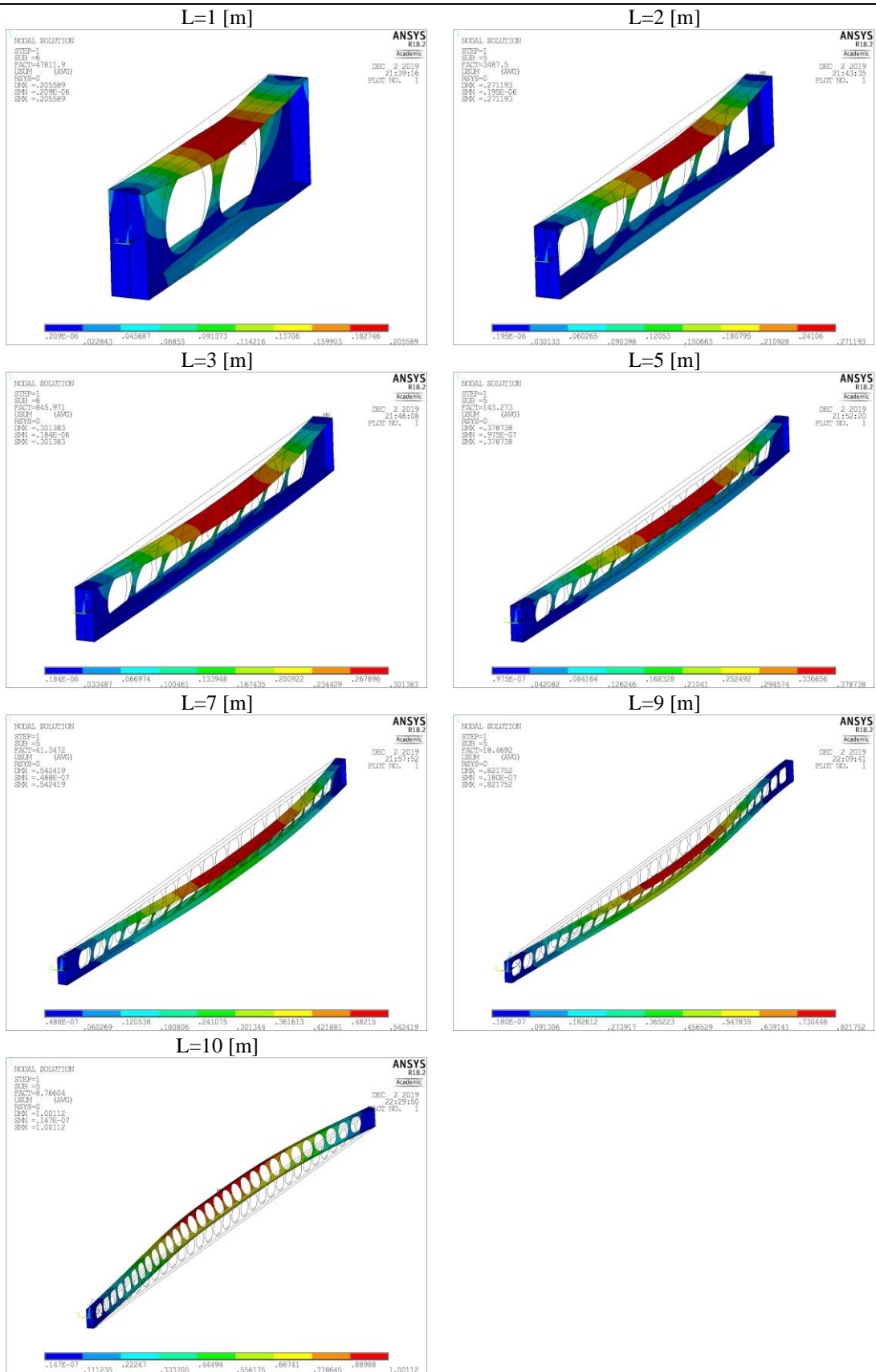
CASO - MR - 600 [°C]



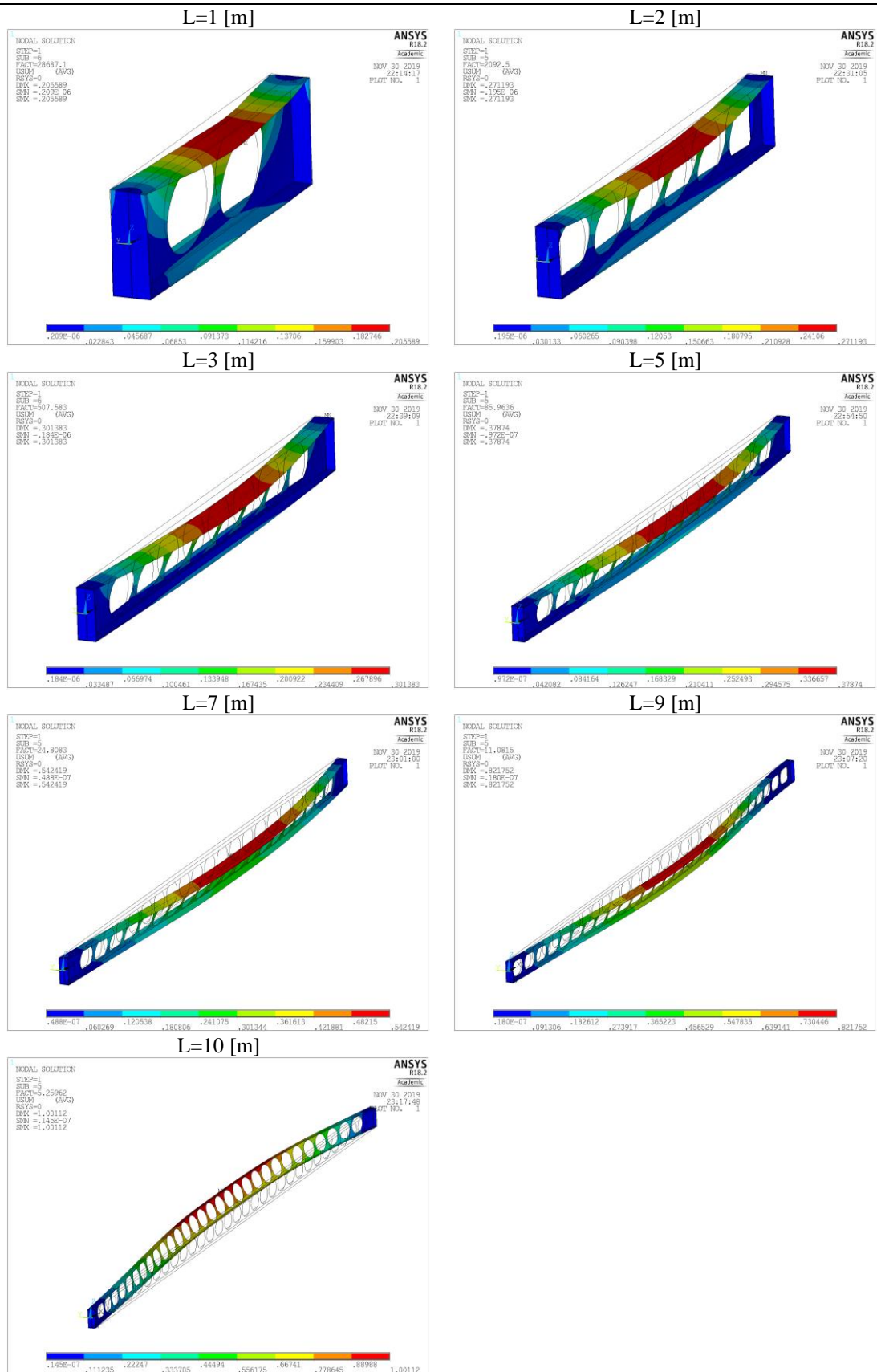
CASO - MR - 700 [°C]



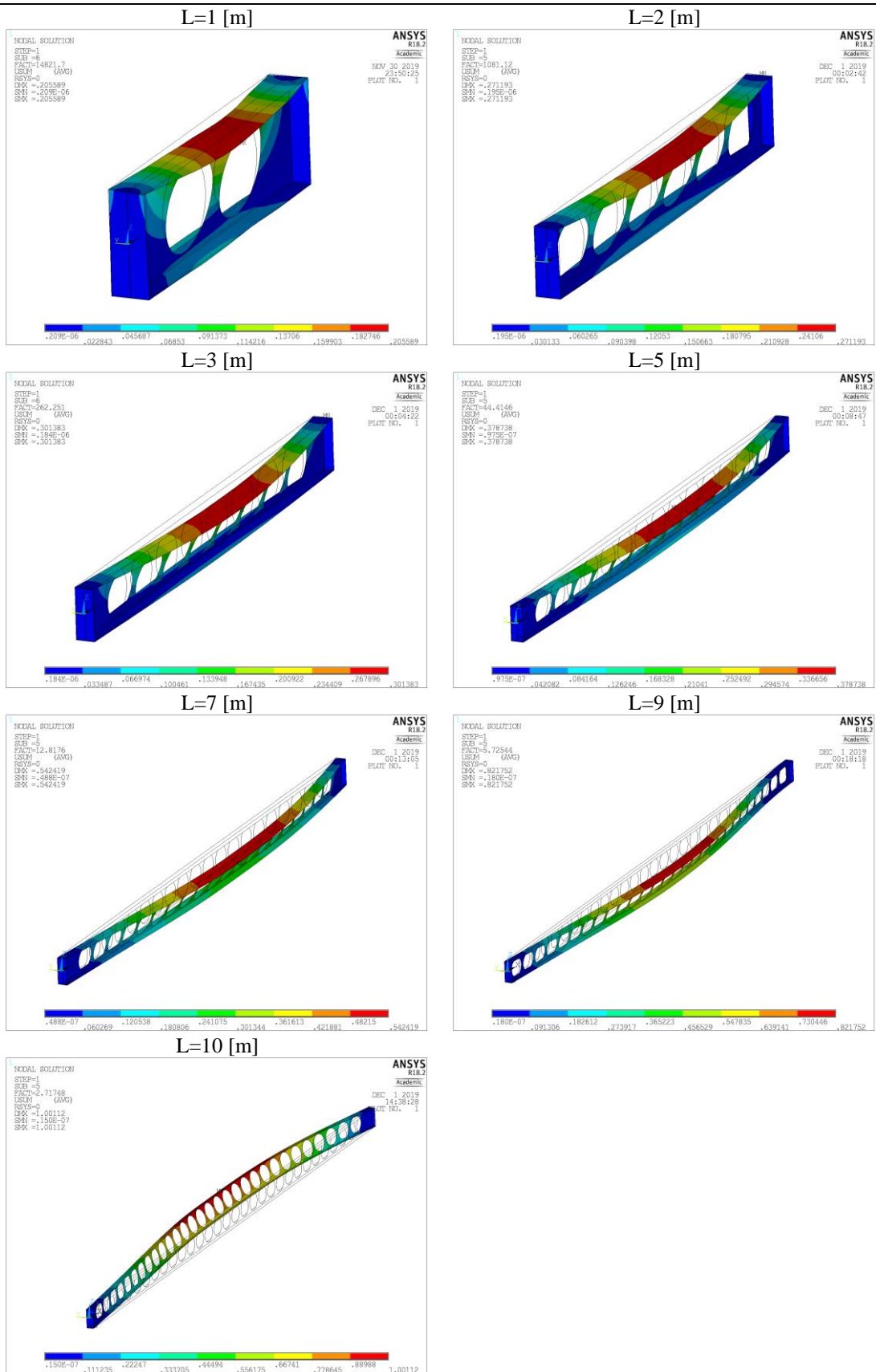
CASO – H=1,4h - 20 [°C]



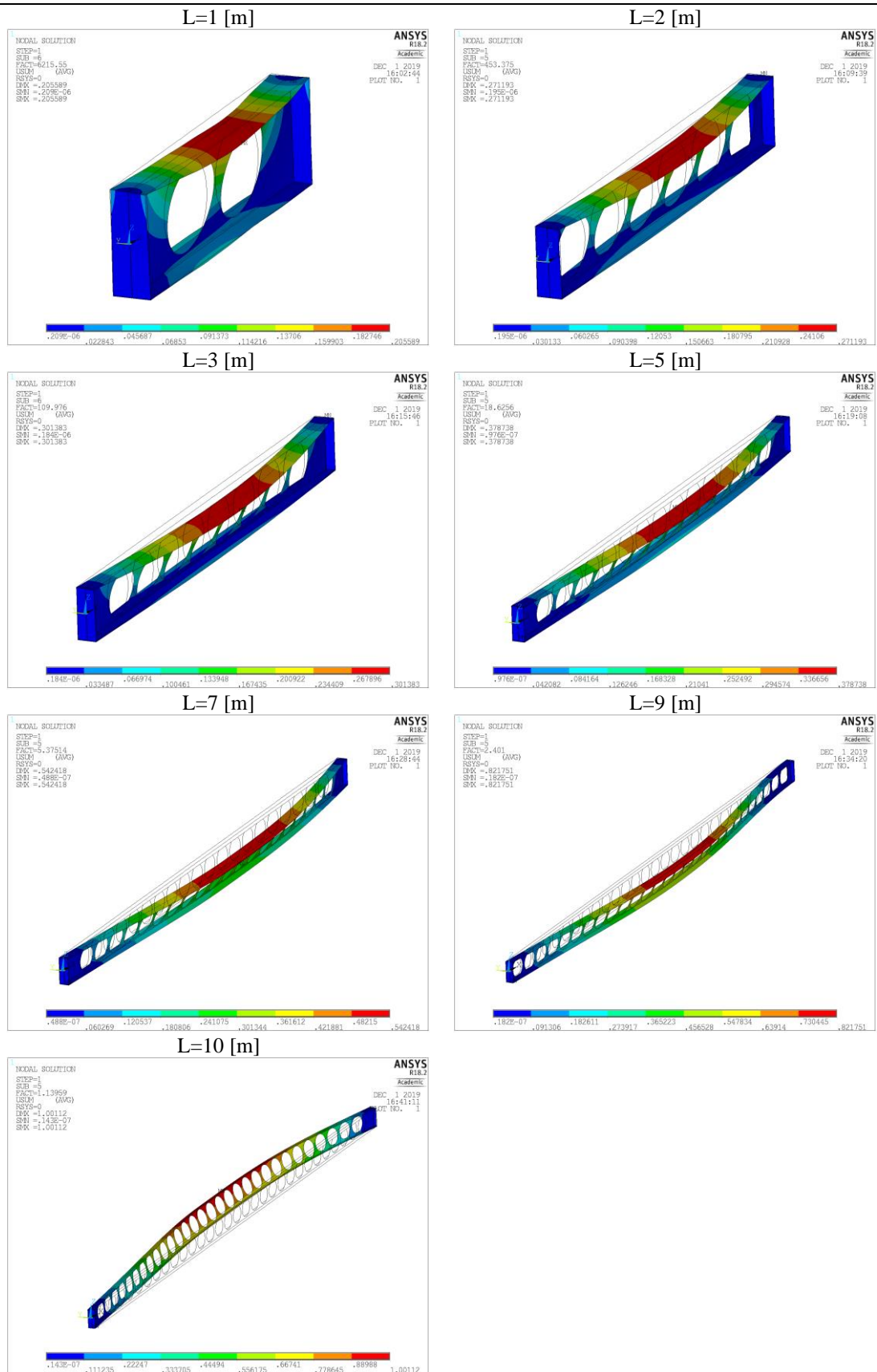
CASO – H=1,4h - 500 [°C]



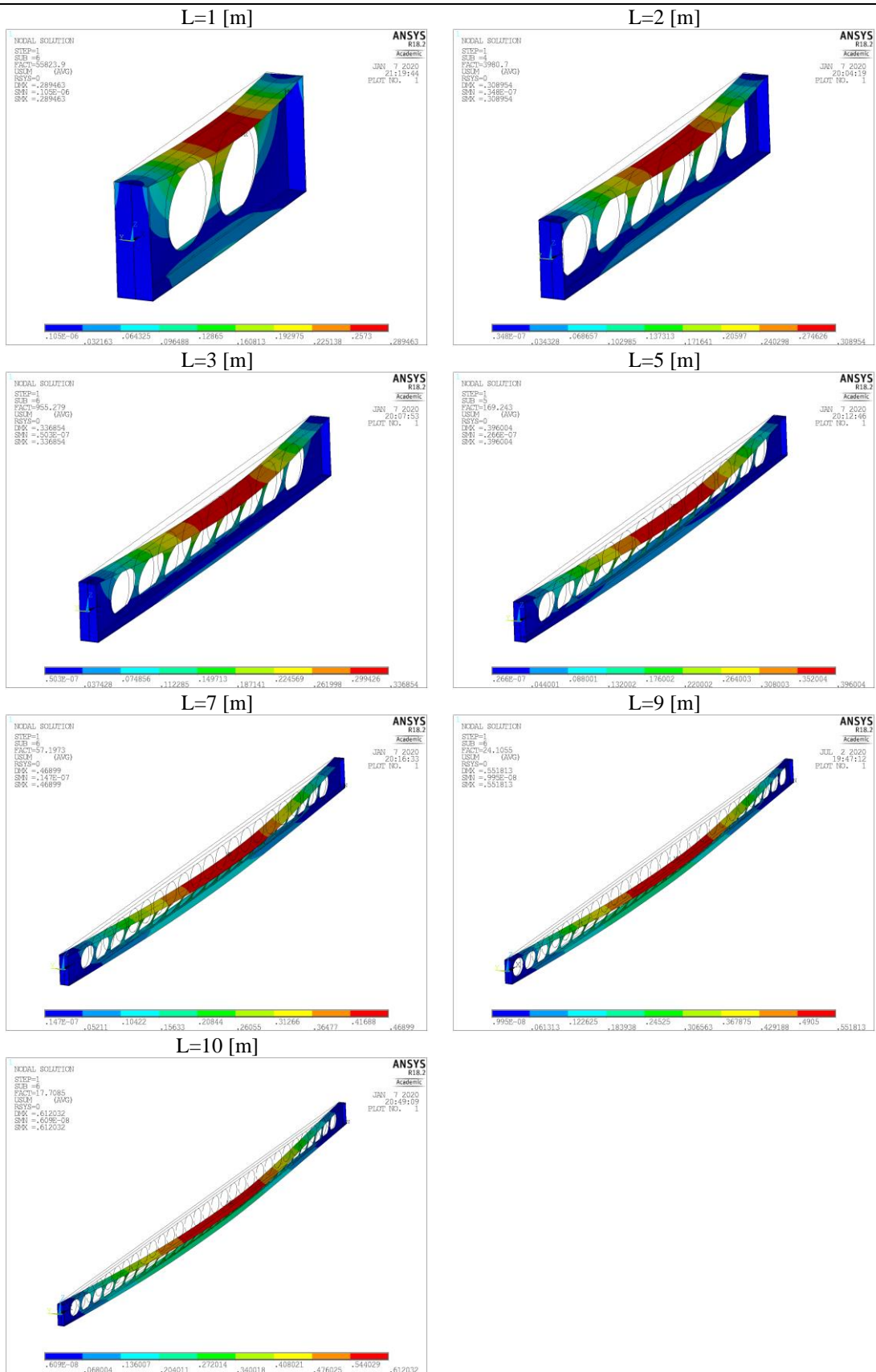
CASO – H=1,4h - 600 [°C]



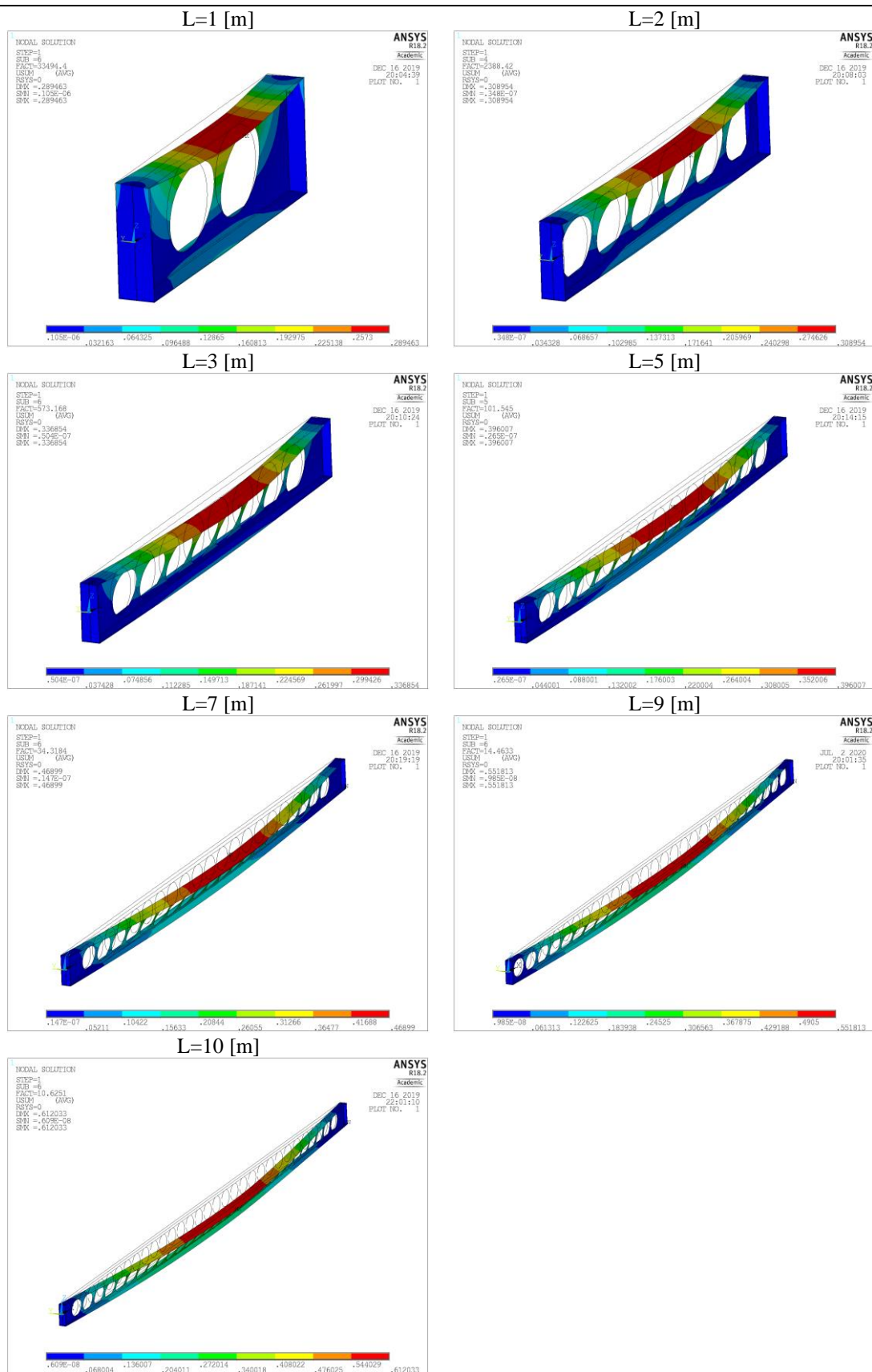
CASO – H=1,4h - 700 [°C]



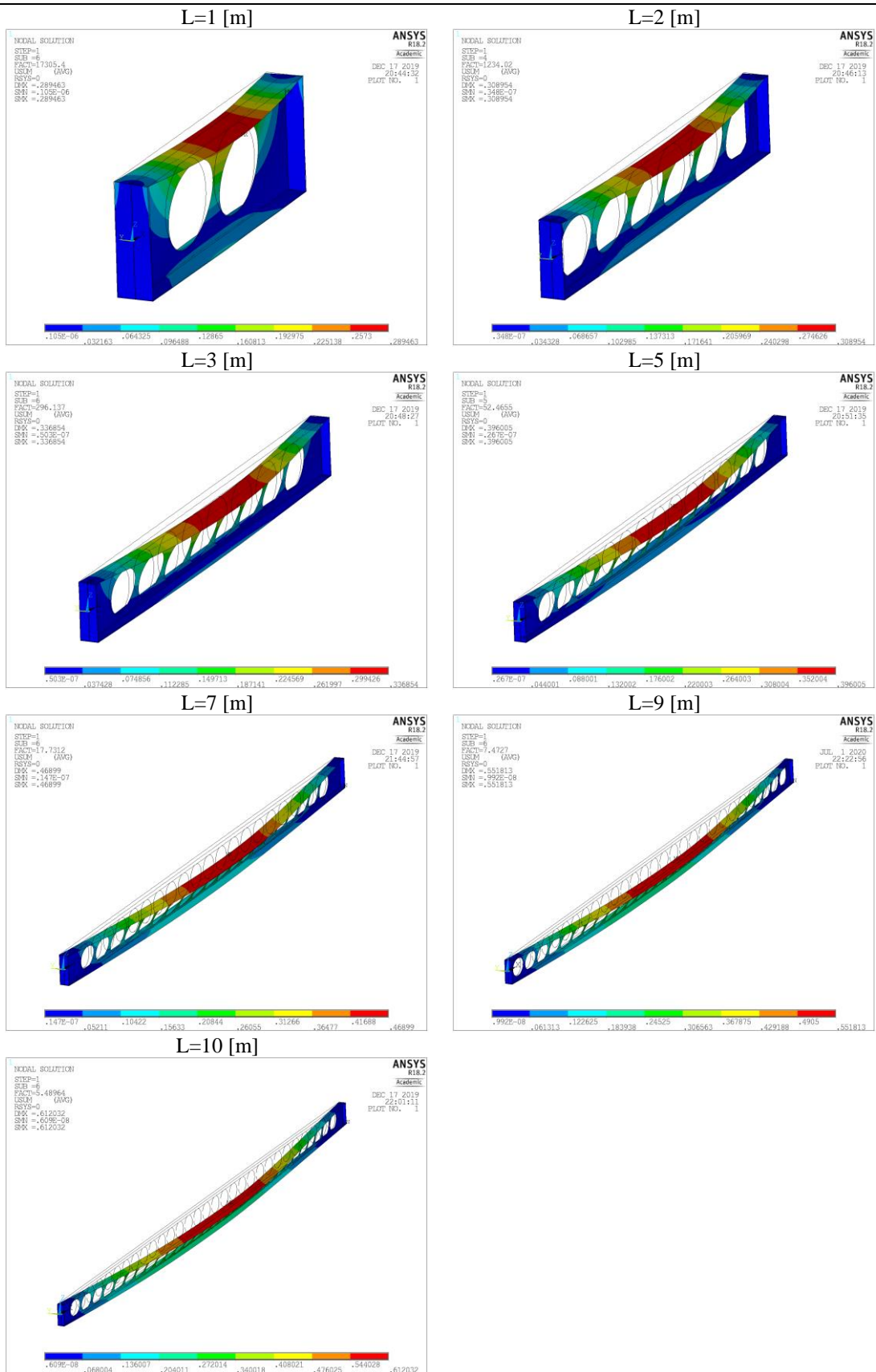
CASO – H=1,6h - 20 [°C]



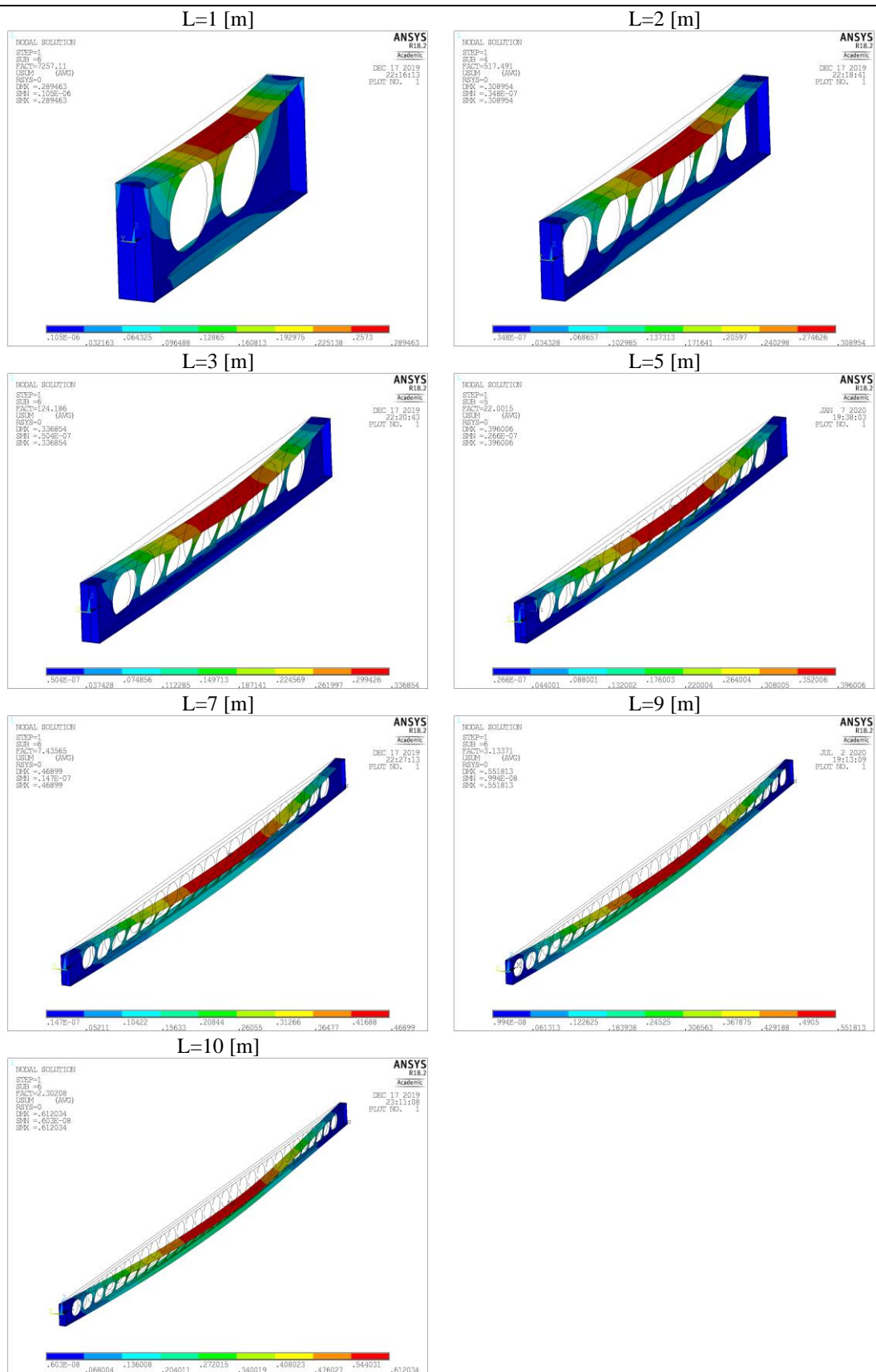
CASO – H=1,6h - 500 [°C]



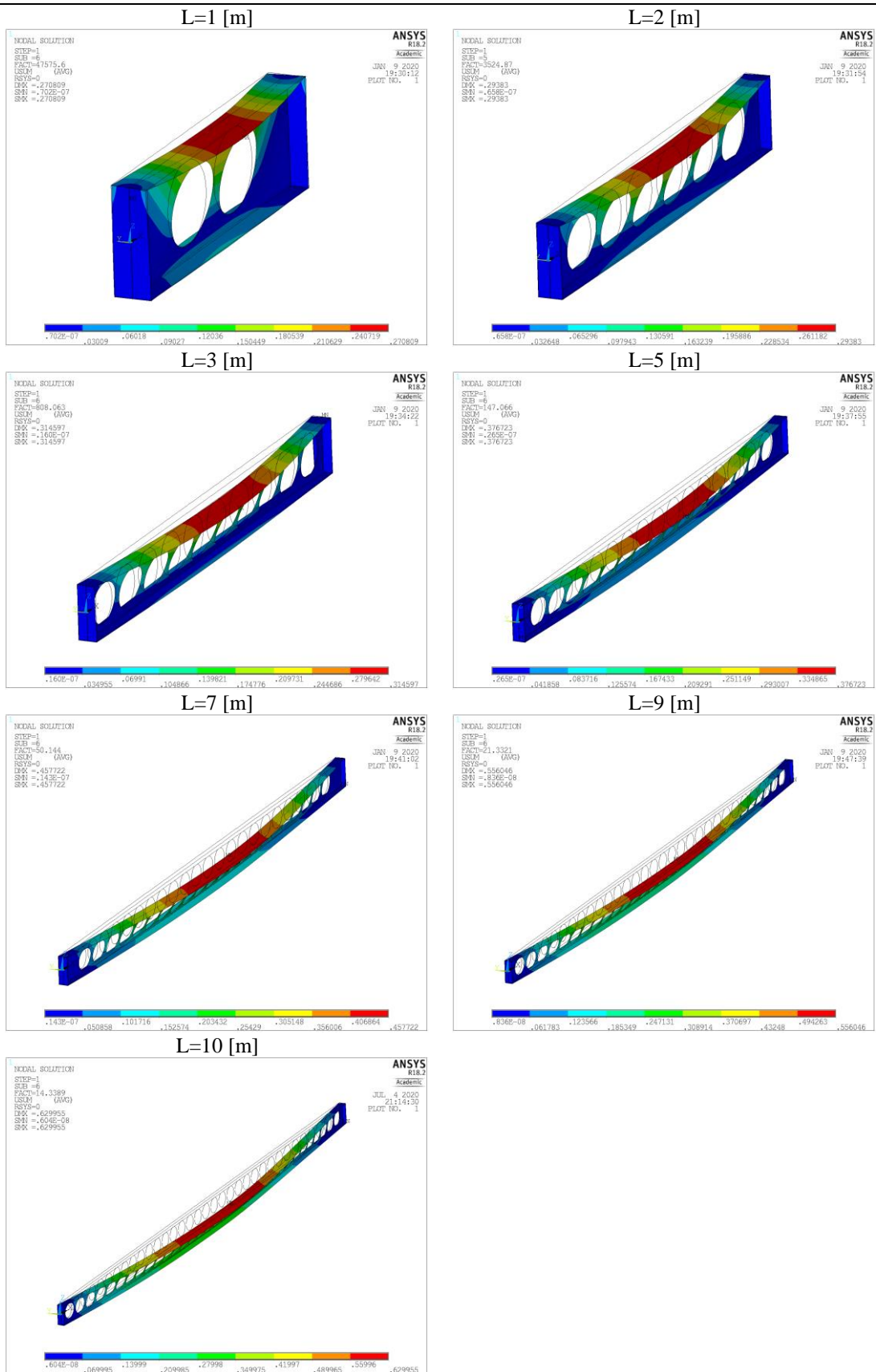
CASO – H=1,6h - 600 [°C]



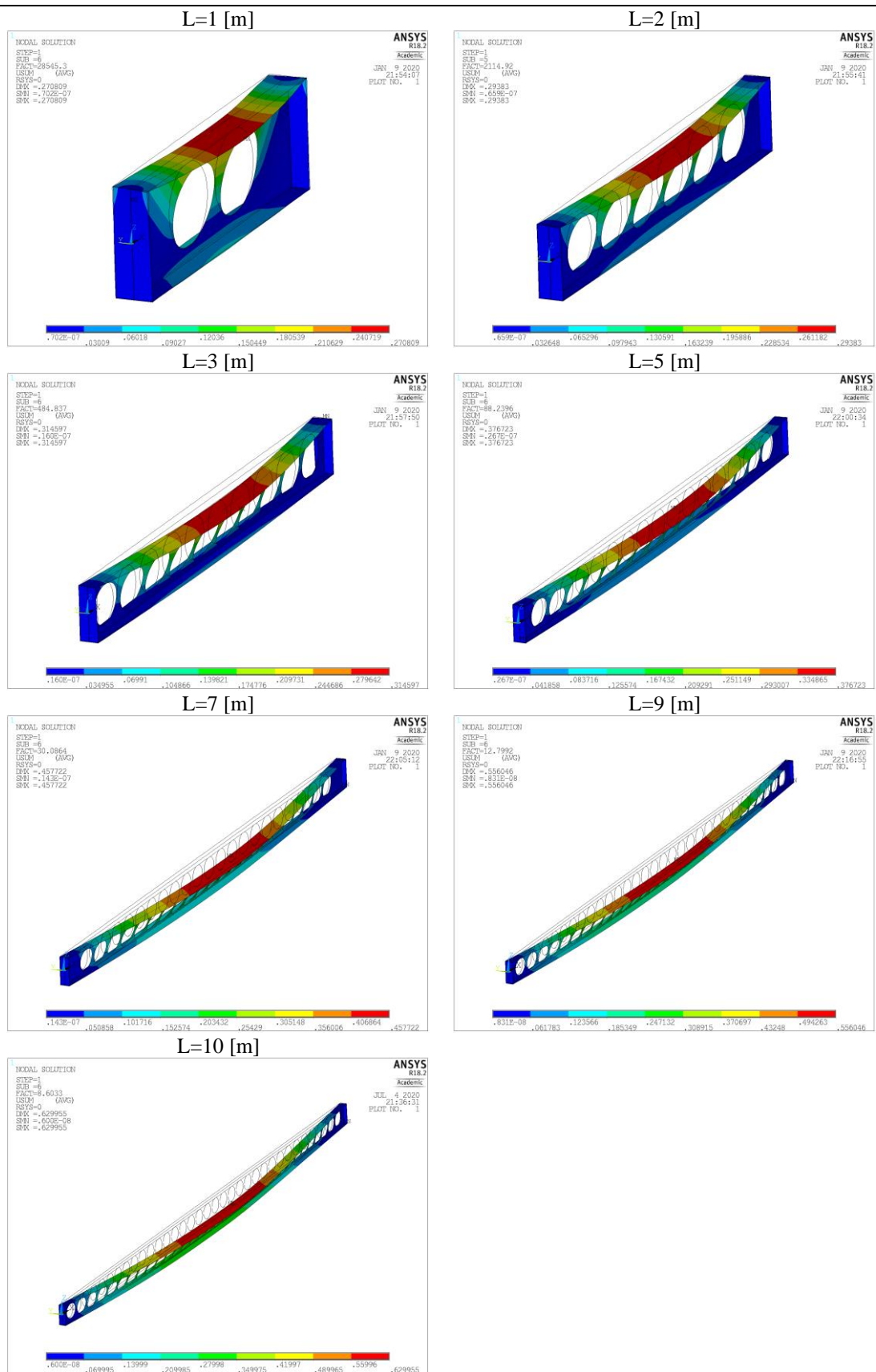
CASO – H=1,6h - 700 [°C]



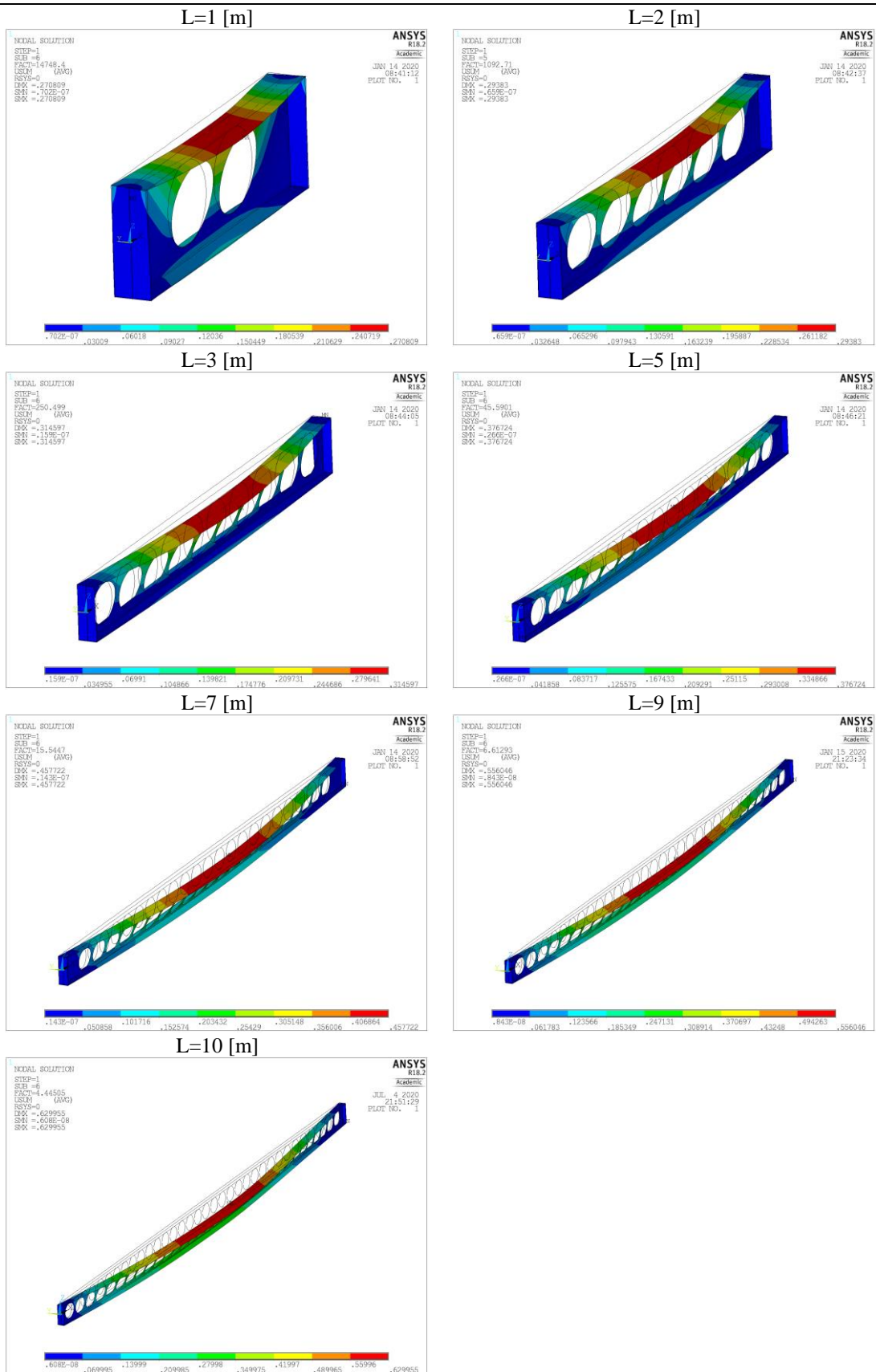
CASO –  $d_0=1,1h - 20 [^{\circ}C]$



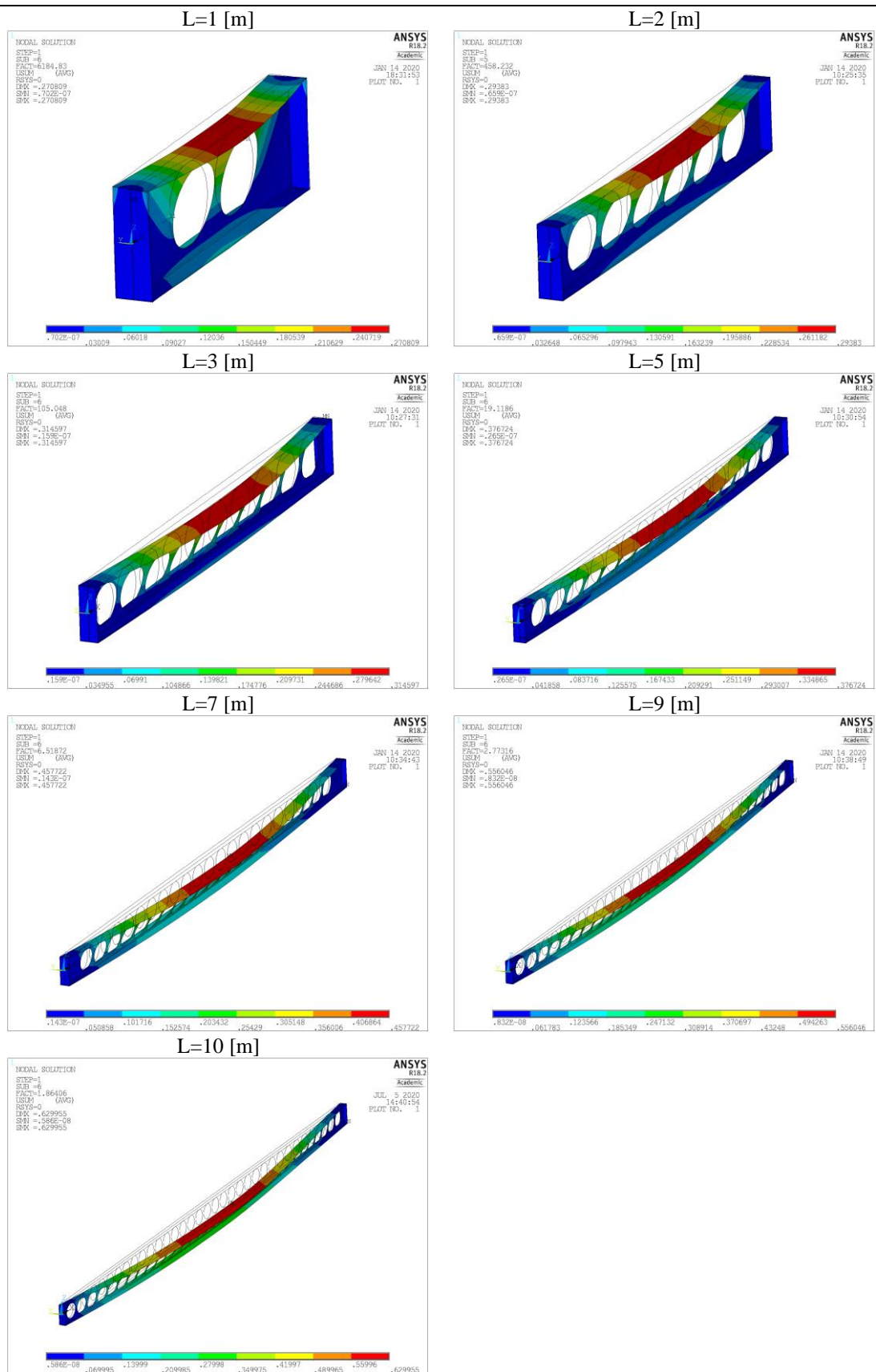
CASO –  $d_0=1,1h - 500 [^{\circ}C]$



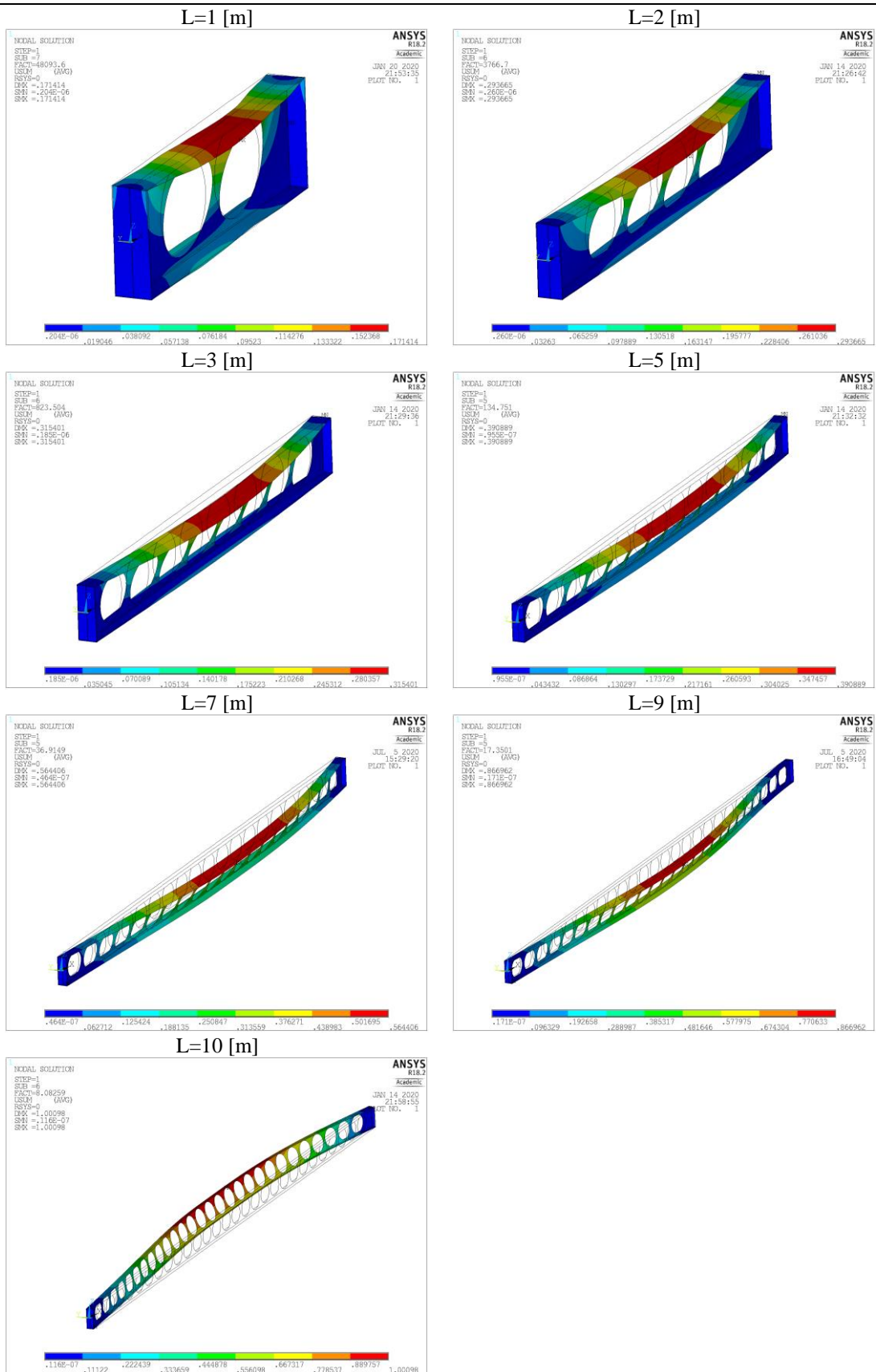
CASO –  $d_0=1,1h - 600 [^{\circ}\text{C}]$



