



# Colunas de aço de ultra alta resistência em condições de incêndio

Arthur Silva Pereira - A57404

Trabalho realizado sob a orientação de

**Prof. Dr. Paulo Piloto**

**Prof. Dr. Artur Caron Mottin**

Mestrado em Engenharia Mecânica

2023-2024



# Colunas de aço de ultra alta resistência em condições de incêndio

Relatório da UC de Projeto  
Mestrado em Engenharia Mecânica  
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Arthur Silva Pereira - A57404

2023-2024

A Escola Superior de Tecnologia e de Gestão não se responsabiliza pelas opiniões expressas neste relatório.

Declaro que o trabalho descrito neste relatório é da minha autoria e é da minha vontade que o mesmo seja submetido a avaliação.

---

Arthur Silva Pereira - A57404



# Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais Marcio e Claudia; aos meus três irmãos Livia, Guilherme e Maria; e por fim a minha falecida avó Maruca.

# Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus.

Quero agradecer ao CEFET-MG e ao IPB pela oportunidade de participar do programa de dupla diplomação. Também expresso minha gratidão ao professor Paulo Piloto por toda a orientação e auxílio prestados na confecção deste trabalho. E gostaria de agradecer ao professor Artur Mottin por aceitar ser meu orientador.

Gostaria de agradecer a equipe de robótica Trincabotz CEFET-MG e a todos os seus membros, por todas as experiências proporcionadas que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão às amizades que me apoiaram durante meu período de intercâmbio, especialmente aos membros do Bairro Nobre (Bruno, Leonardo, Edilson, Lucas, Guilherme e Vinicius), pela companhia e por tornarem os dias em Bragança mais leves.

Não posso deixar de agradecer aos meus pais, Márcio e Cláudia, e aos meus irmãos, Livia, Guilherme e Maria, assim como aos meus avós Zezé, Maria, Maruca e Lacerda, e ao meu amigo Caio, pelo apoio e carinho incondicionais. Sem vocês, nada disso seria possível. Também gostaria de expressar minha gratidão aos meus tios Manga e Luciana por terem me recebido em sua casa durante a minha graduação.

Por fim, agradeço de todo coração a toda minha família e amigos, que sempre me apoiaram ao longo de toda essa jornada.

# Resumo

A pesquisa propõe um estudo de compressão em colunas de aço de alta resistência (UHSS) em situações de incêndio, visando preencher lacunas na literatura existente. Utilizando o software Ansys de elementos finitos, o trabalho compara resultados obtidos com métodos simplificados, além de confrontar dados numéricos e experimentais da literatura. Simulações com dois tipos de secções diferentes foram desenvolvidas: uma secção com colunas circulares ocas (CHS) e outra envolvendo colunas híbridas, ambas em condições de incêndio. As simulações empregaram elementos de casca para modelar as paredes das colunas. Inicialmente, foram conduzidas simulações de flambagem elástica para identificar carga crítica e módulos de instabilidade. Em seguida, análises não lineares geométricas e materiais foram utilizadas para prever a resistência do material a temperaturas elevadas. Por fim, é apresentado um estudo paramétrico, considerando variações de comprimento, espessura, fator de carga e taxas aquecimento para ambas as configurações. Os resultados indicam que colunas mais longas apresentam menor resistência ao fogo sob fatores de carga elevados, enquanto a variação da espessura exerce impacto pouco significativo. O parâmetro de maior influência na temperatura crítica revelou ser o fator de carga. Também pode ser evidenciado que, na maioria dos casos, as colunas híbridas apresentaram temperaturas críticas menores que as colunas CHS para um mesmo fator de carga. No entanto, as colunas híbridas estavam sujeitas a cargas mais elevadas, e demonstraram uma menor perda de resistência com o aumento do comprimento. Finalmente, o trabalho incluiu a formulação de novas equações de projeto para ambas as configurações, contribuindo para a aplicação prática dos resultados obtidos.

**Aços de Ultra-alta Resistência, Fogo, Flambagem, Elementos Finitos**

# Abstract

The research proposes a study on the compression of ultra-high strength steel (UHSS) columns in fire situations, aiming to fill gaps in the existing literature. Using the finite element software Ansys, the study compares results obtained with simplified methods, numerical methods and experimental results from the literature. Simulations with two different sections were developed: one cross section with circular hollow columns (CHS) and another involving hybrid columns, both under fire conditions. The simulations employed shell finite elements to model the surfaces of the columns. Initially, elastic buckling simulations were conducted to identify critical load and instability modes. Then, geometrically and materially non-linear analyses were developed to predict material strength at high temperatures. After that, a parametric study addressed variations in length, thickness, load factor, and heating rate for both configurations. The results indicate that longer columns exhibit lower fire resistance under high load levels, while thickness variation has a limited impact. The parameter with the greatest influence on critical temperature was the load level. It was also evident that, in most cases, hybrid columns showed lower critical temperatures than CHS columns for the same load factor. However, hybrid columns were subjected to higher loads and demonstrated a lower loss of strength with increasing length. Finally, the study included the formulation of new design equations for both configurations, contributing to the practical application of the obtained results.

**Ultra-High Strength Steels, Fire, Buckling, Finite Elements**

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos . . . . .	2
1.1.1	Objetivo Geral . . . . .	2
1.1.2	Objetivos Específicos . . . . .	2
1.2	Organização da Tese . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>5</b>
2.1	Revisão Bibliográfica . . . . .	5
2.1.1	Aço UHSS . . . . .	5
2.1.2	Testes em Fogo . . . . .	7
2.1.2.1	Transferência de Calor . . . . .	8
2.1.3	Propriedades dos Materiais . . . . .	9
2.1.3.1	Propriedades Mecânicas . . . . .	9
2.1.3.2	Propriedades Térmicas . . . . .	11
2.1.4	Projeto de Colunas em Fogo . . . . .	12
2.1.4.1	Classificação das Secções Transversais . . . . .	14
2.1.4.2	Resistência a Fogo para Colunas . . . . .	15
2.1.4.3	Critérios de Resistência ao Fogo . . . . .	16
2.2	Estudos Experimentais de Materiais UHSS a Altas Temperaturas . . . . .	17
2.3	Simulação Numérica de Colunas de UHSS . . . . .	18
2.4	Resultados Experimentais de Colunas de UHSS . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Modelo de Elementos Finitos</b>	<b>21</b>
3.1	Desenvolvimento da Simulação . . . . .	21
3.1.1	Elementos Utilizados . . . . .	21
3.1.1.1	Elemento de Casca 181 . . . . .	22
3.1.1.2	Elemento de Casca 131 . . . . .	22

3.1.2	Análise Linear Elástica de Flambagem à Temperatura Ambiente . . . . .	23
3.1.3	Análise não Linear de