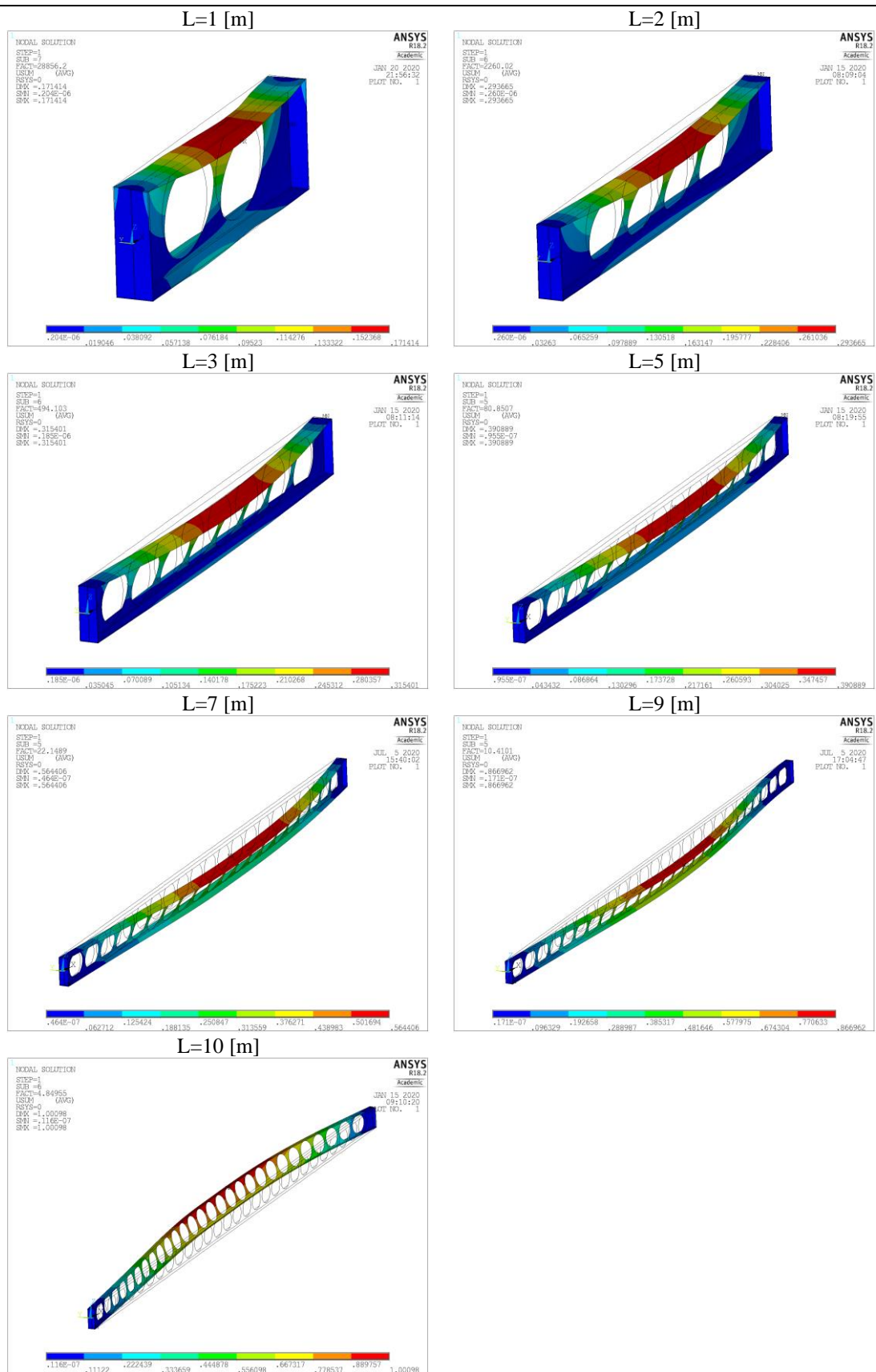
CASO –  $d_0=1,1h - 700 [^{\circ}C]$



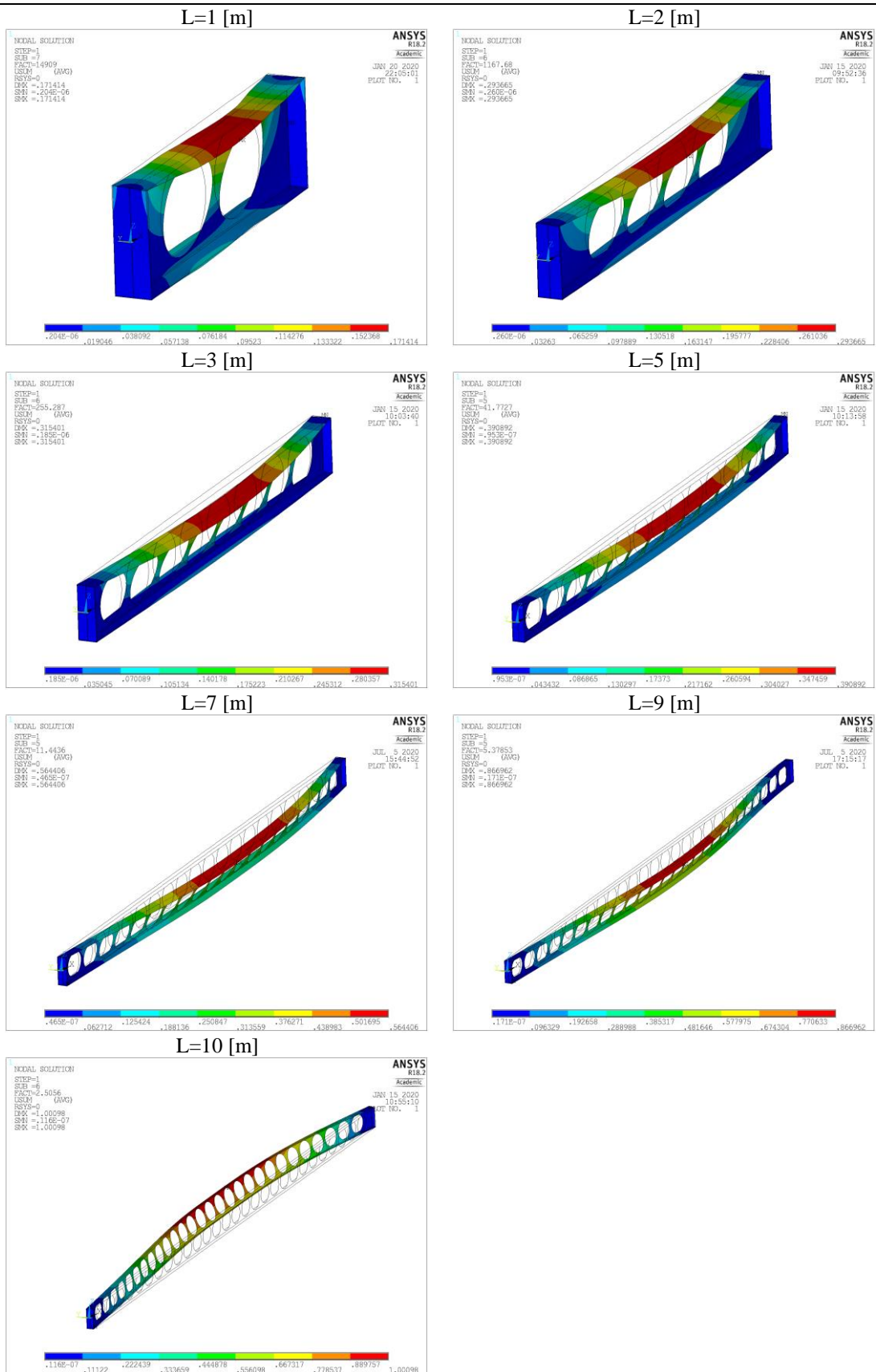
CASO –  $d_0=1,3h - 20 [^{\circ}C]$



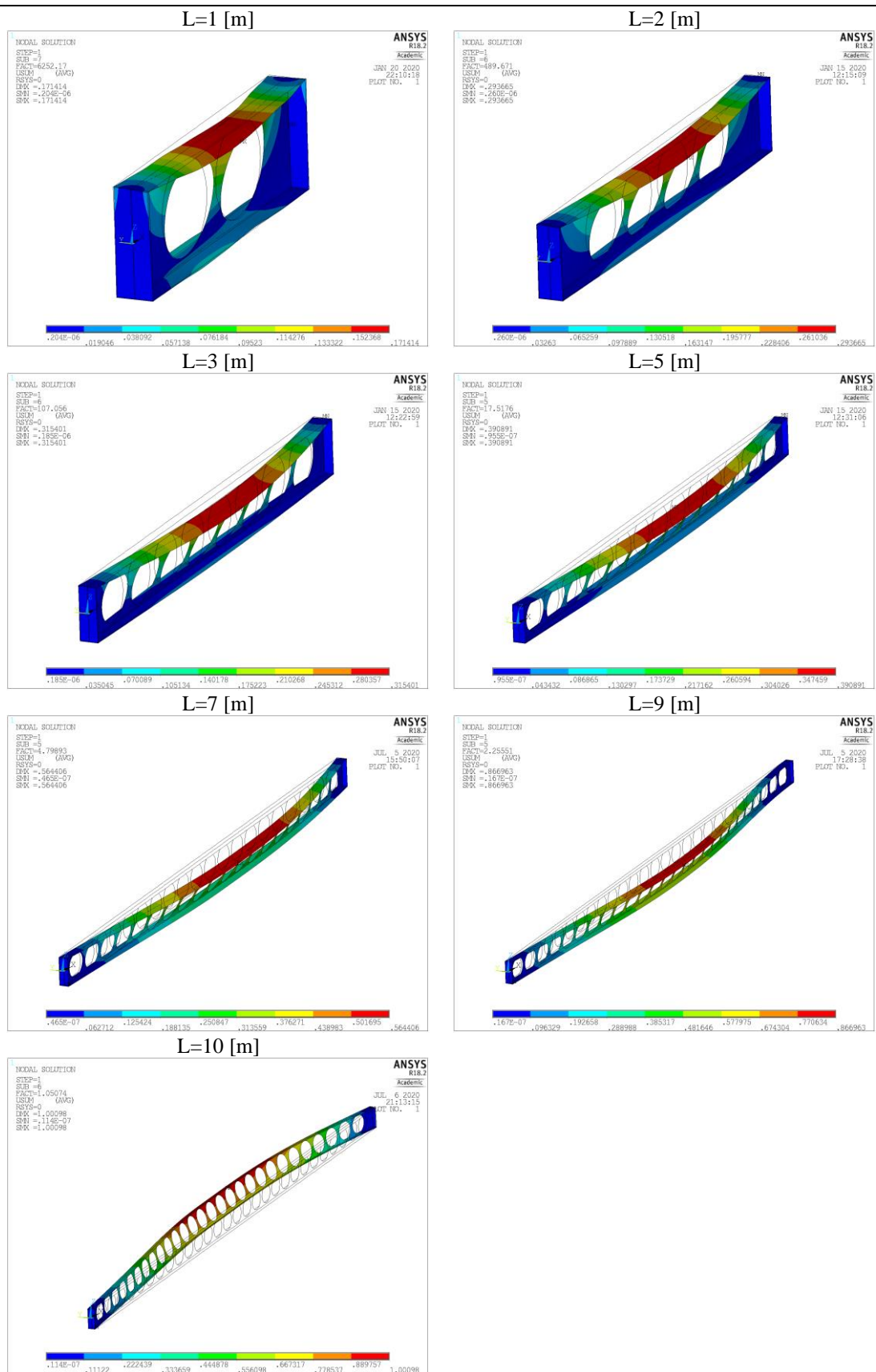
CASO –  $d_0=1,3h - 500 [^{\circ}C]$



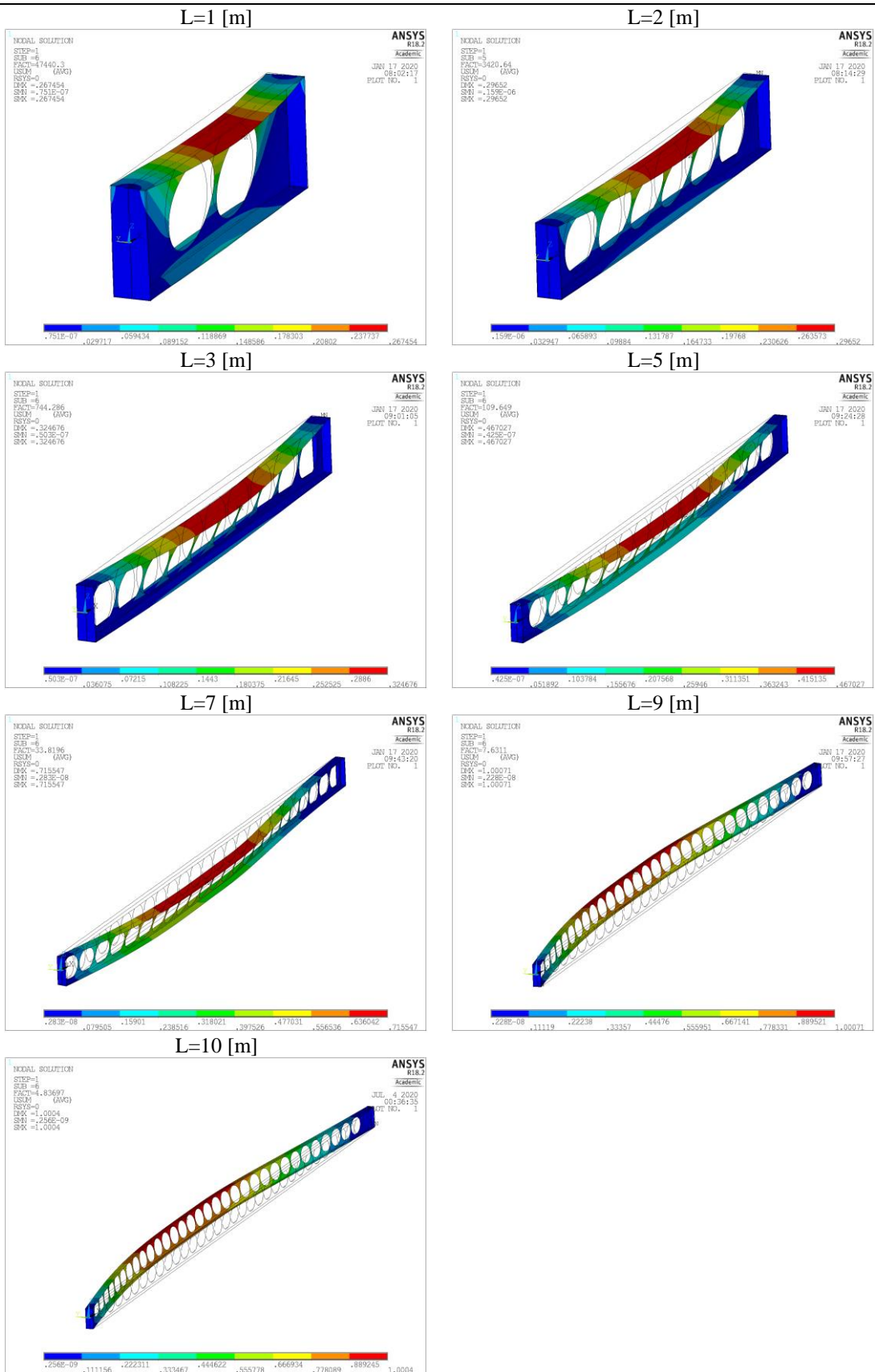
CASO –  $d_0=1,3h - 600 [^{\circ}\text{C}]$



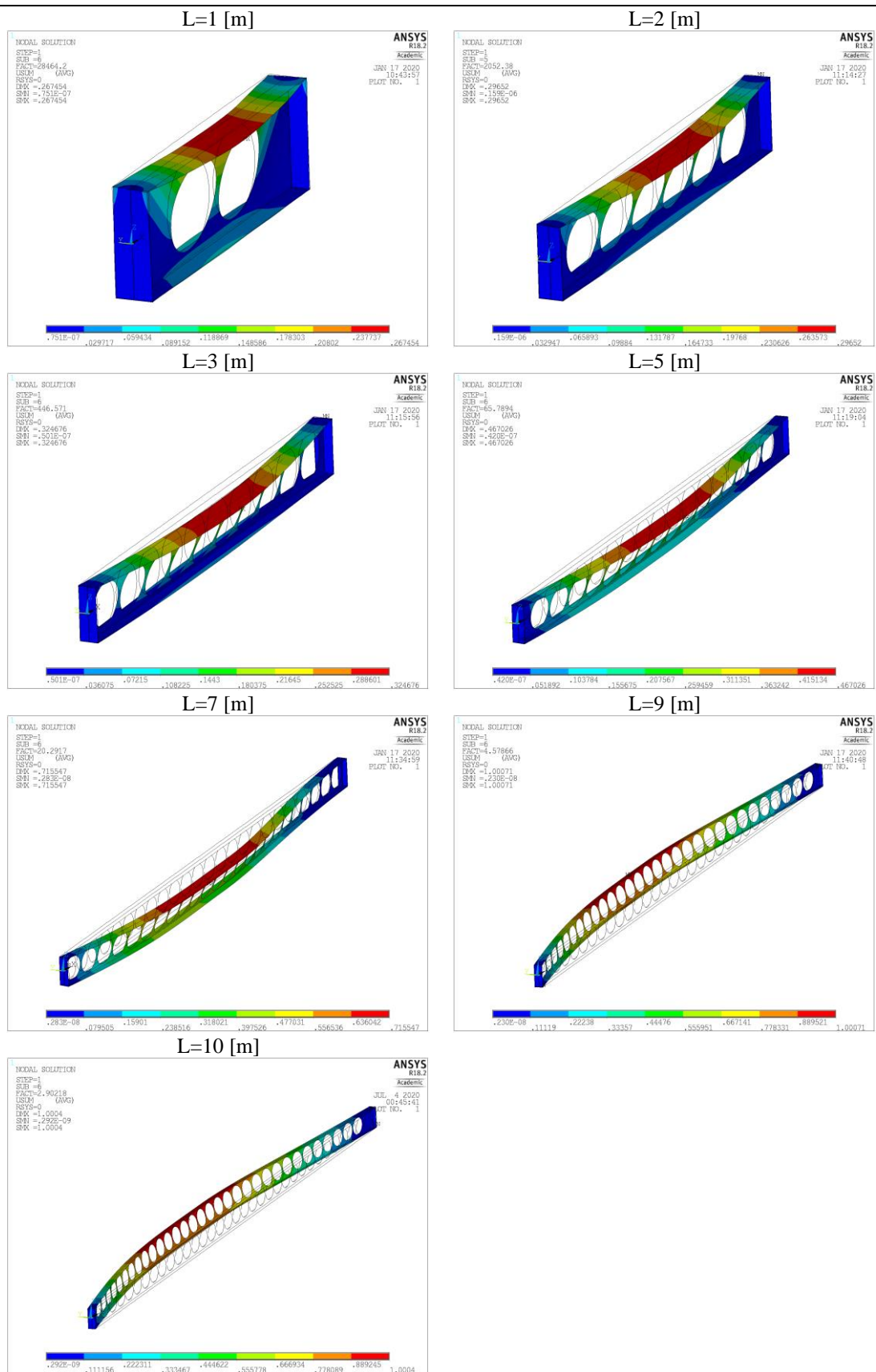
CASO –  $d_0=1,3h - 700 [^{\circ}C]$



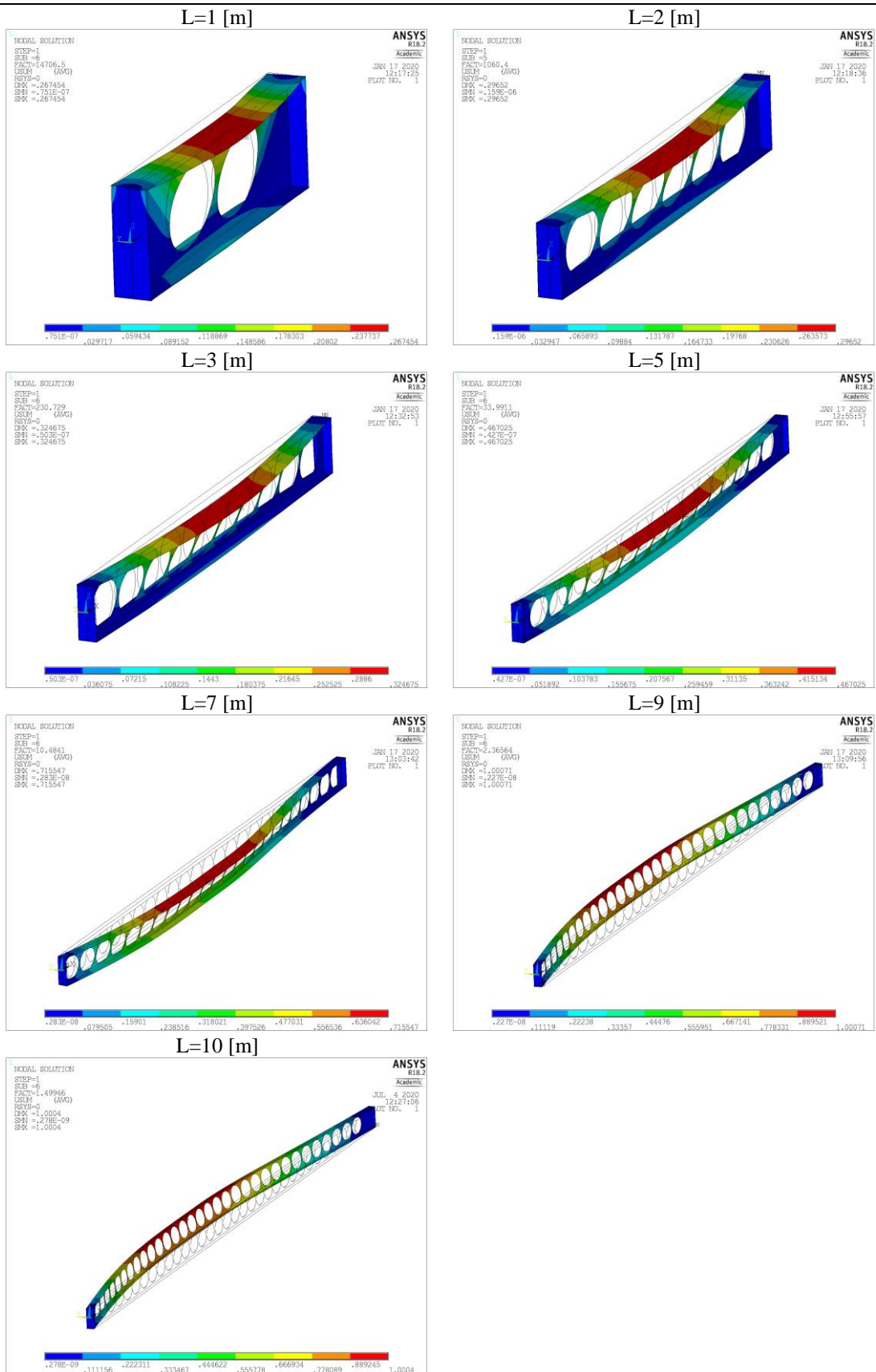
CASO – S=1,1d<sub>0</sub> - 20 [°C]



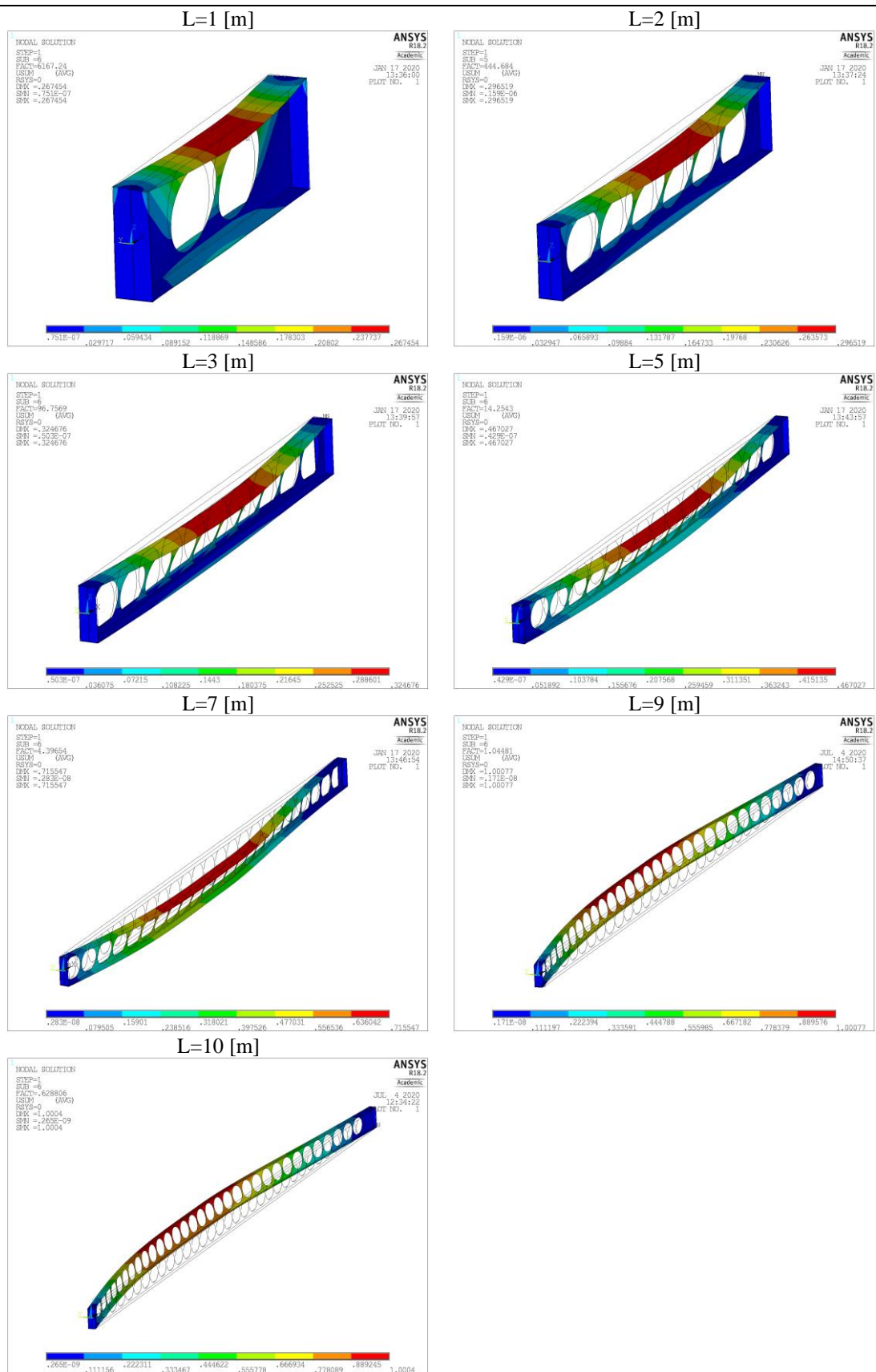
CASO – S=1,1d<sub>0</sub> - 500 [°C]



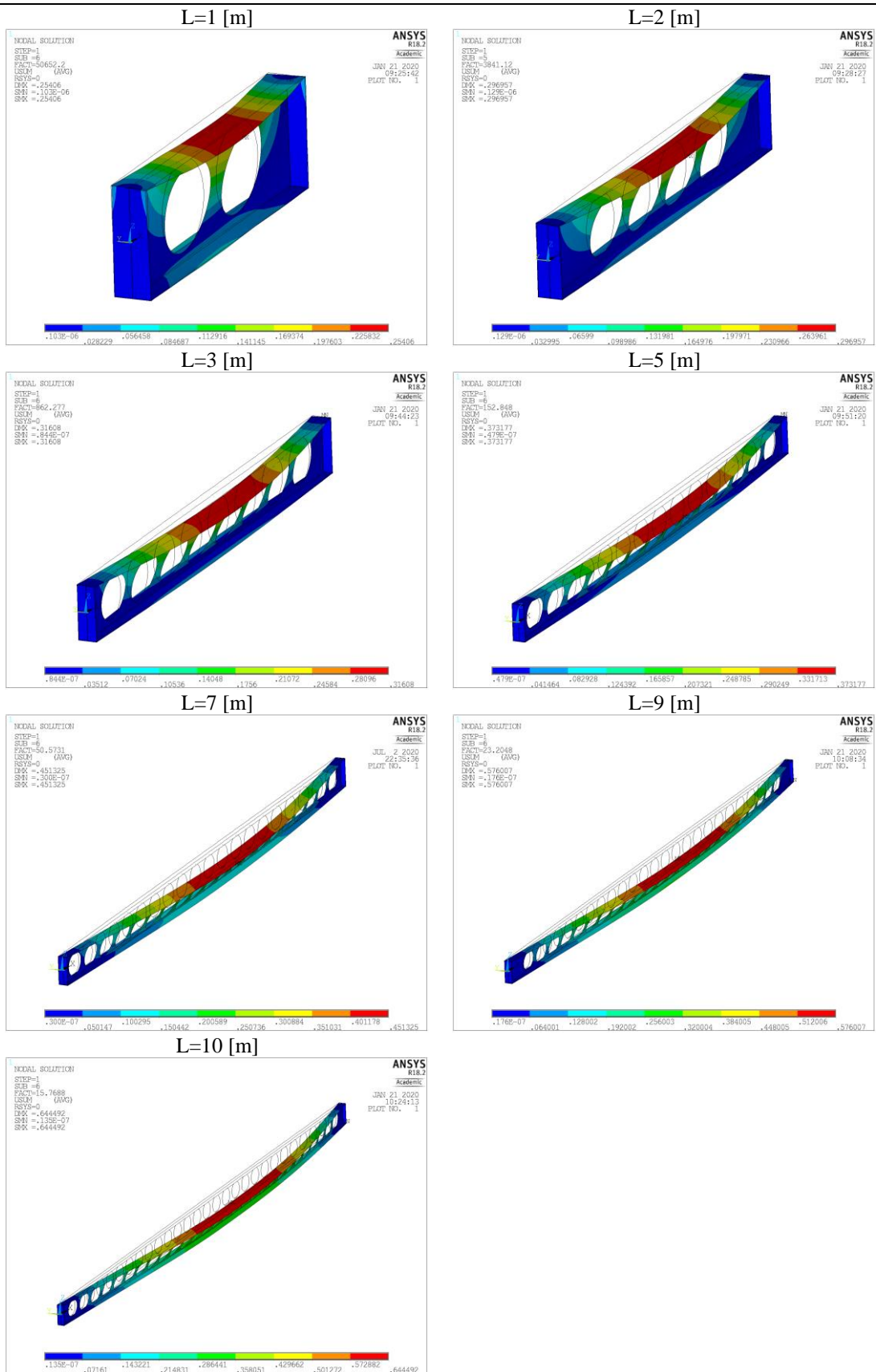
CASO – S=1,  $1d_0 - 600 [^{\circ}\text{C}]$



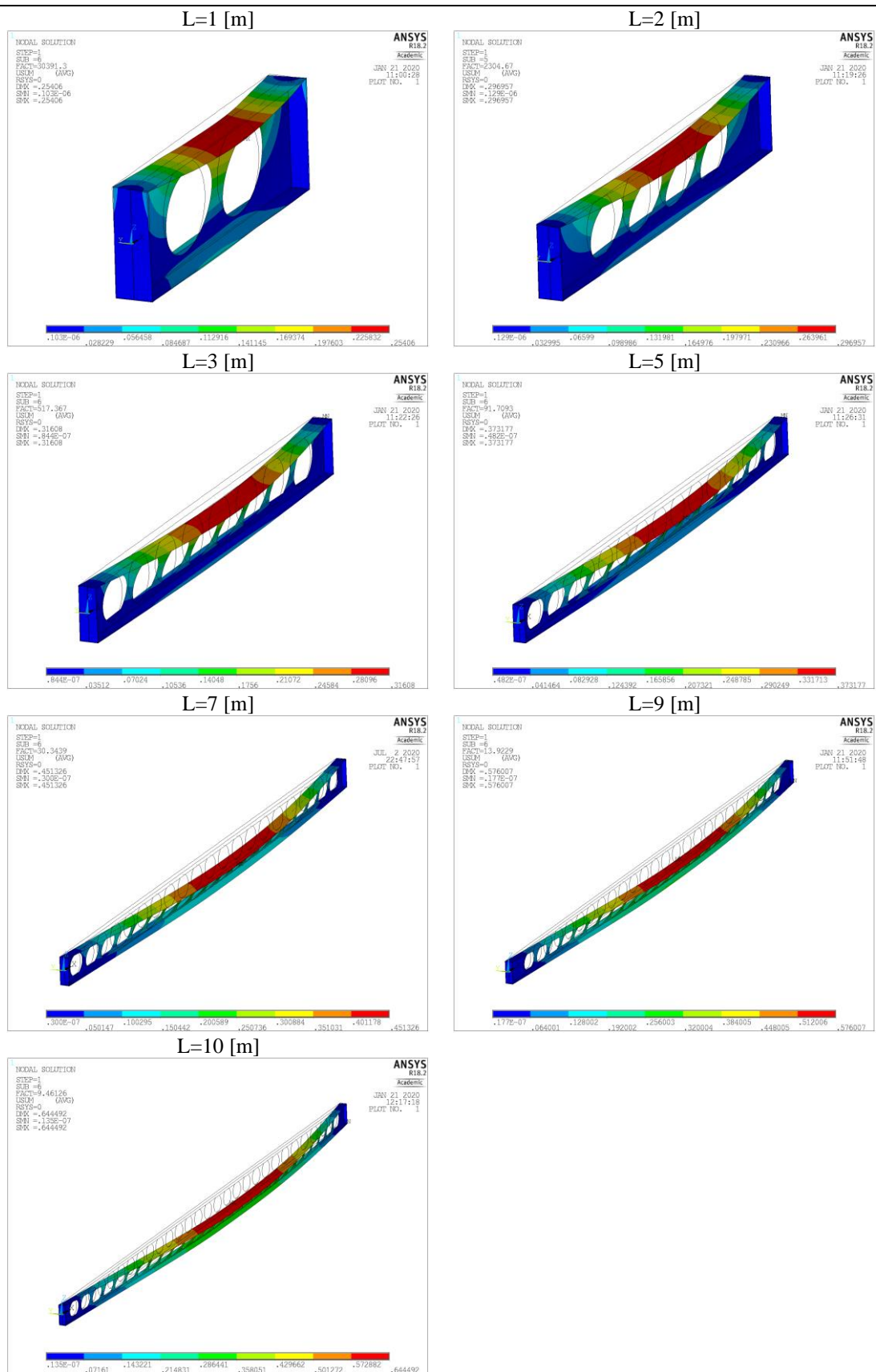
CASO – S=1,1d<sub>0</sub> - 700 [°C]



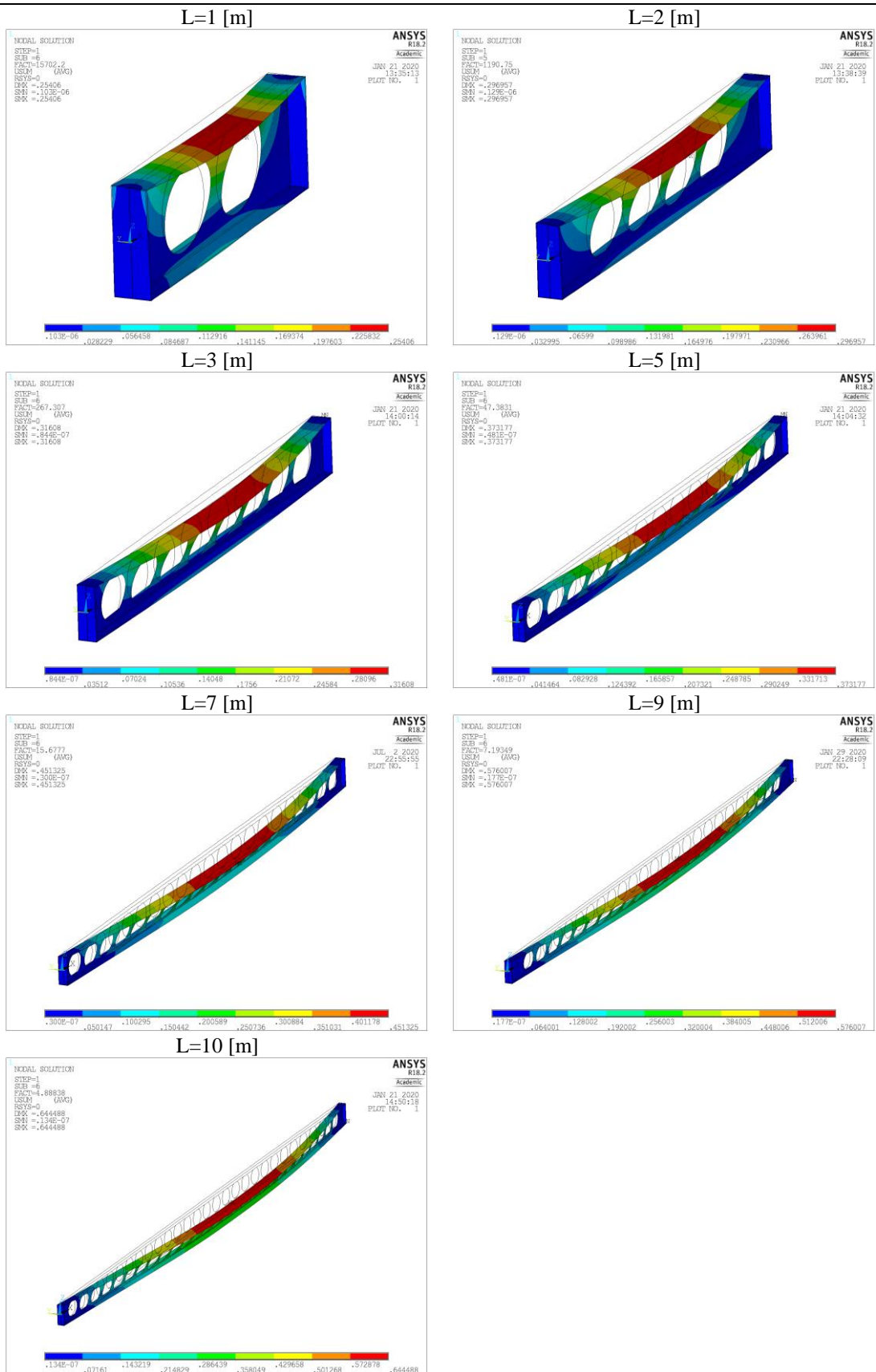
CASO –  $S=1,3d_0 - 20$  [°C]



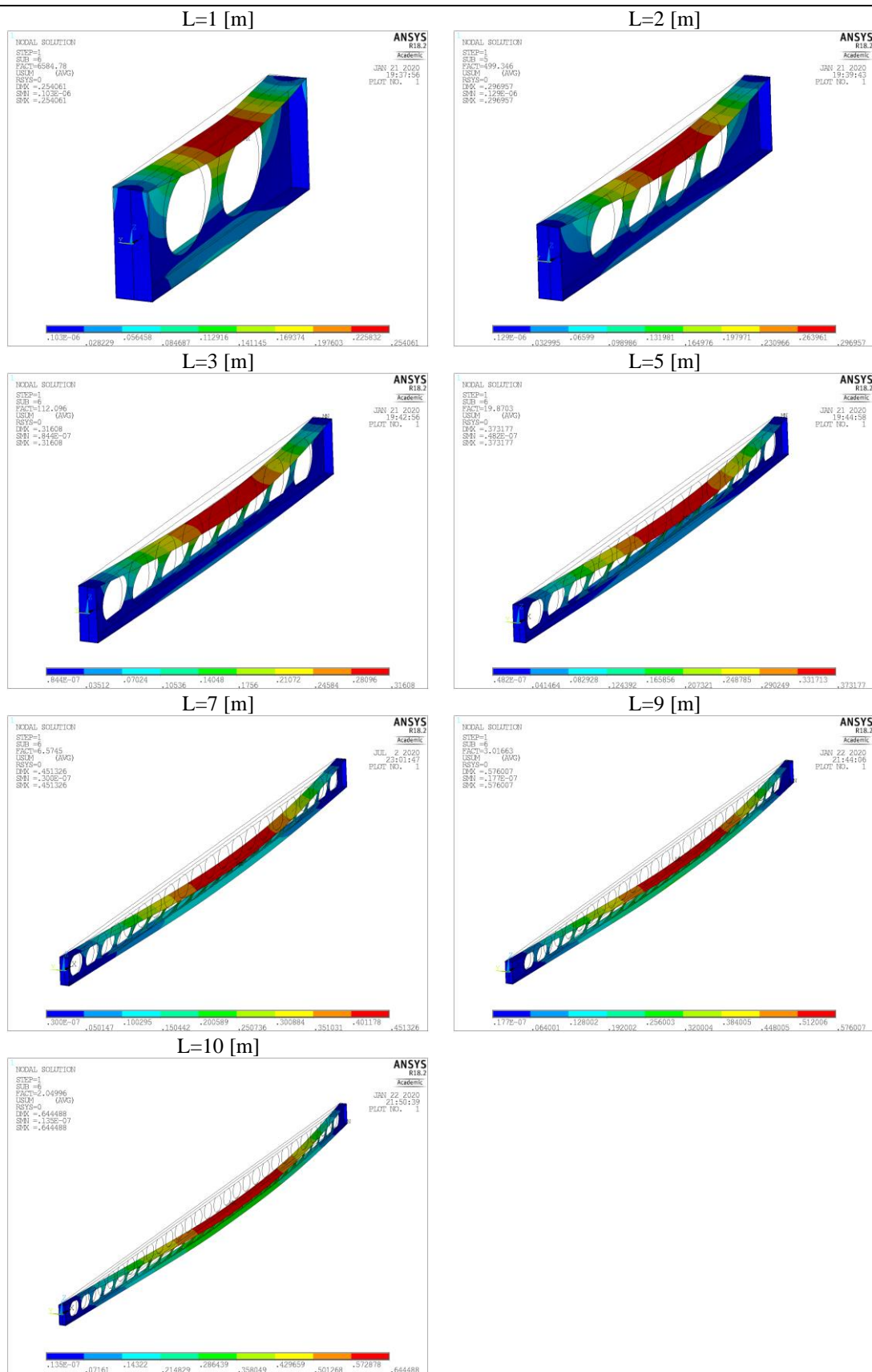
CASO – S=1,3d<sub>0</sub> - 500 [°C]



CASO – S=1,3d<sub>0</sub> - 600 [°C]

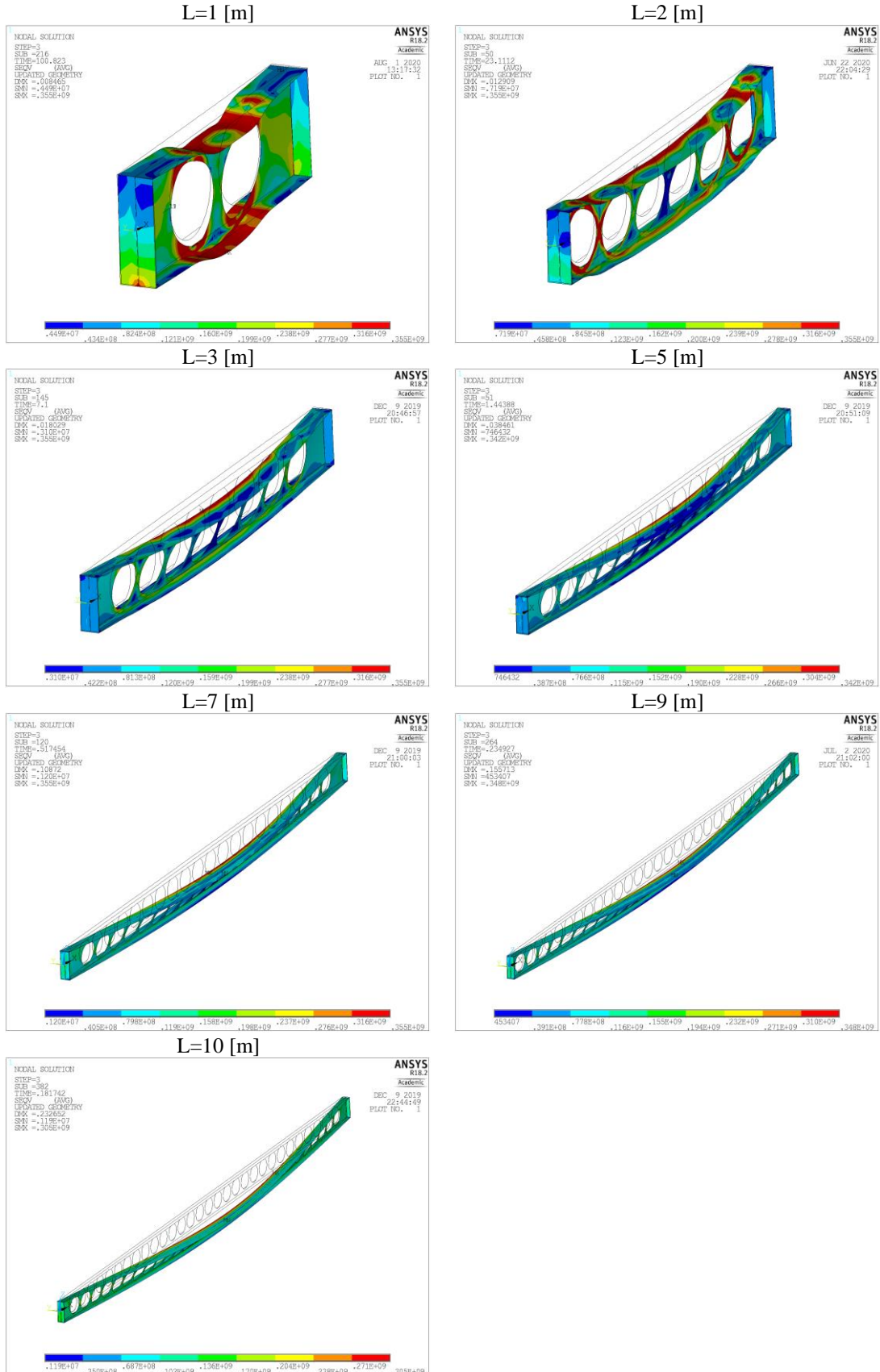


CASO – S=1,3d<sub>0</sub> - 700 [°C]

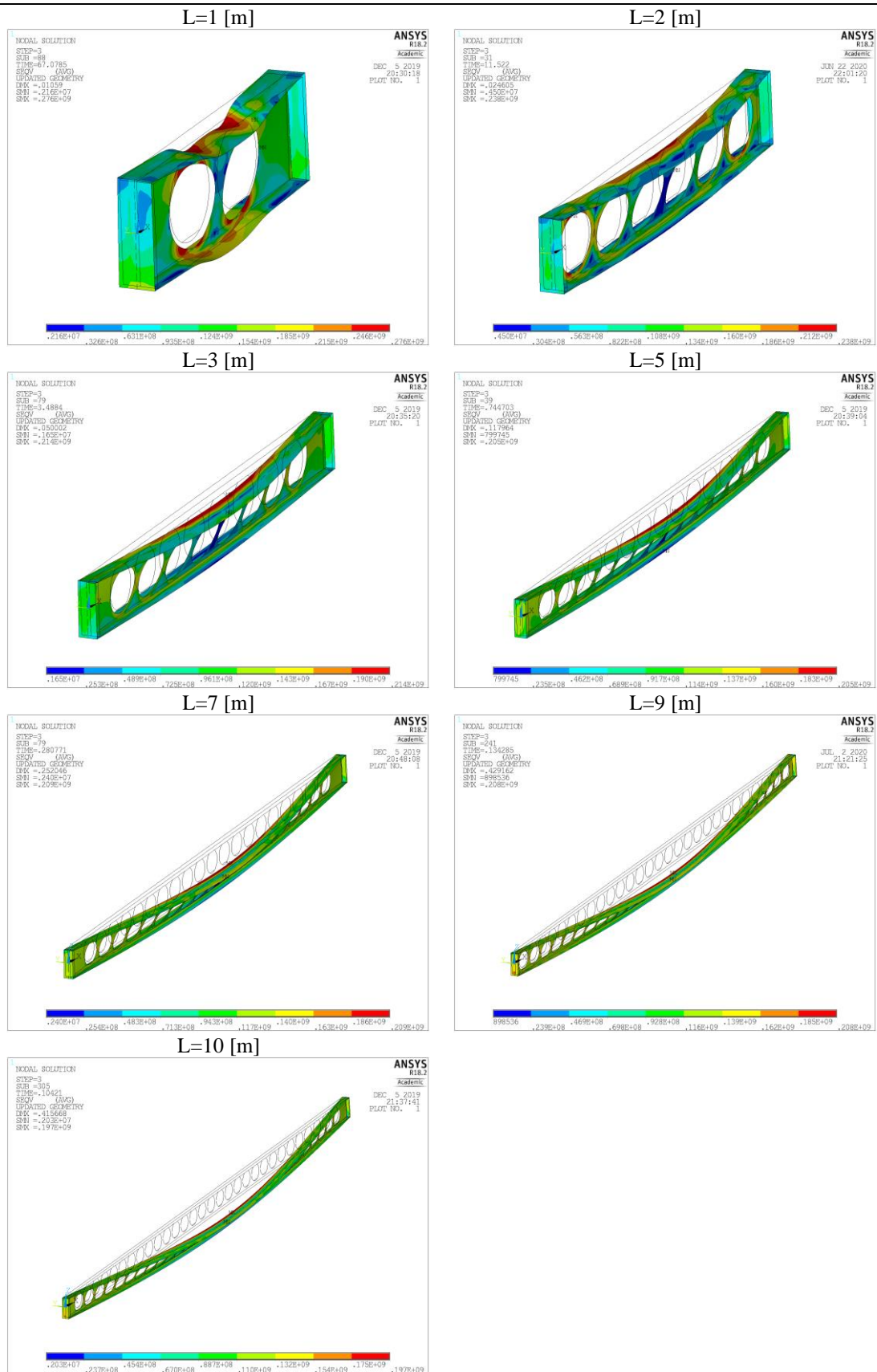


ANEXO F – Tensões Von Mises das vigas alveolares

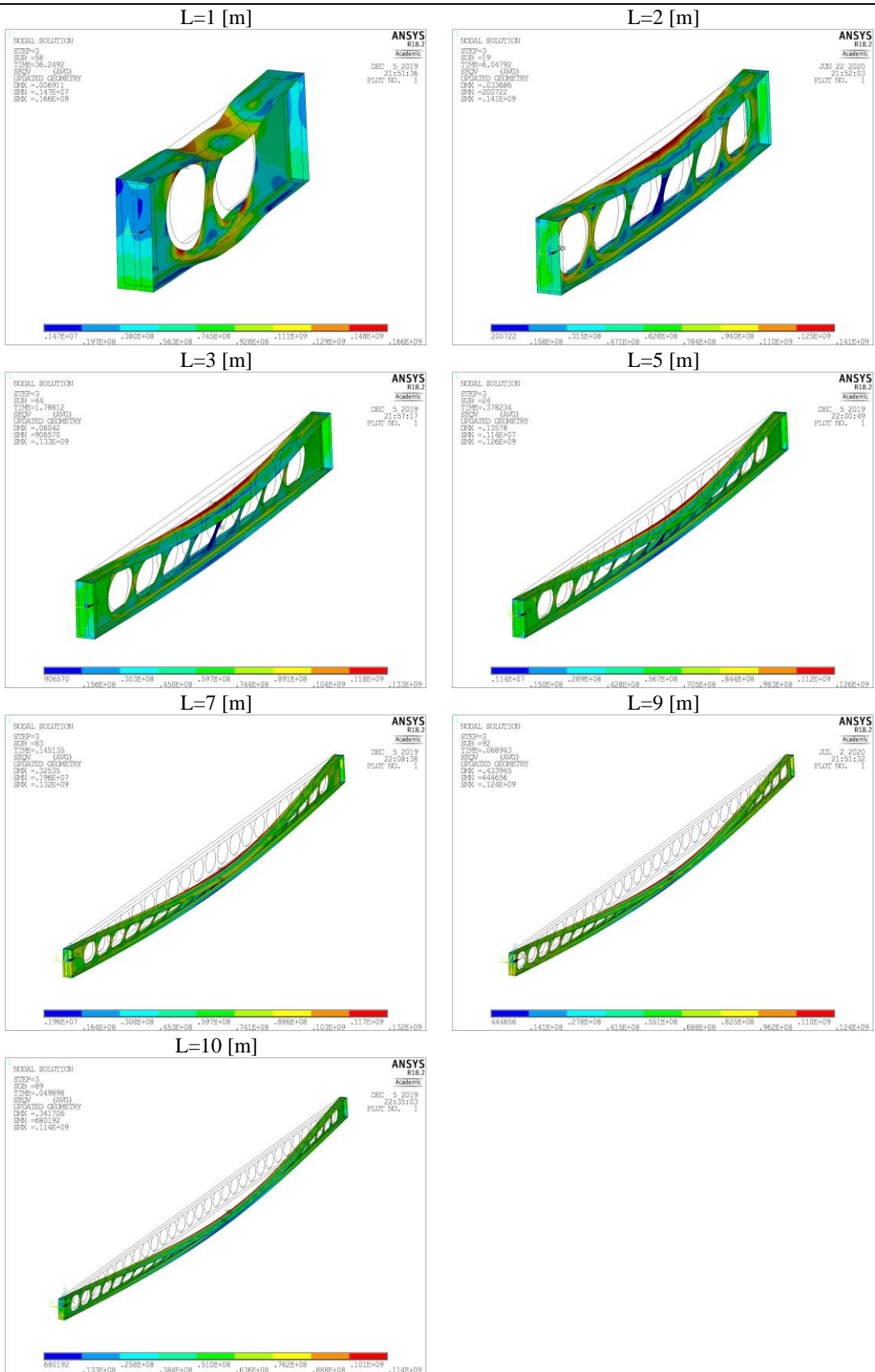
CASO – MR - 20 [°C]



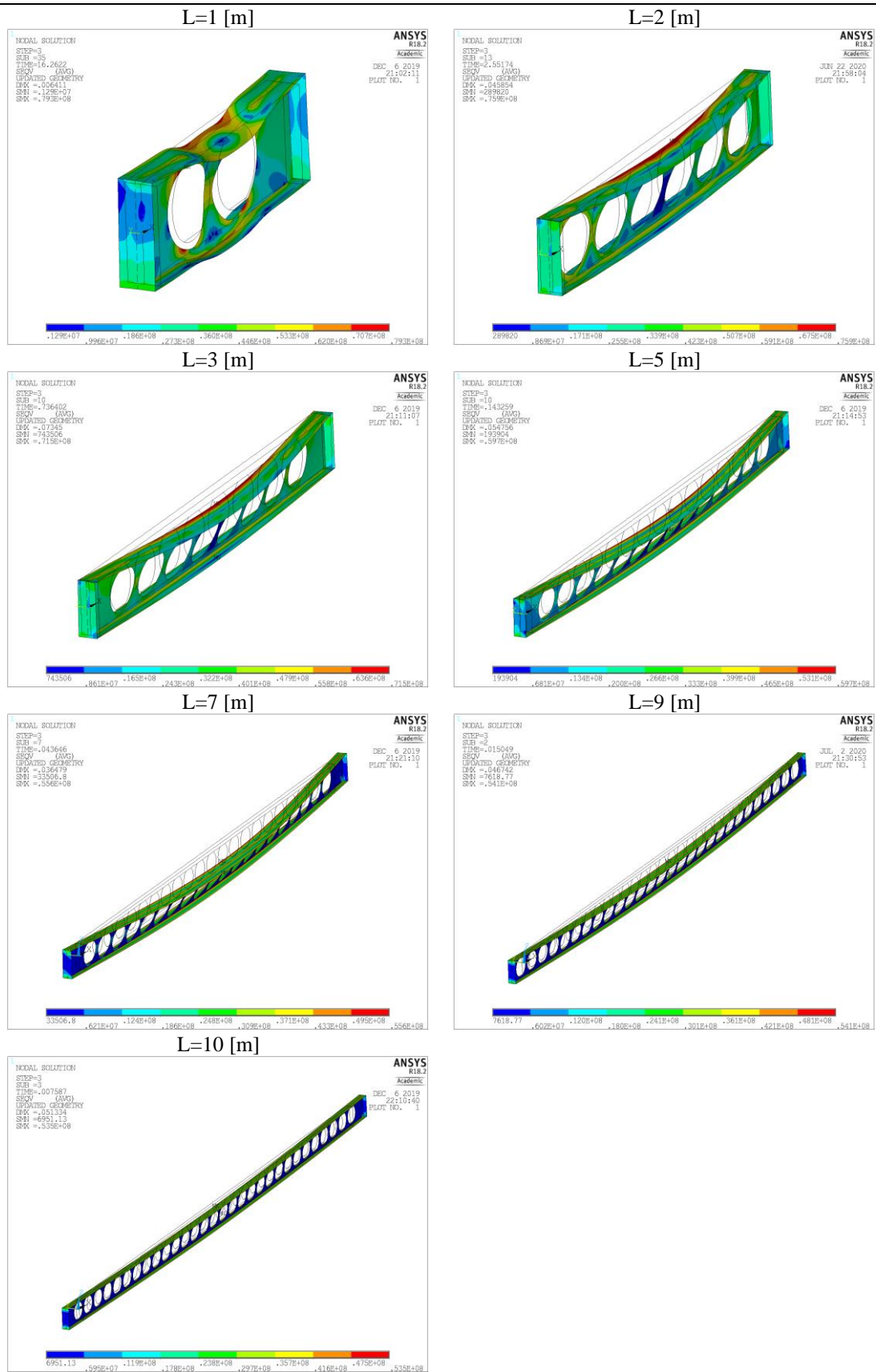
CASO – MR - 500 [°C]



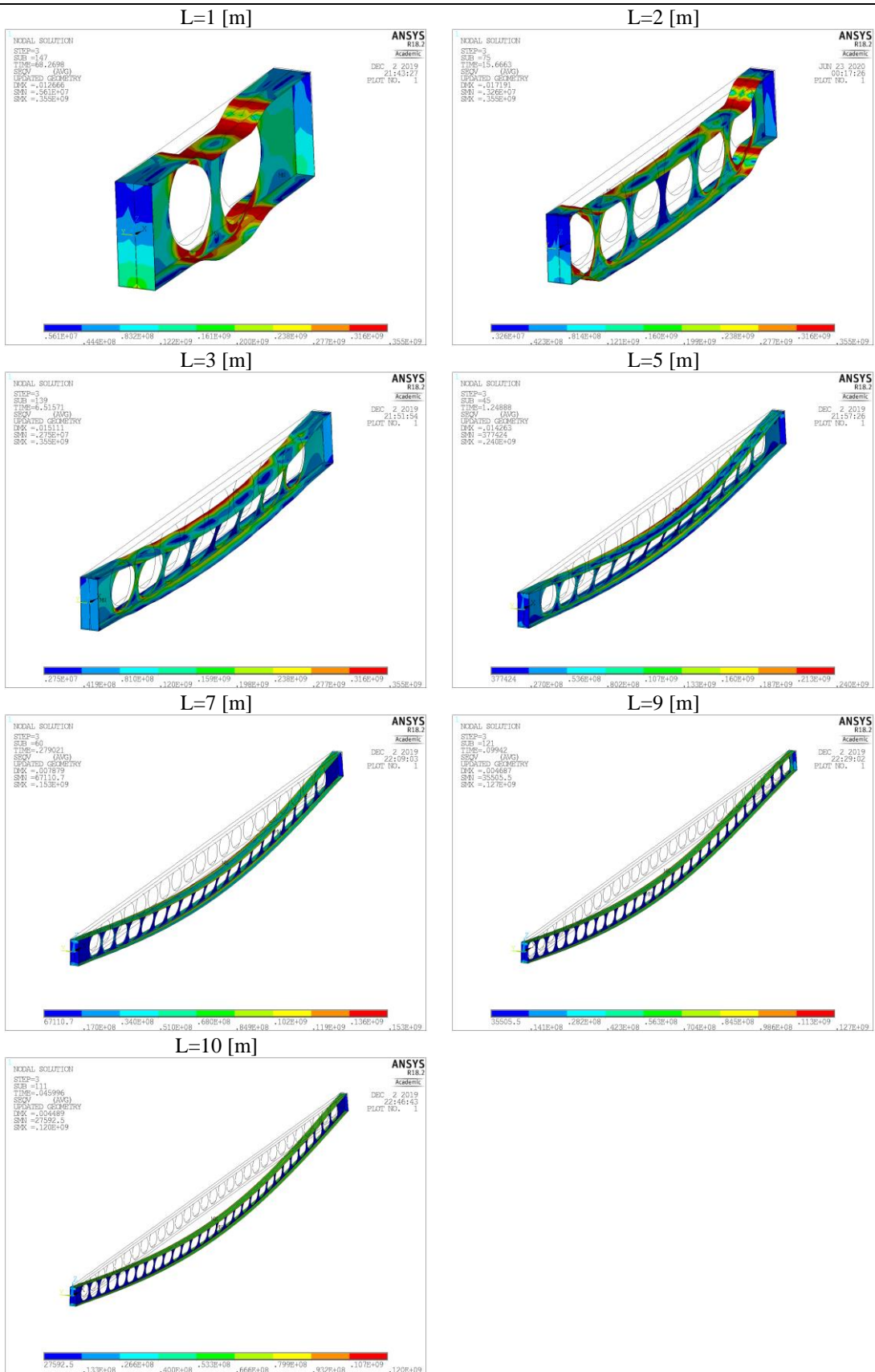
CASO – MR - 600 [°C]



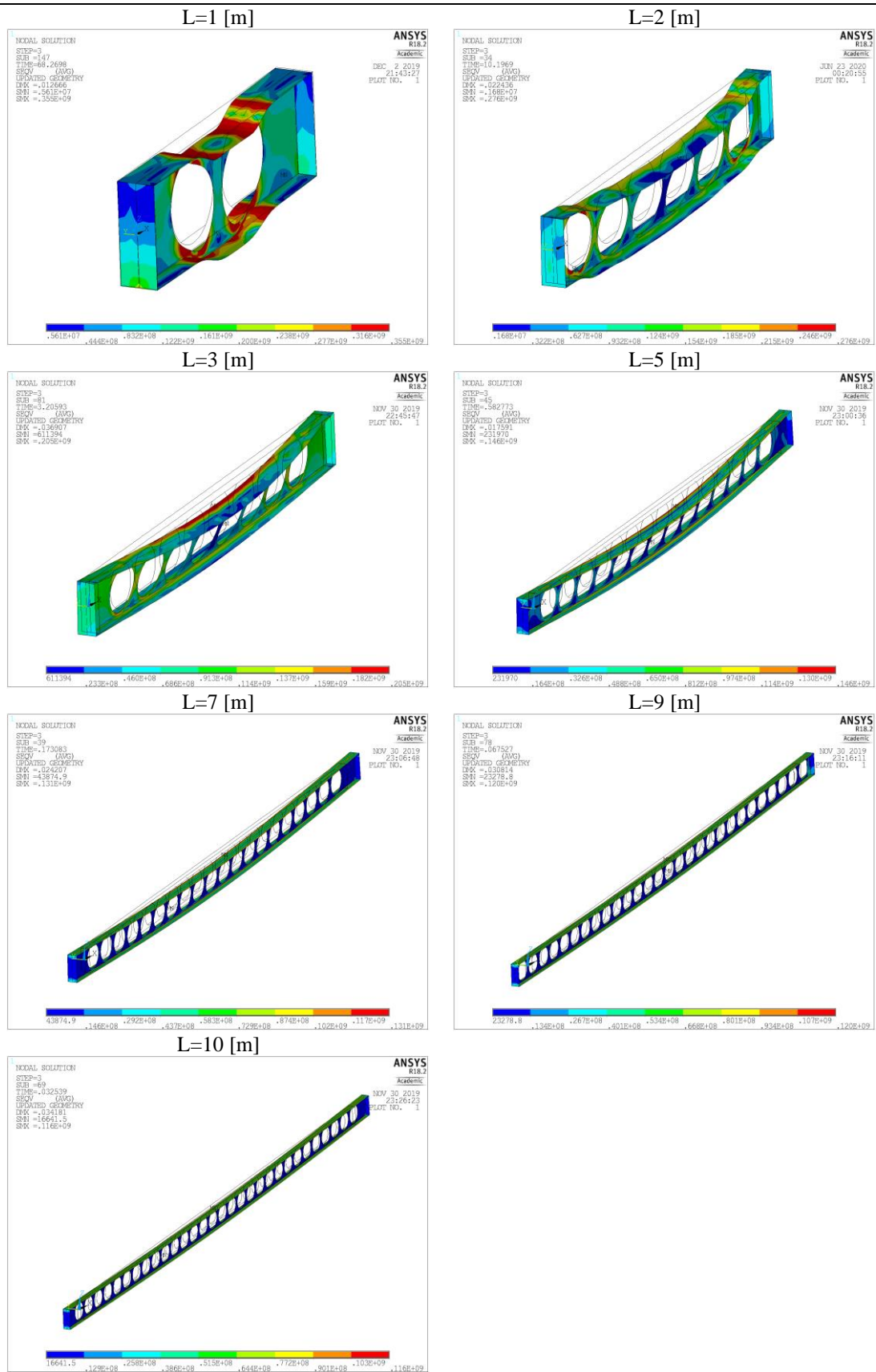
CASO – MR - 700 [°C]



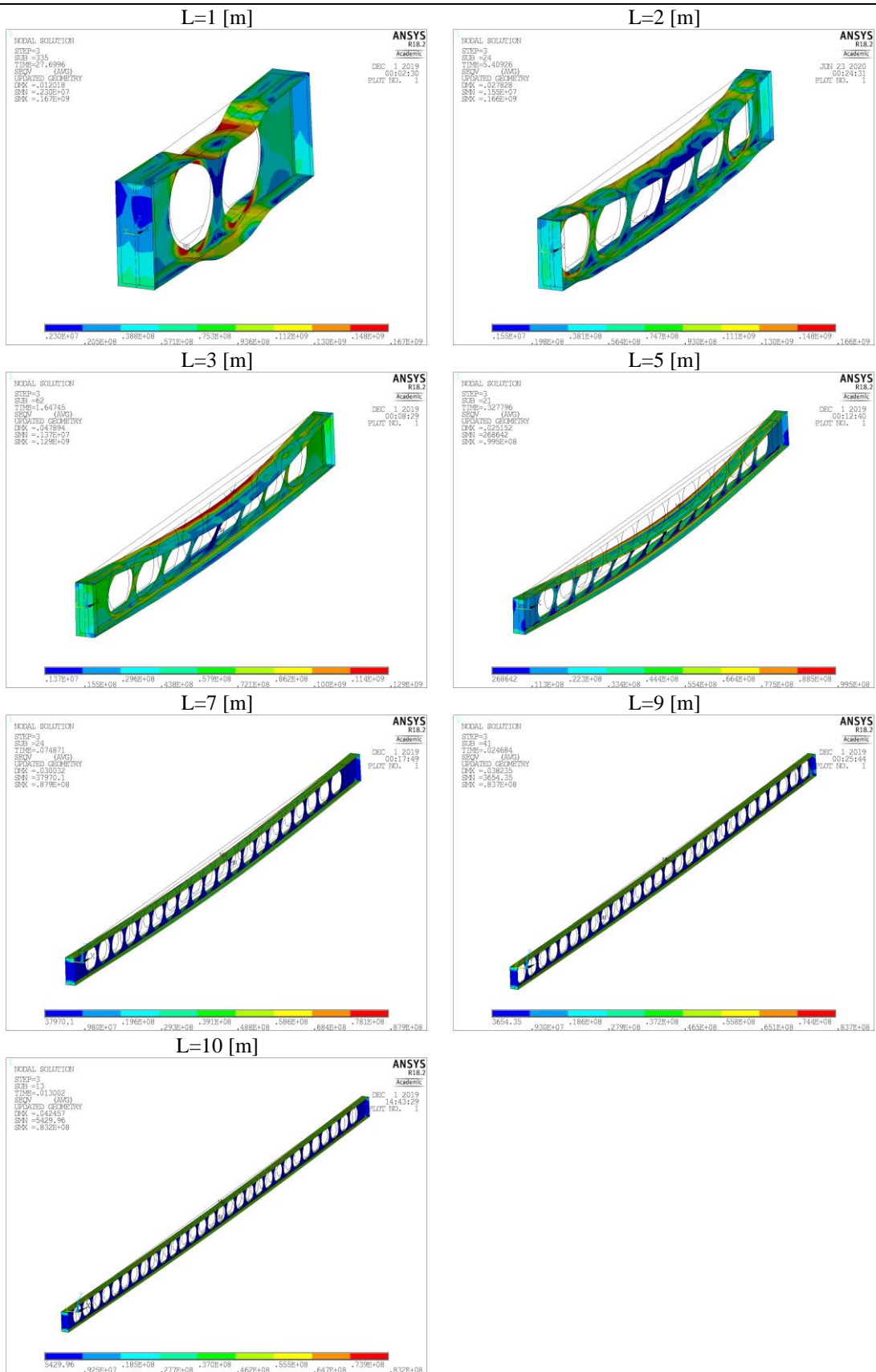
CASO – H=1,4h - 20 [°C]



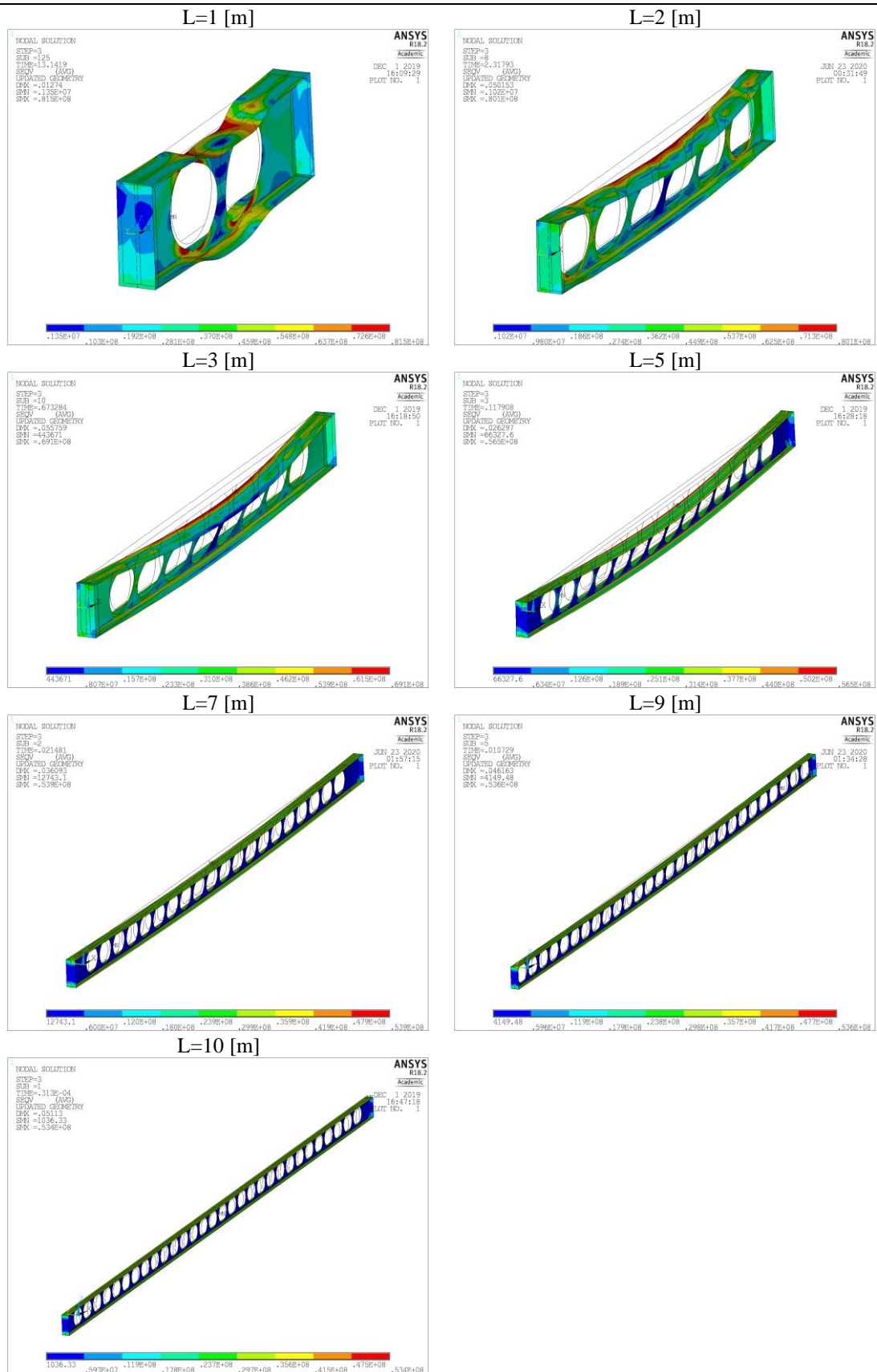
CASO – H=1,4h - 500 [°C]



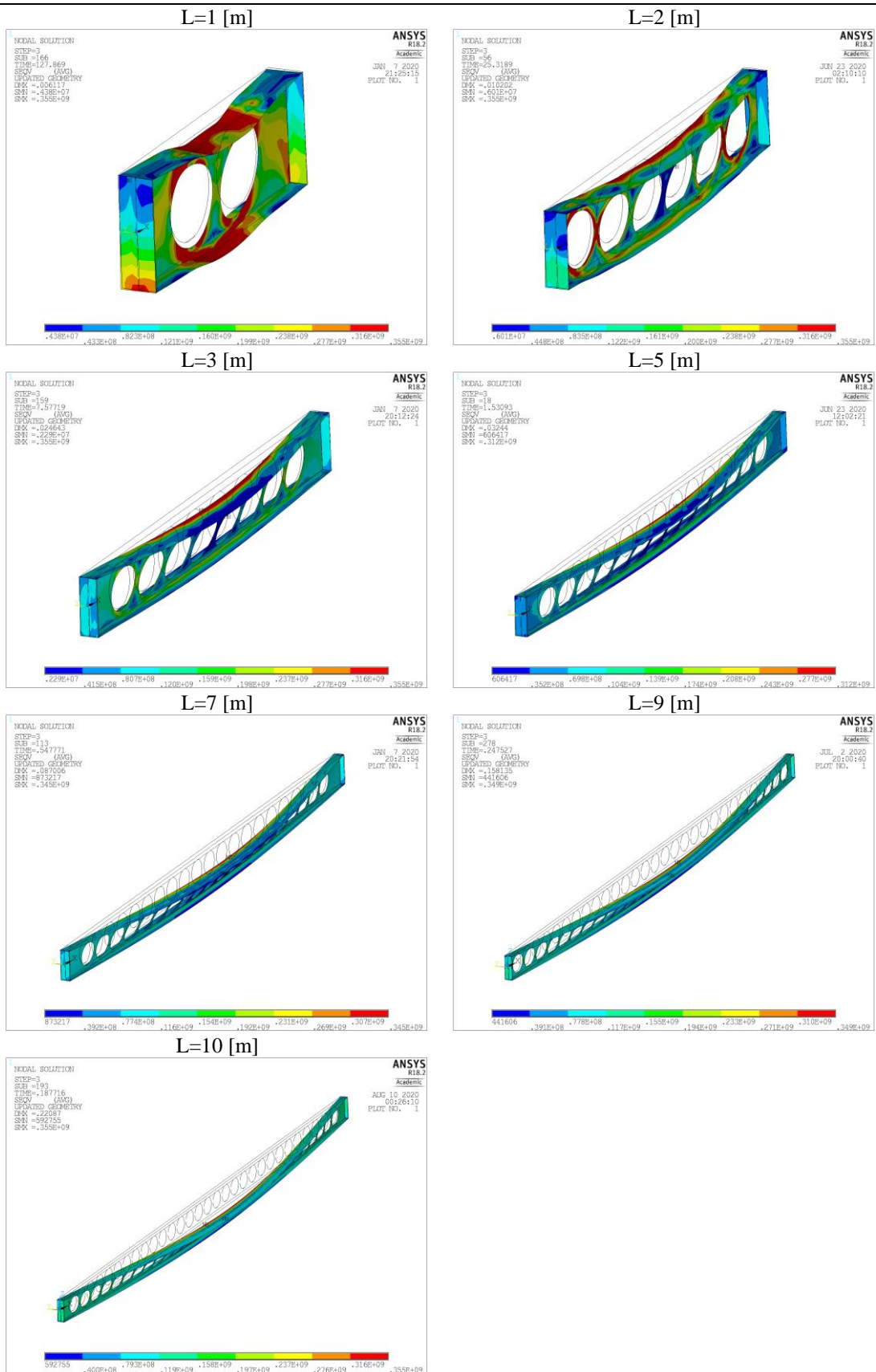
CASO – H=1,4h - 600 [°C]



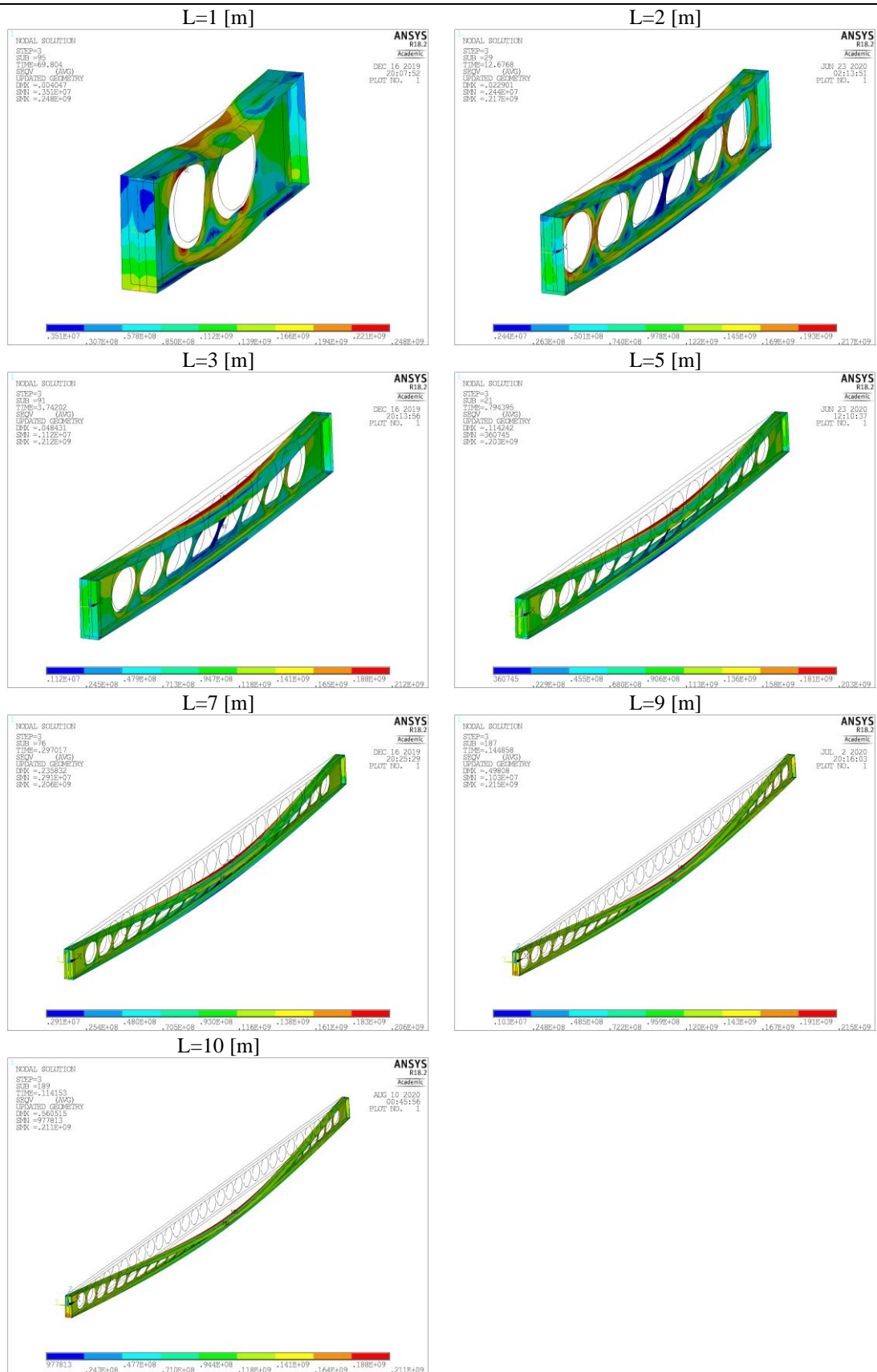
CASO – H=1,4h - 700 [°C]



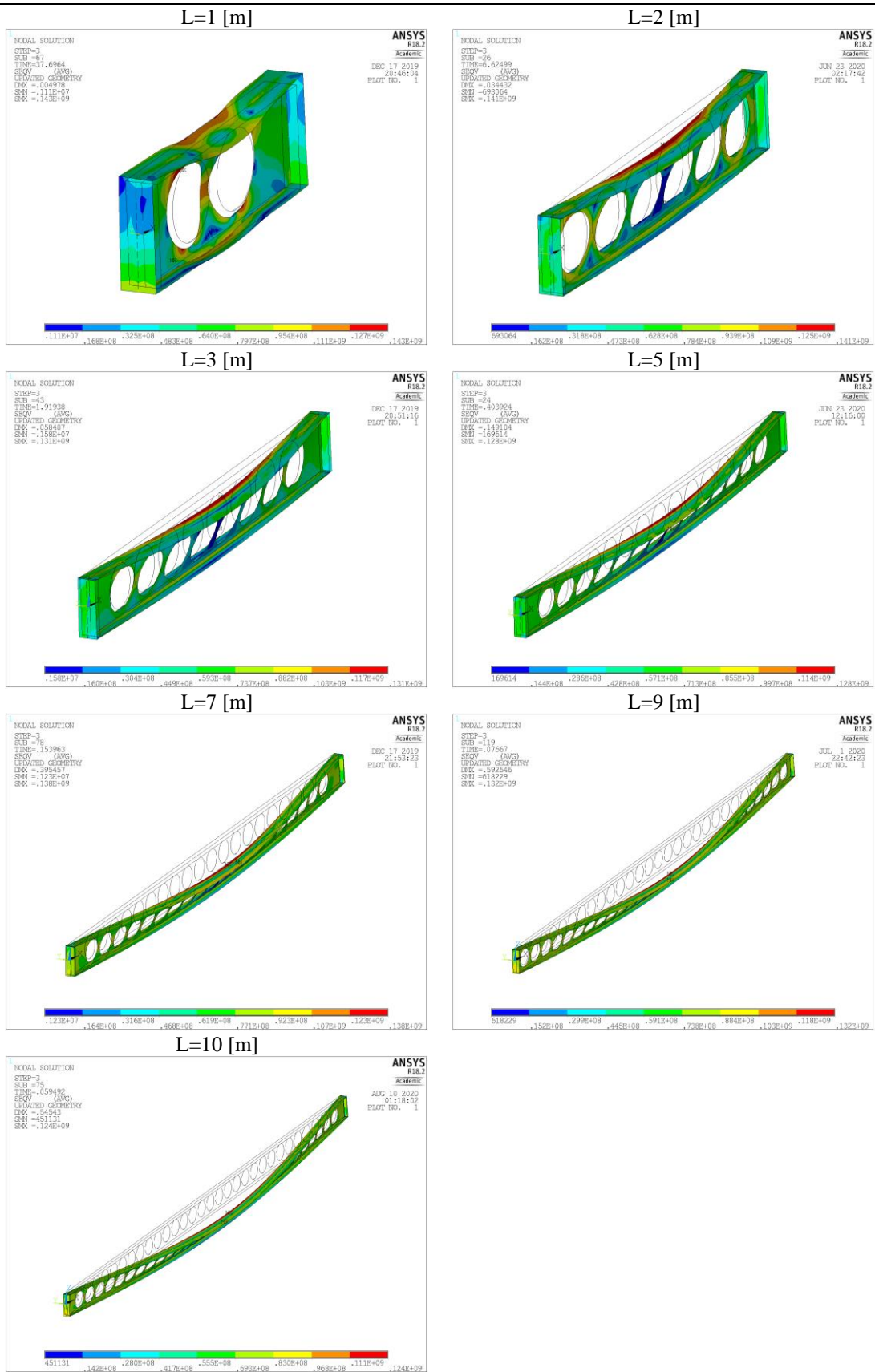
CASO – H=1,6h - 20 [°C]



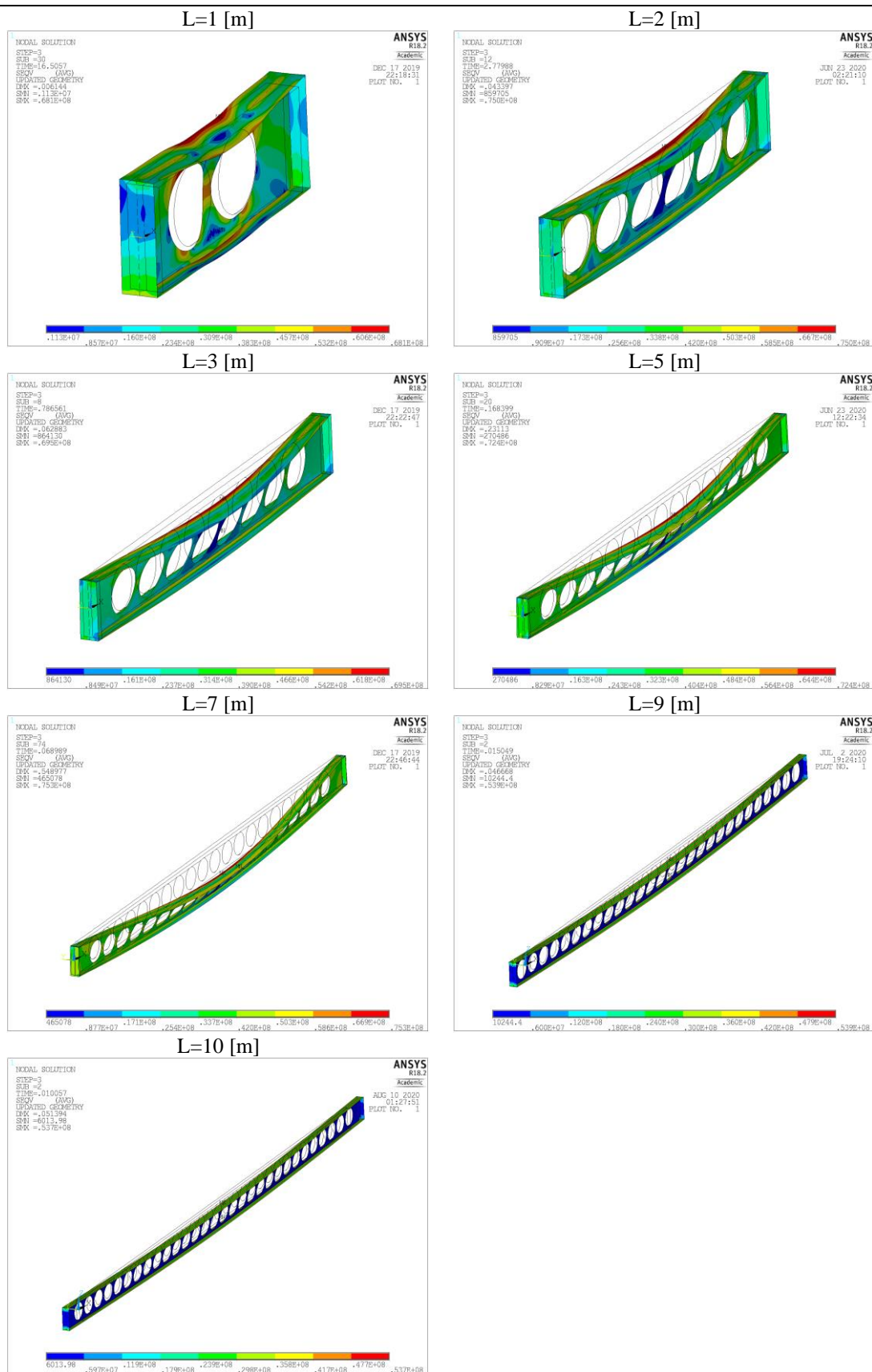
CASO – H=1,6h - 500 [°C]



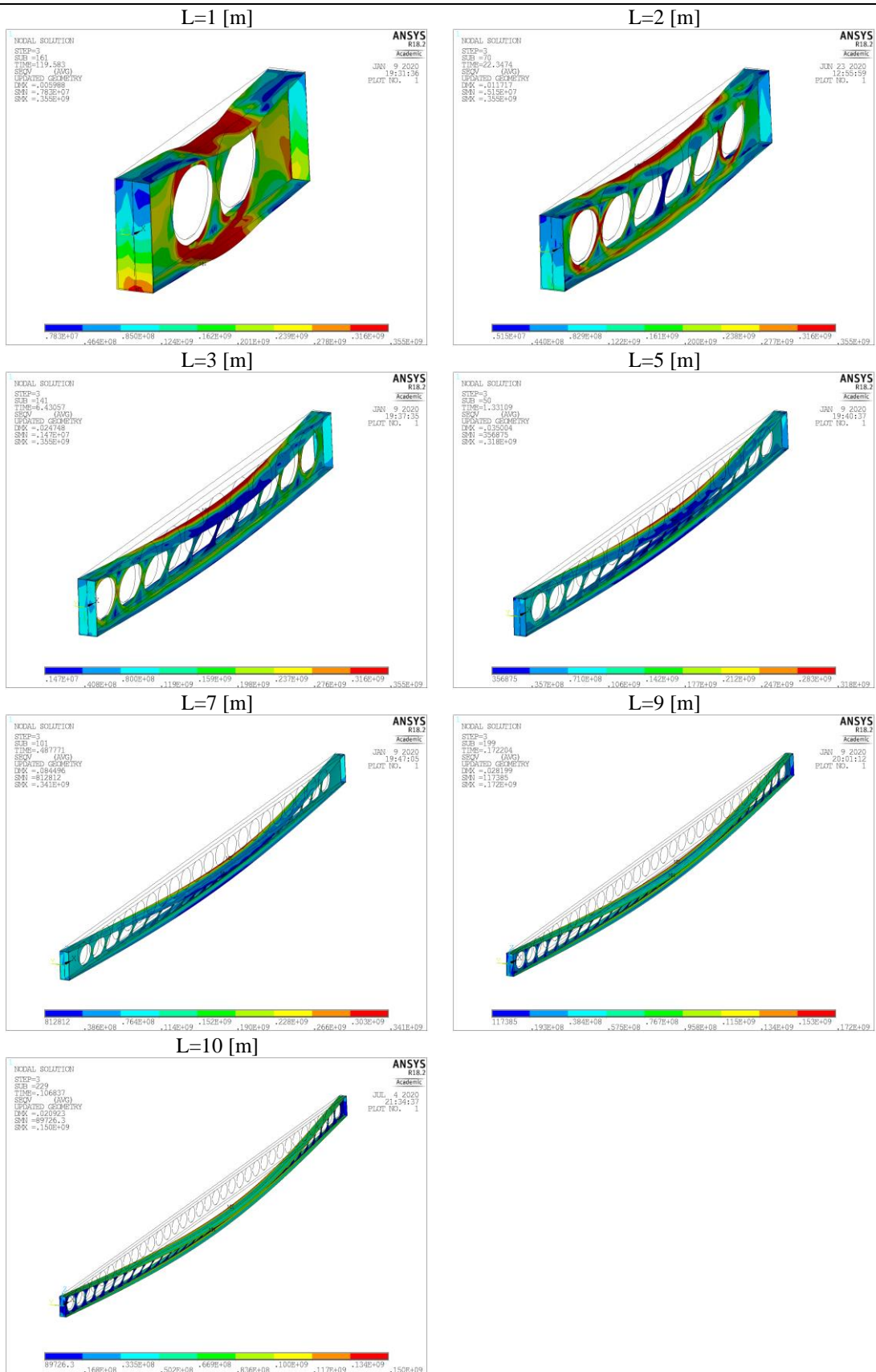
CASO – H=1,6h - 600 [°C]



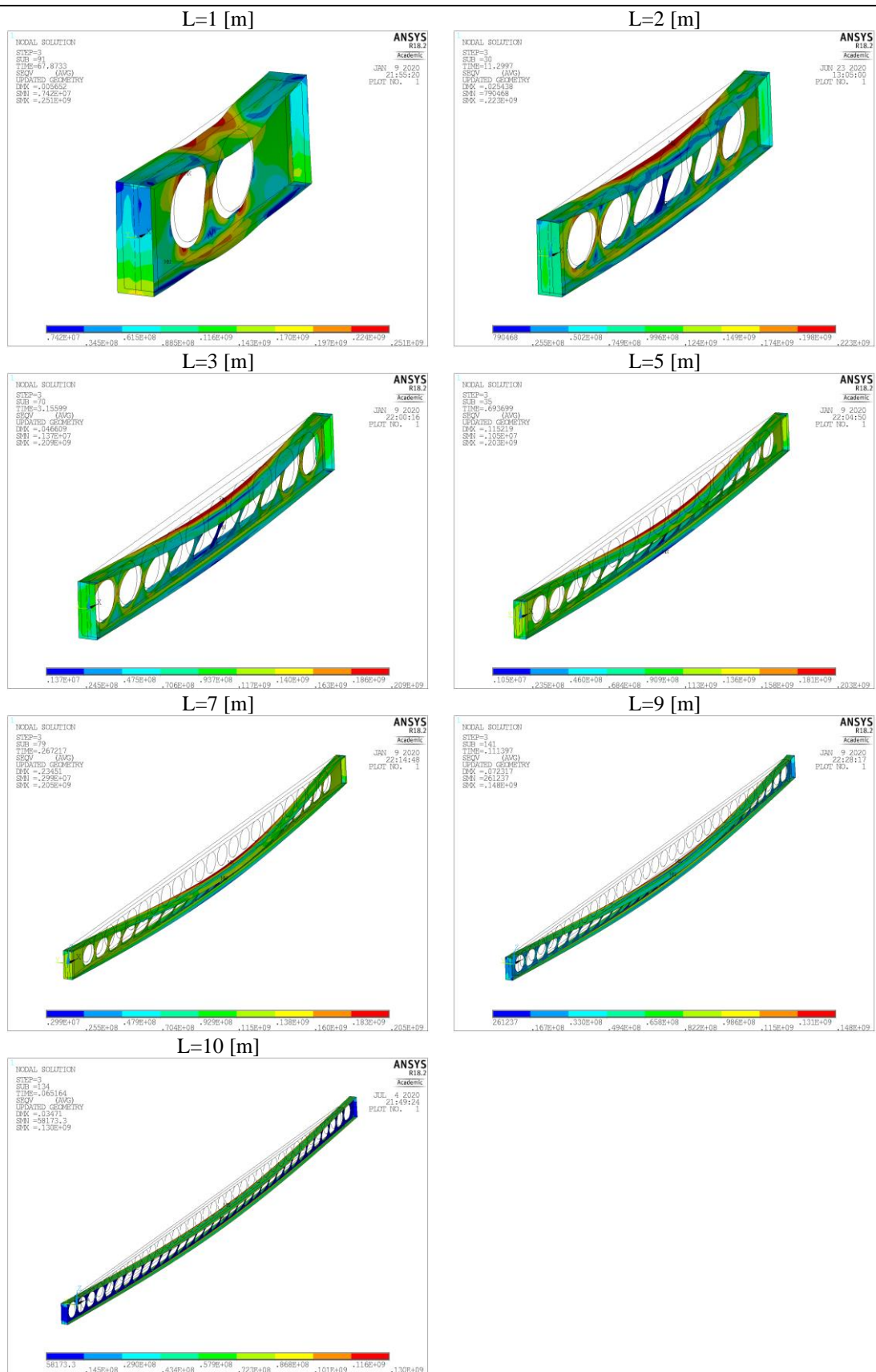
CASO – H=1,6h - 700 [°C]



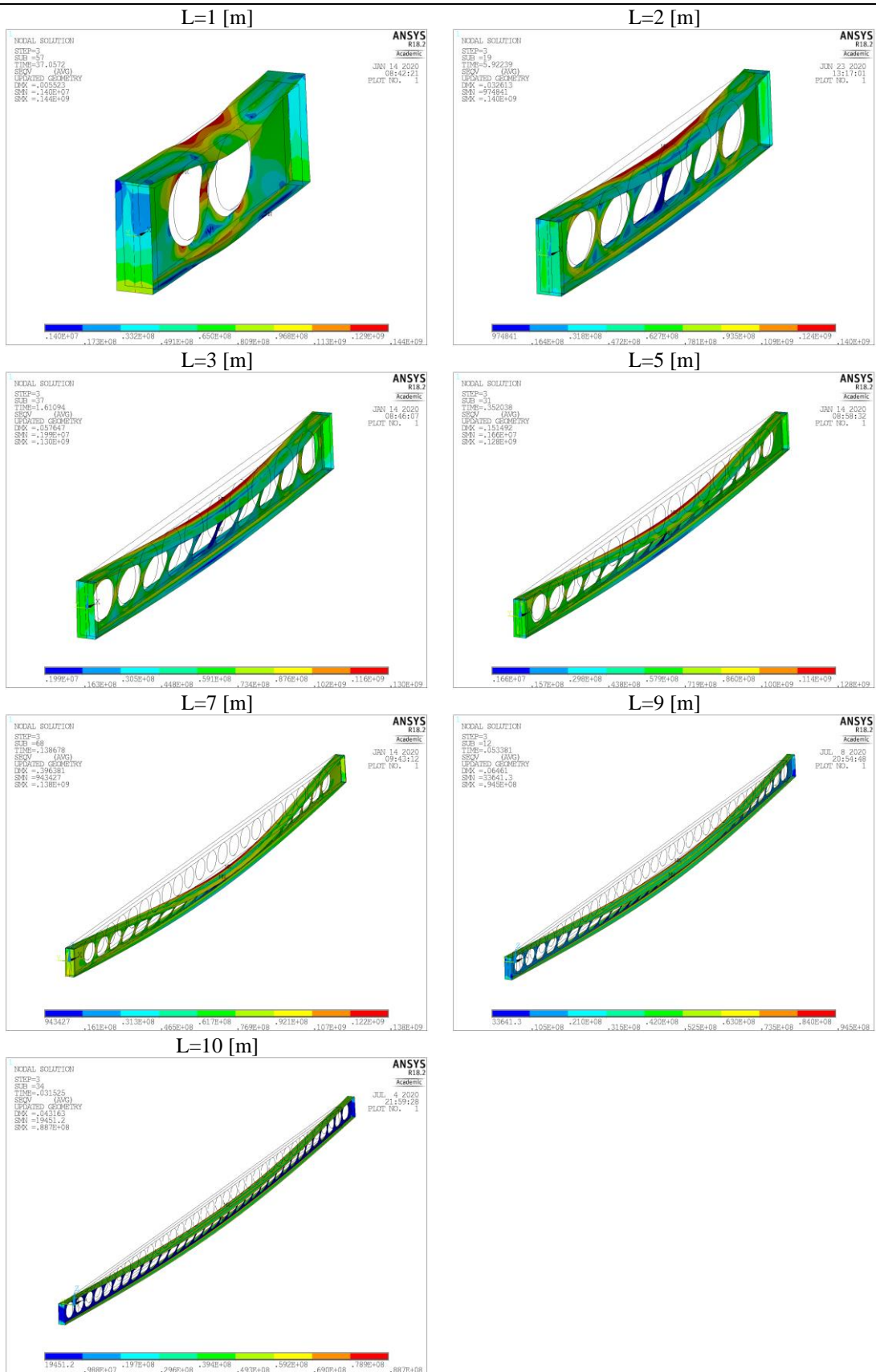
CASO –  $d_0=1,1h - 20 [^{\circ}C]$



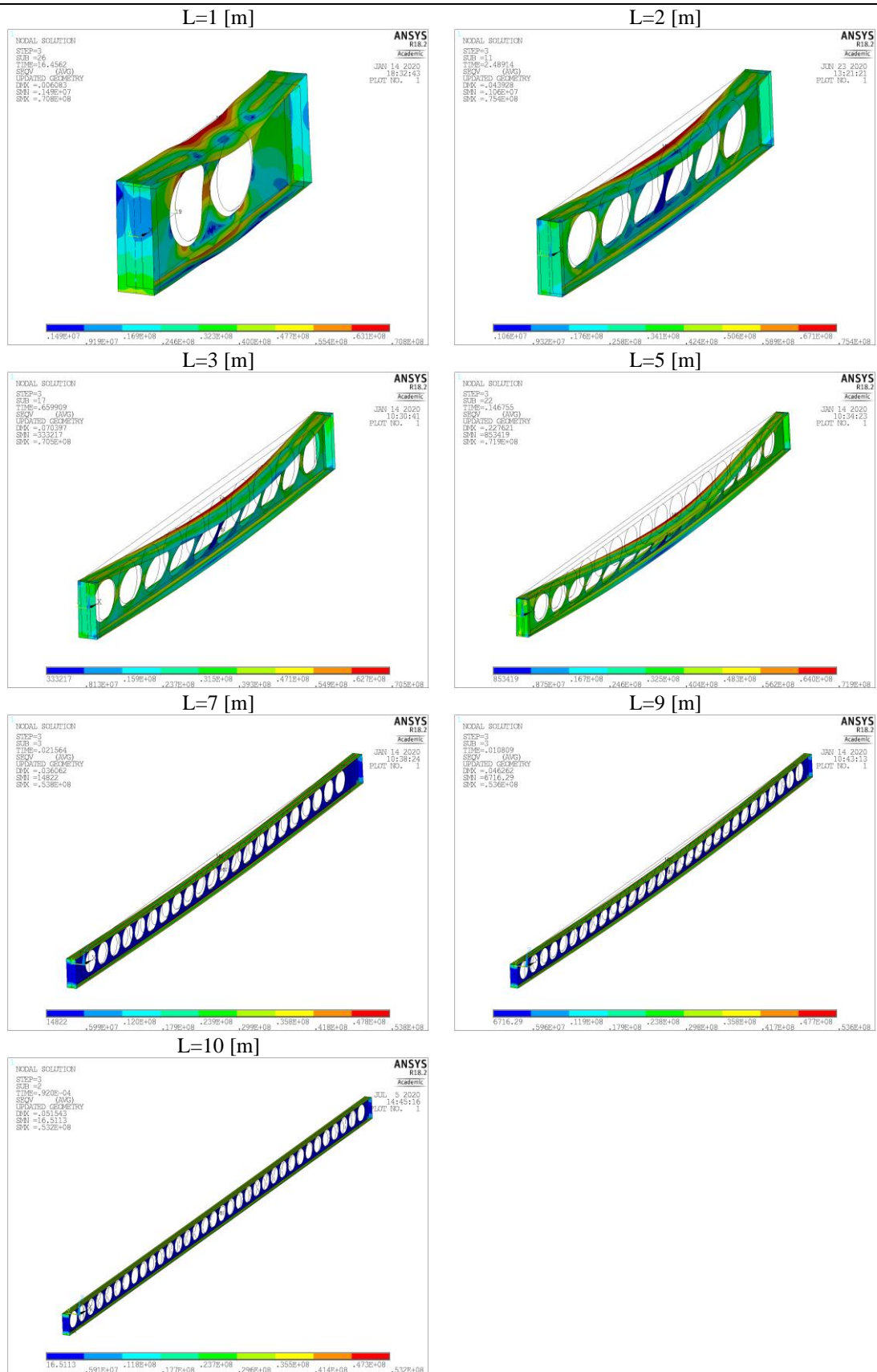
CASO –  $d_0=1,1h - 500 [^{\circ}C]$



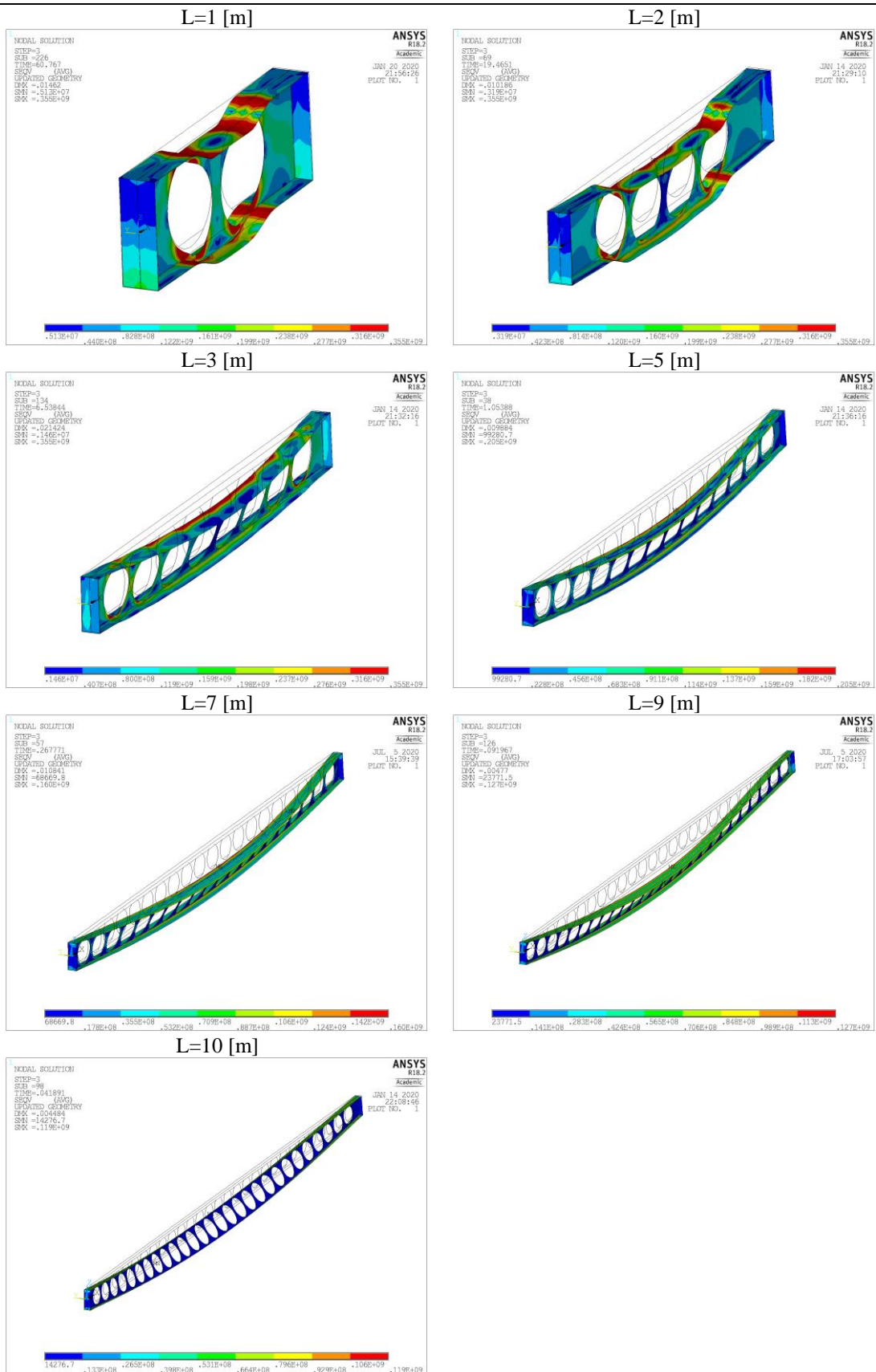
CASO –  $d_0=1,1h - 600 [^{\circ}\text{C}]$



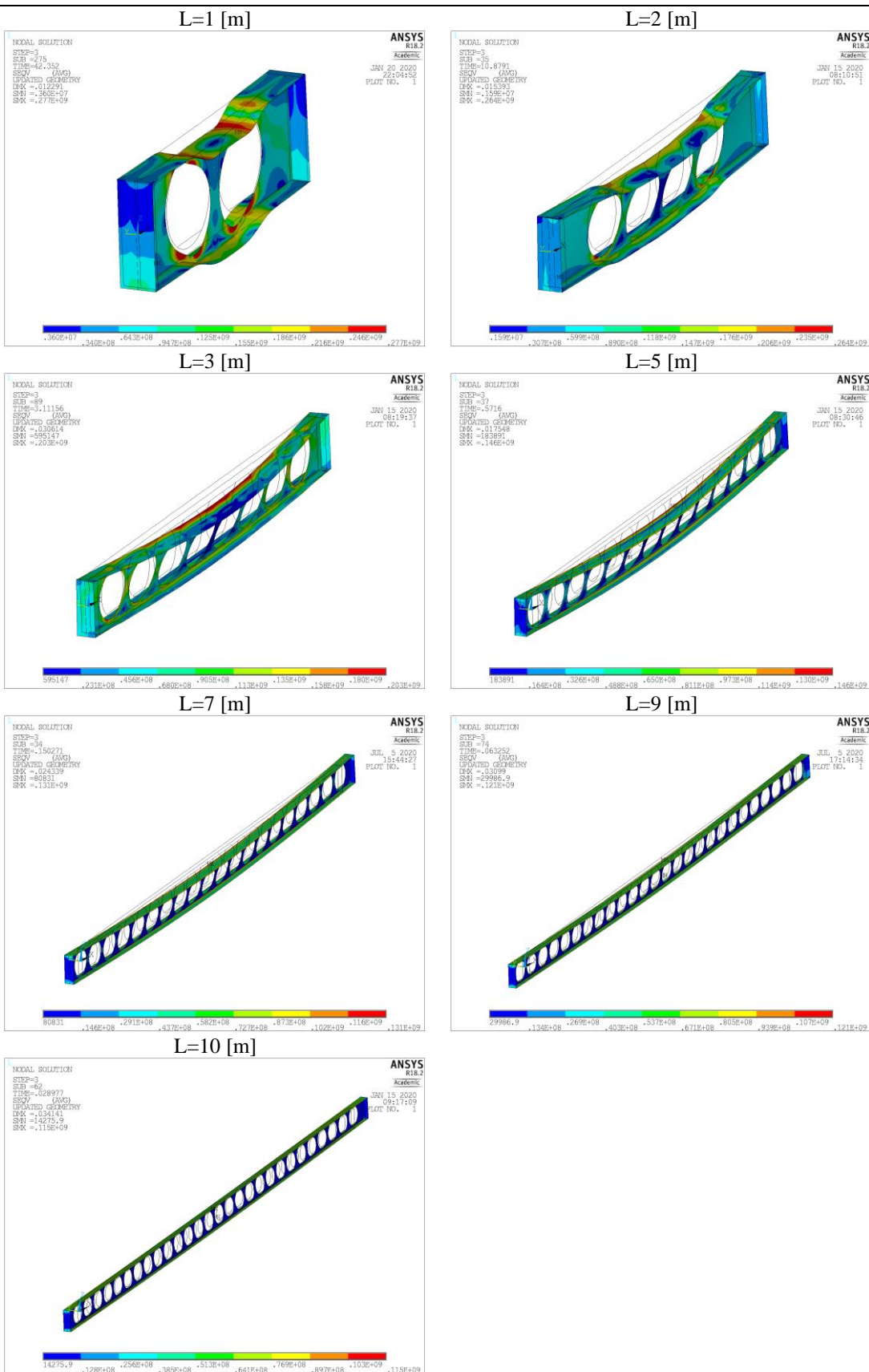
CASO –  $d_0=1,1h - 700 [^{\circ}\text{C}]$



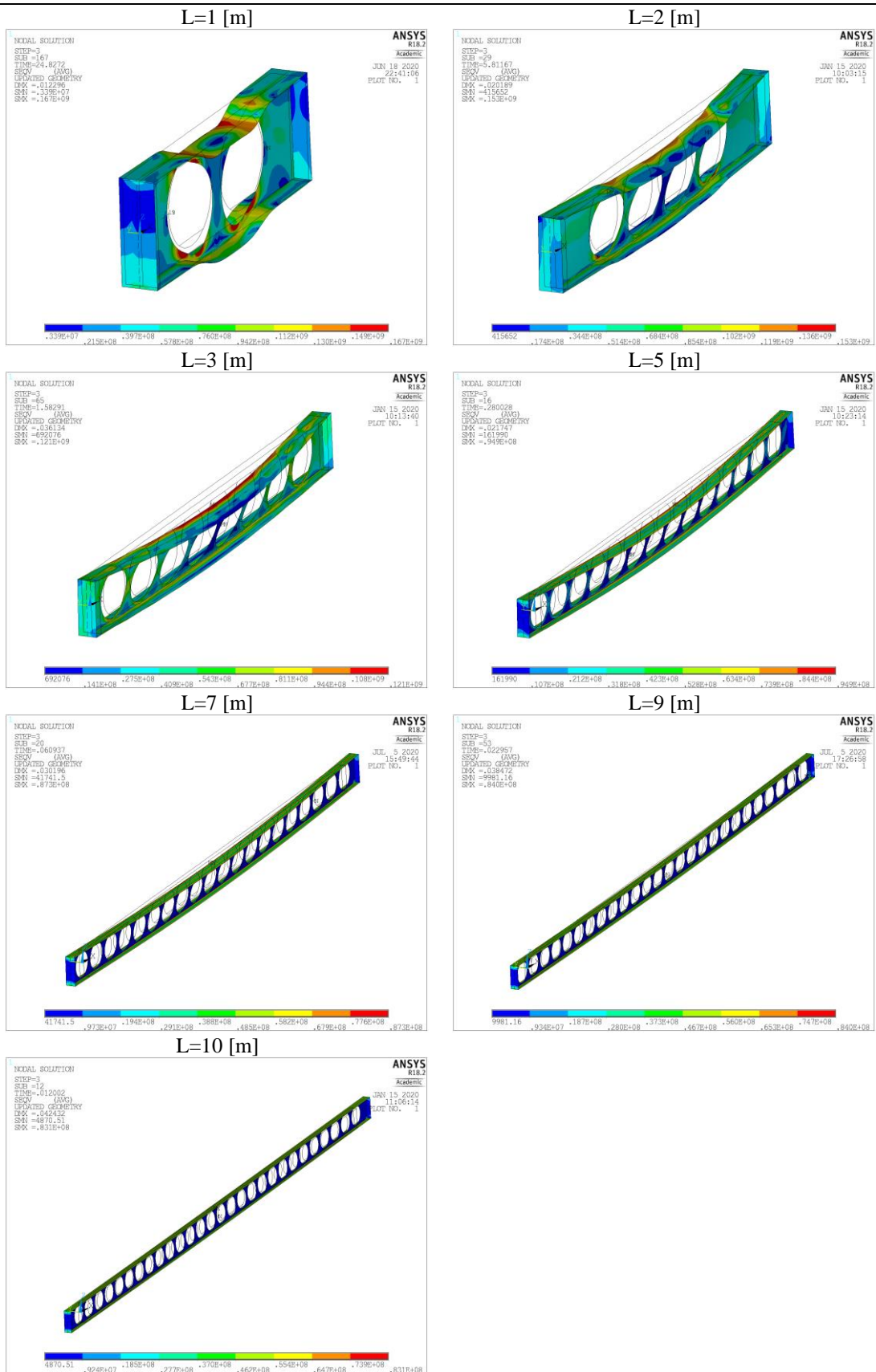
CASO –  $d_0=1,3h - 20 [^{\circ}C]$



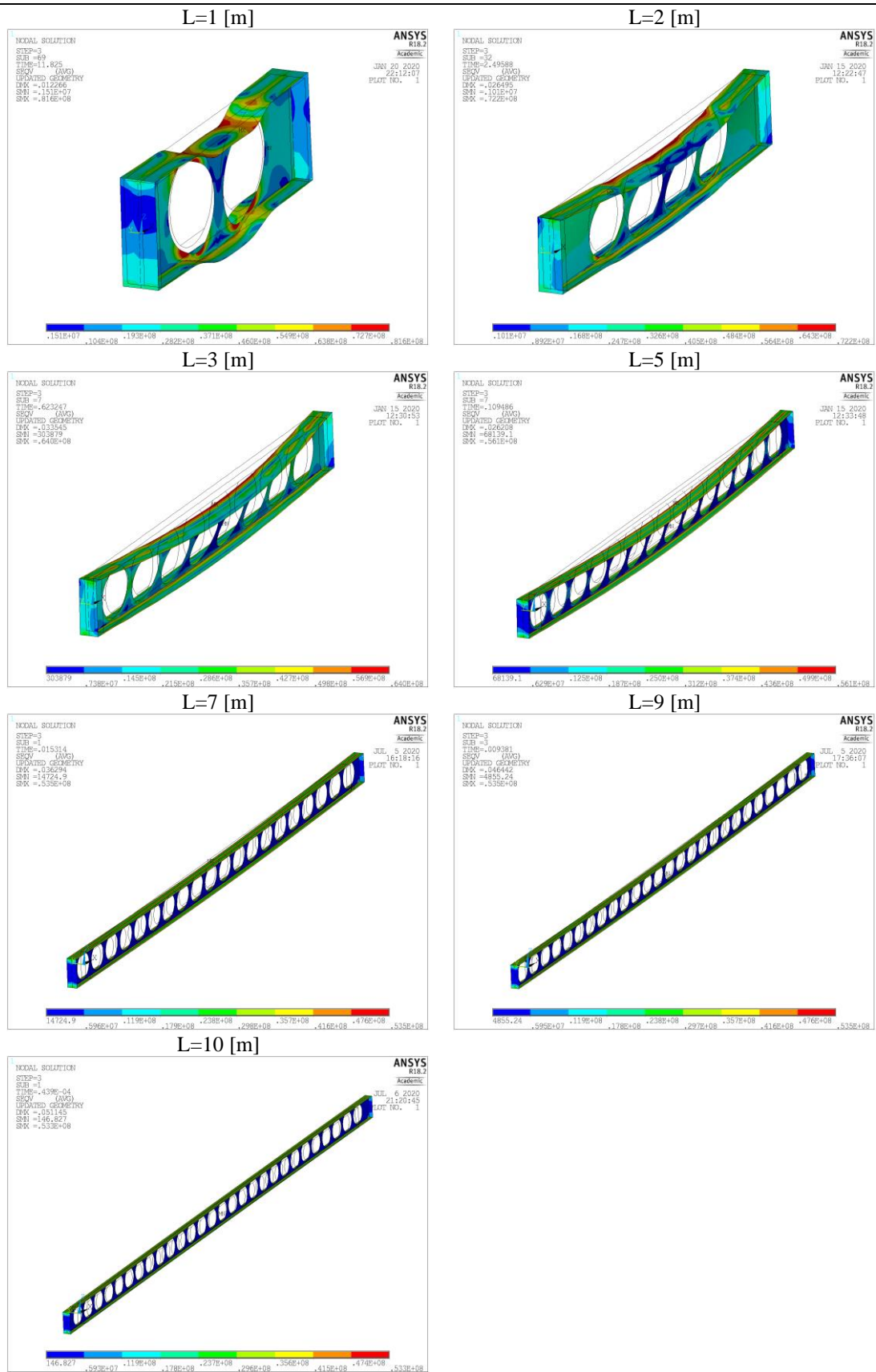
CASO –  $d_0=1,3h$  - 500 [°C]



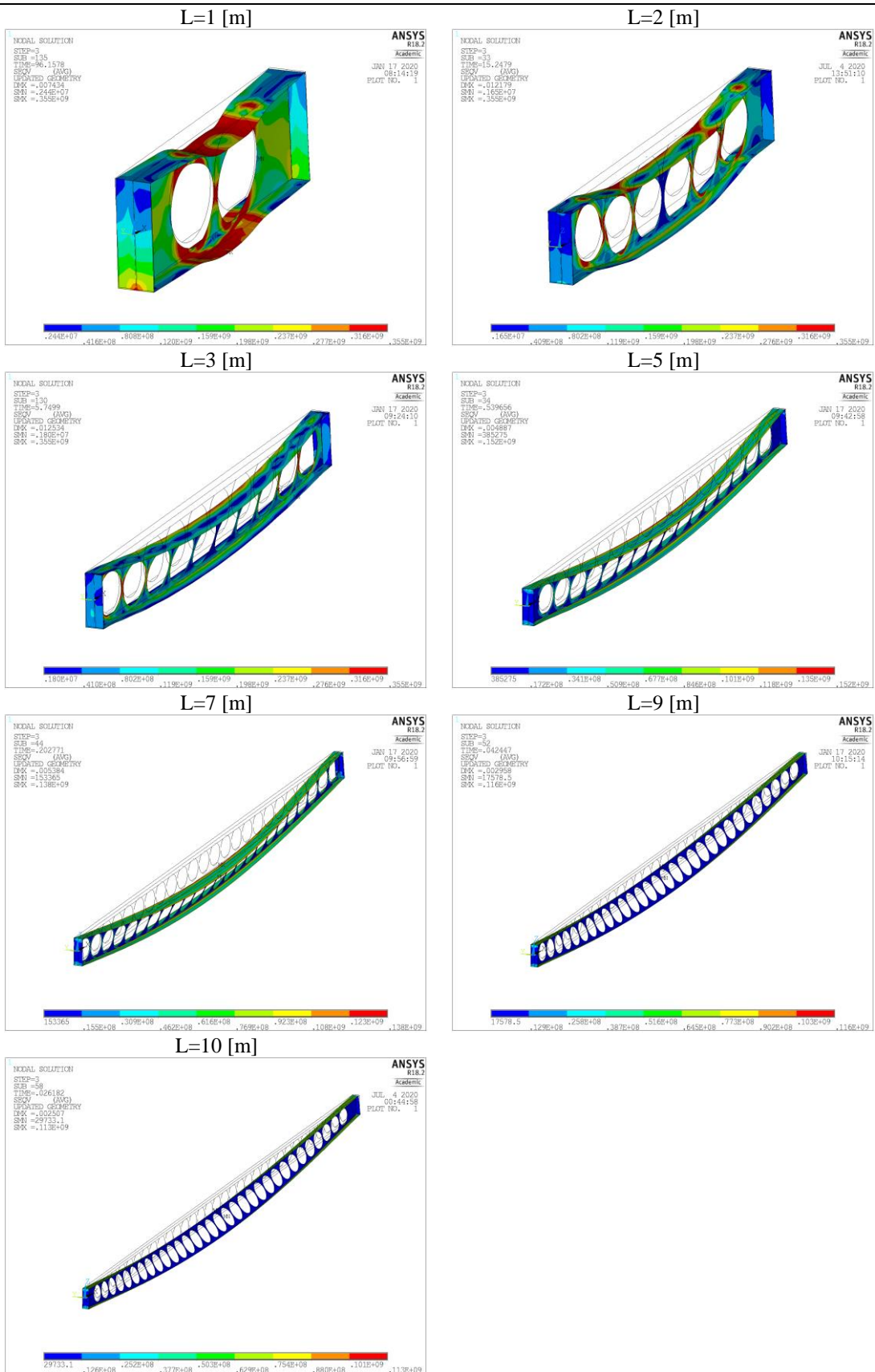
CASO –  $d_0=1,3h - 600 [^{\circ}\text{C}]$



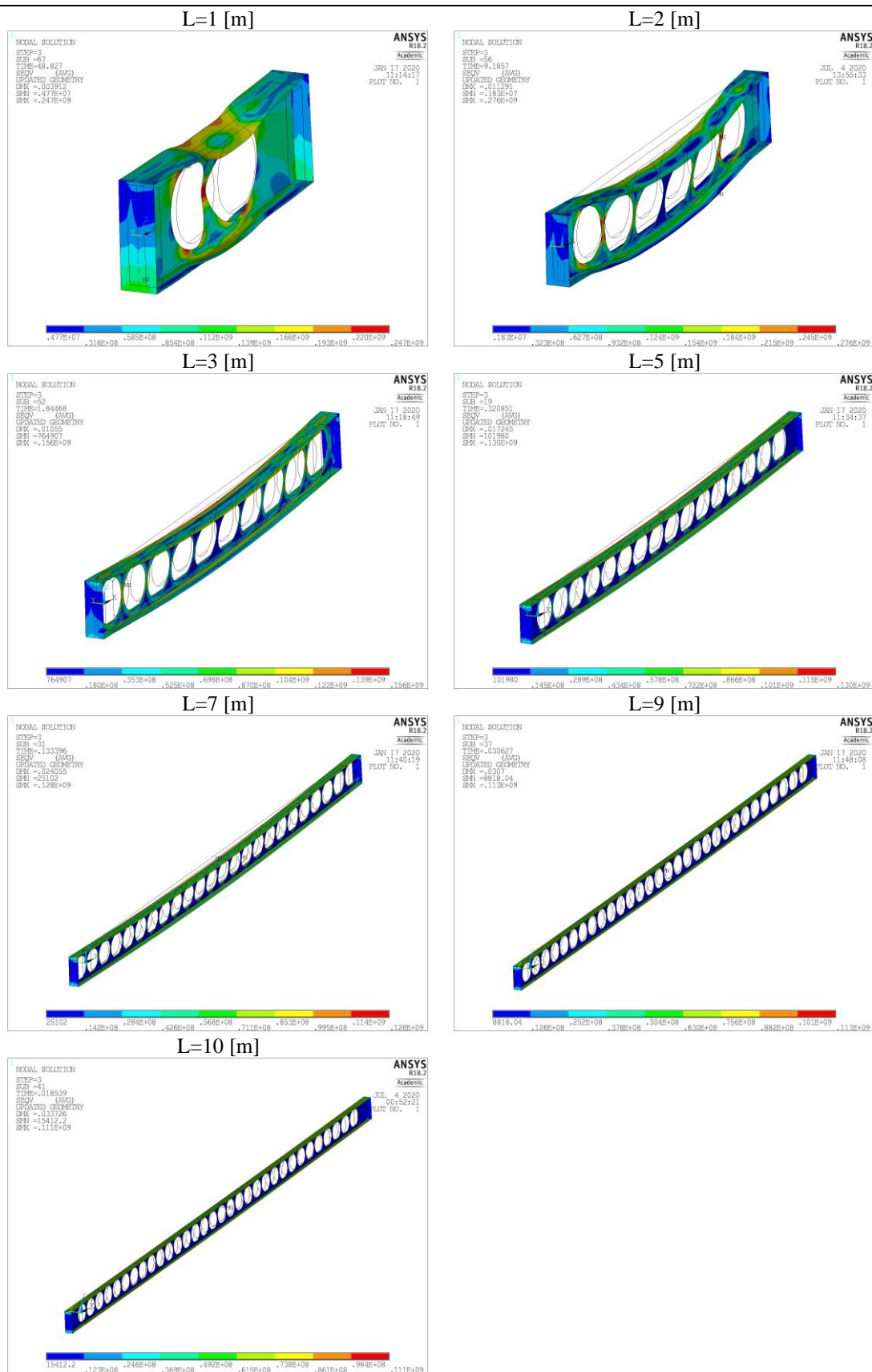
CASO –  $d_0=1,3h$  - 700 [°C]



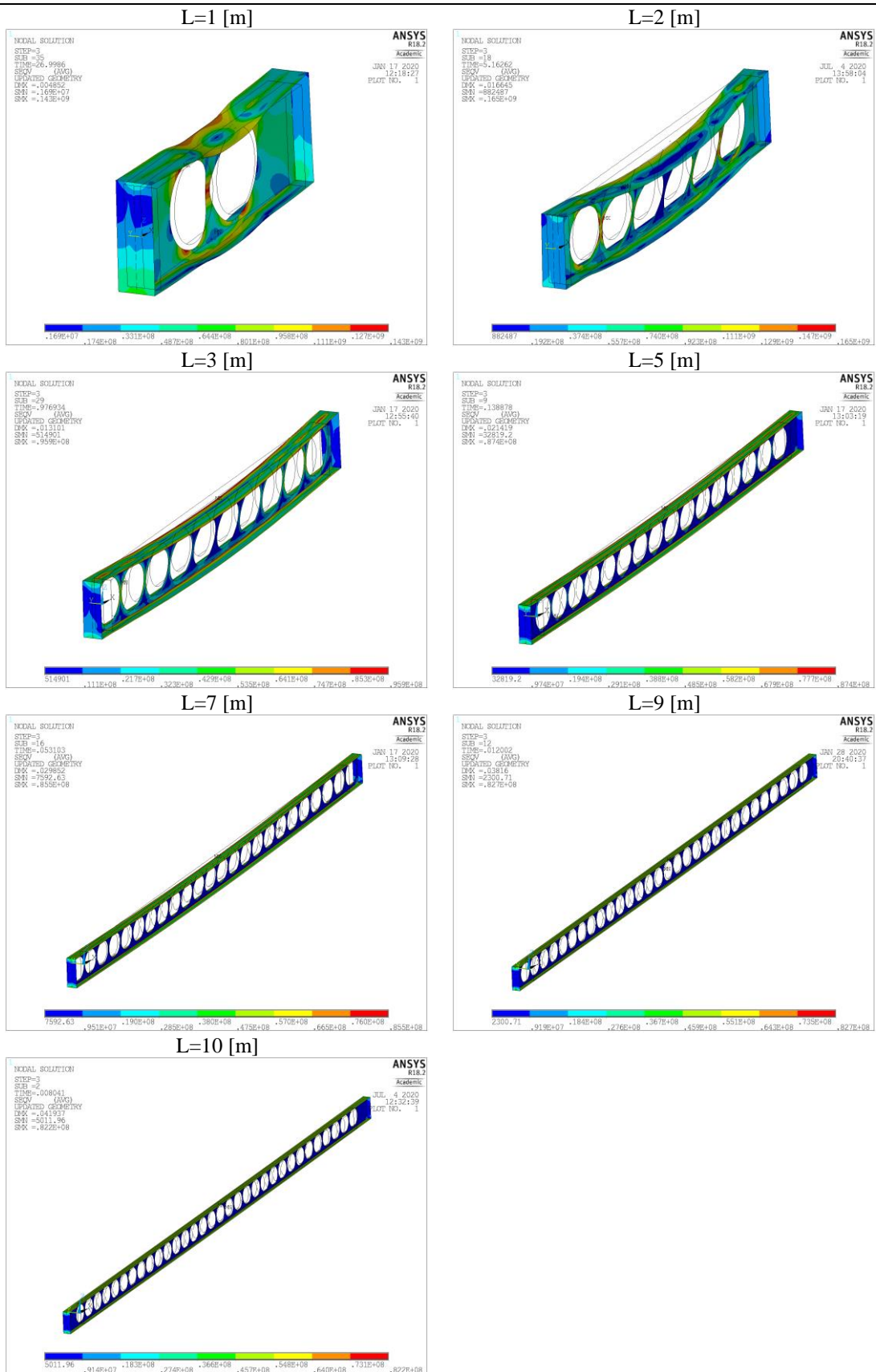
CASO –  $S=1,1d_0 - 20 [^{\circ}C]$



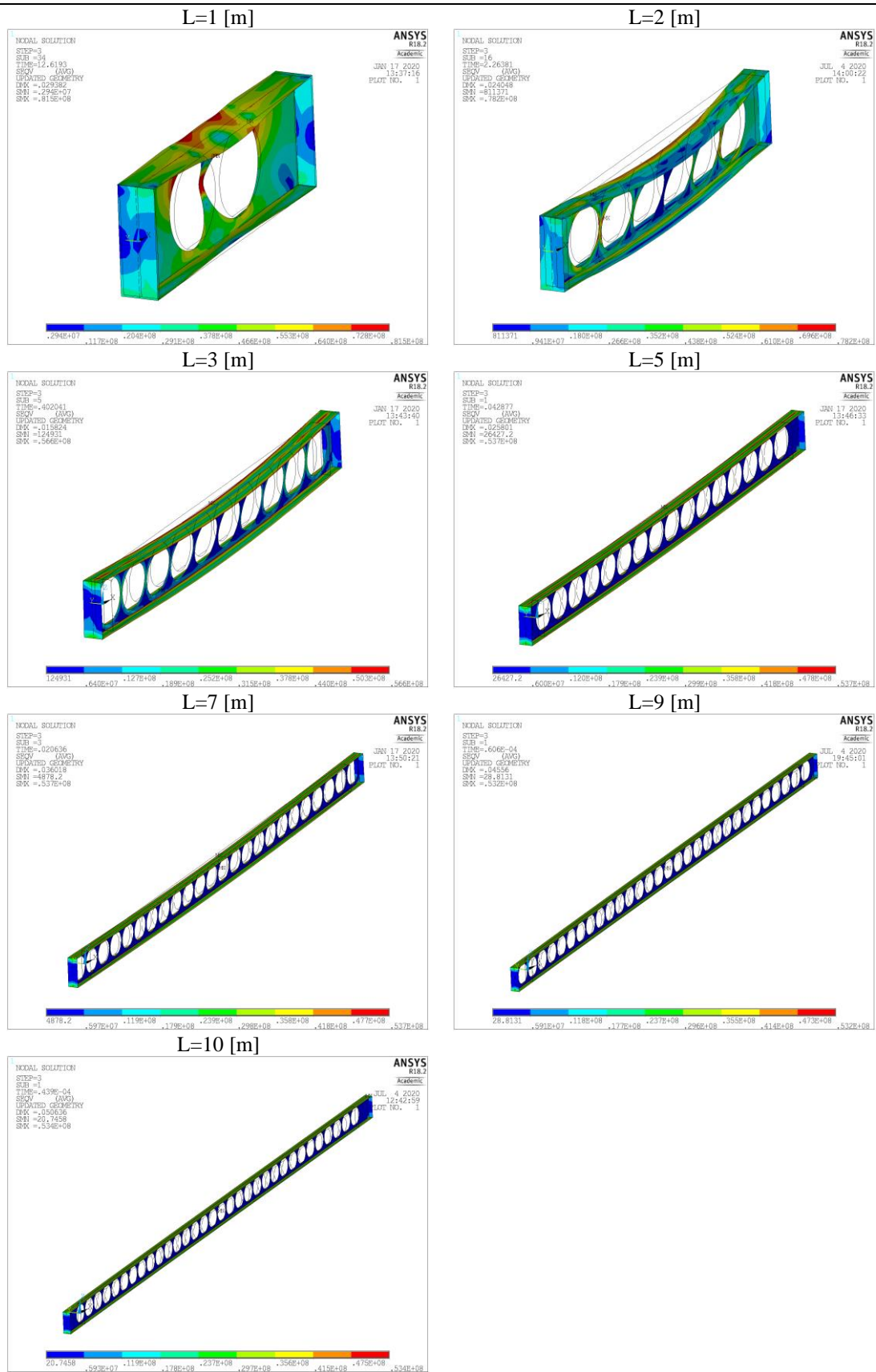
CASO – S=1,1d<sub>0</sub> - 500 [°C]



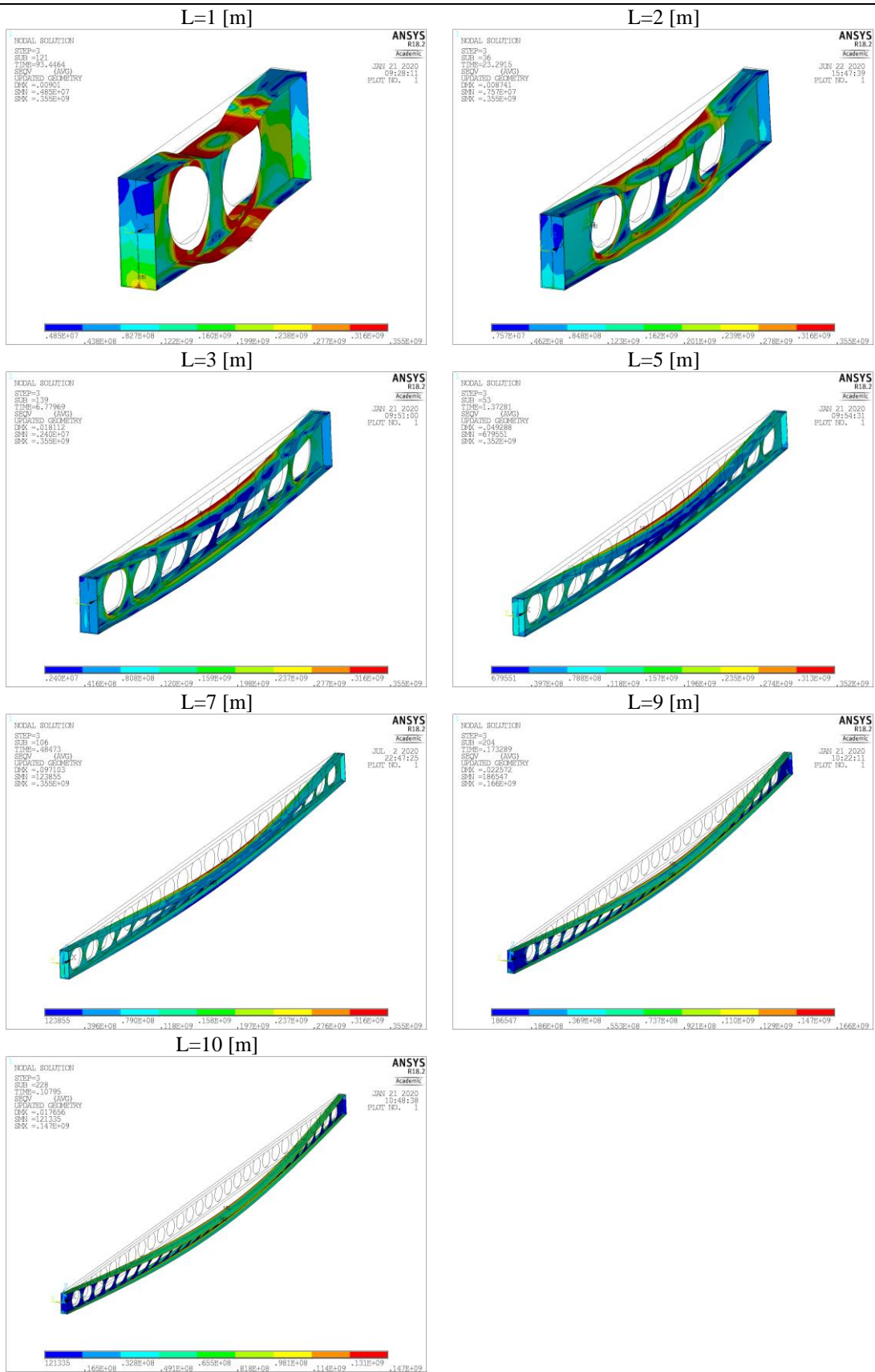
CASO – S=1,1d<sub>0</sub> - 600 [°C]



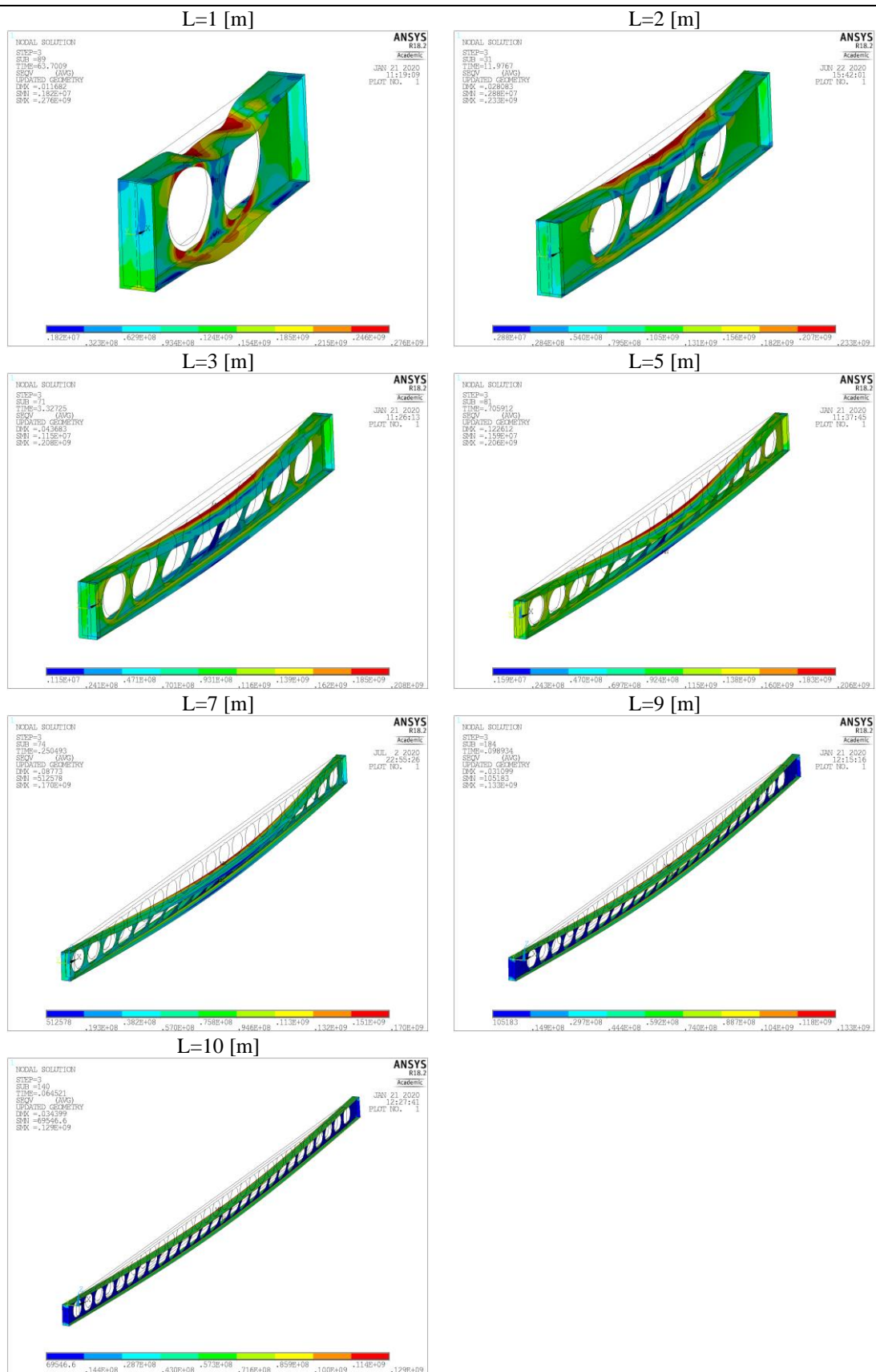
CASO – S=1,1d<sub>0</sub> - 700 [°C]



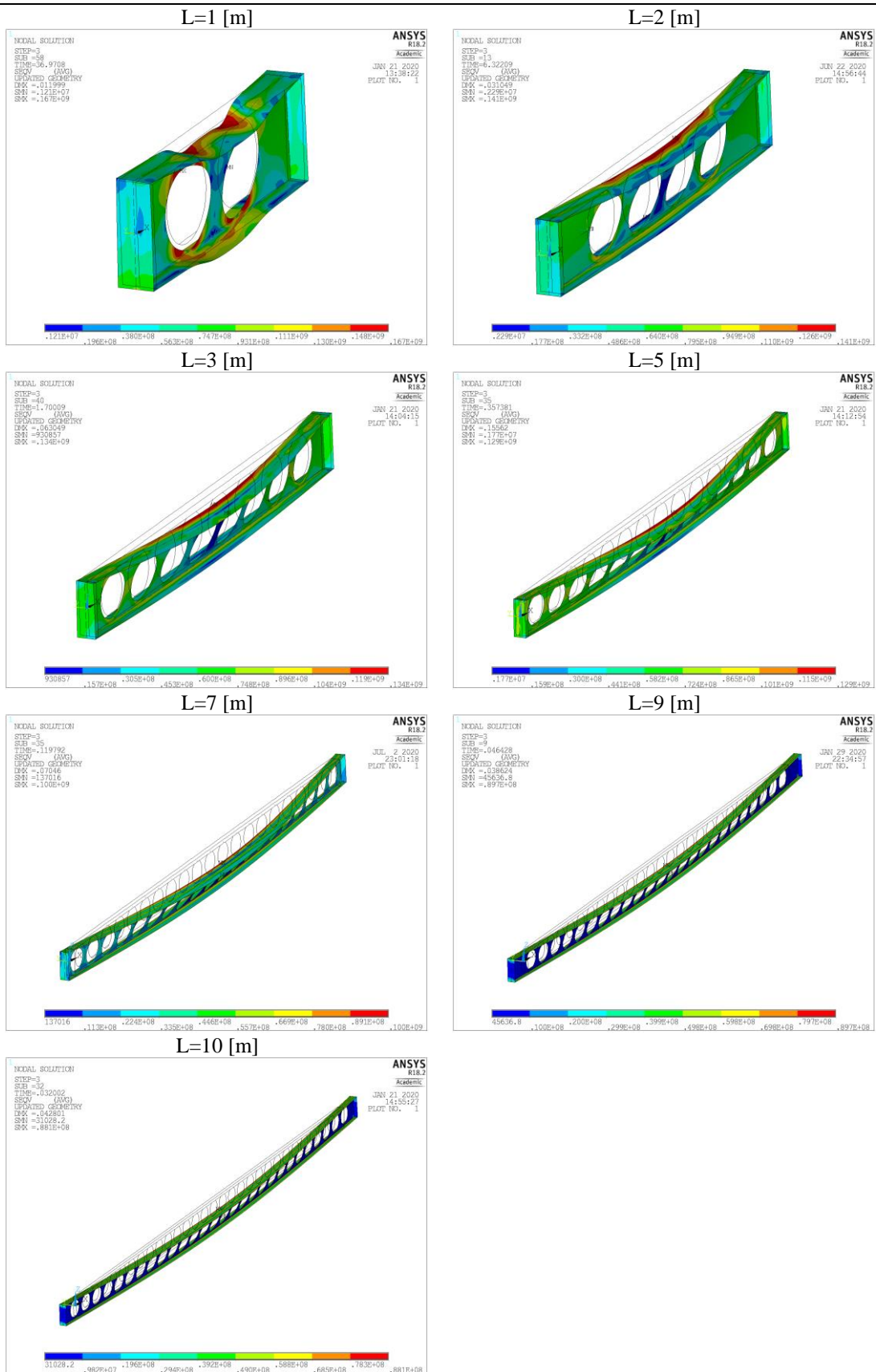
CASO –  $S=1,3d_0 - 20 [^{\circ}C]$



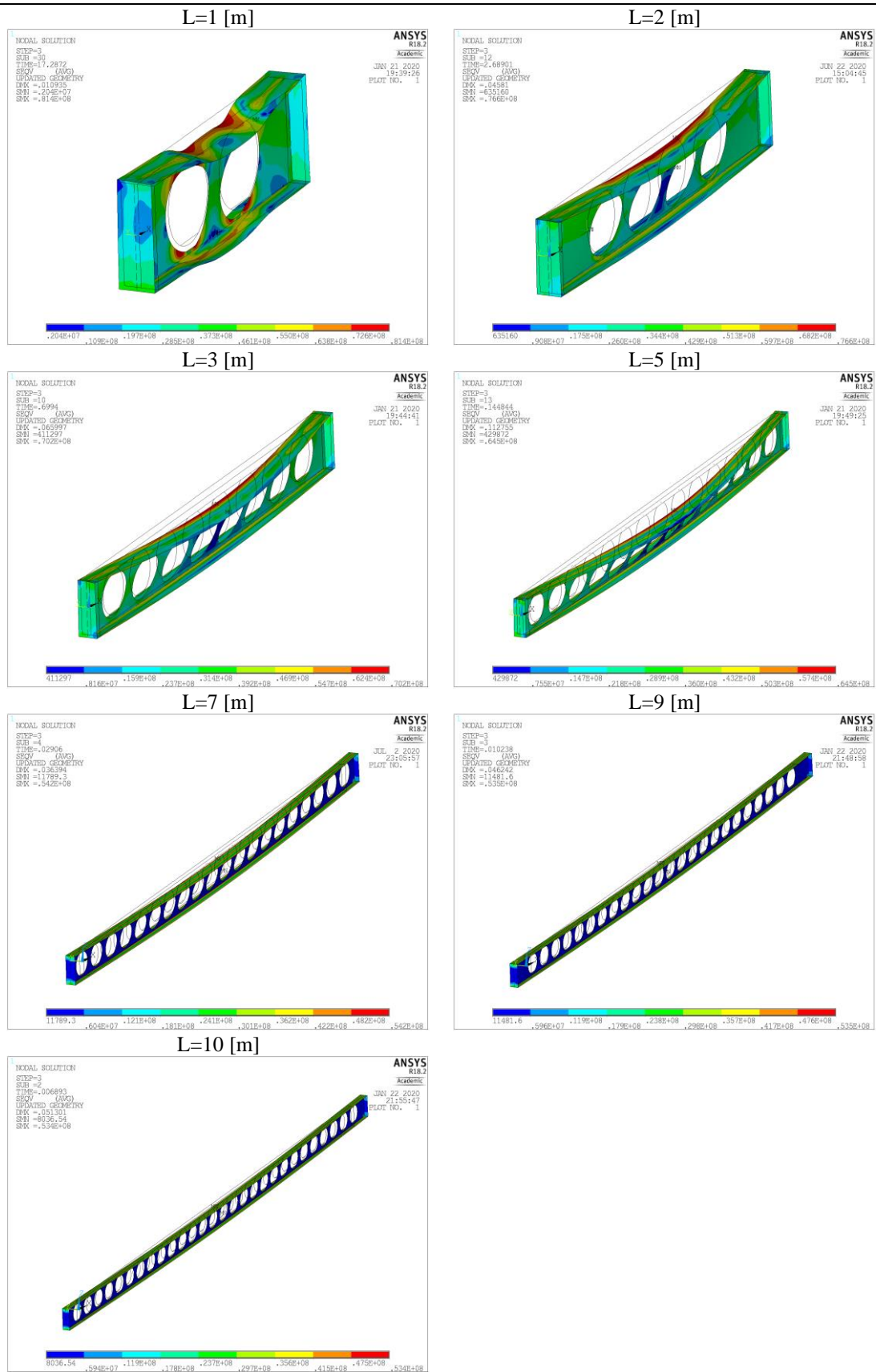
CASO – S=1,3d<sub>0</sub> - 500 [°C]



CASO –  $S=1,3d_0 - 600 [^{\circ}\text{C}]$

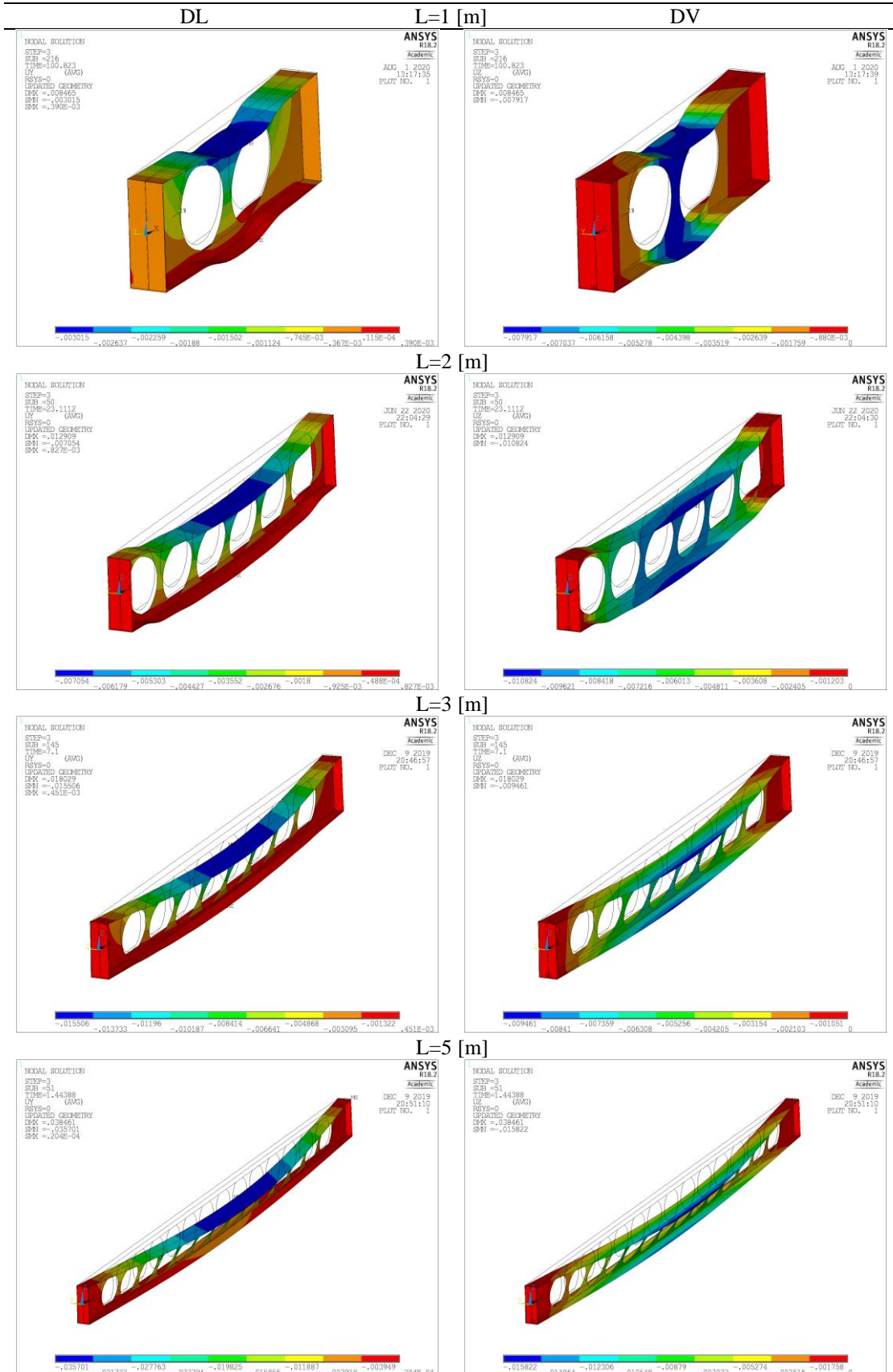


CASO – S=1,3d<sub>0</sub> - 700 [°C]

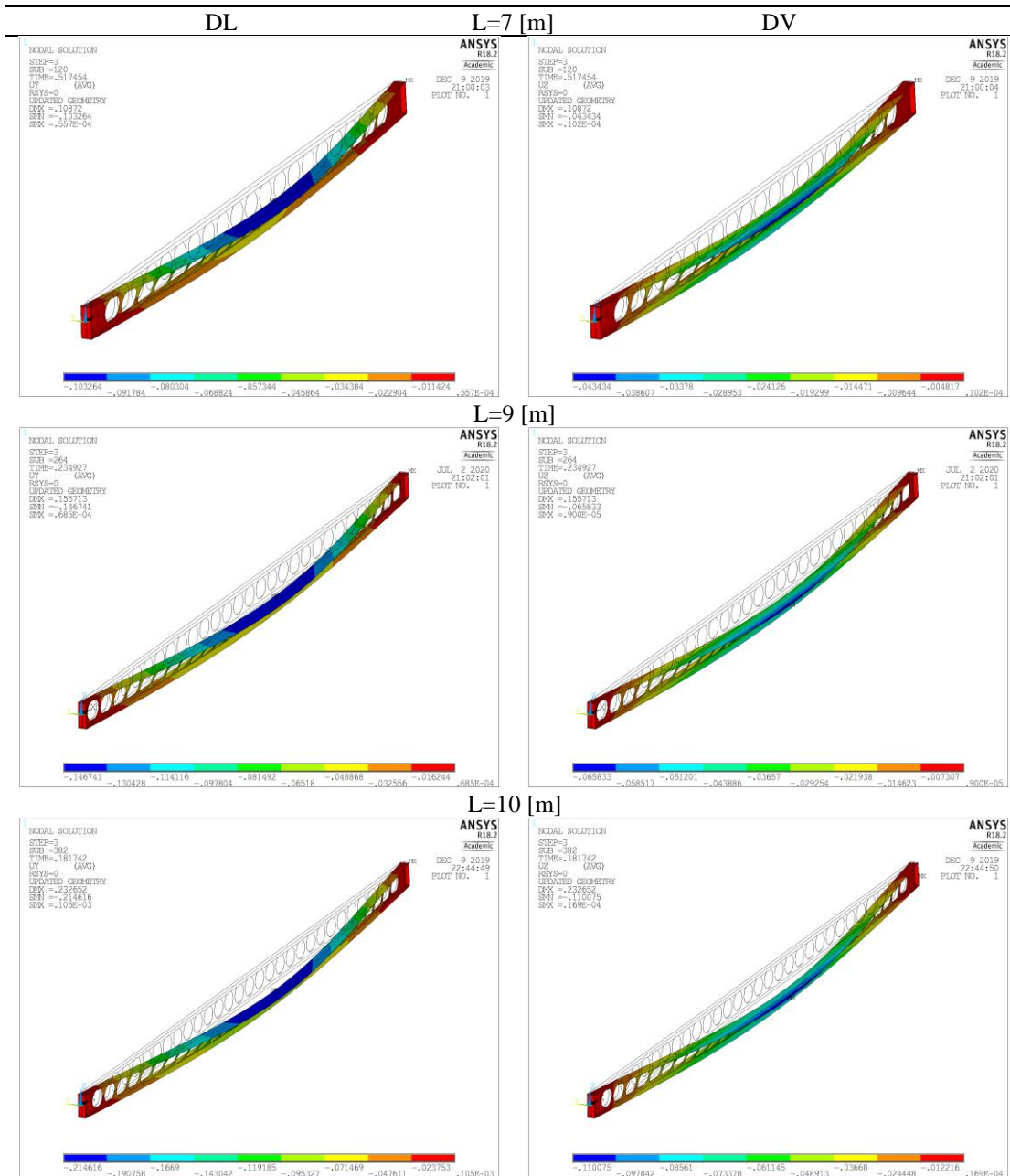


ANEXO G – Deslocamentos laterais e verticais das vigas alveolares

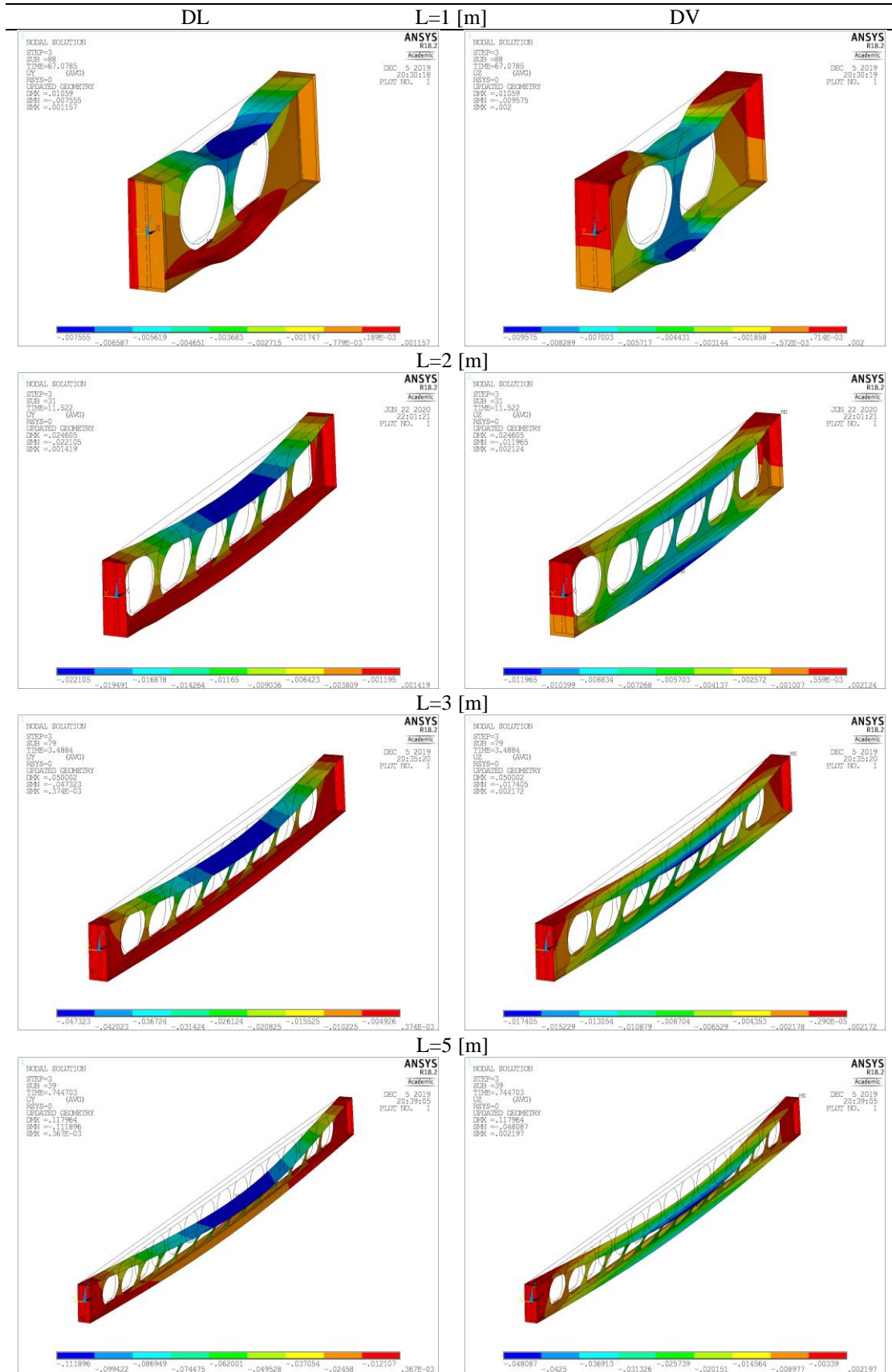
CASO – MR - 20 [°C]



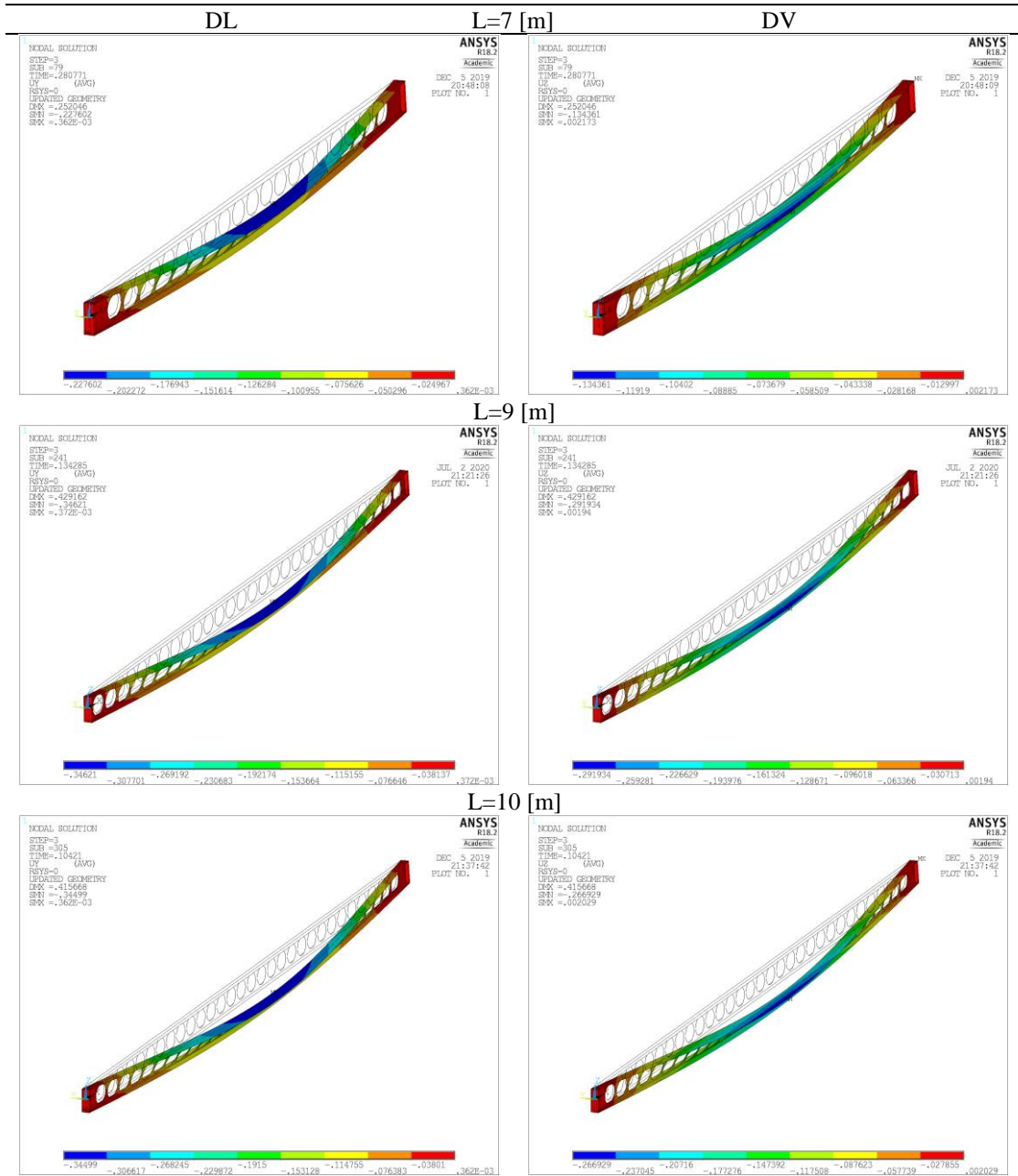
CASO – MR - 20 [°C]



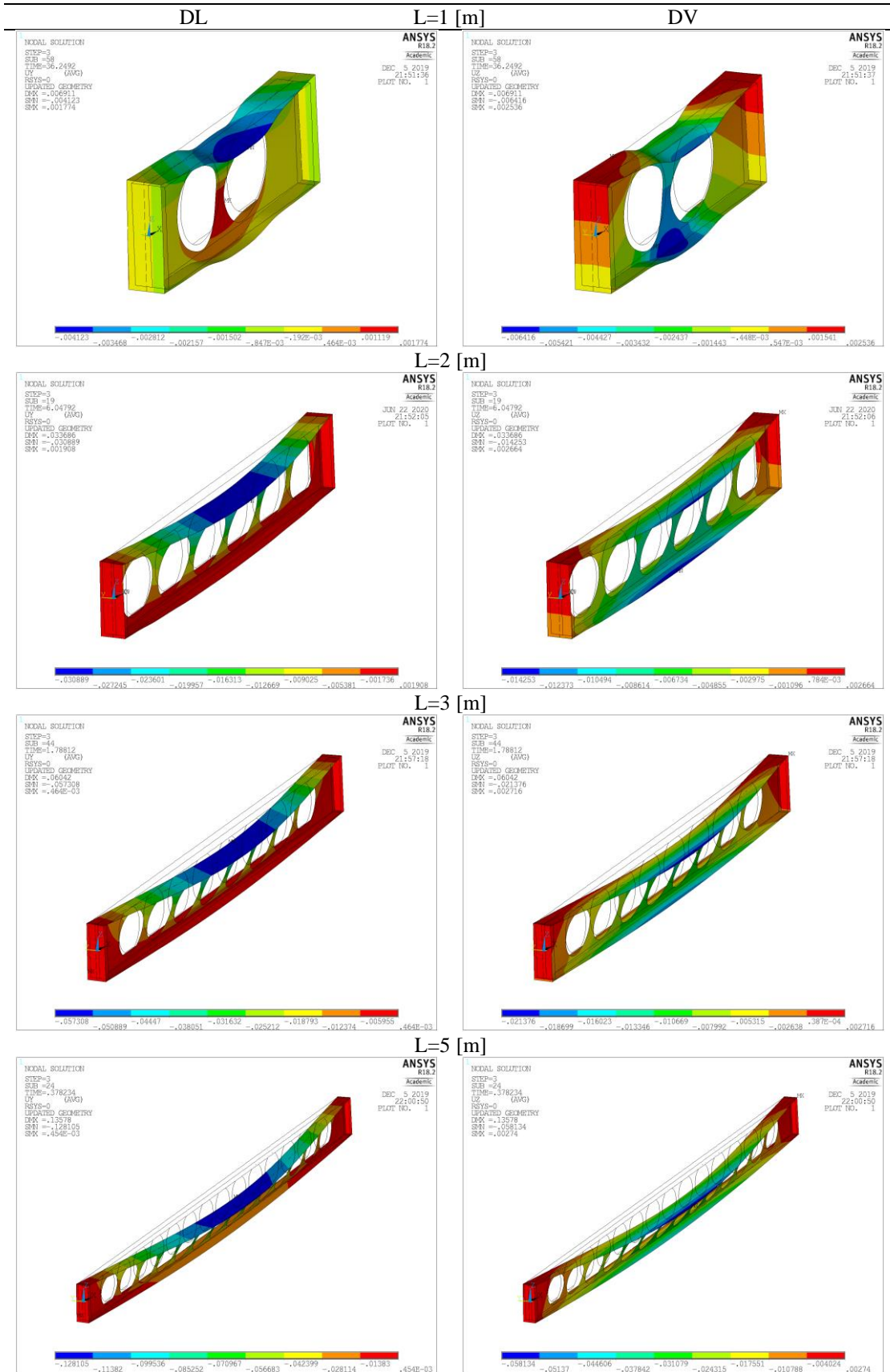
CASO – MR - 500 [°C]



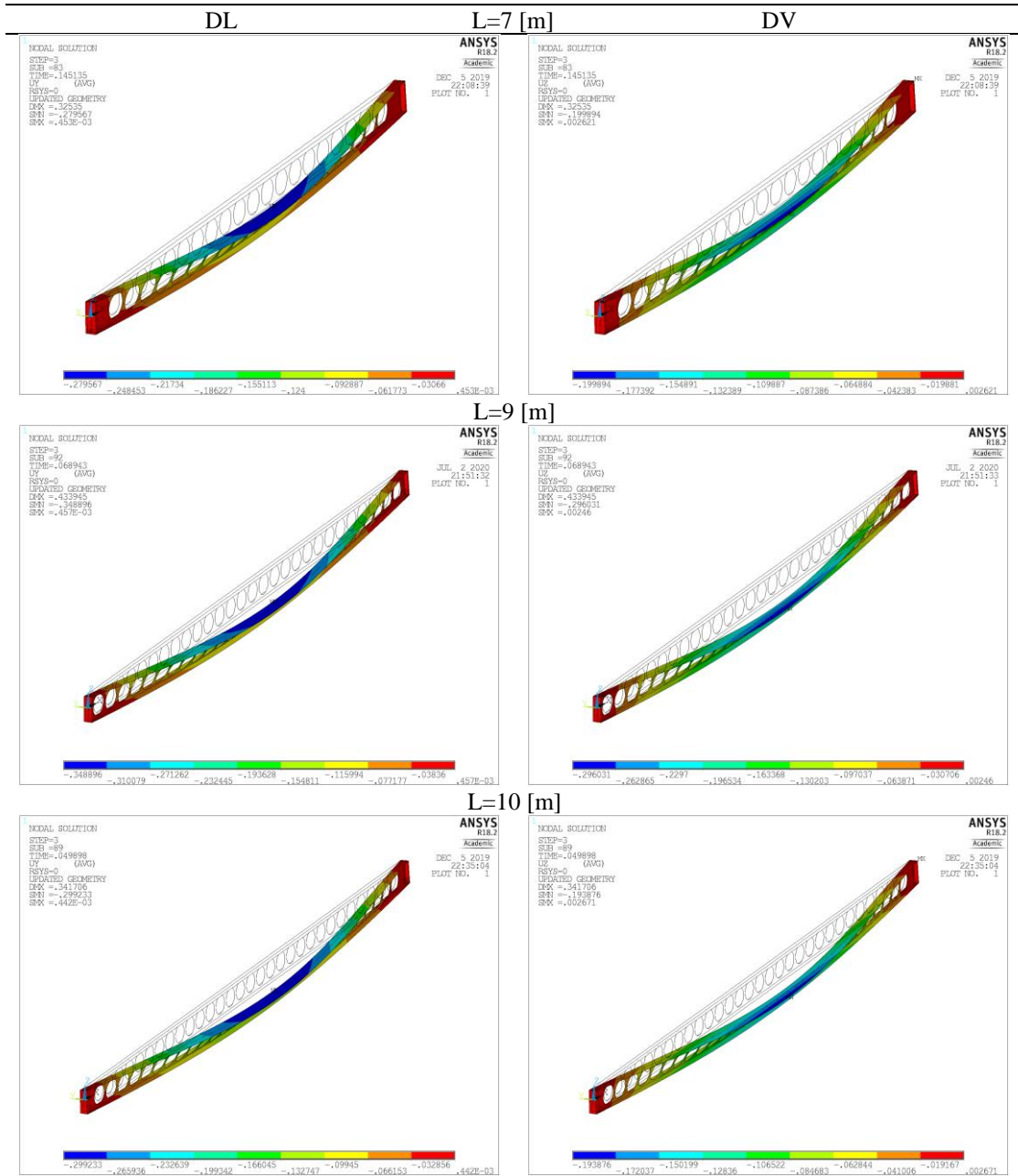
CASO – MR - 500 [°C]



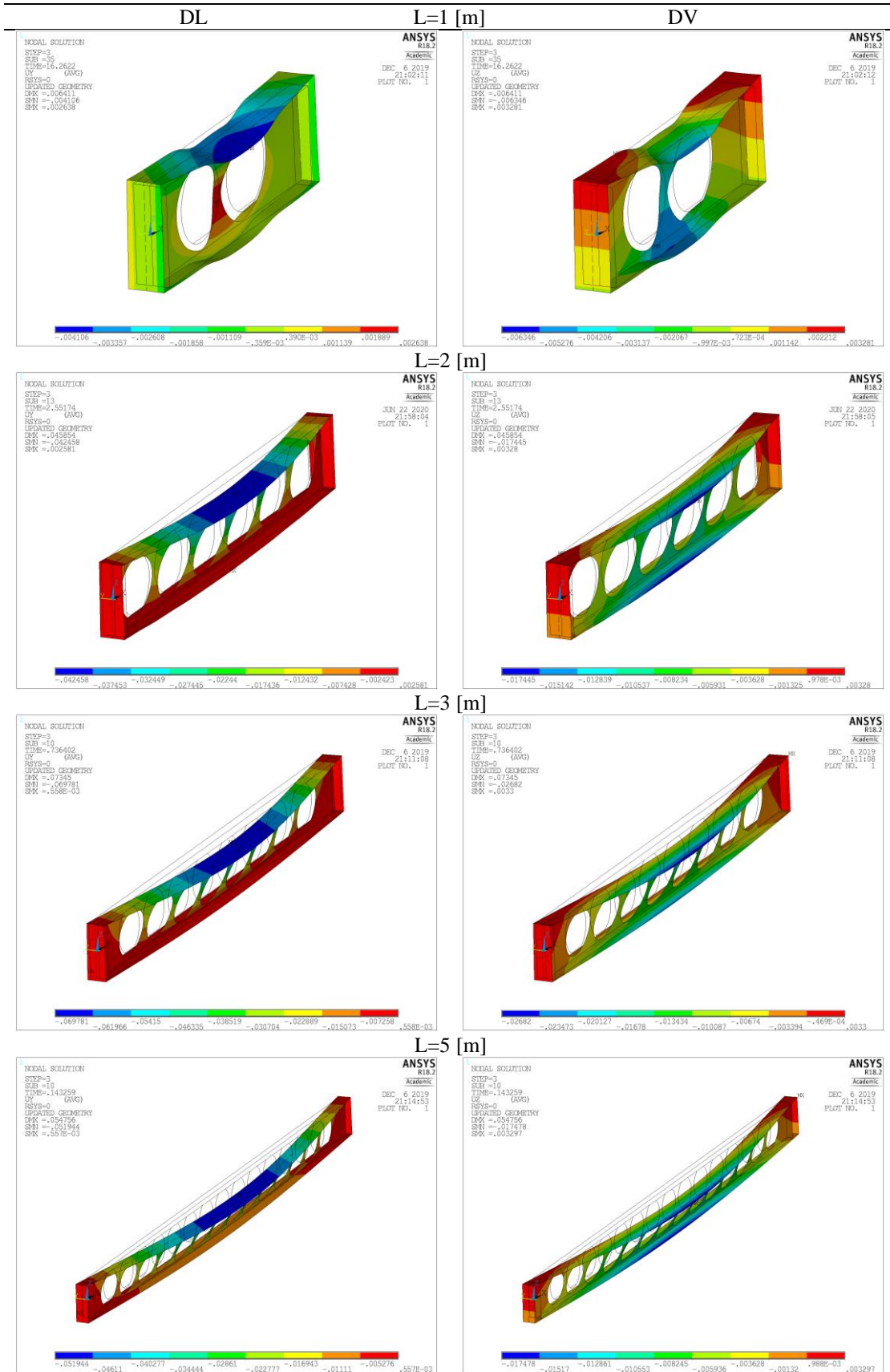
CASO – MR - 600 [°C]



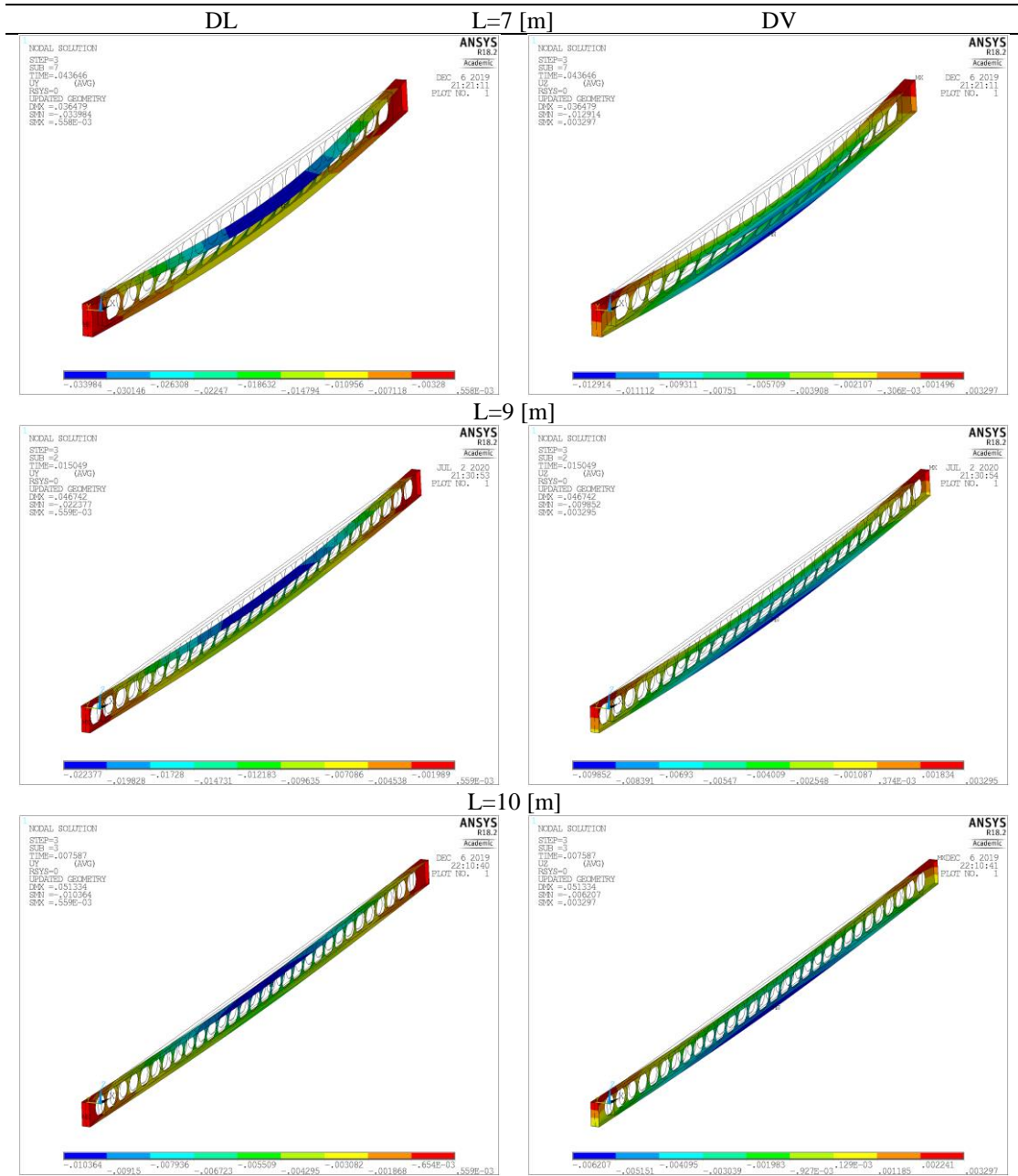
CASO – MR - 600 [°C]



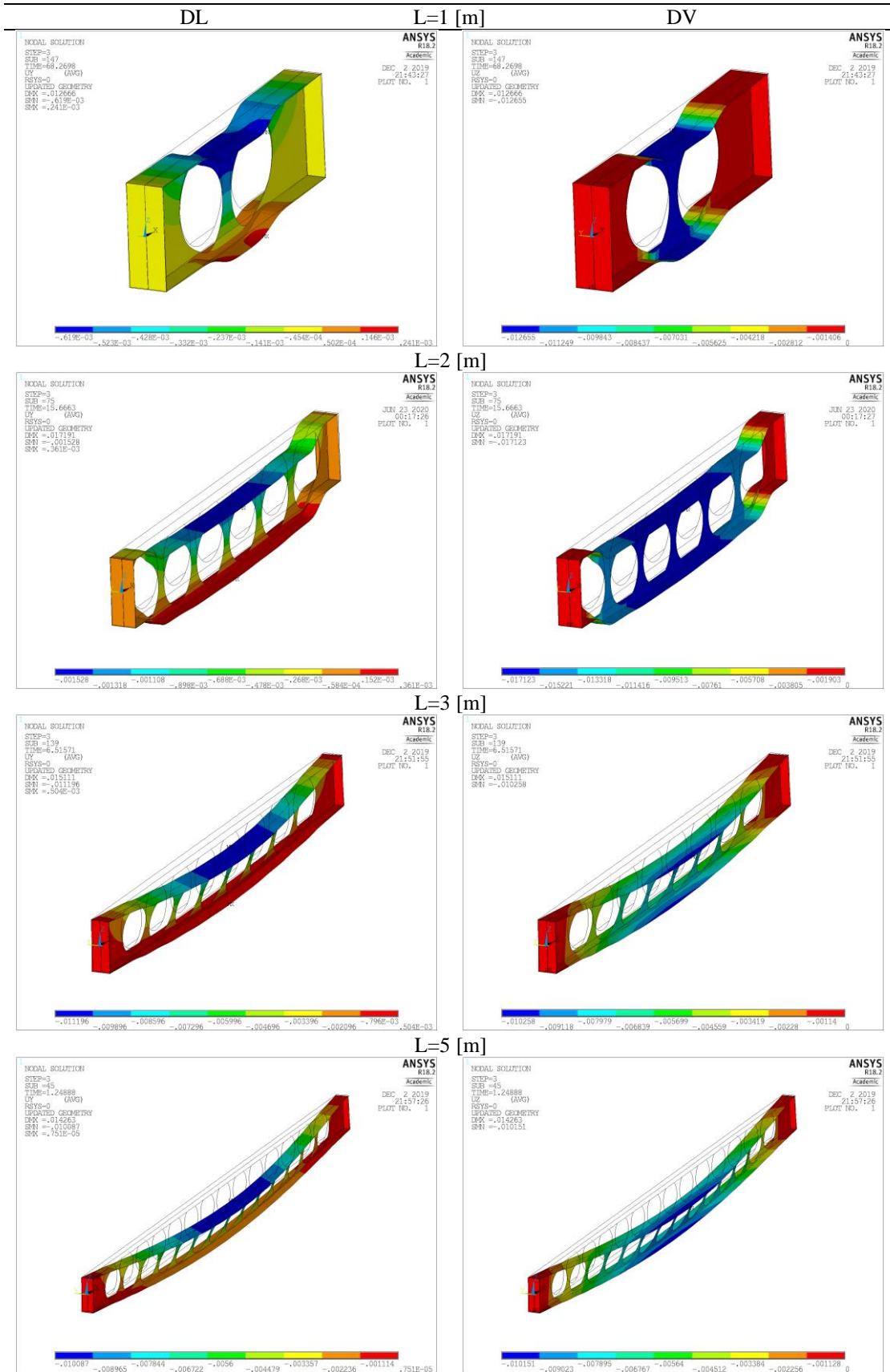
CASO – MR - 700 [°C]



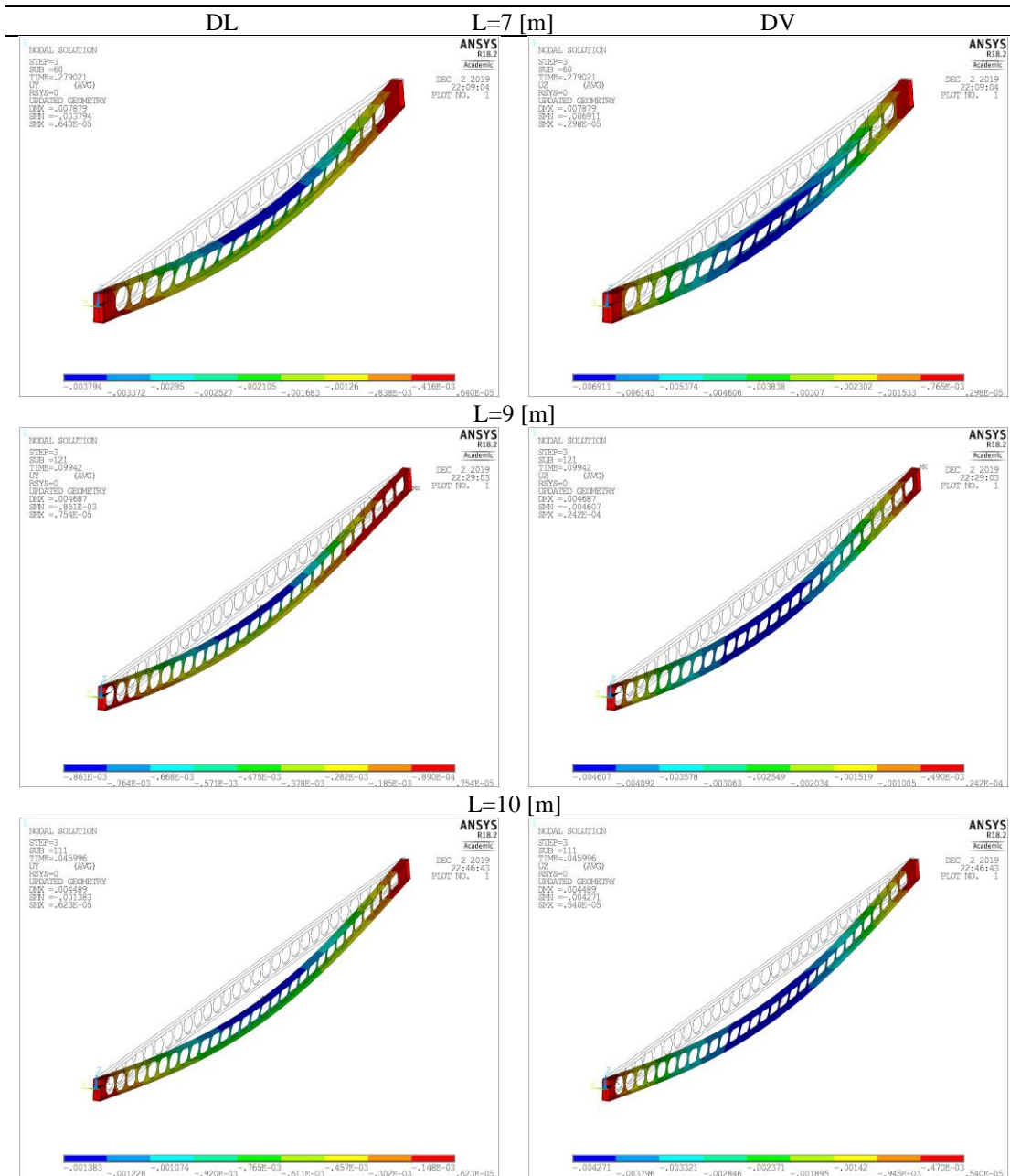
CASO – MR - 700 [°C]



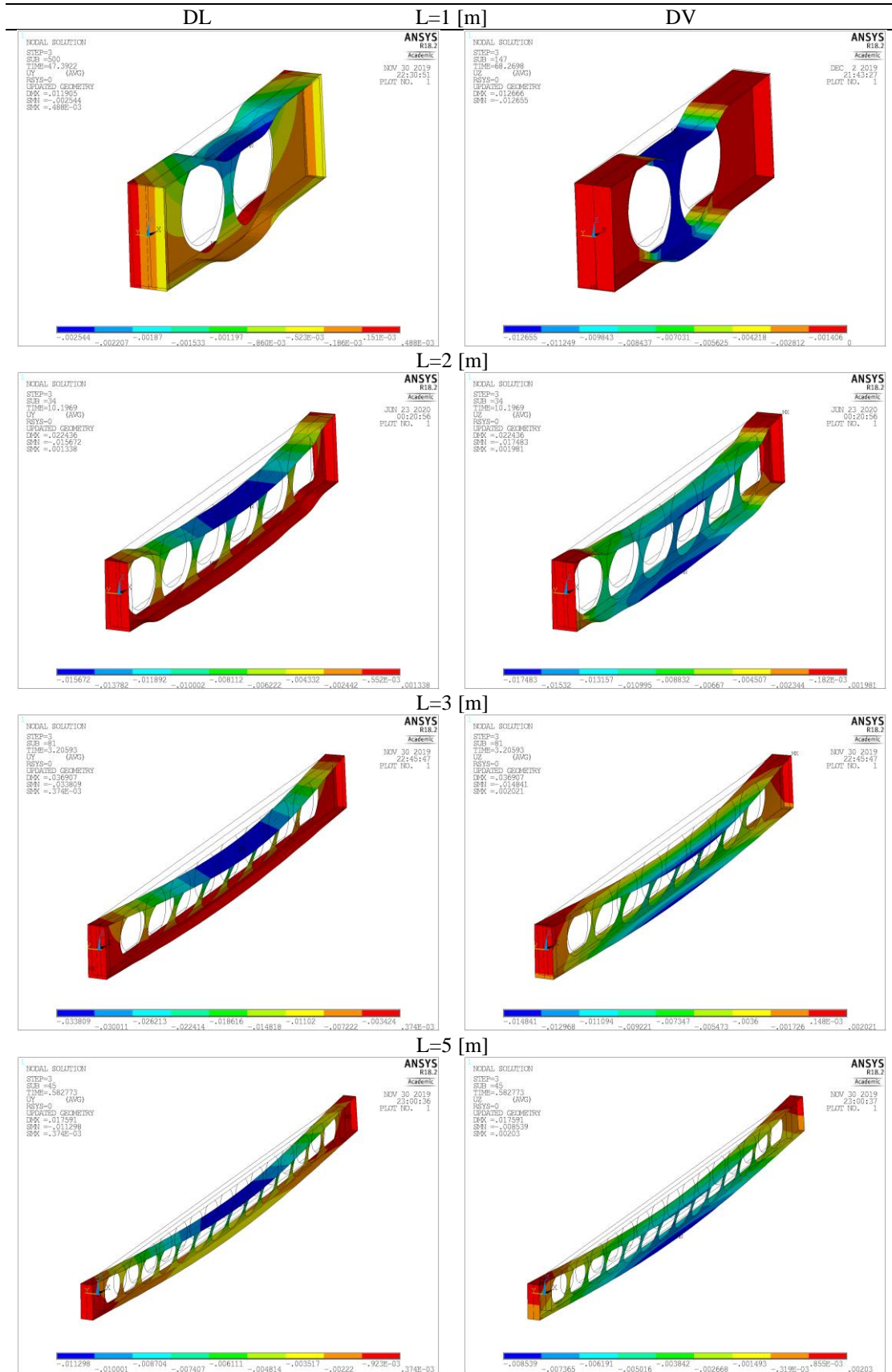
CASO – H=1,4h - 20 [°C]



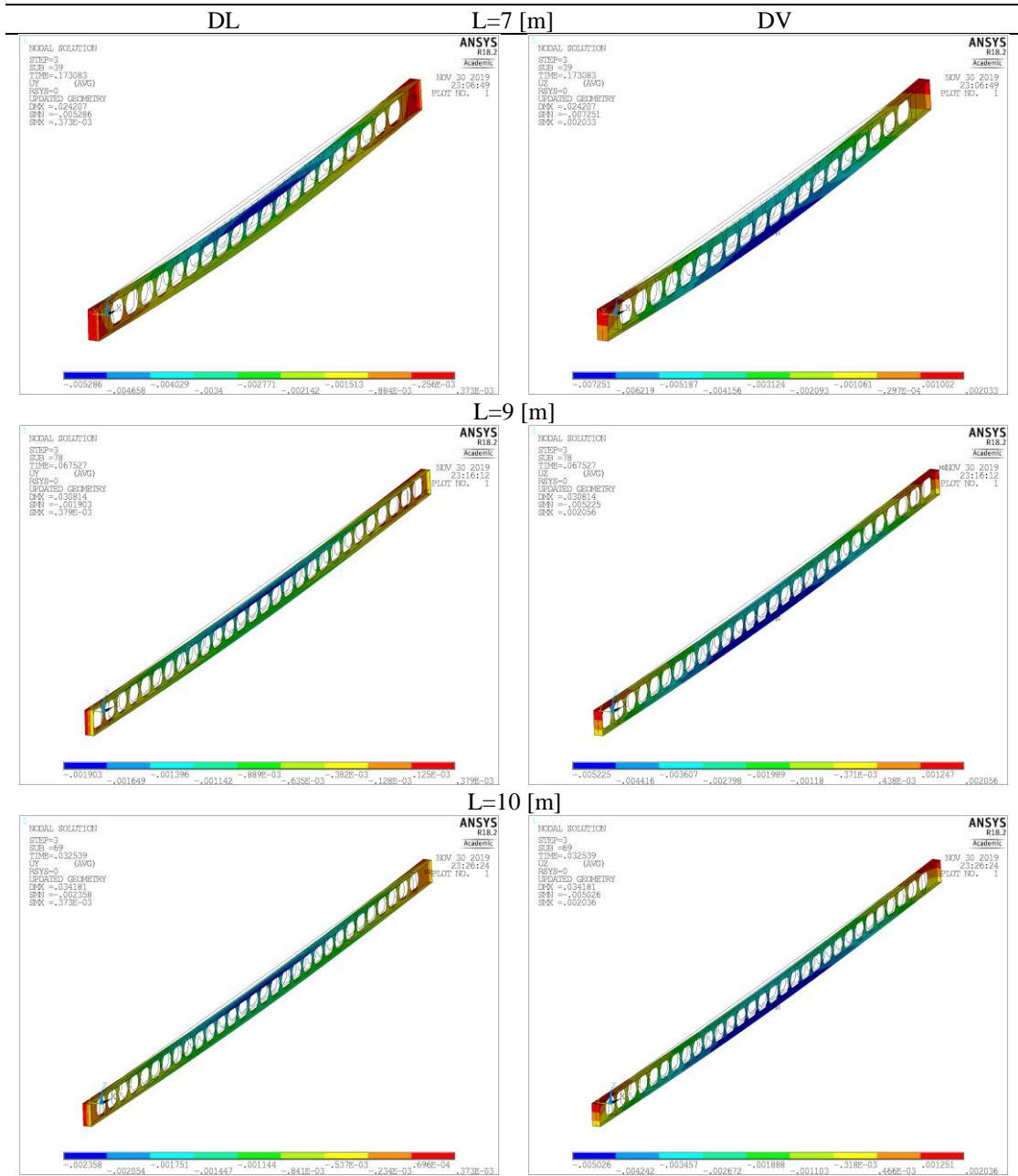
CASO – H=1,4h - 20 [°C]



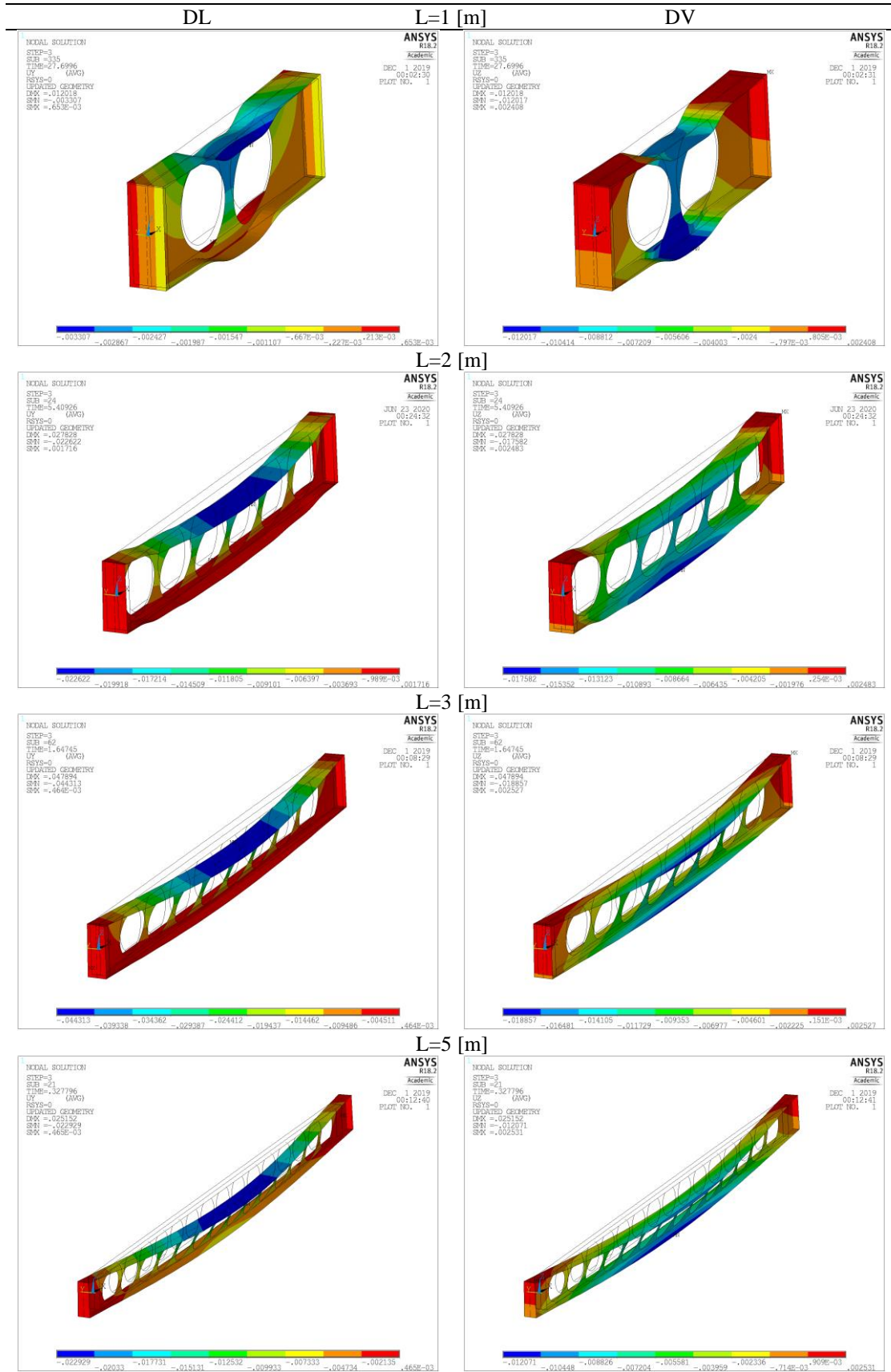
CASO – H=1,4h - 500 [°C]



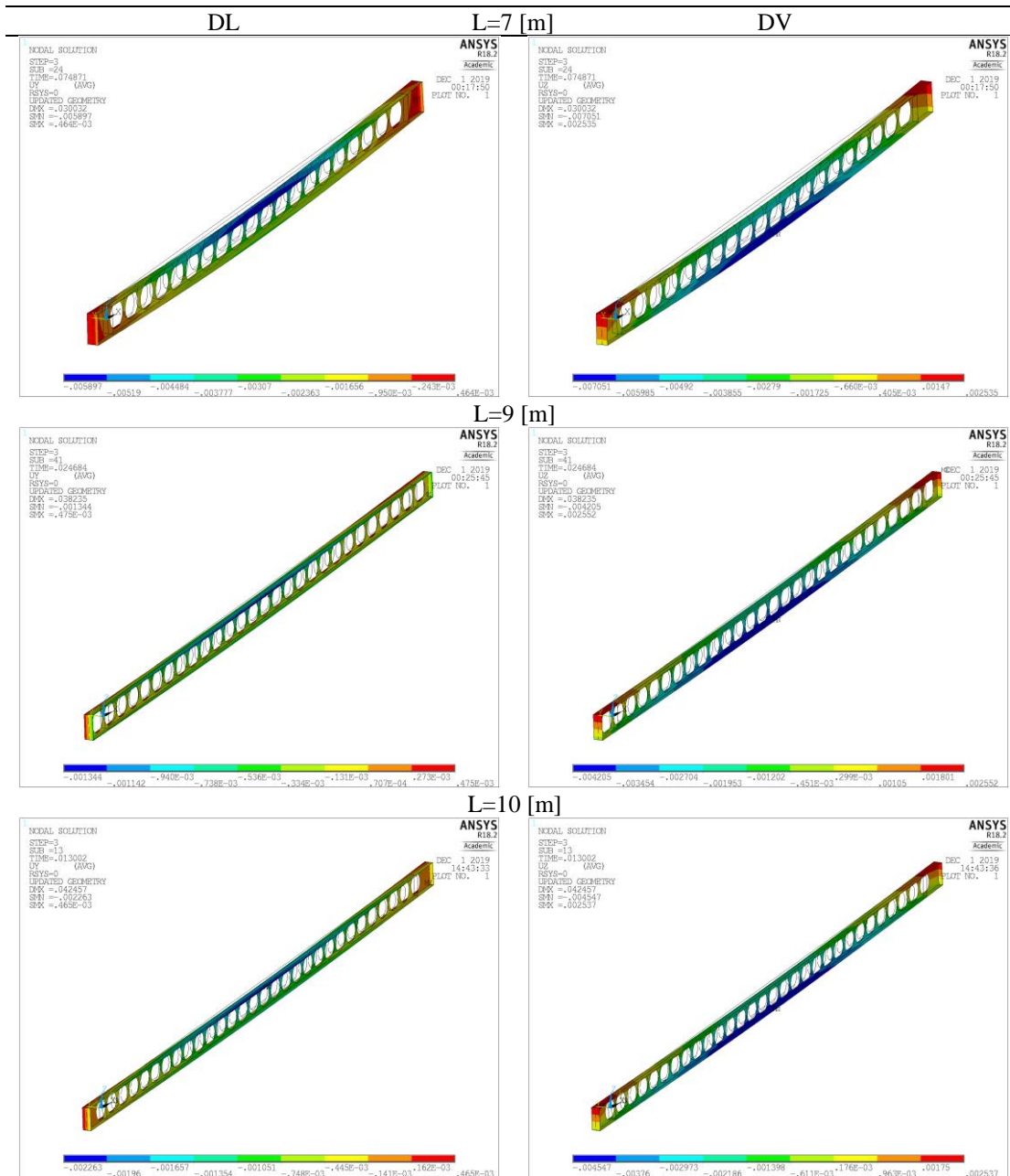
CASO – H=1,4h - 500 [°C]



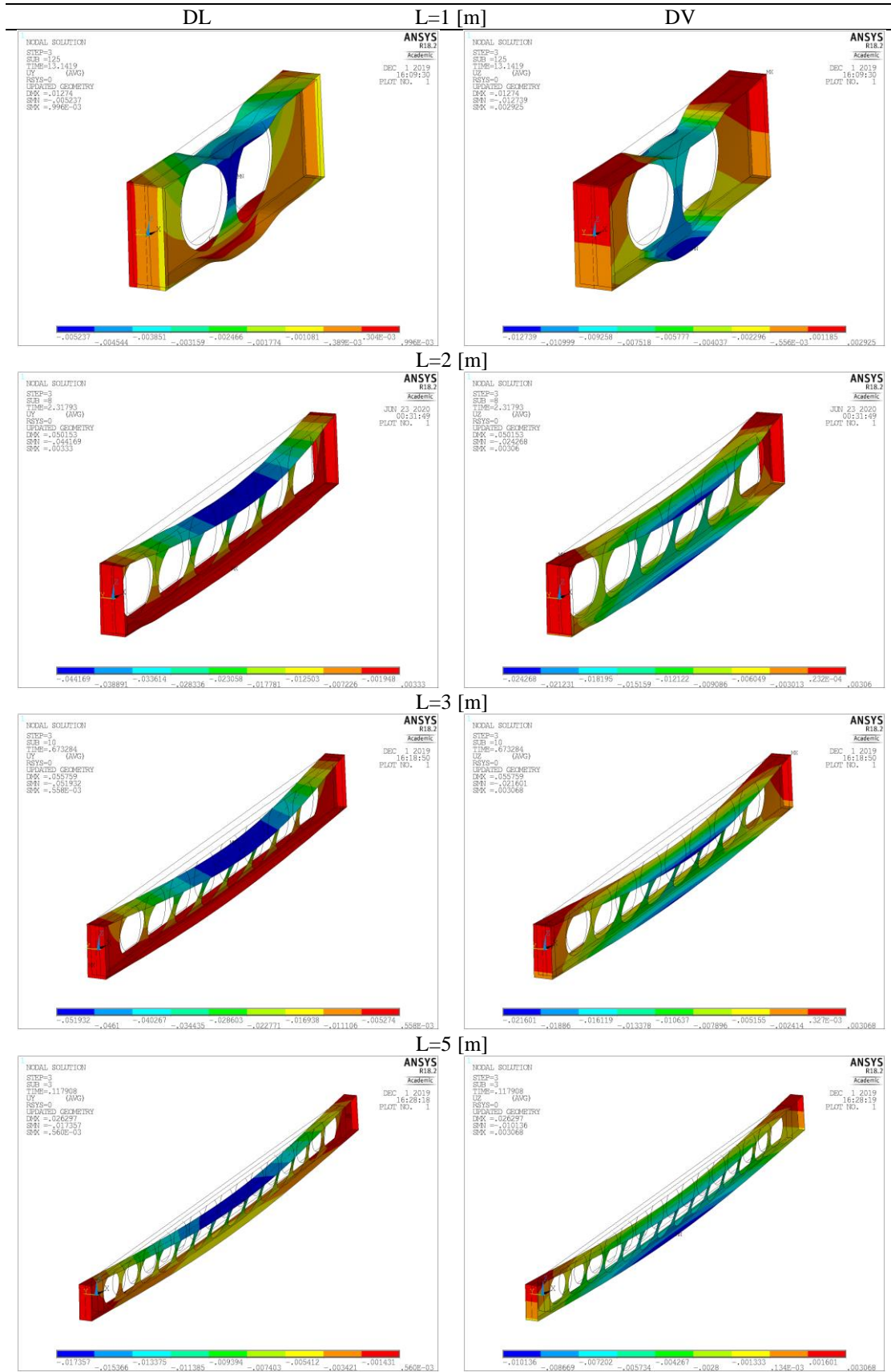
CASO – H=1,4h - 600 [°C]



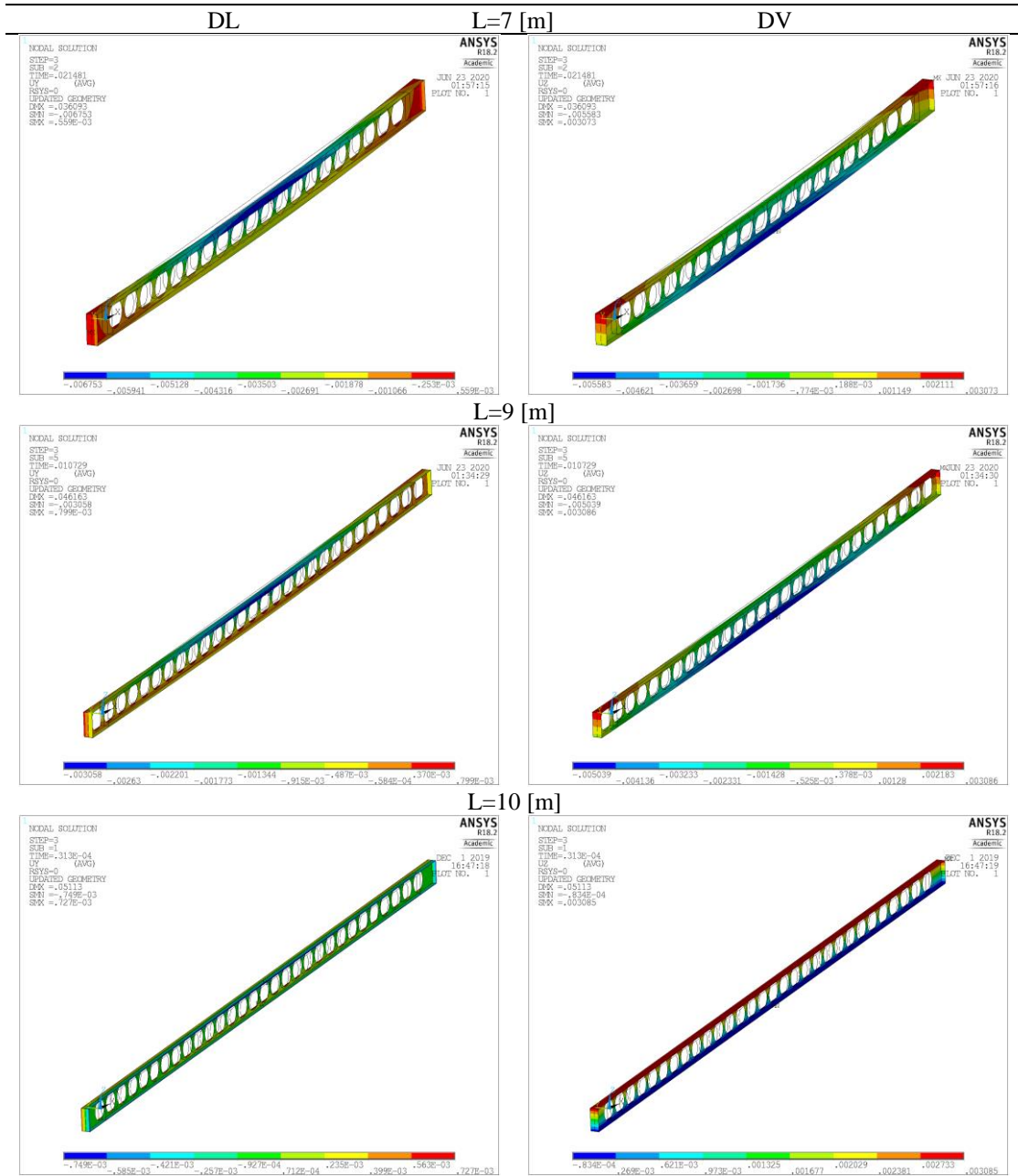
CASO – H=1,4h - 600 [°C]



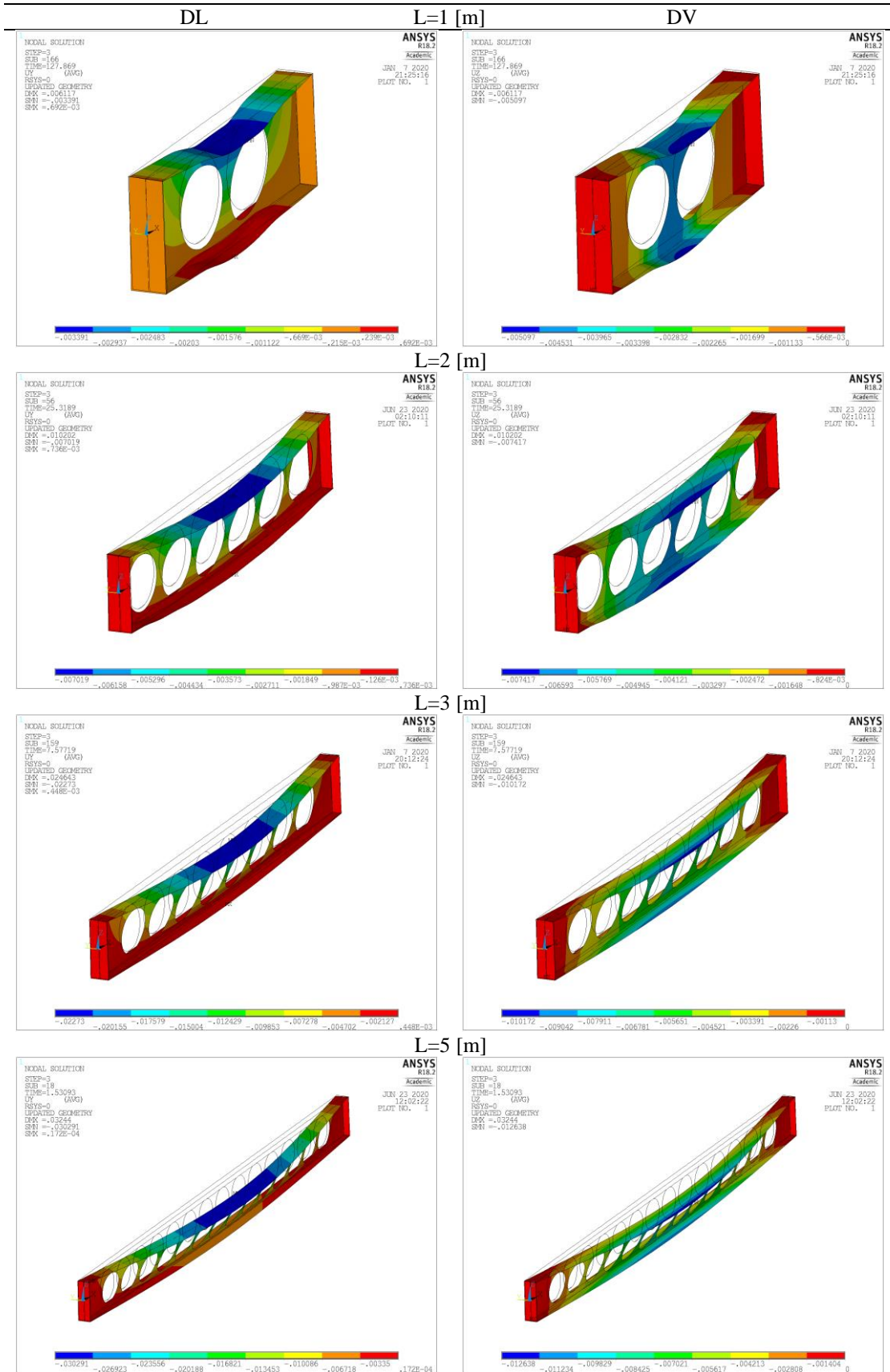
CASO – H=1,4h - 700 [°C]



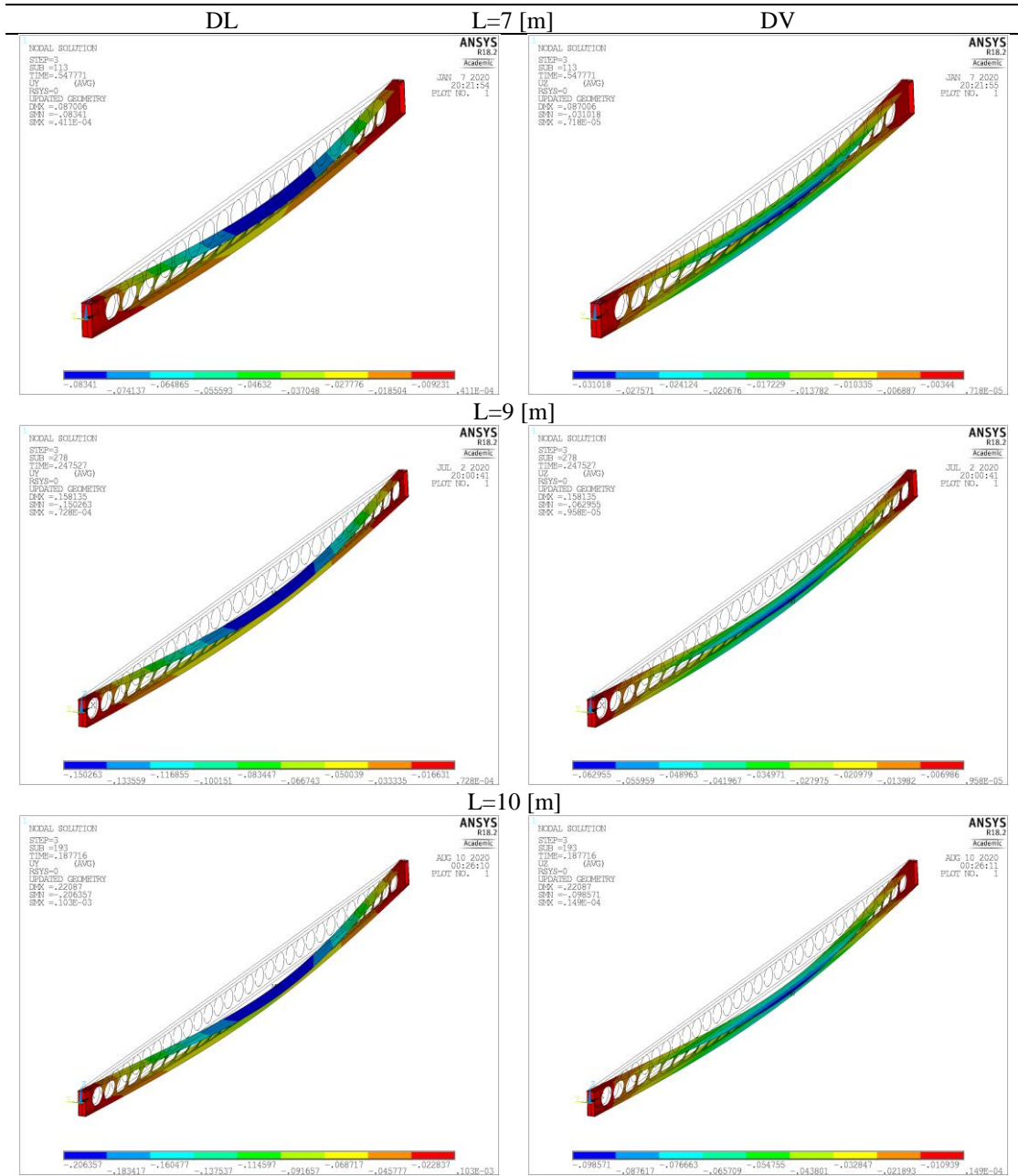
CASO – H=1,4h - 700 [°C]



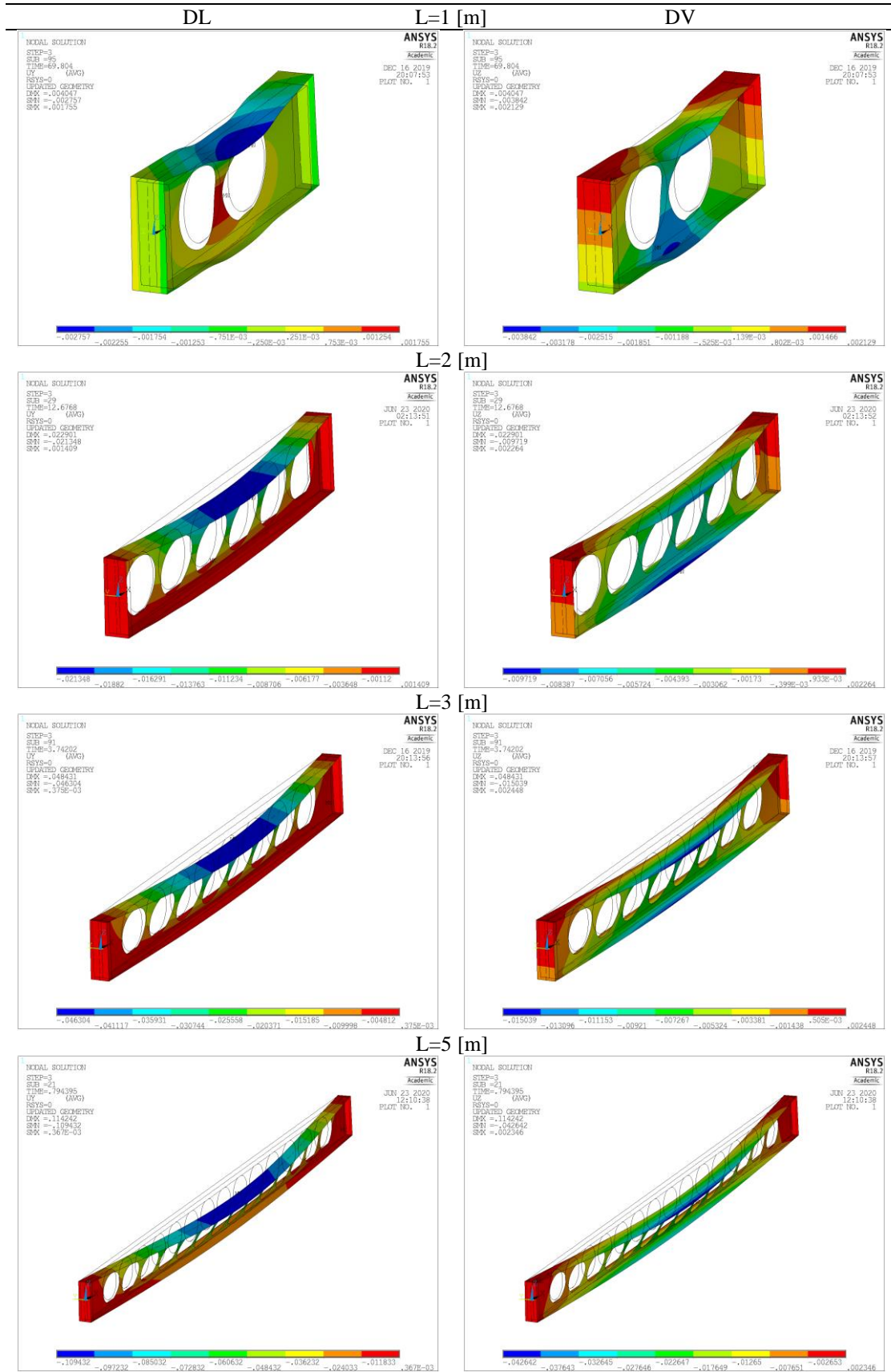
CASO – H=1,6h - 20 [°C]



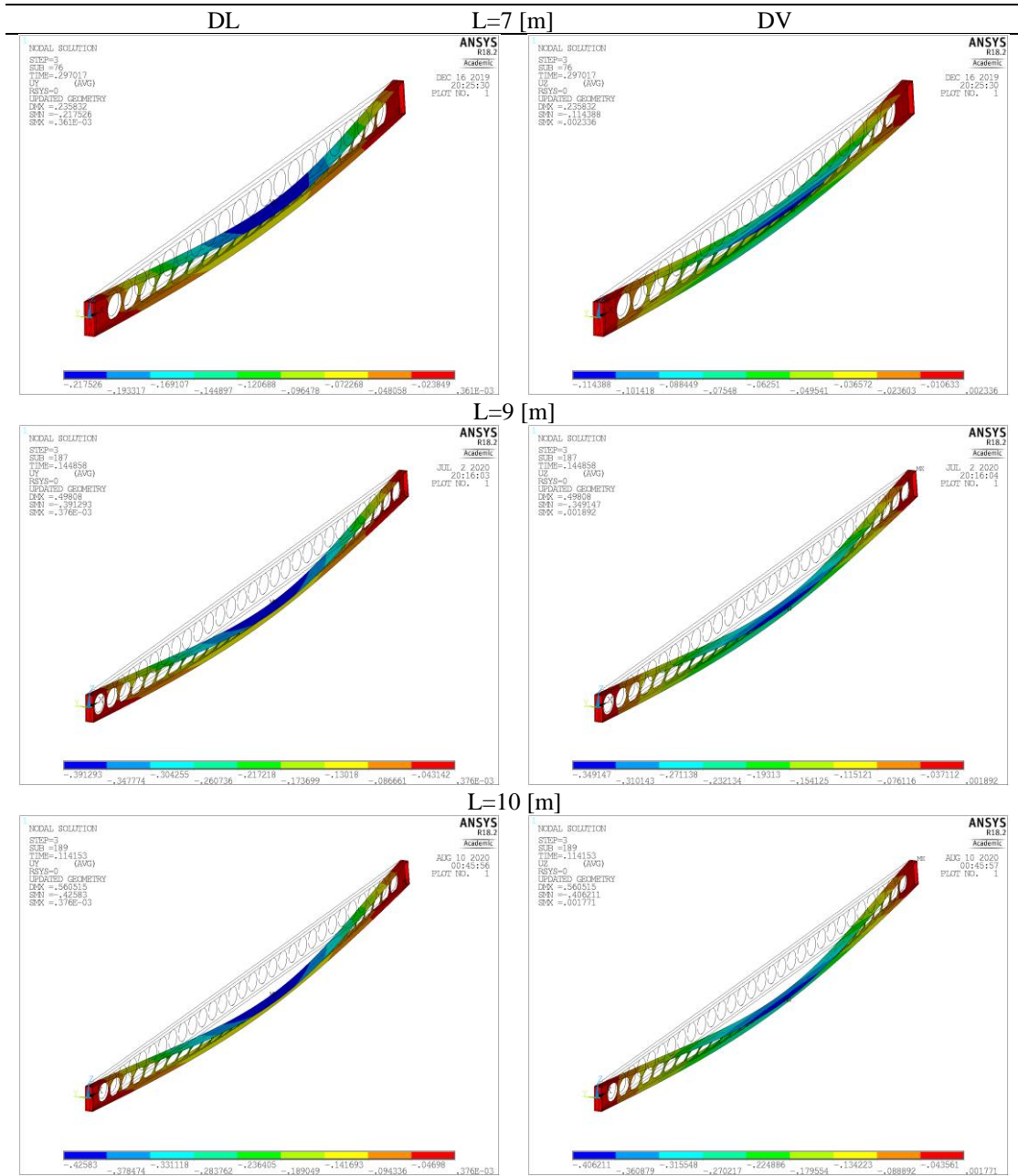
CASO – H=1,6h - 20 [°C]



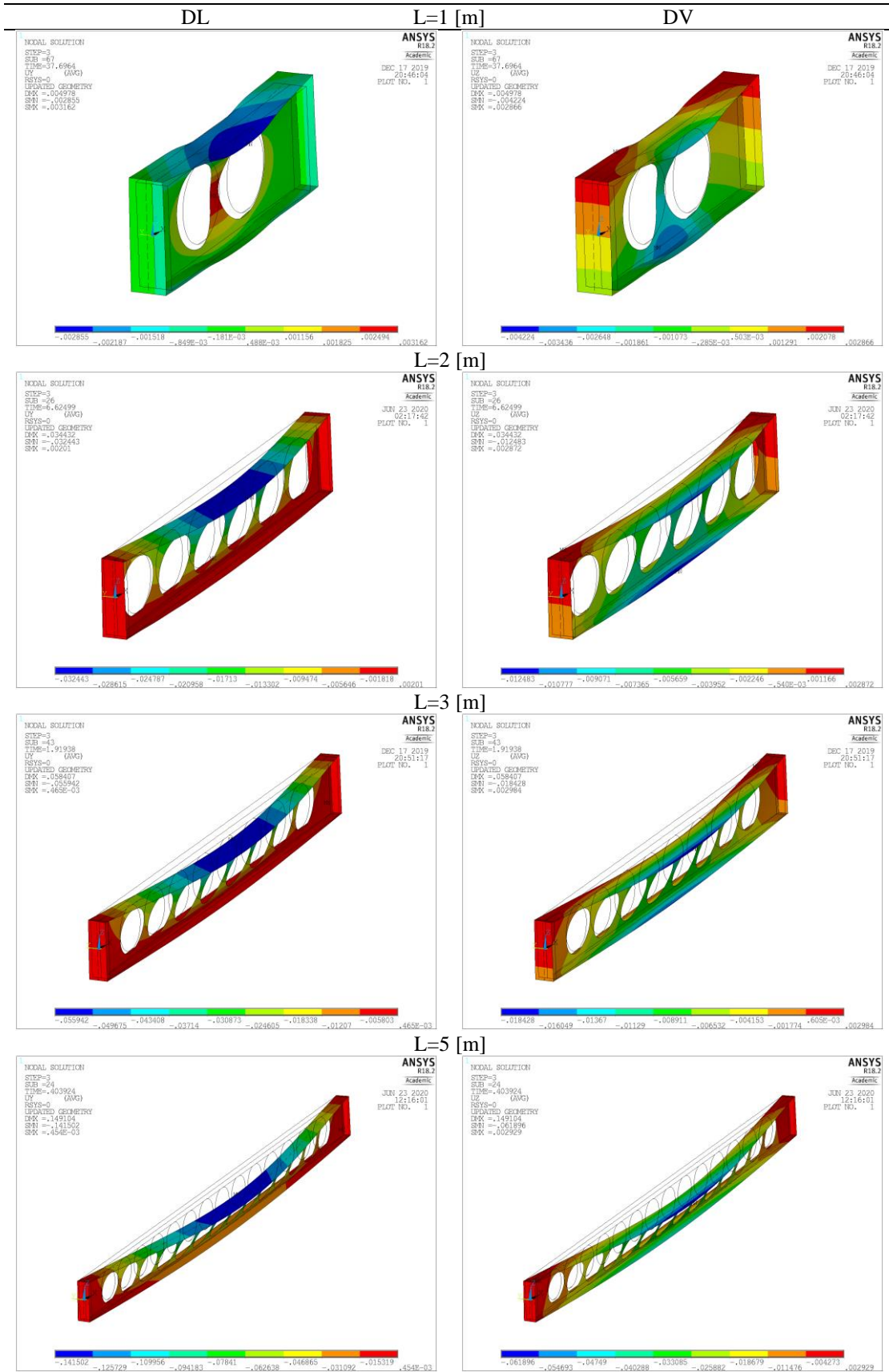
CASO – H=1,6h - 500 [°C]



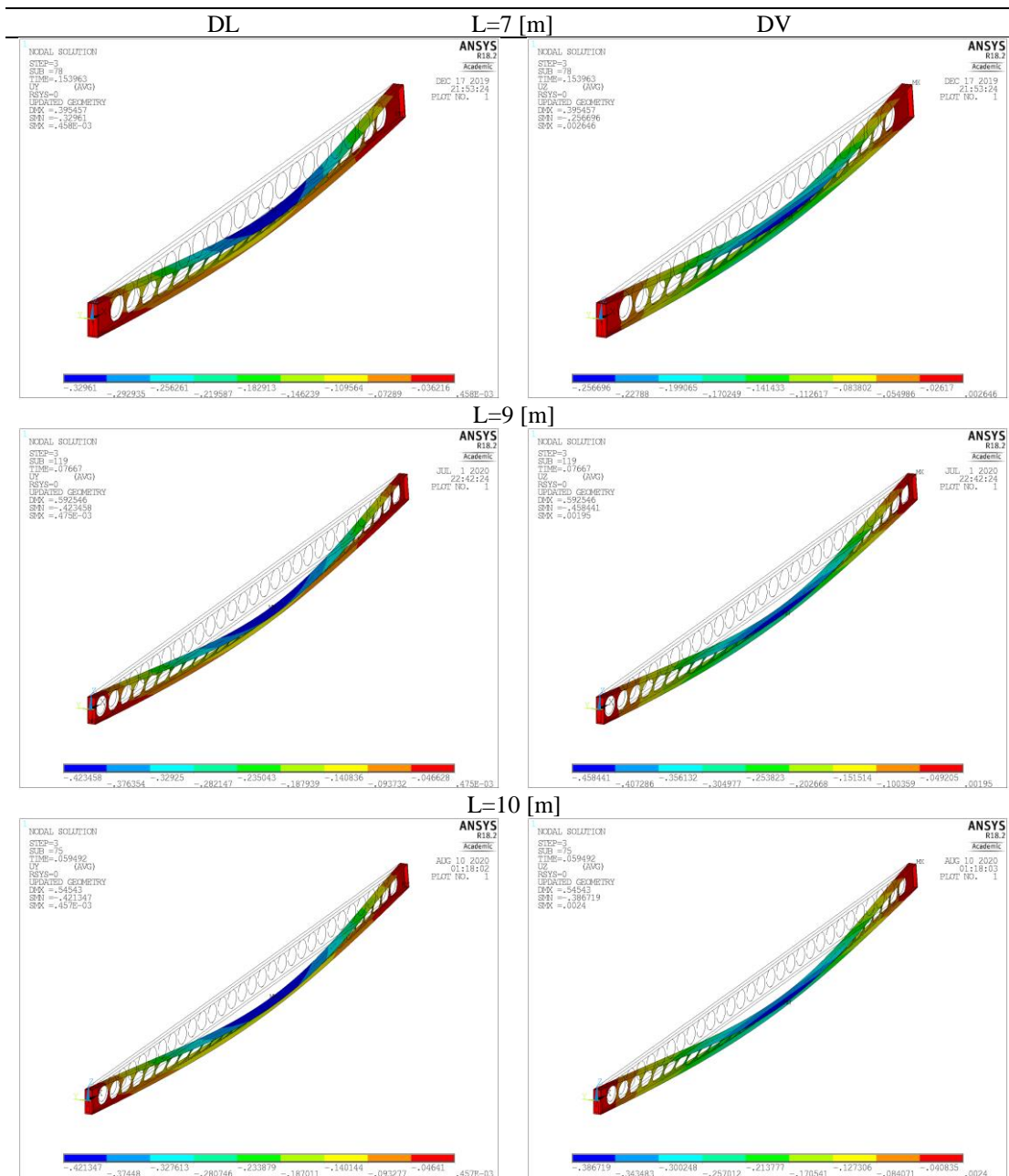
CASO – H=1,6h - 500 [°C]



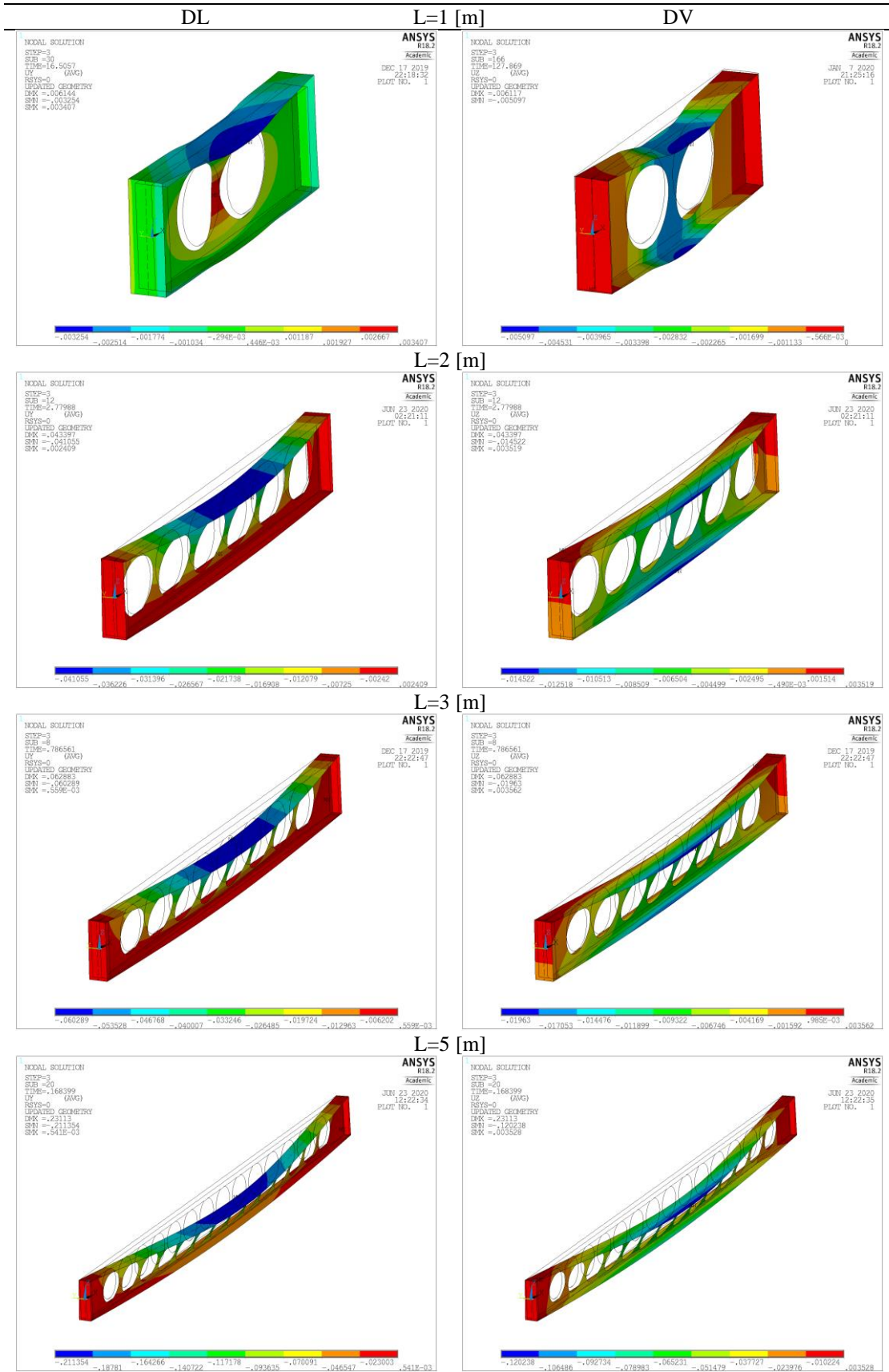
CASO – H=1,6h - 600 [°C]



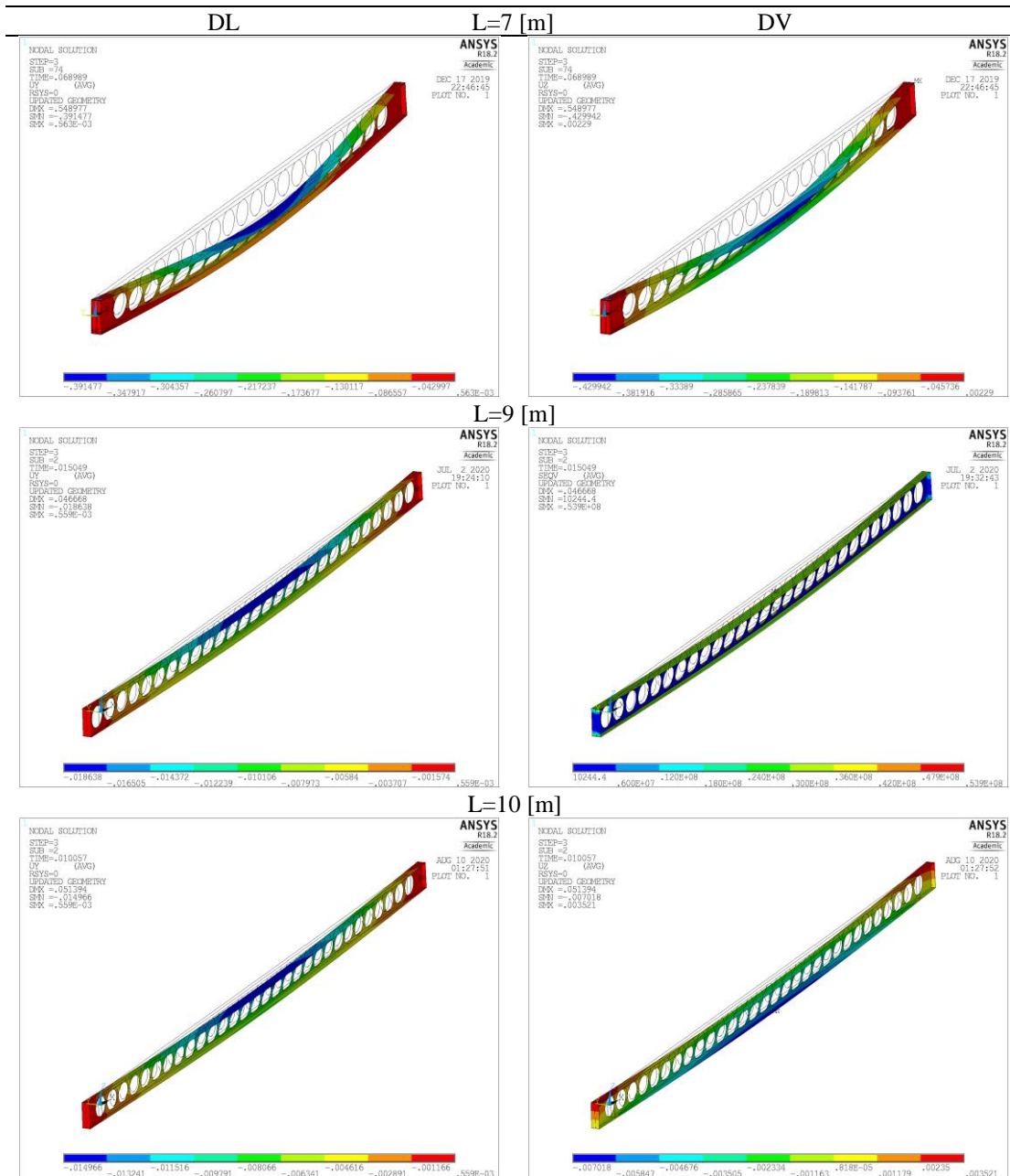
CASO – H=1,6h - 600 [°C]



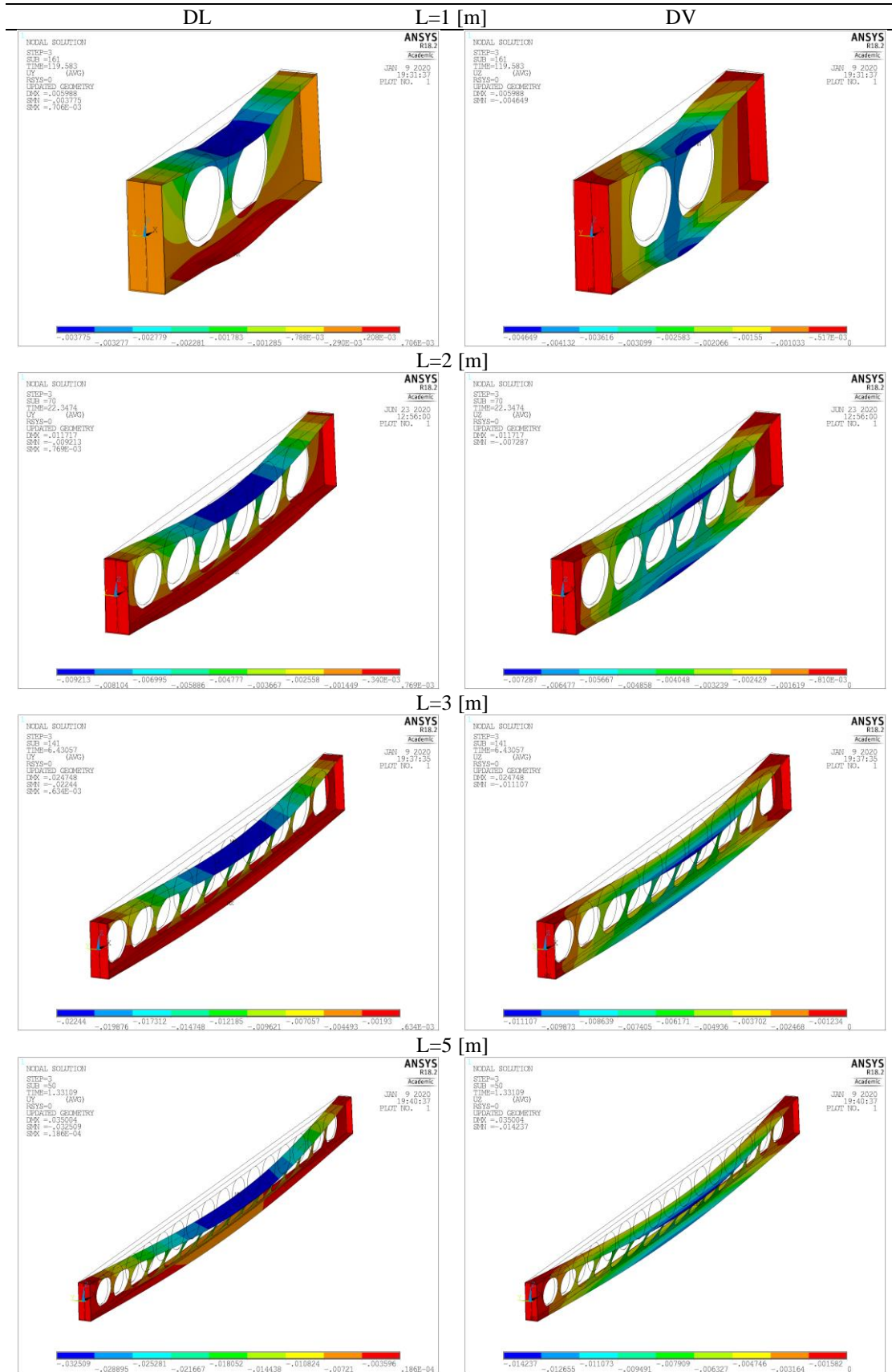
CASO – H=1,6h - 700 [°C]



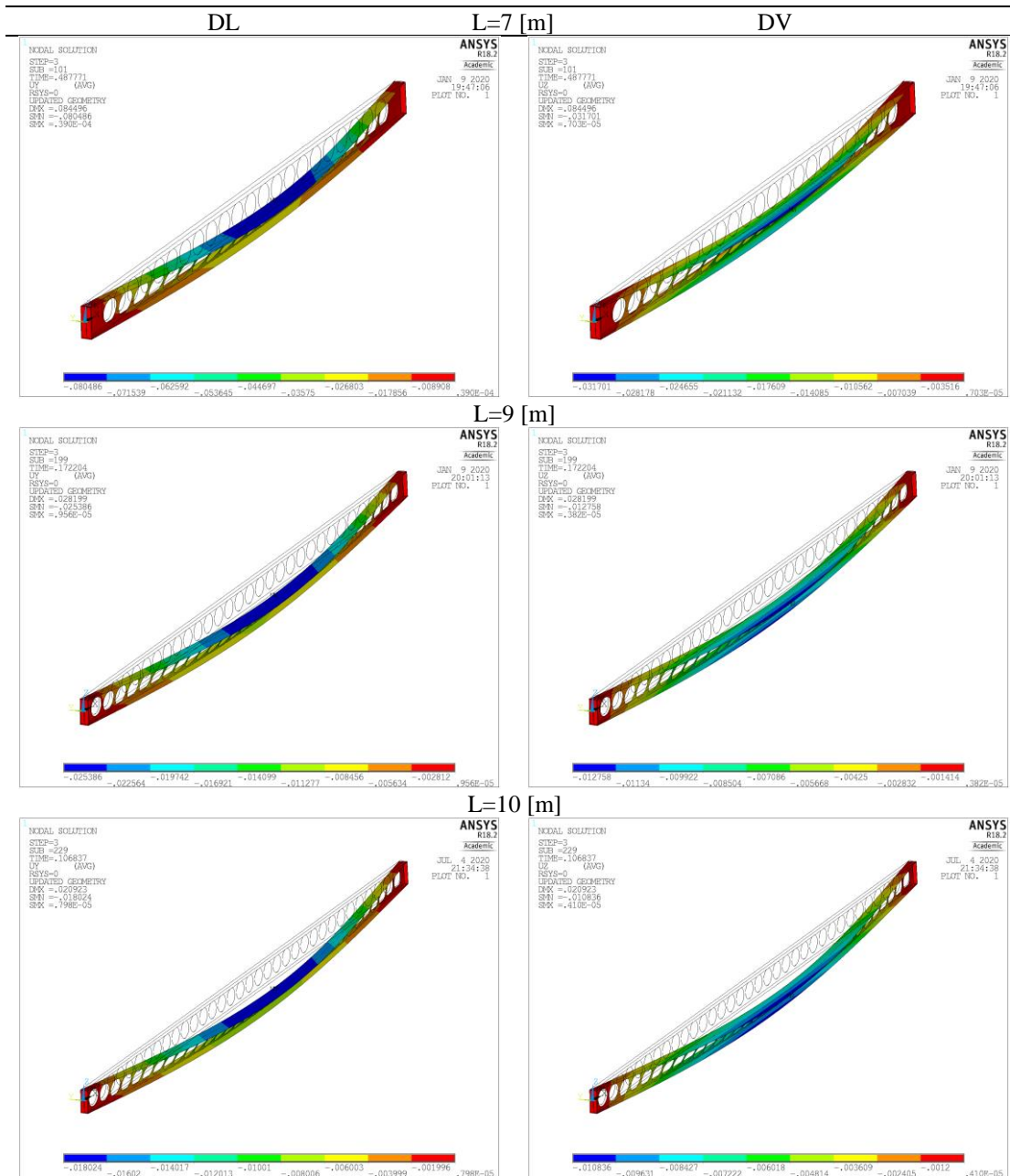
CASO – H=1,6h - 700 [°C]



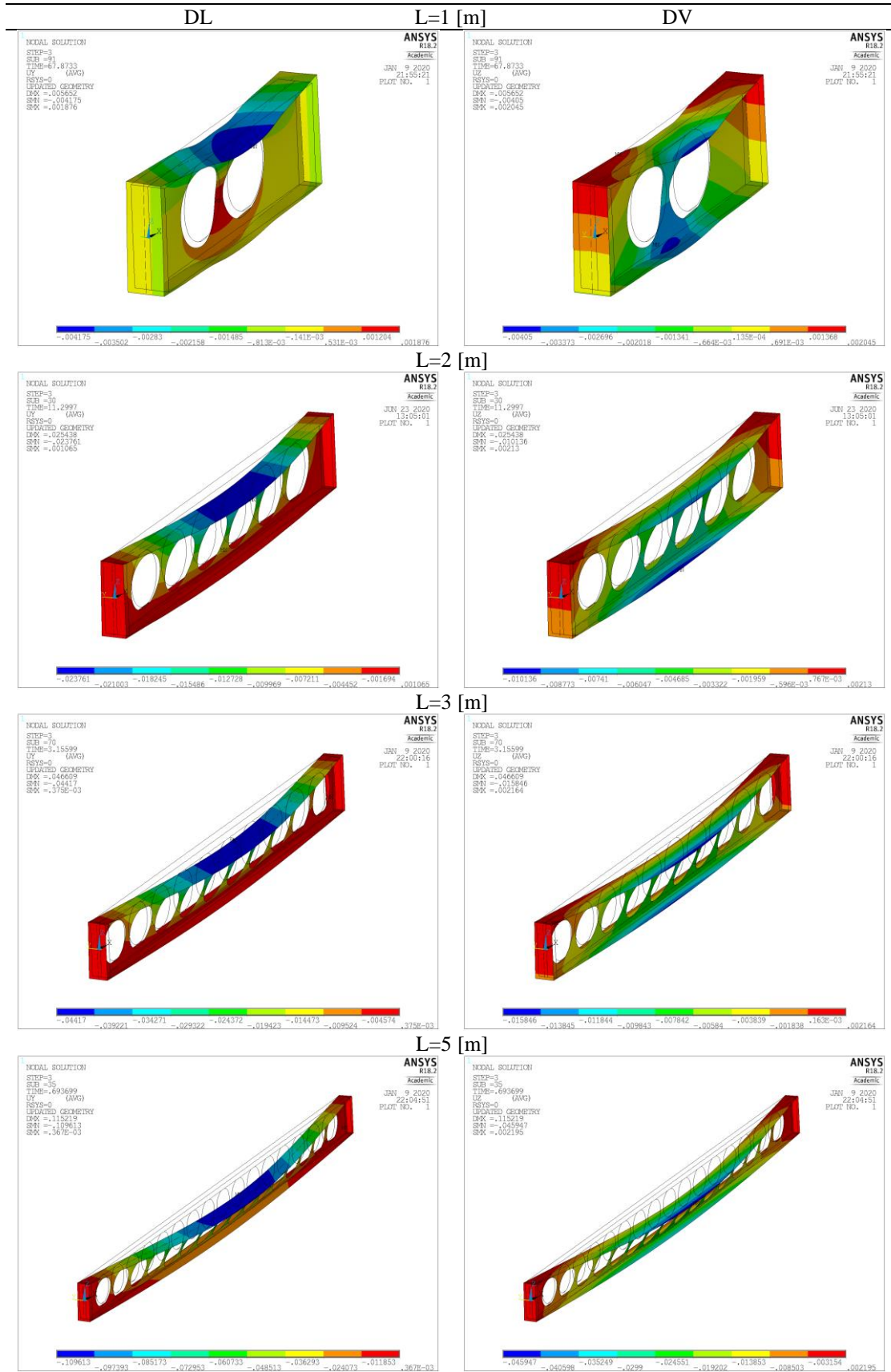
CASO –  $d_0=1,1h - 20 [^{\circ}C]$



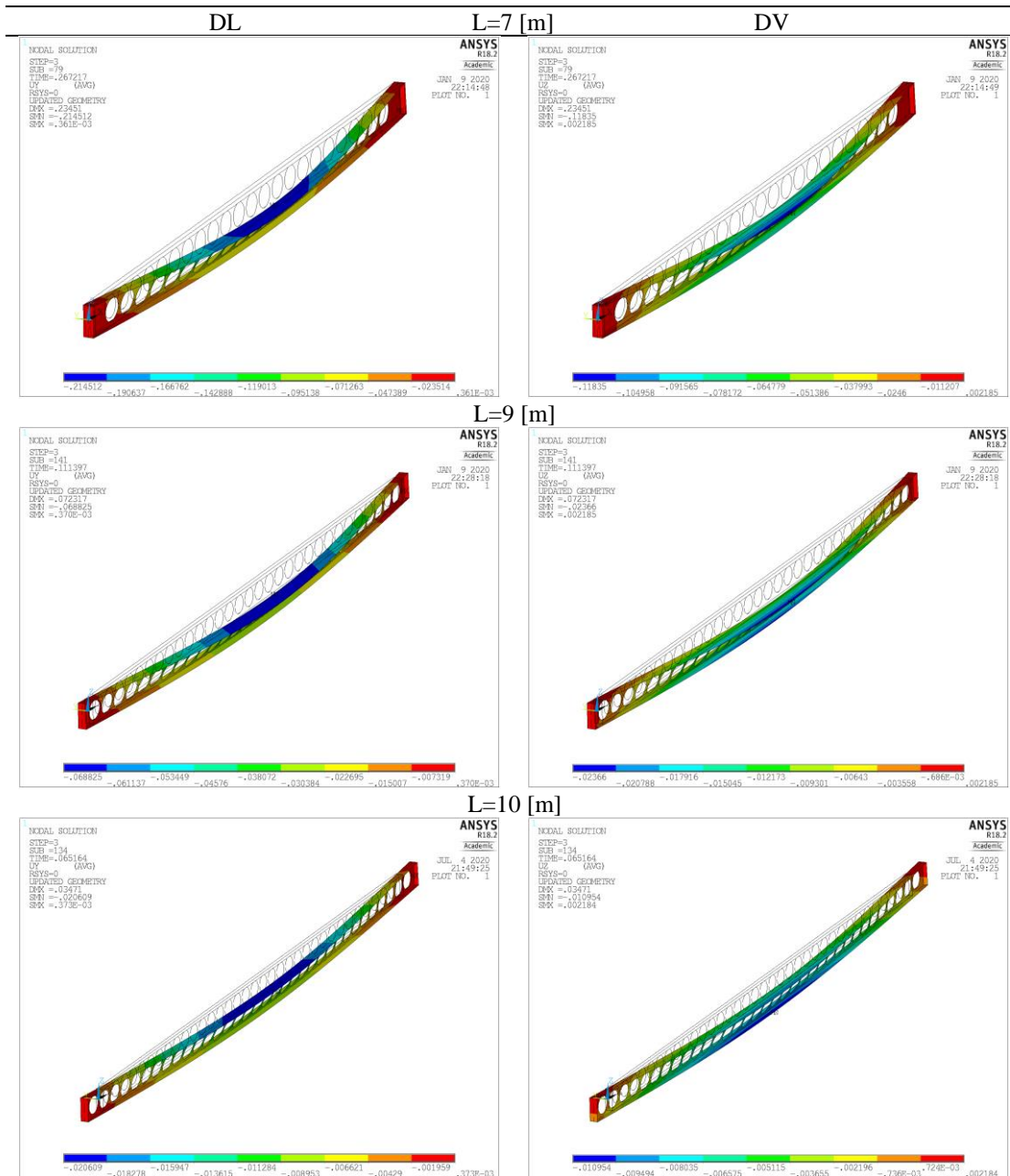
CASO –  $d_0=1,1h - 20 [^{\circ}C]$



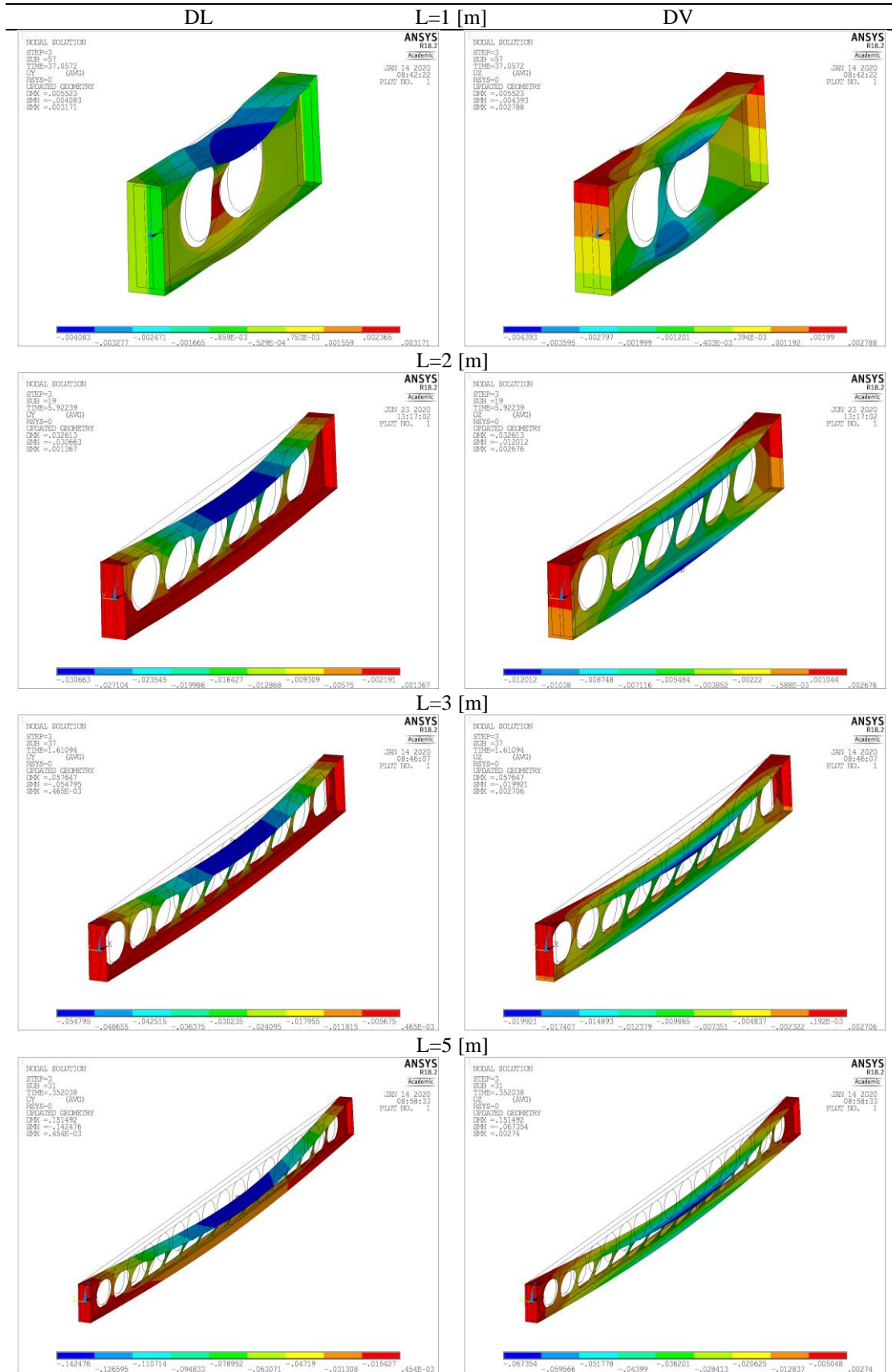
CASO –  $d_0=1,1h - 500 [^{\circ}C]$



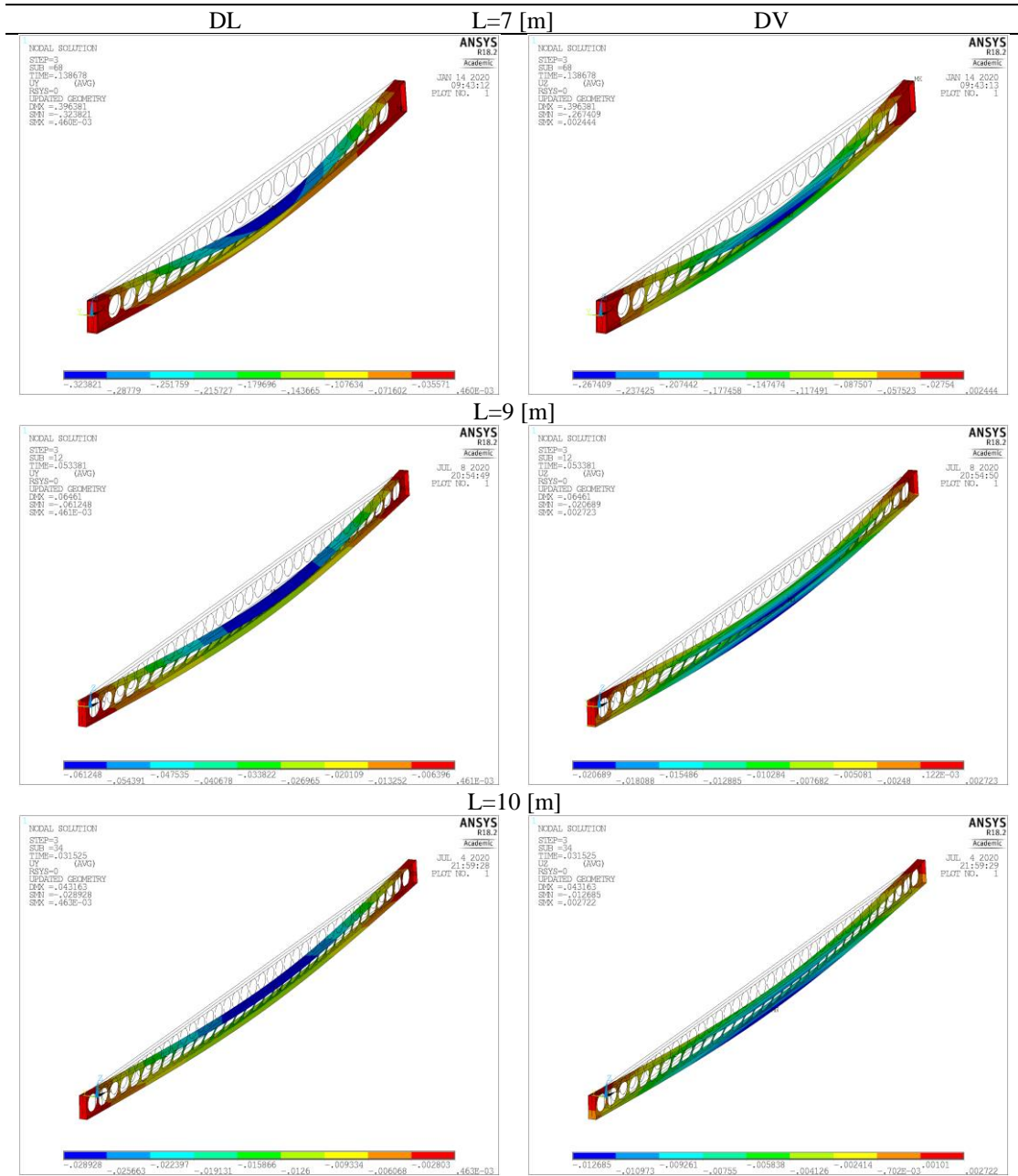
CASO –  $d_0=1,1h - 500 [^{\circ}C]$



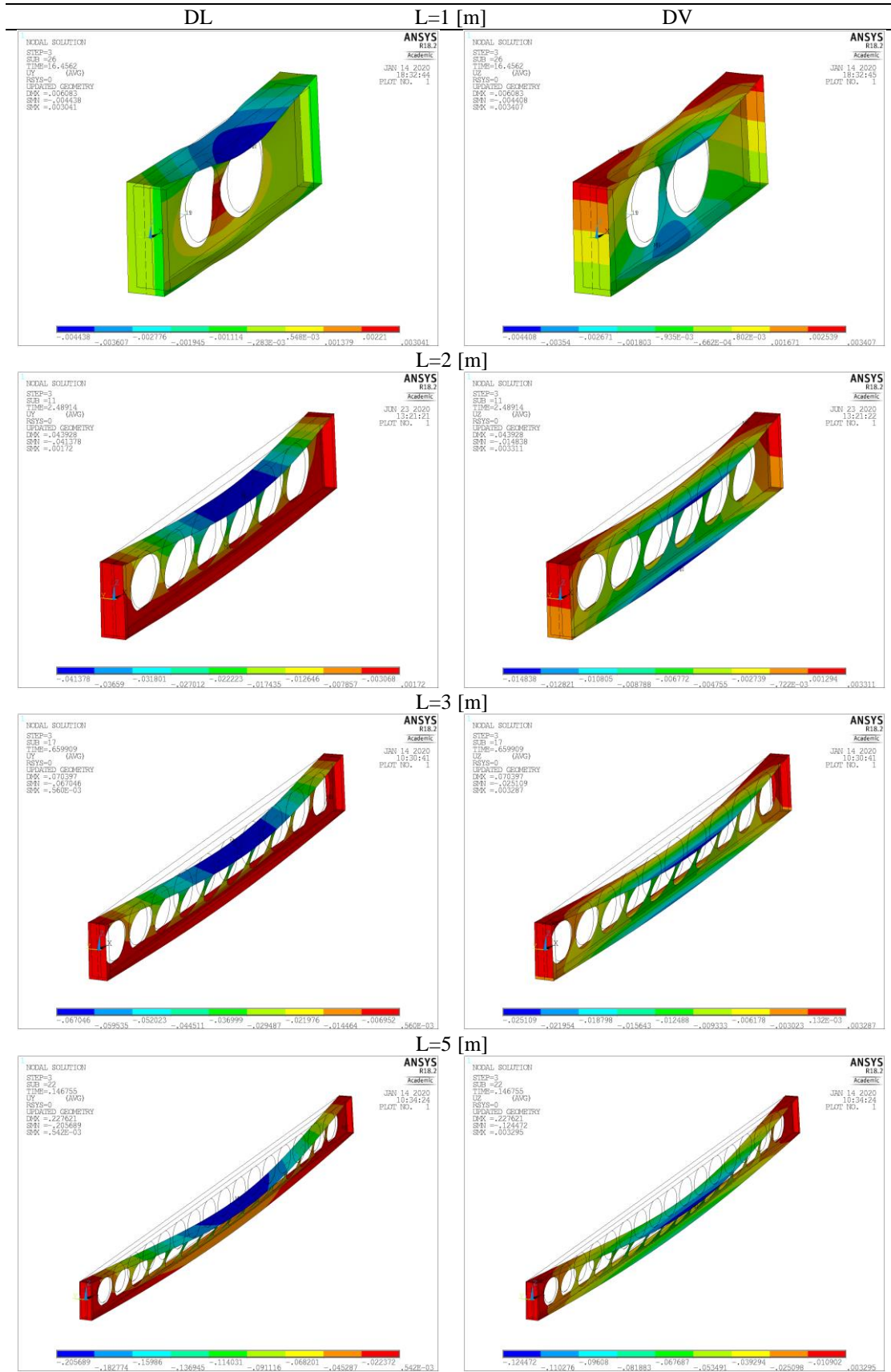
CASO –  $d_0=1,1h - 600 [^{\circ}C]$



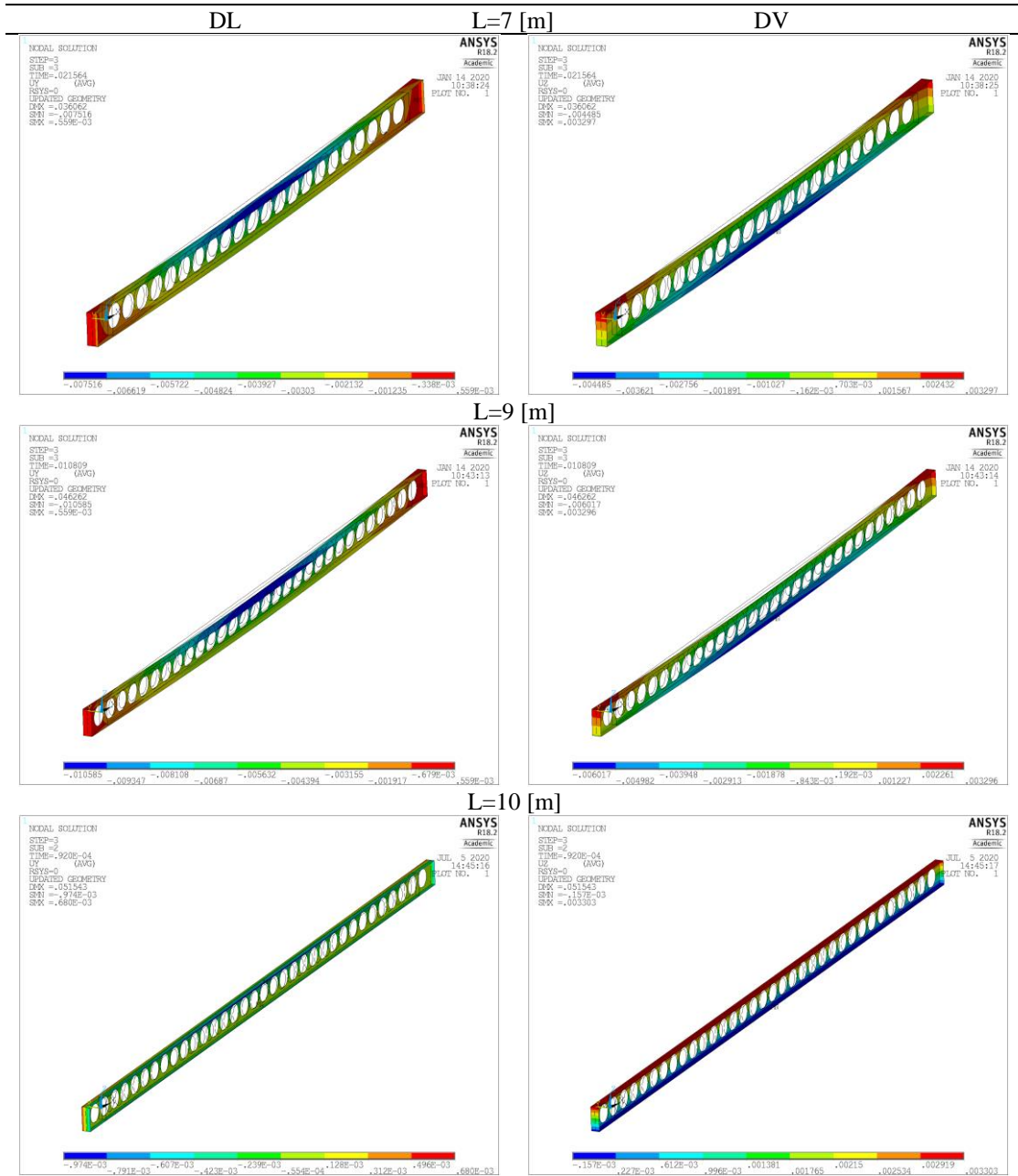
CASO –  $d_0=1,1h - 600 [^{\circ}C]$



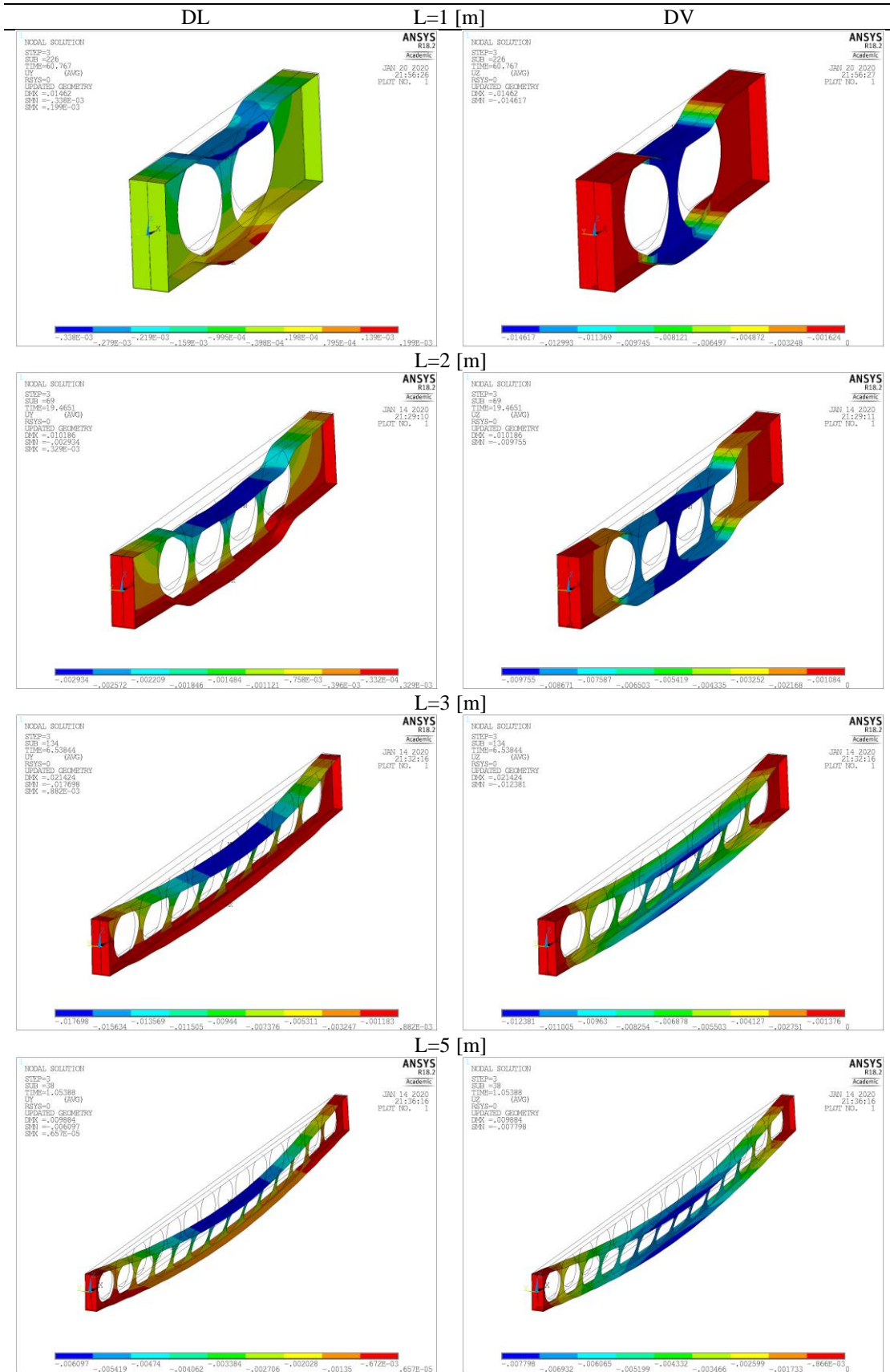
CASO –  $d_0=1,1h - 700 [^{\circ}C]$



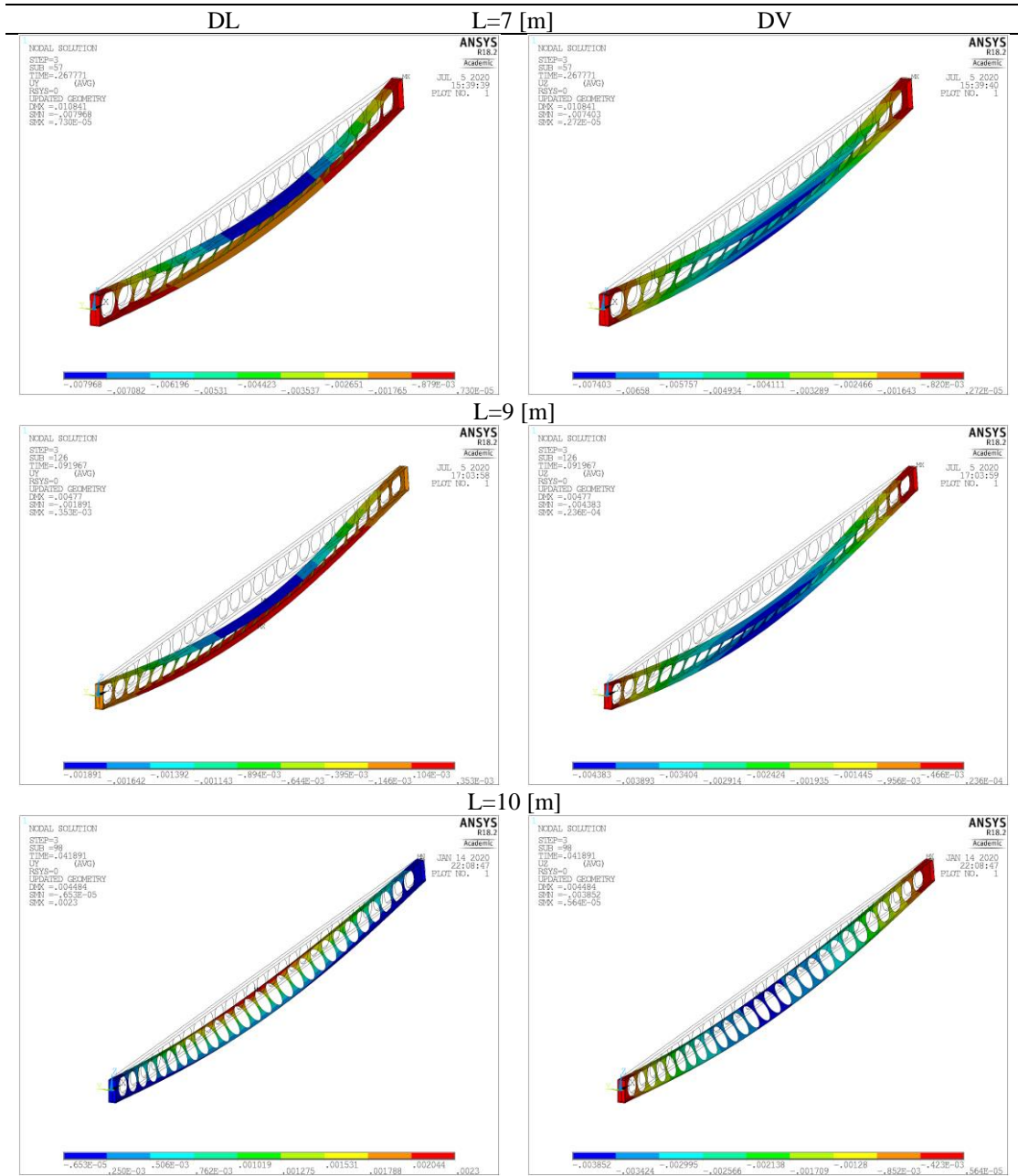
CASO –  $d_0=1,1h - 700 [^{\circ}C]$



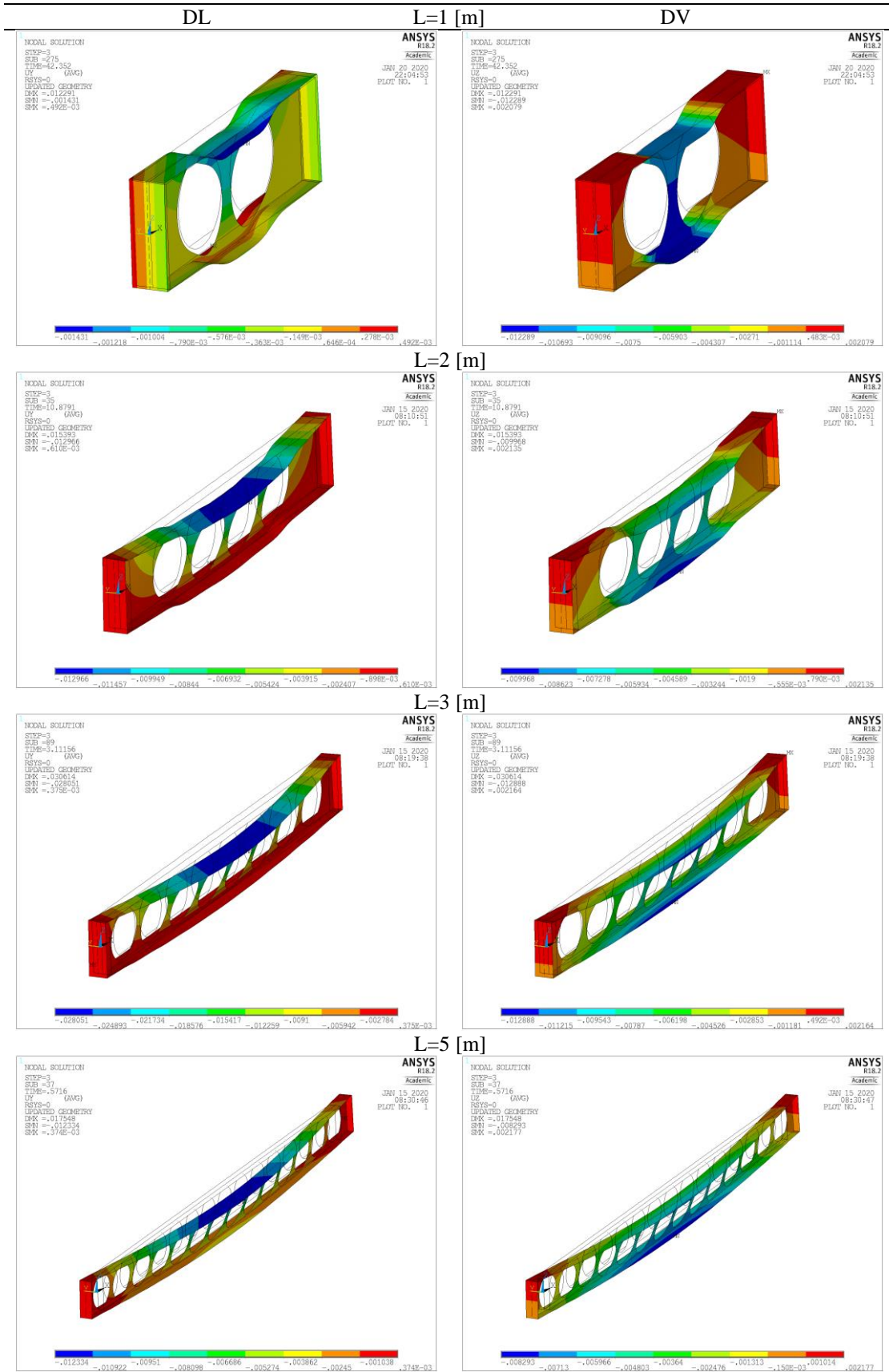
CASO –  $d_0=1,3h - 20 [^{\circ}C]$



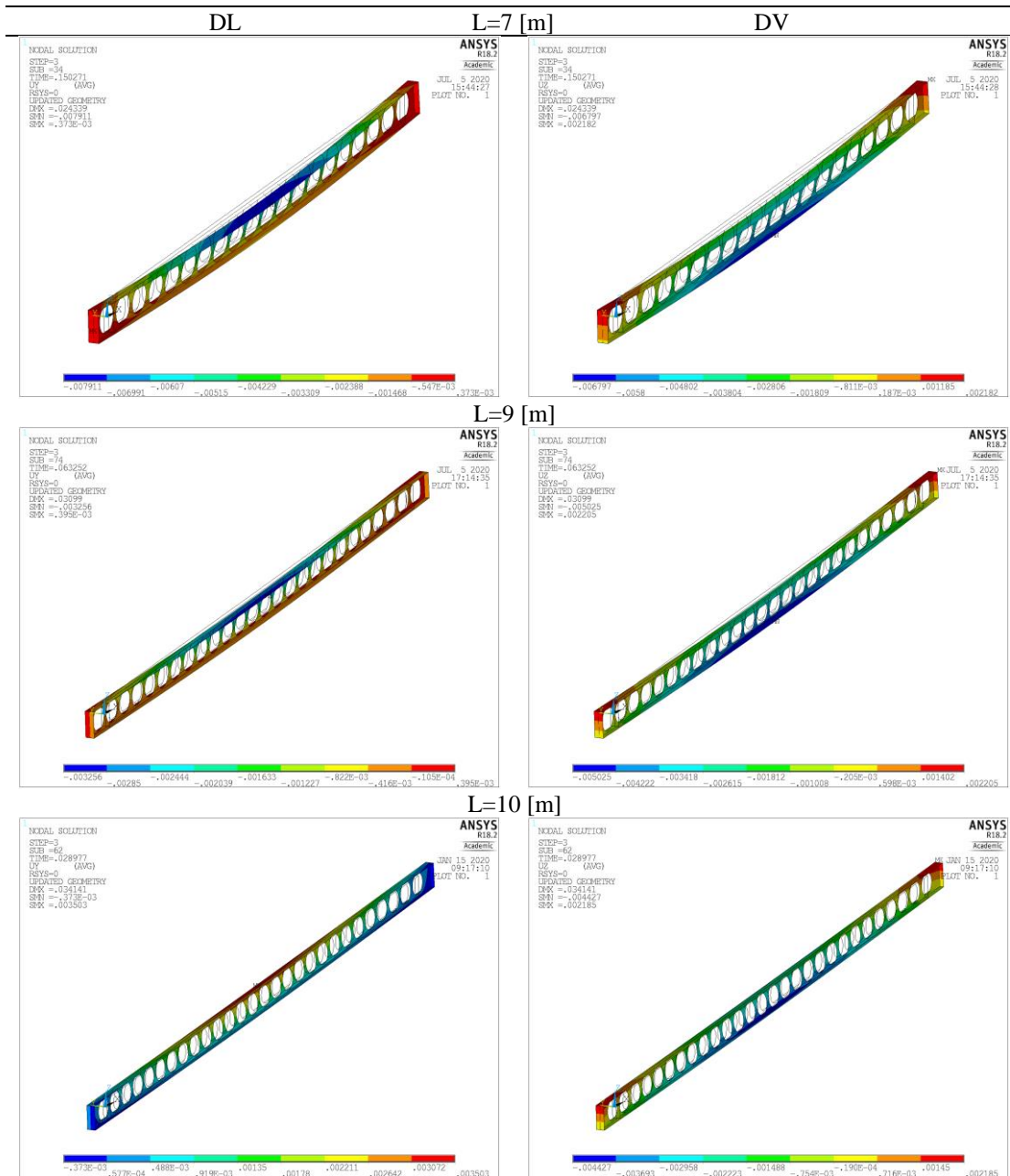
CASO –  $d_0=1,3h - 20 [^{\circ}C]$



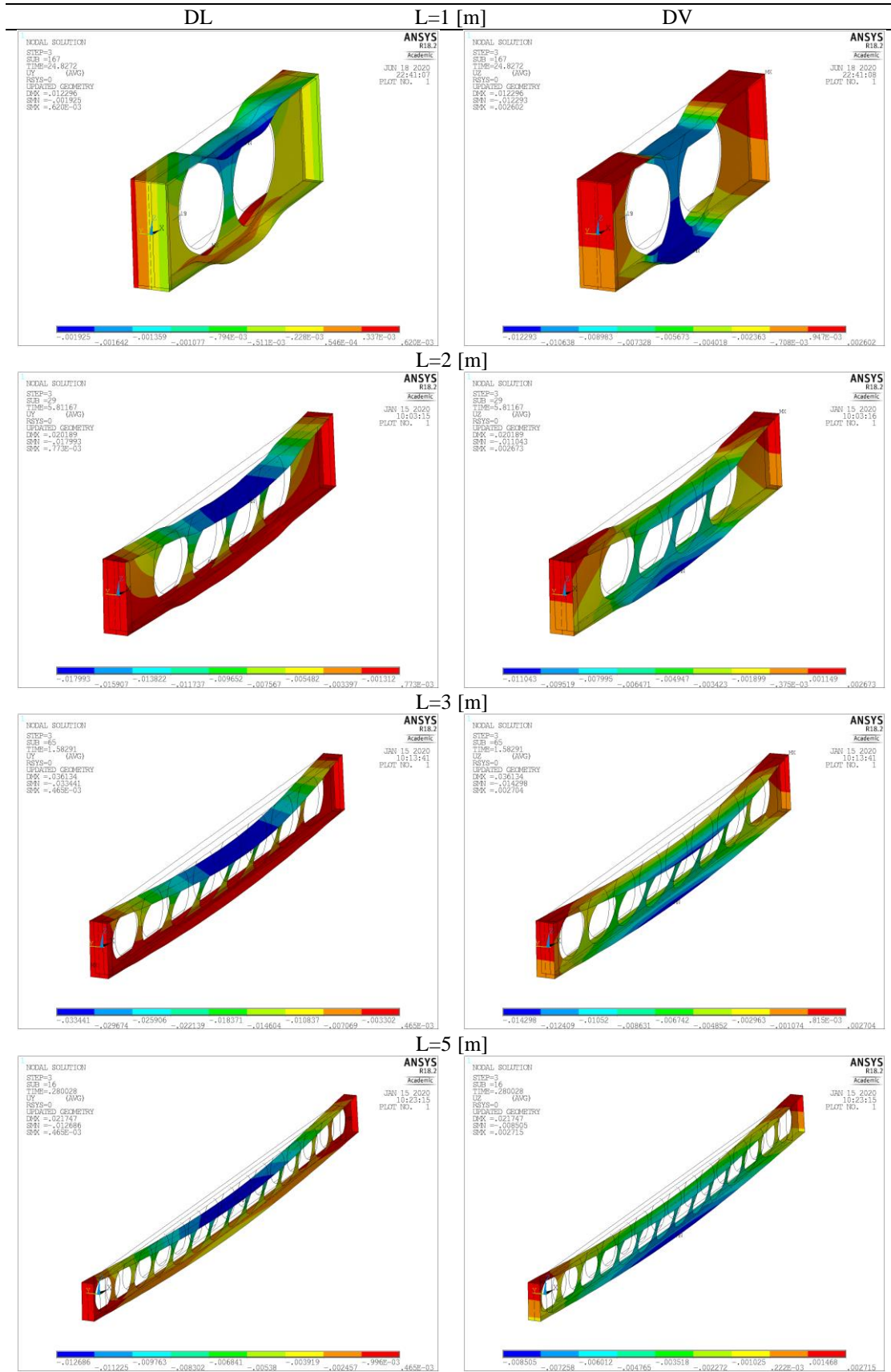
CASO –  $d_0=1,3h - 500 [^{\circ}C]$



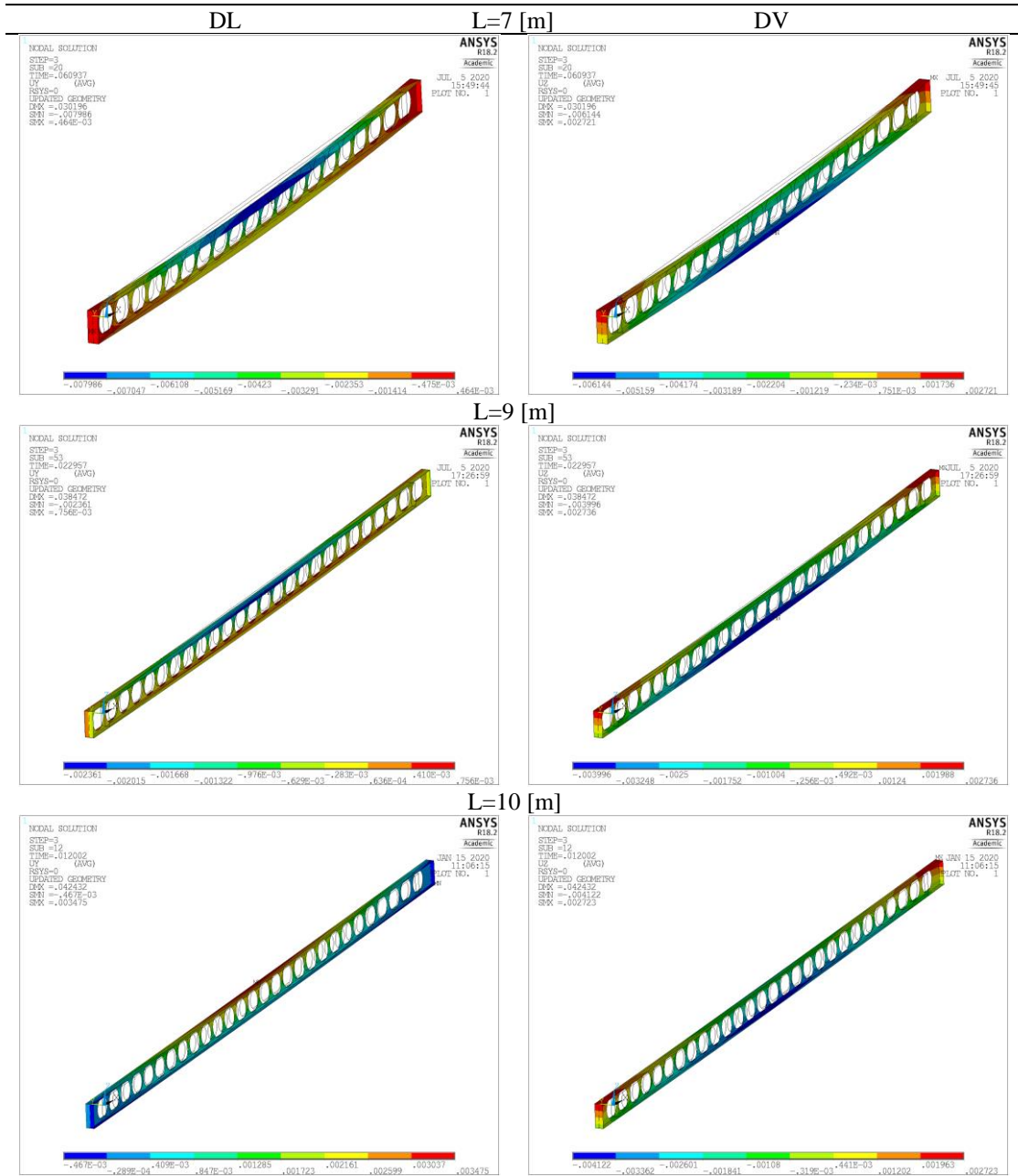
CASO –  $d_0=1,3h$  - 500 [°C]



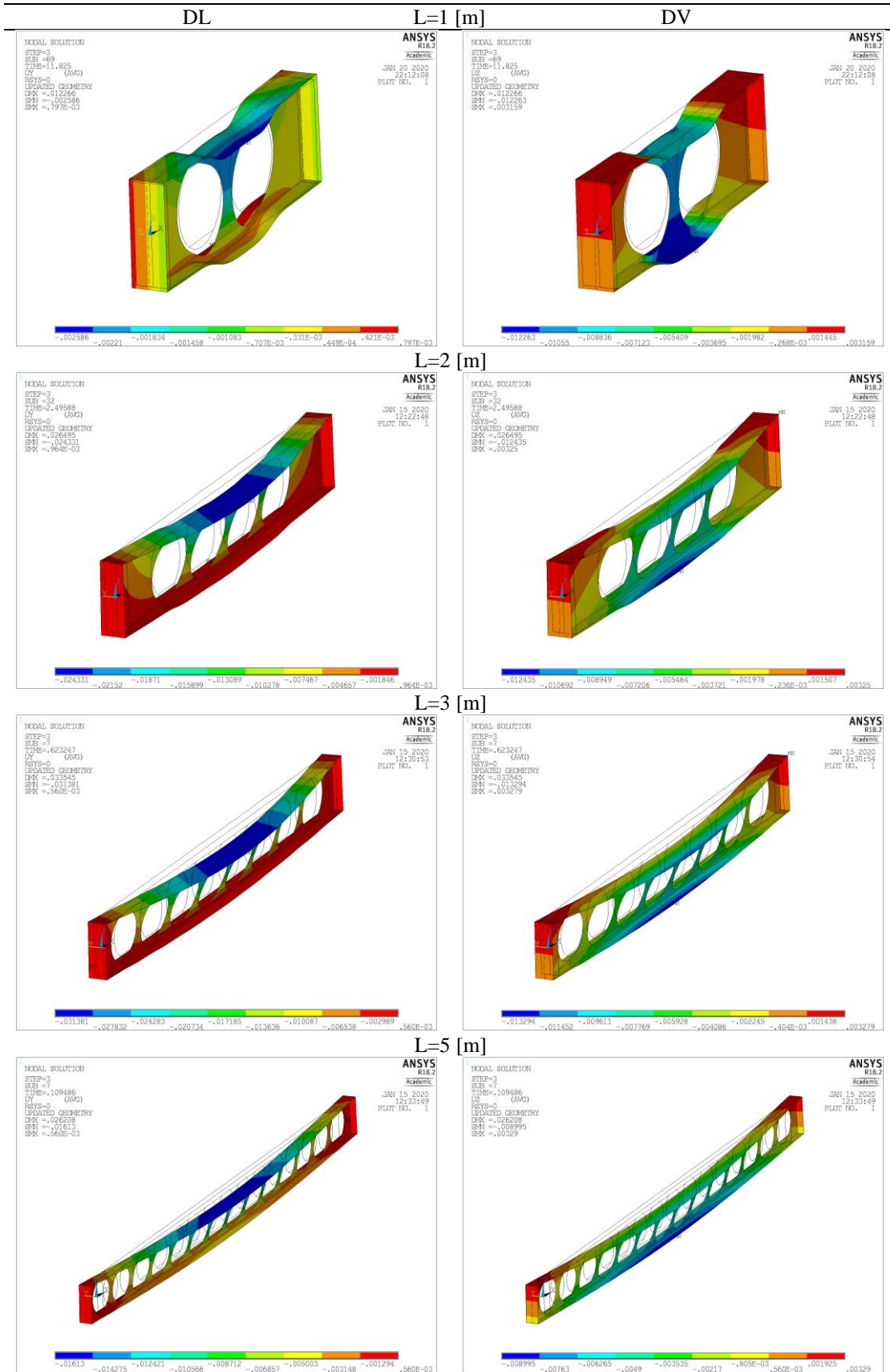
CASO –  $d_0=1,3h - 600 [^{\circ}C]$



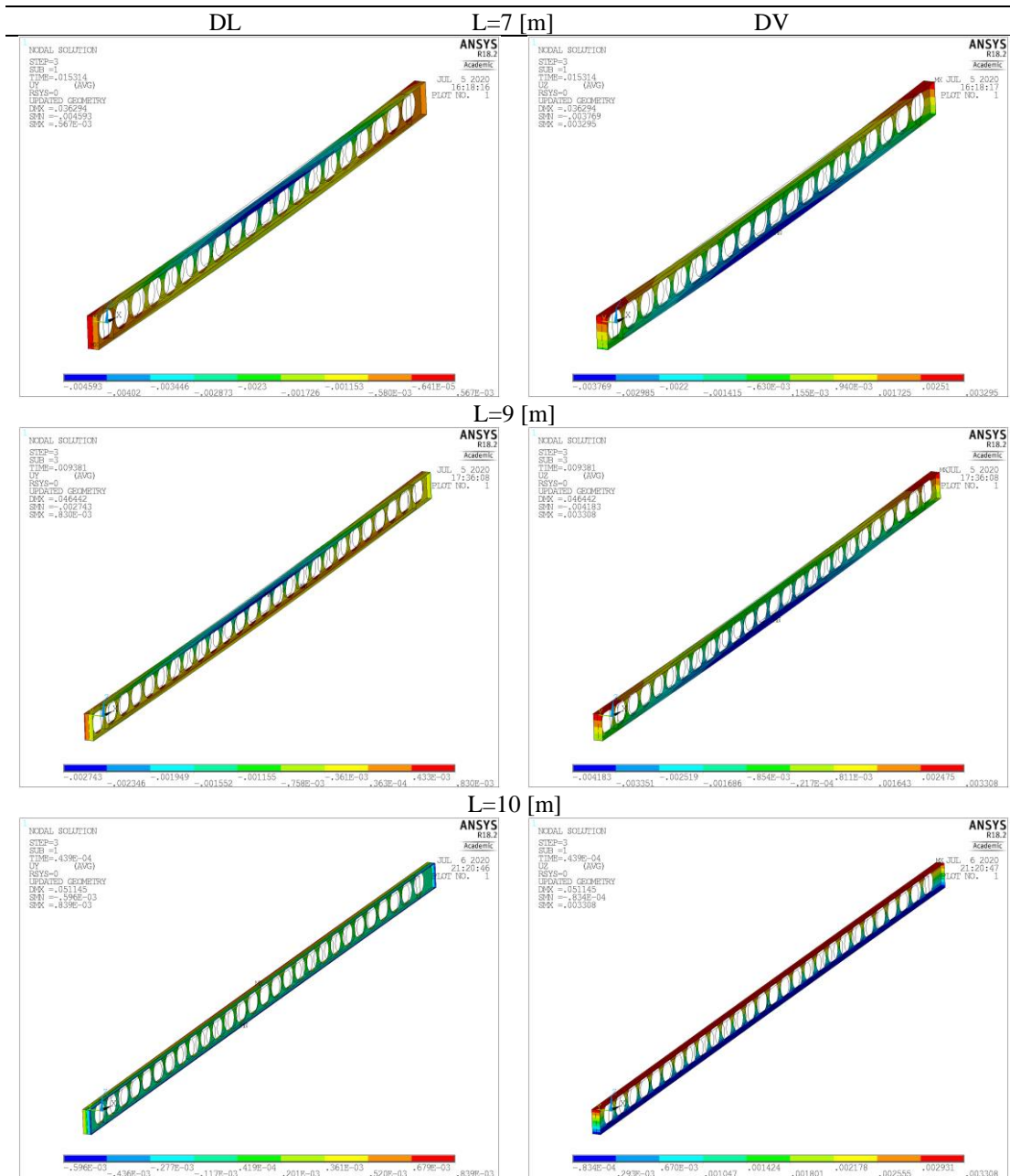
CASO –  $d_0=1,3h - 600 [^{\circ}C]$



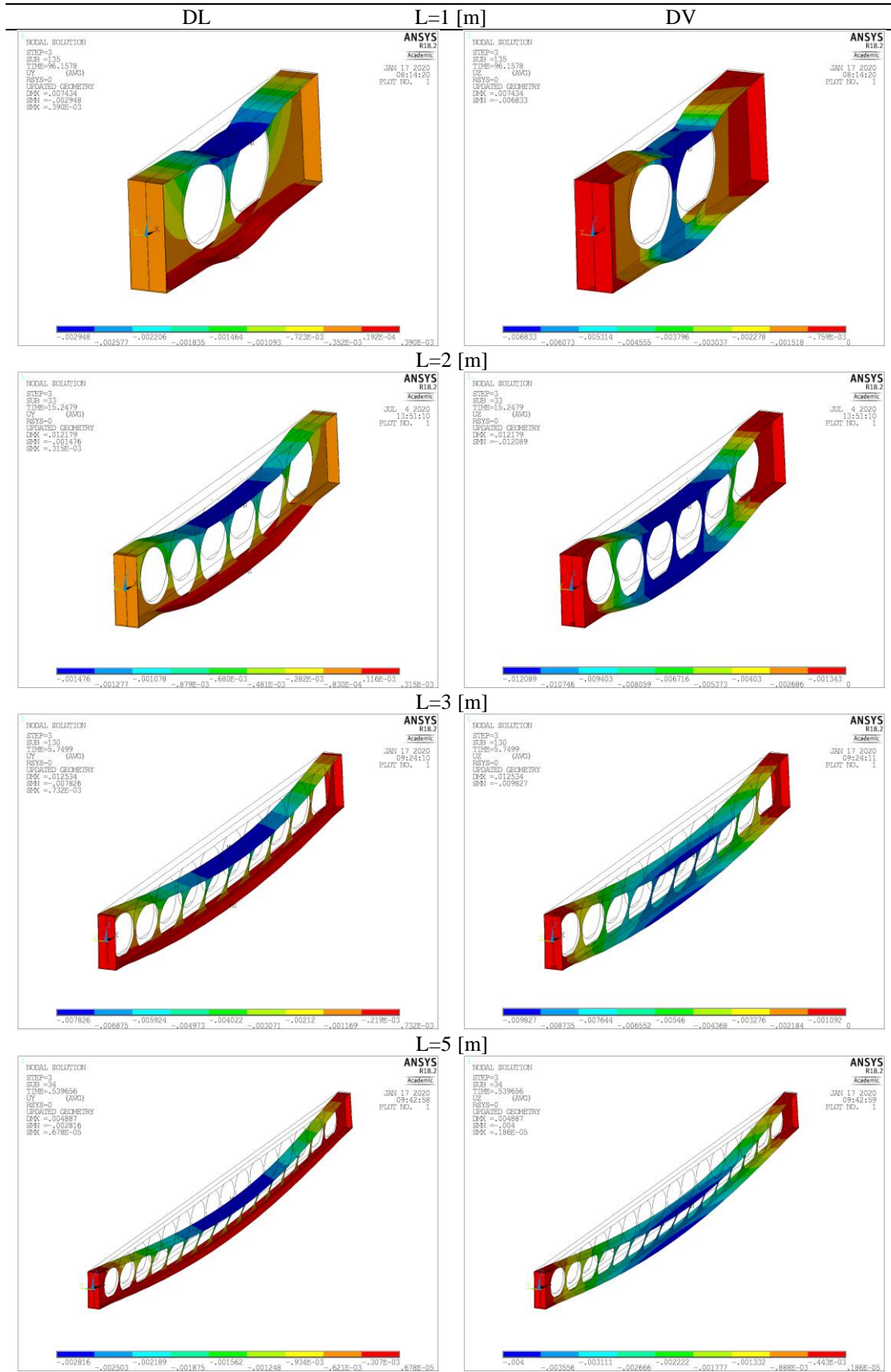
CASO –  $d_0=1,3h - 700 [^{\circ}\text{C}]$



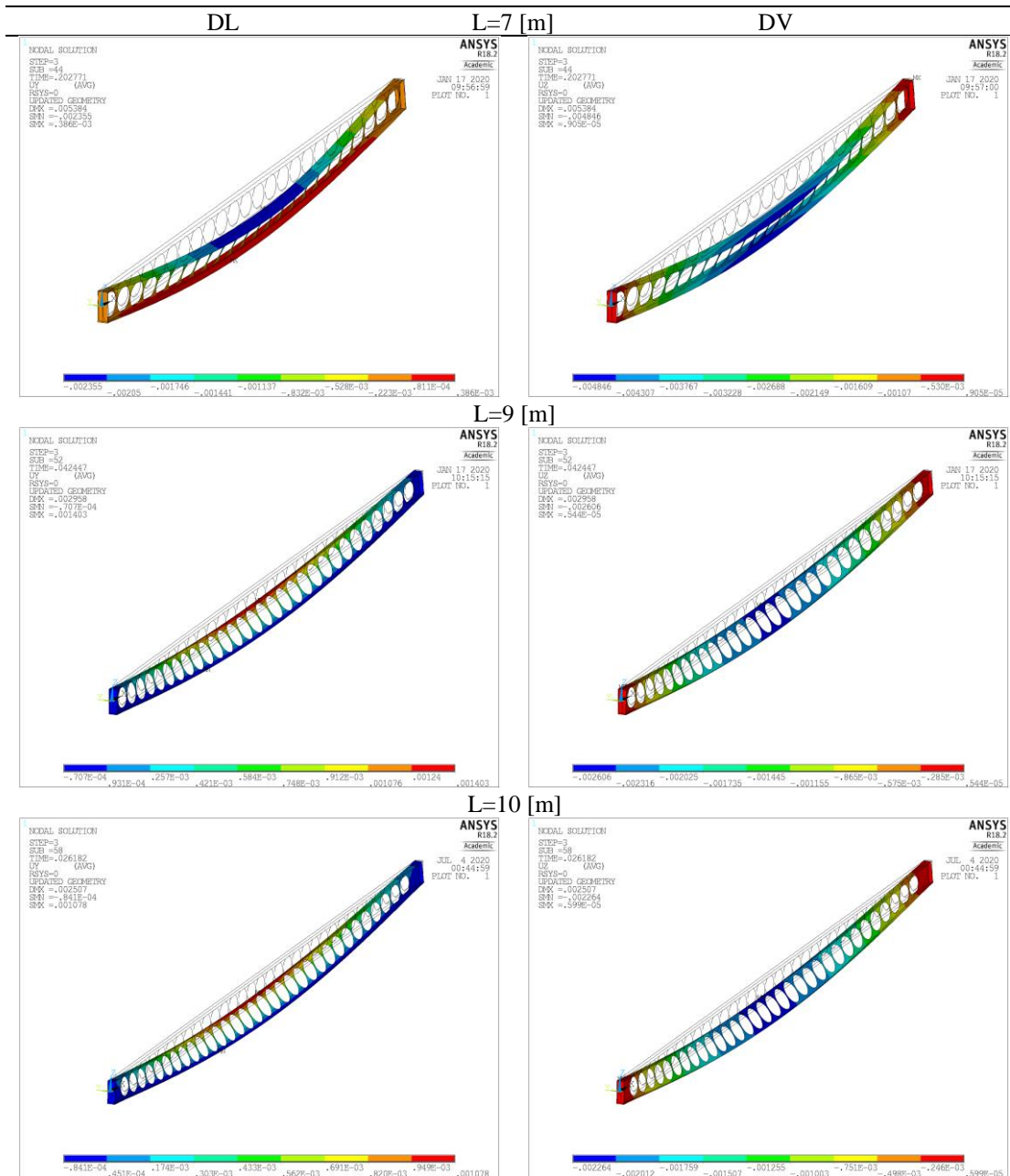
CASO –  $d_0=1,3h - 700 [^{\circ}C]$



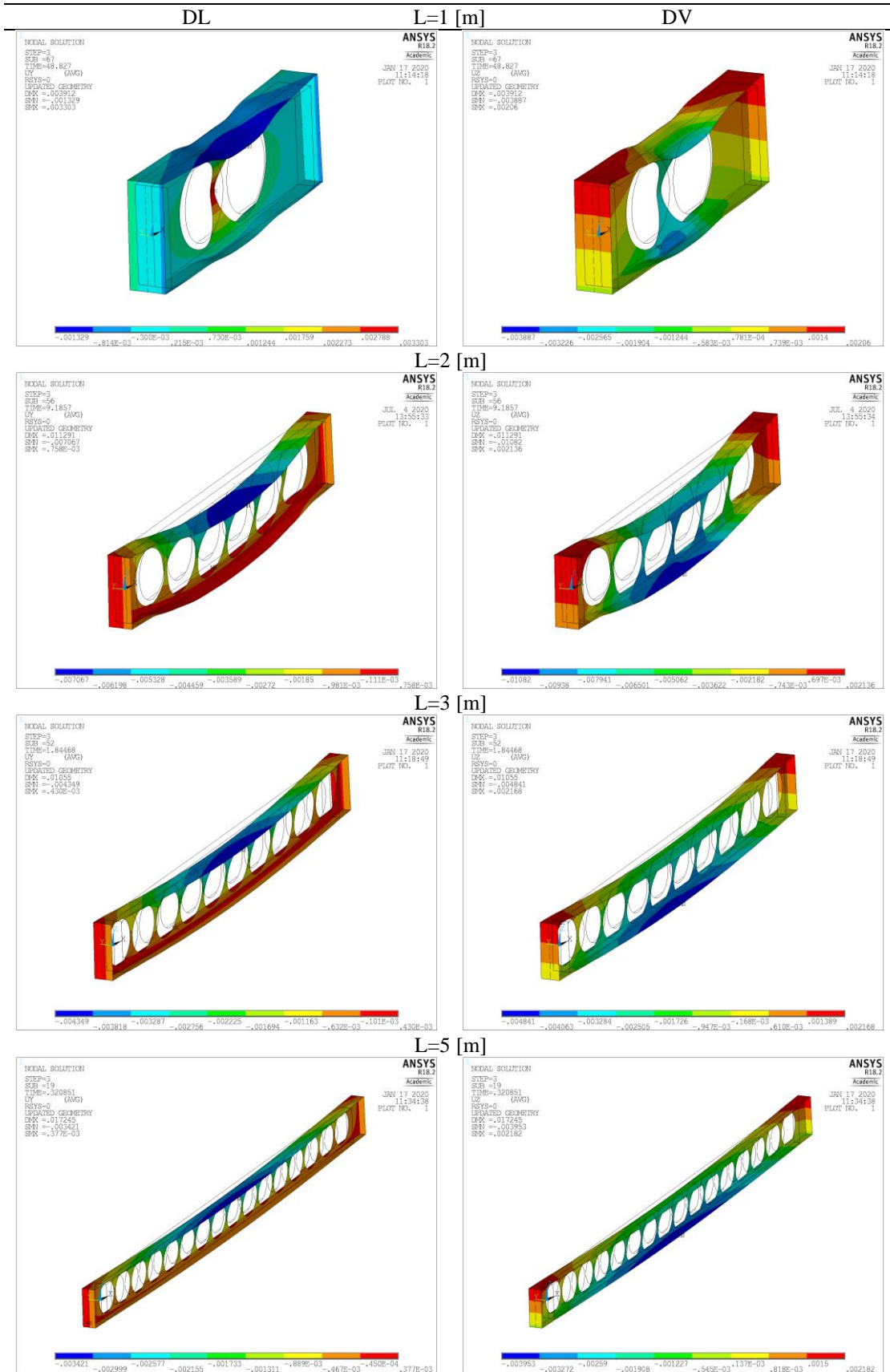
CASO –  $S=1,1d_0 - 20 [^{\circ}\text{C}]$



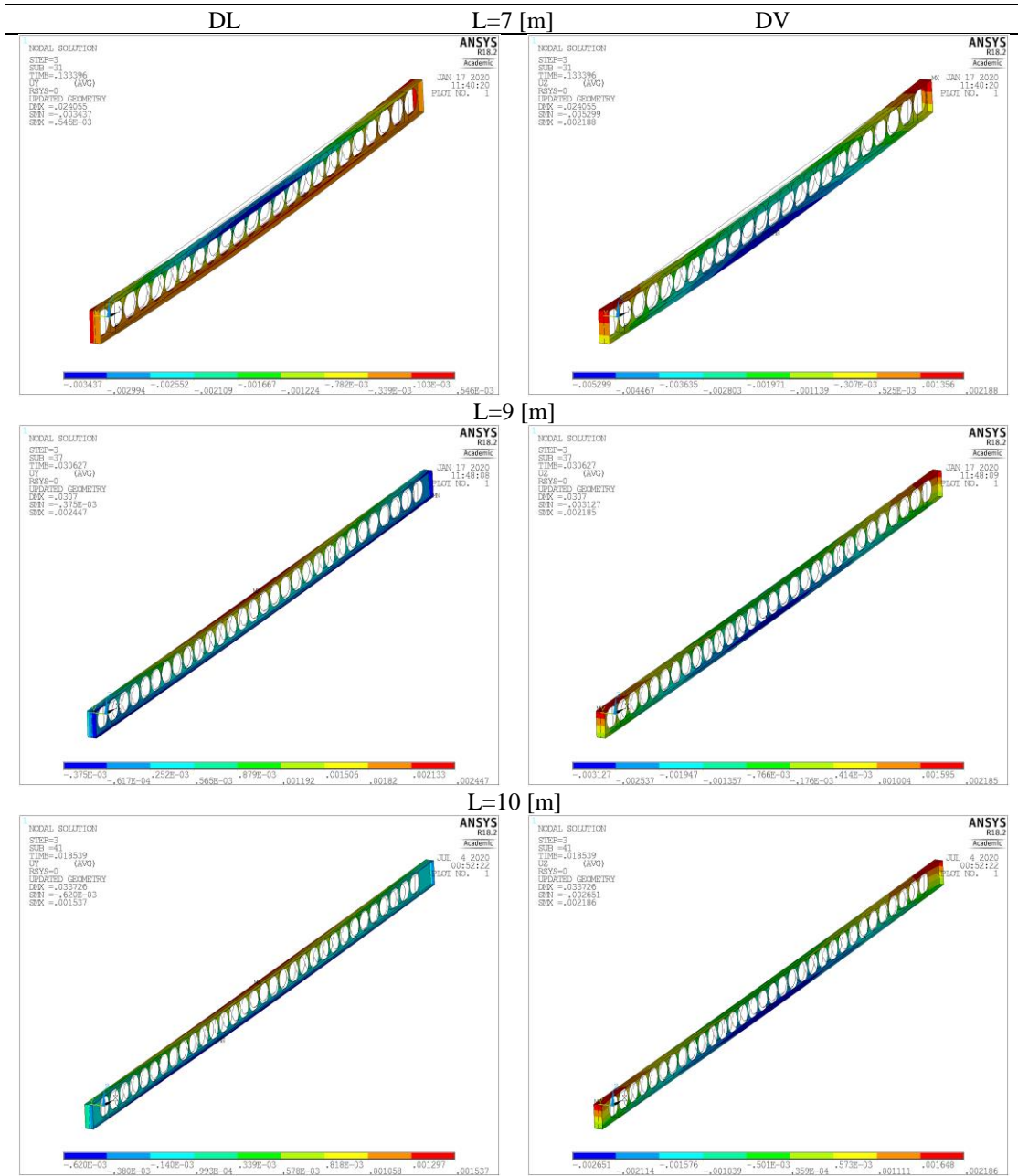
CASO – S=1,1d<sub>0</sub> - 20 [°C]



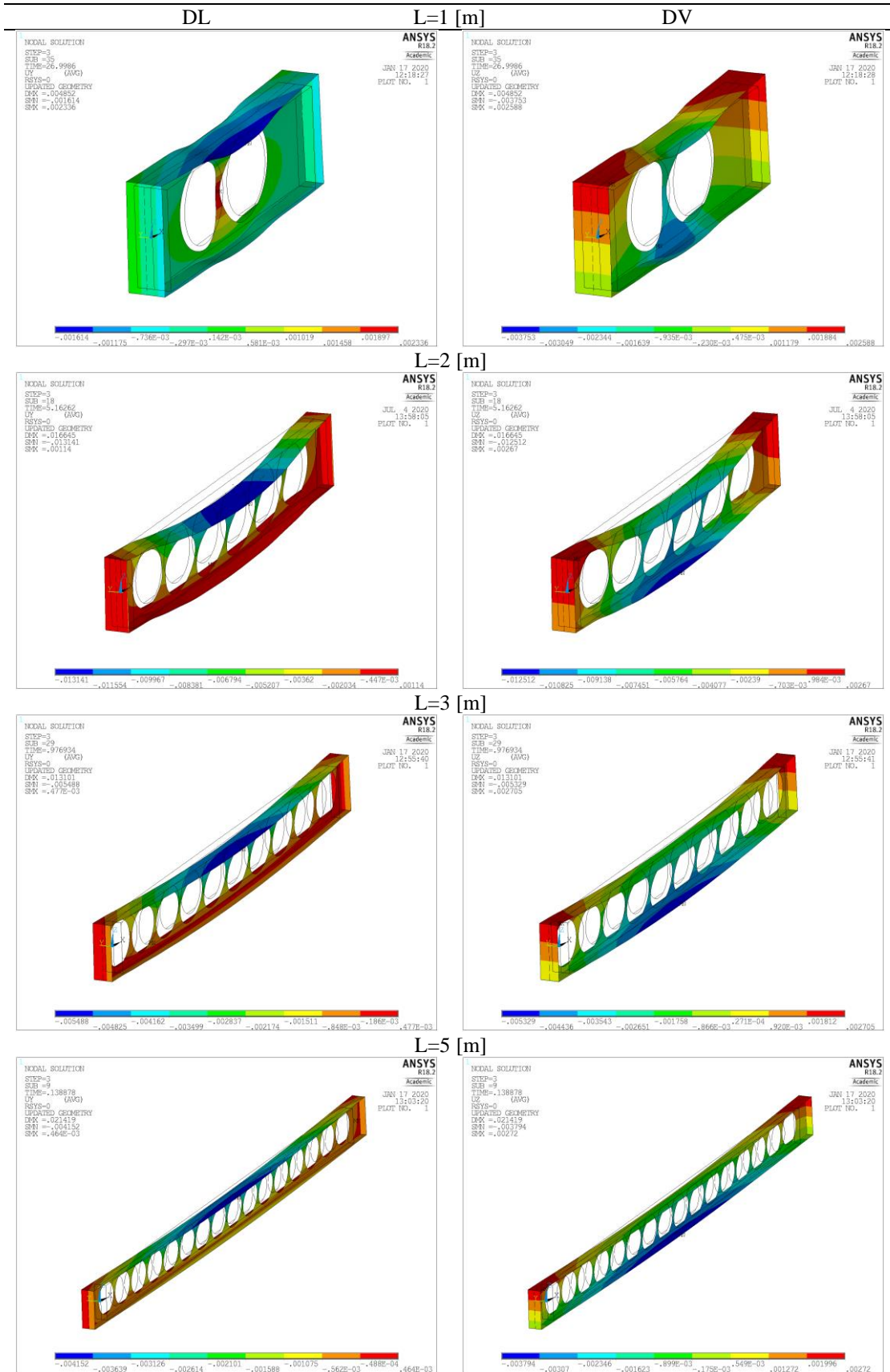
CASO – S=1,  $1d_0$  - 500 [°C]



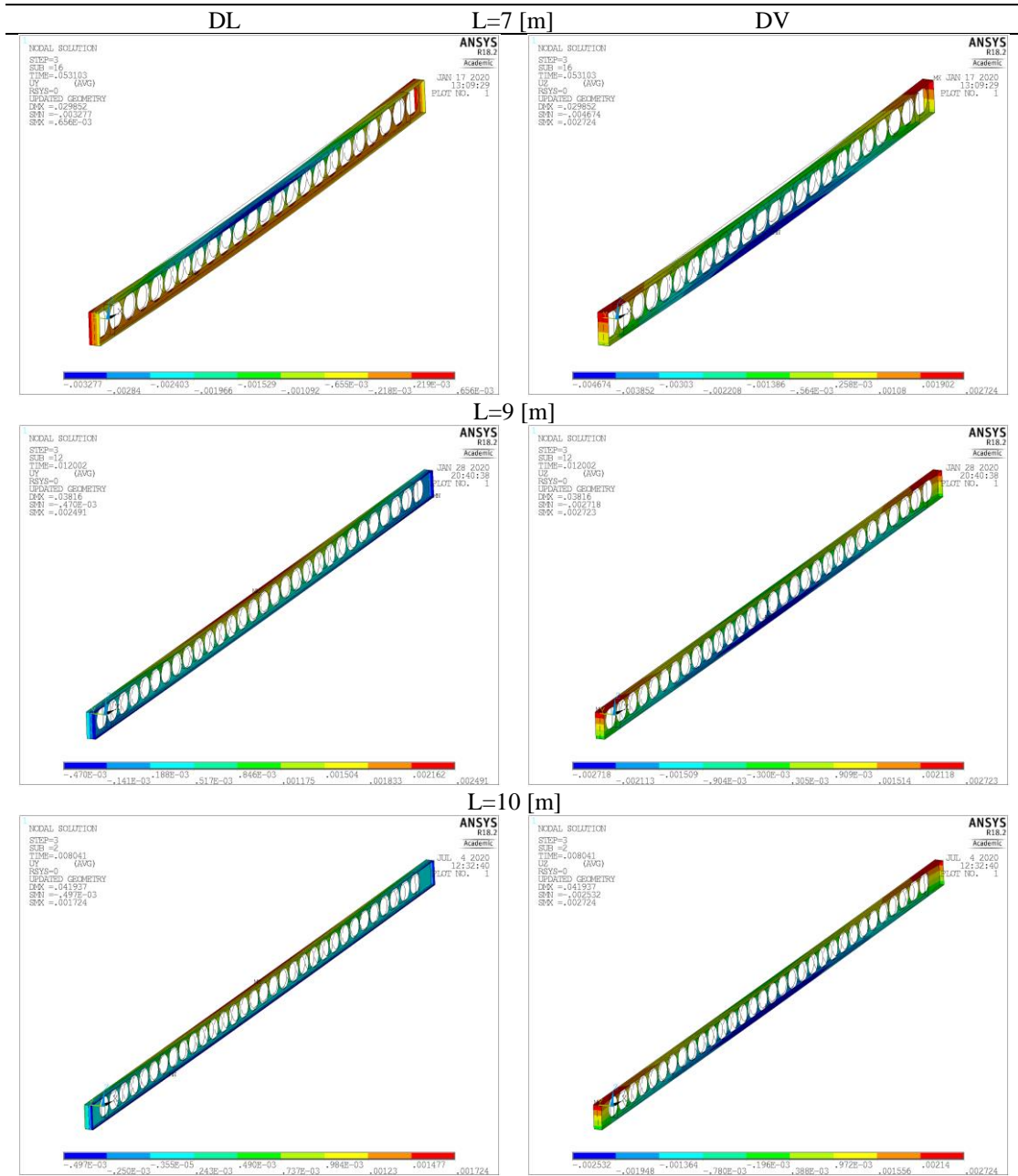
CASO – S=1,1d<sub>0</sub> - 500 [°C]



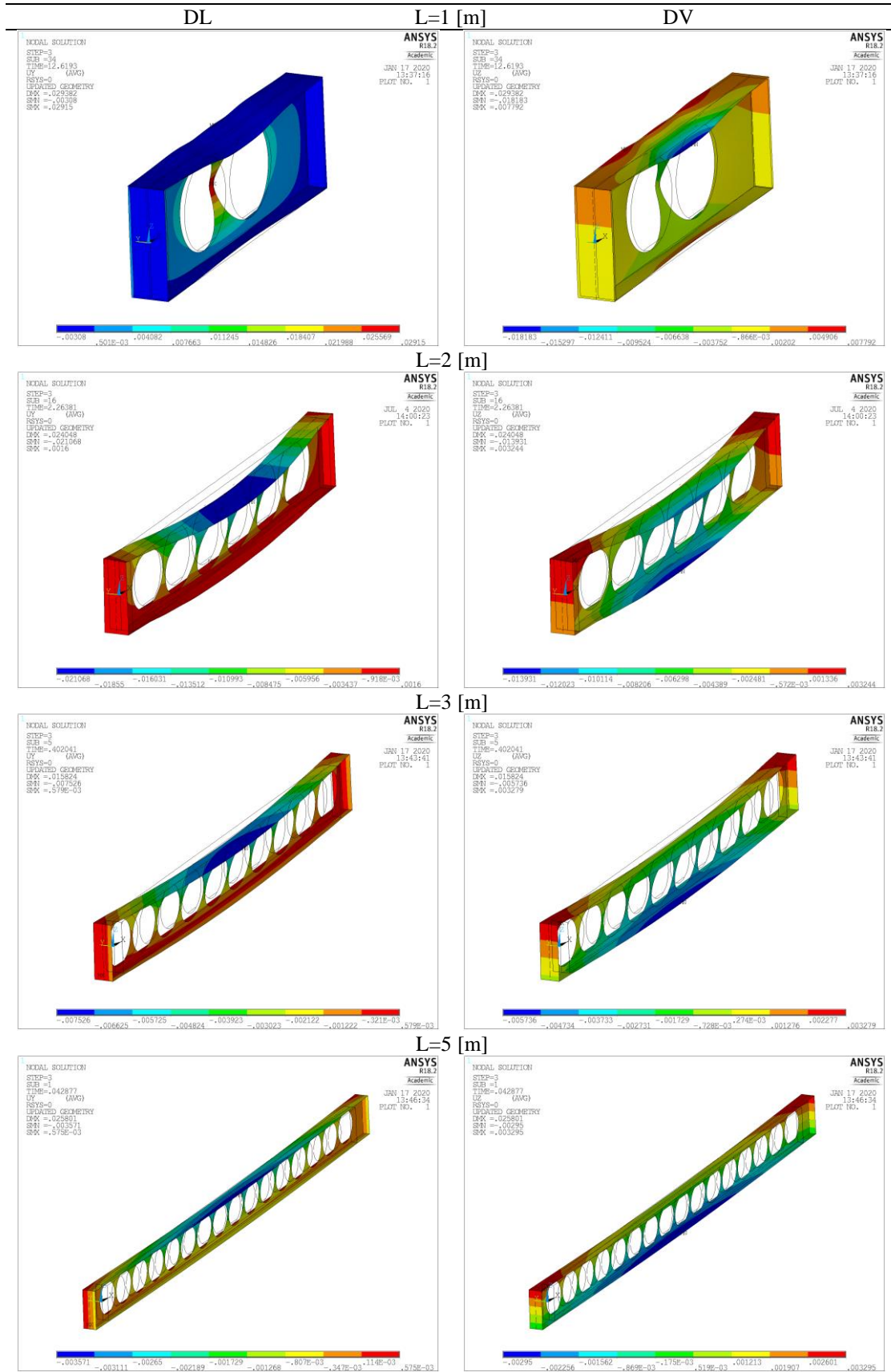
CASO – S=1,1d<sub>0</sub> - 600 [°C]



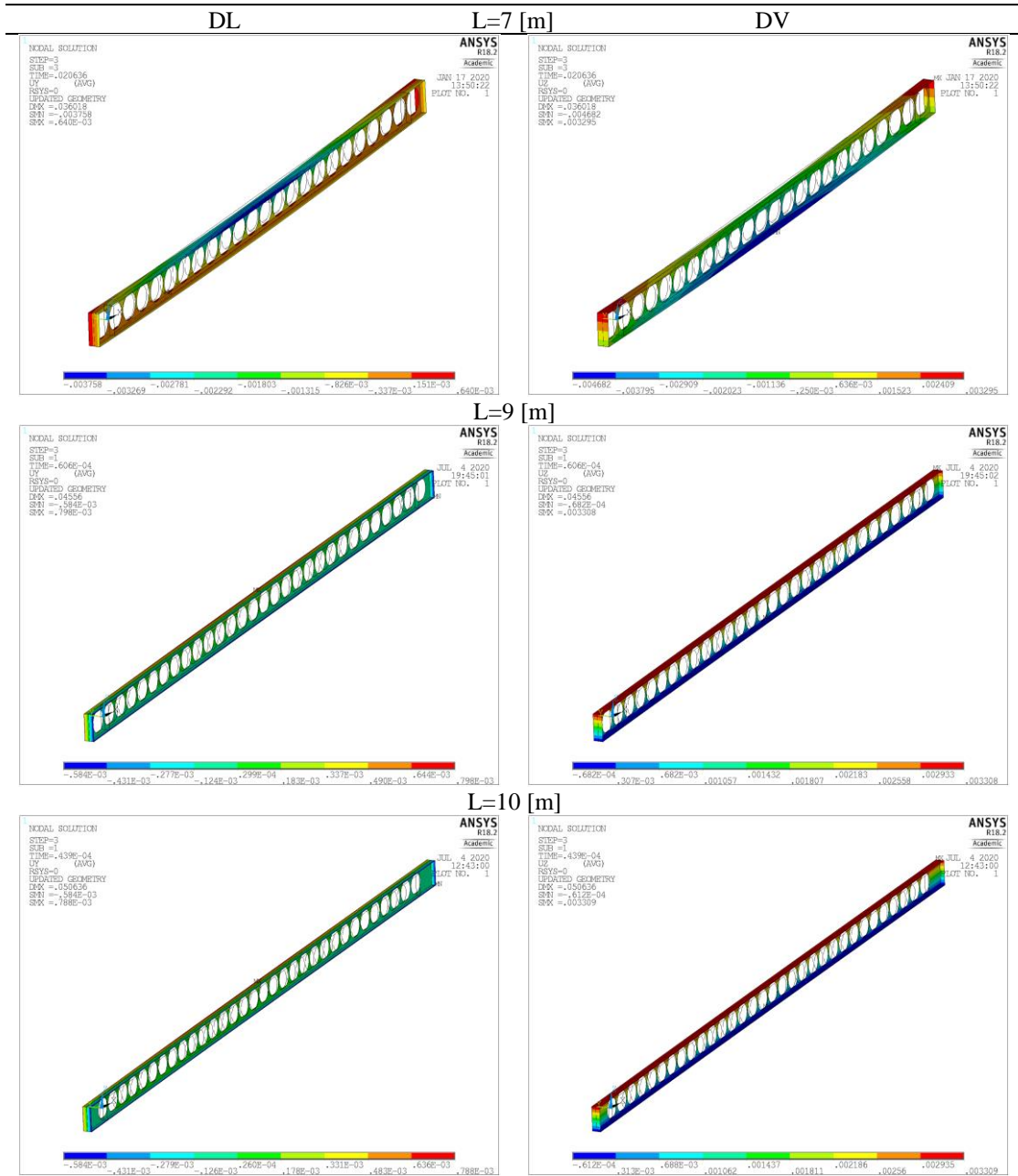
CASO – S=1,1d<sub>0</sub> - 600 [°C]



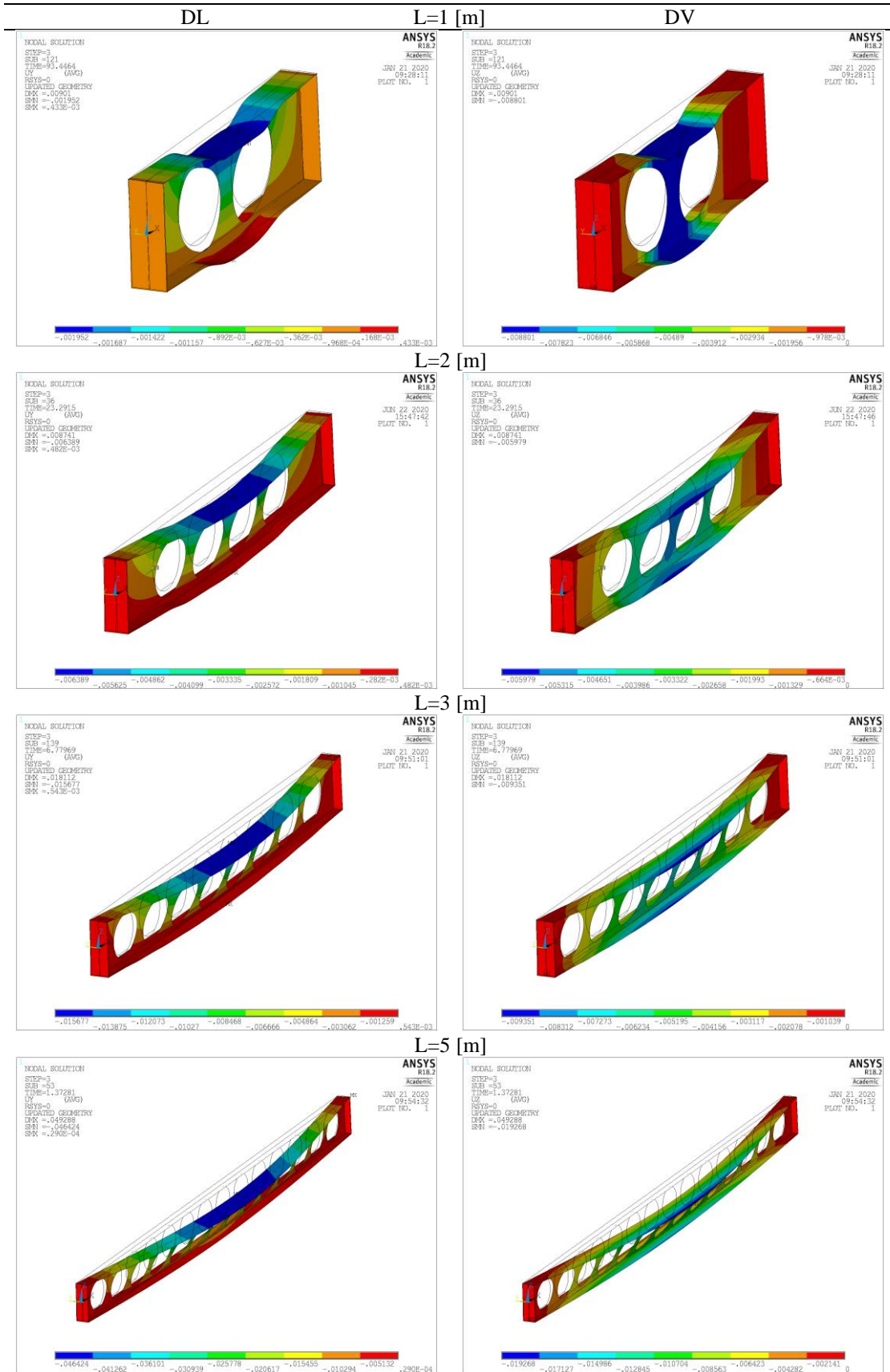
CASO – S=1,1d<sub>0</sub> - 700 [°C]



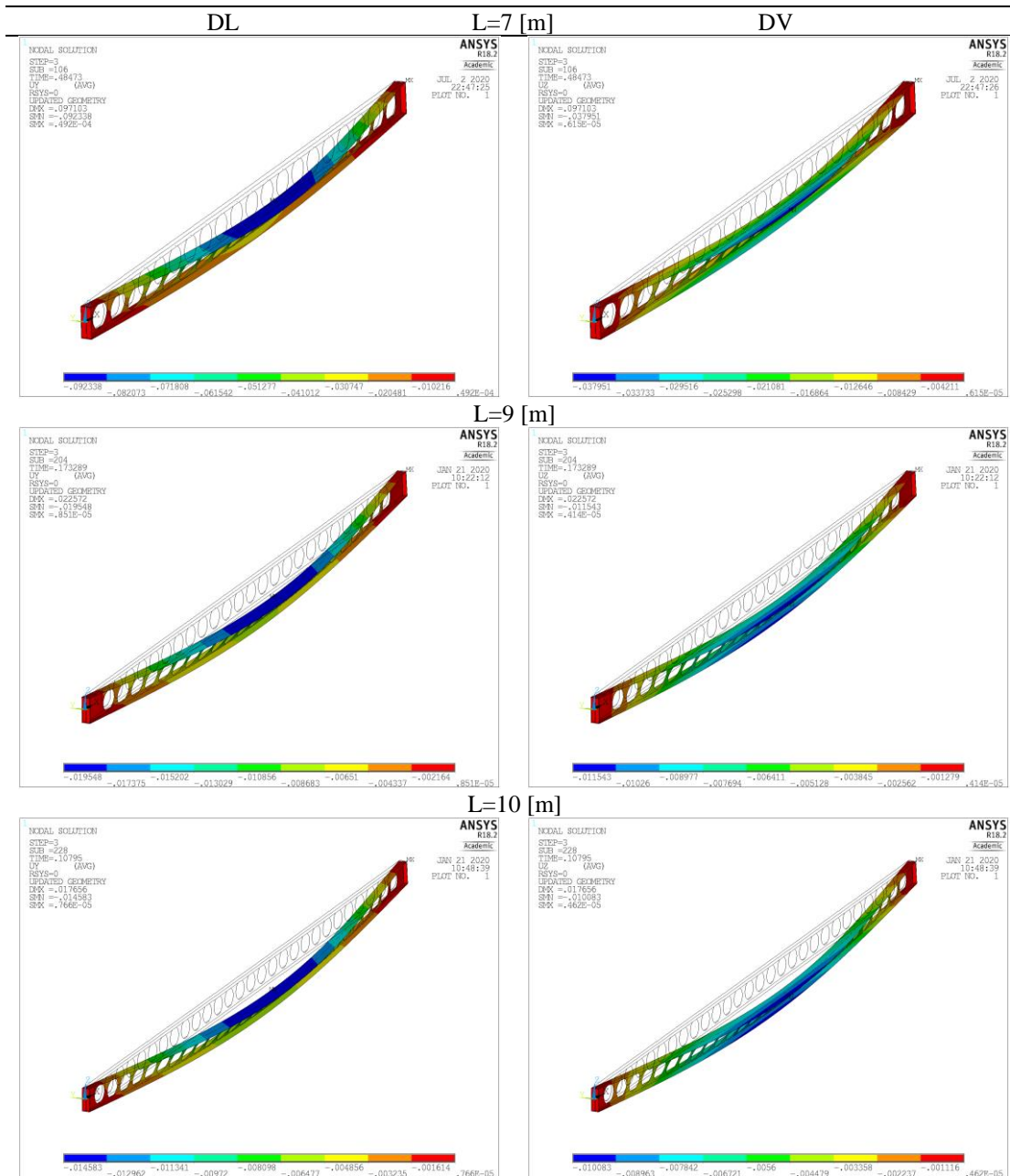
CASO – S=1,1d<sub>0</sub> - 700 [°C]



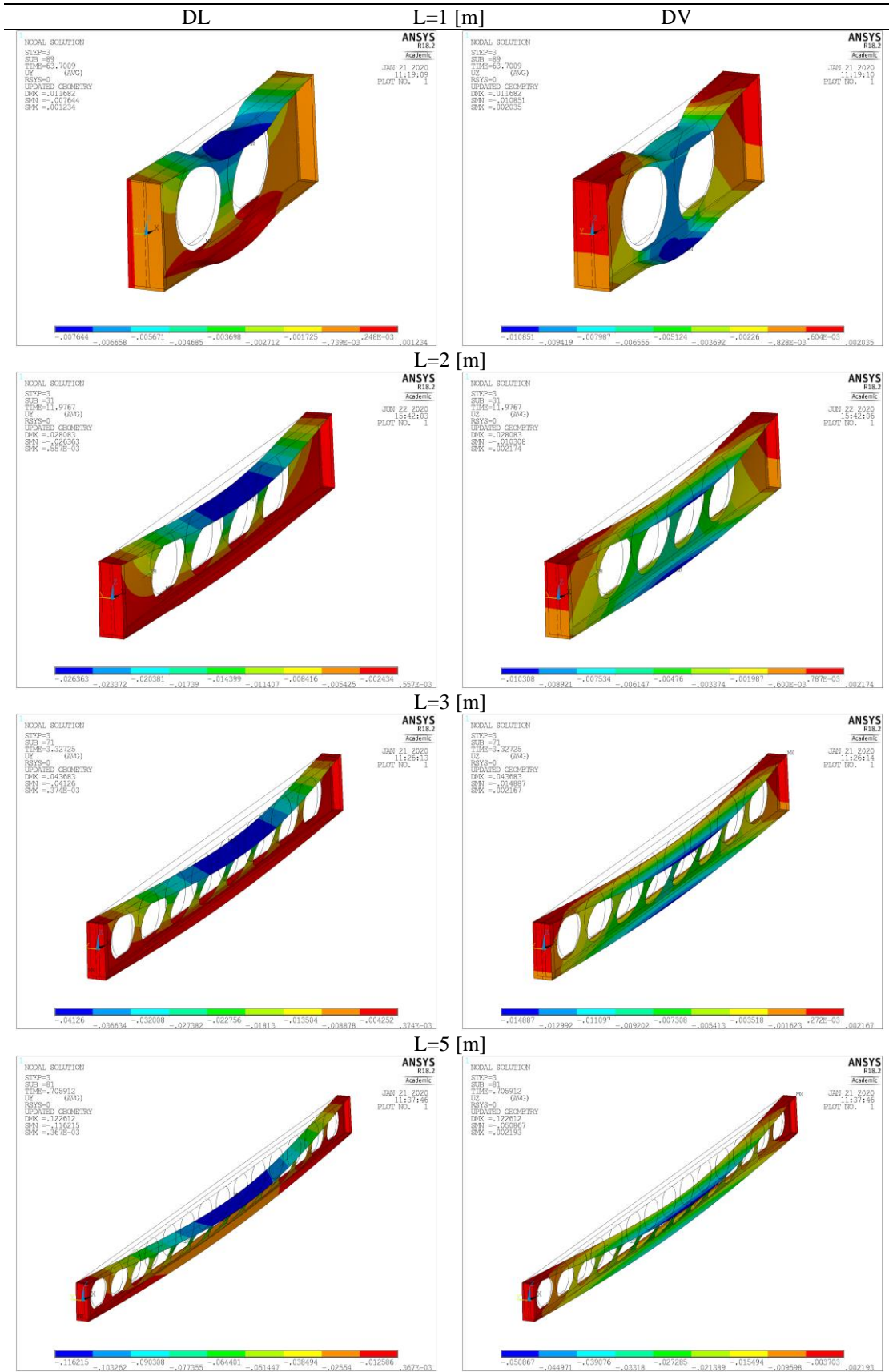
CASO –  $S=1,3d_0 - 20 [^{\circ}C]$



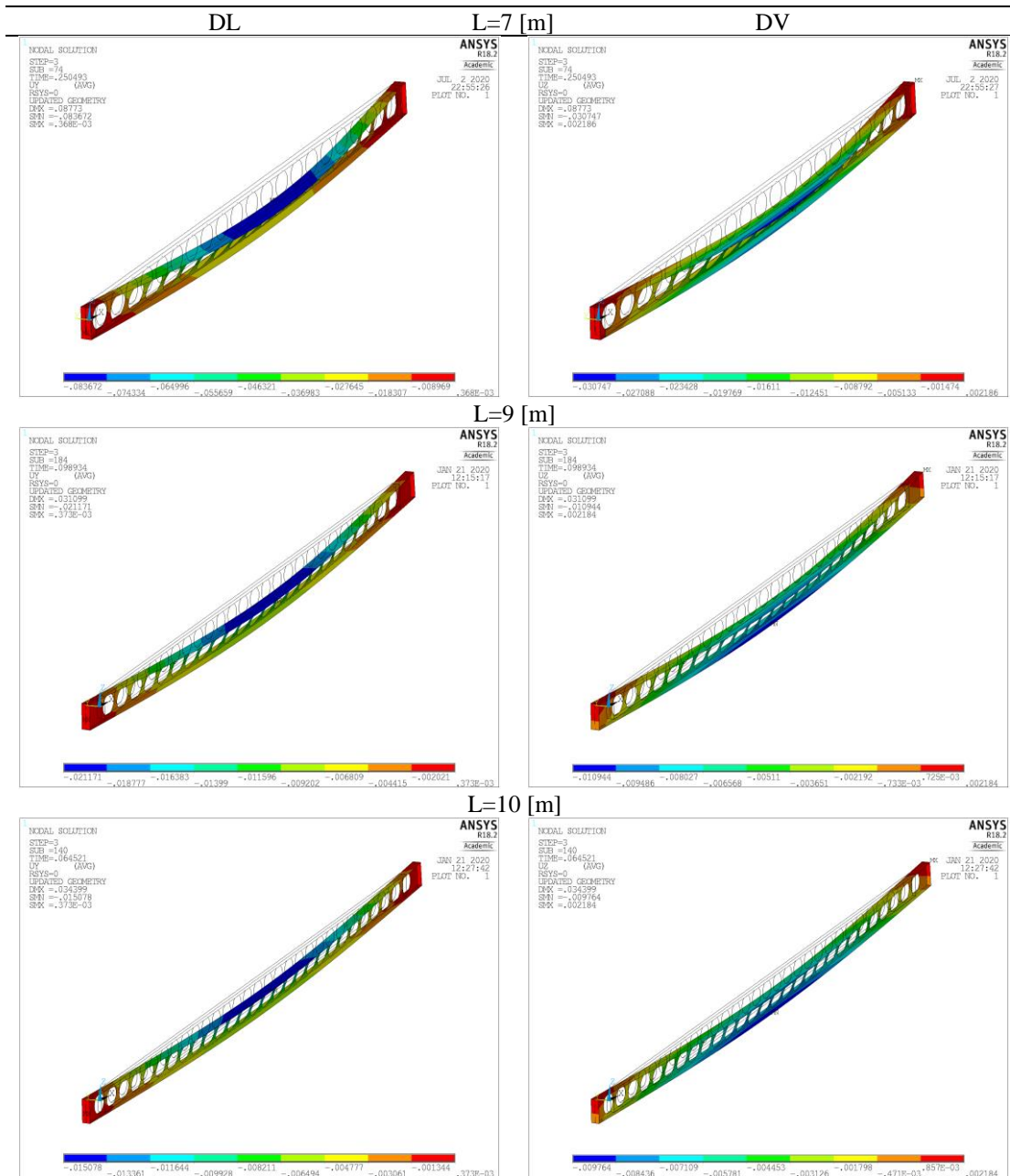
CASO – S=1,3d<sub>0</sub> - 20 [°C]



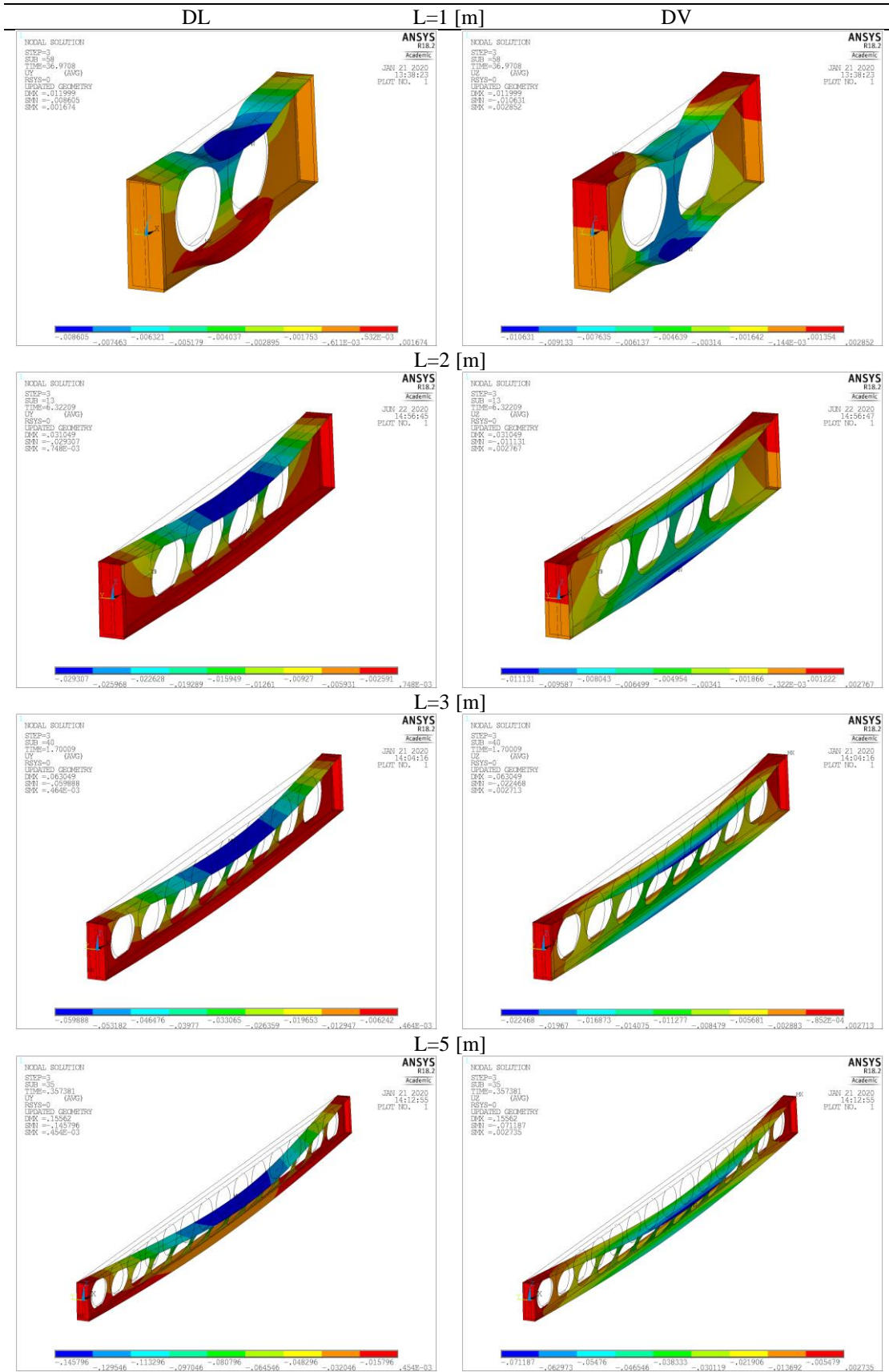
CASO – S=1,3d<sub>0</sub> - 500 [°C]



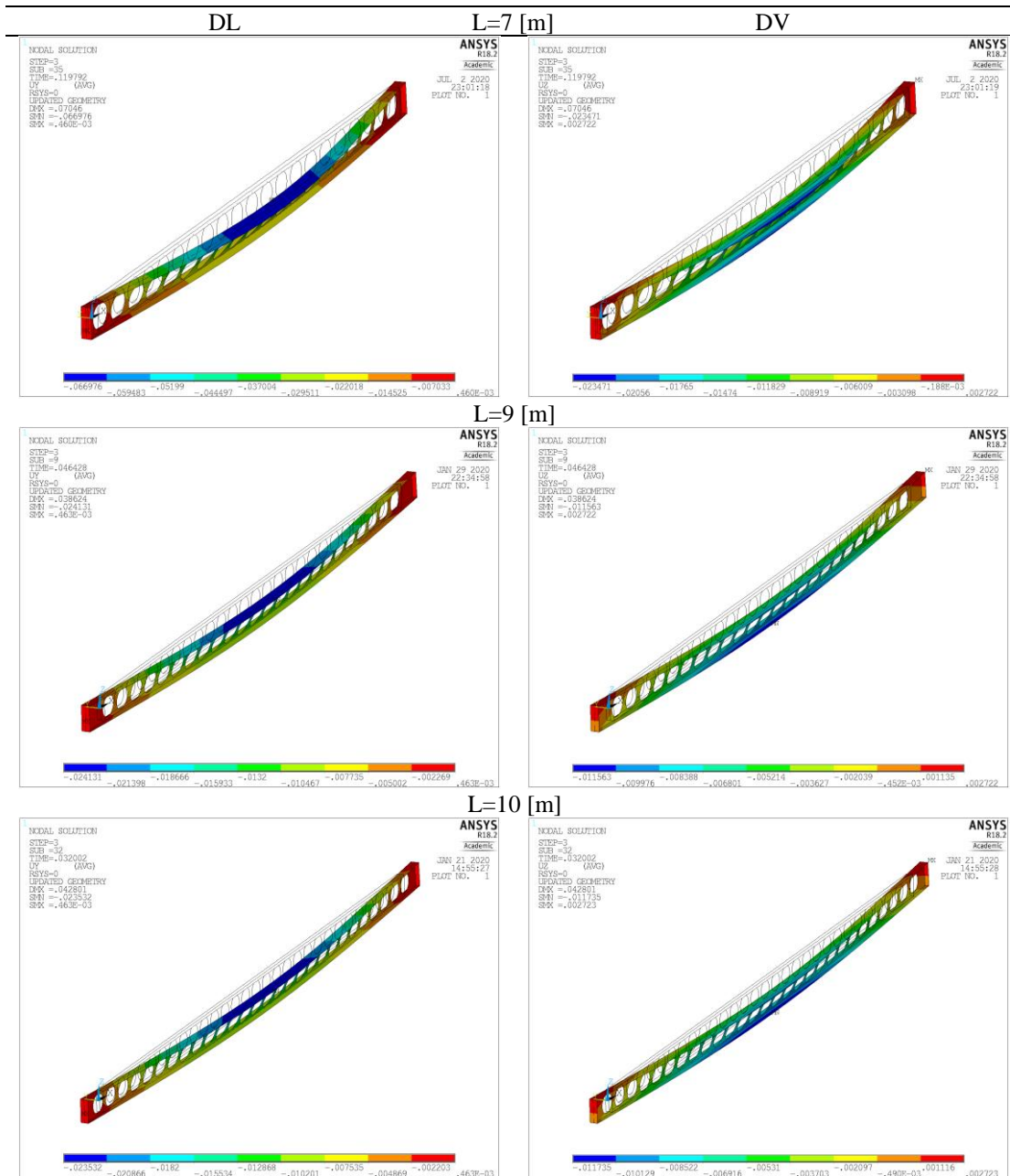
CASO – S=1,3d<sub>0</sub> - 500 [°C]



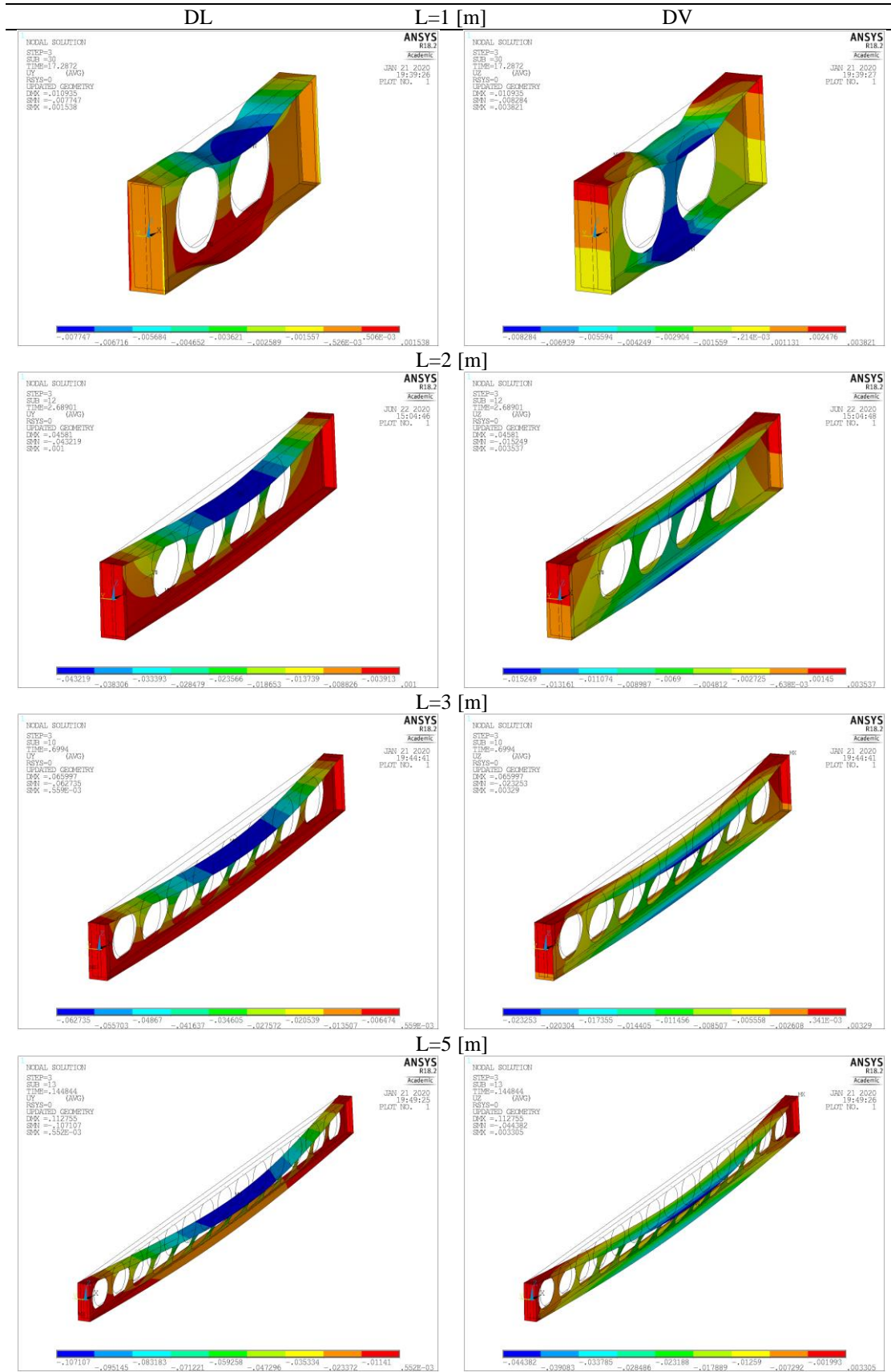
CASO – S=1,3d<sub>0</sub> - 600 [°C]



CASO – S=1,3d<sub>0</sub> - 600 [°C]



CASO – S=1,3d<sub>0</sub> – 700 [°C]



CASO –  $S=1,3d_0$  - 700 [°C]

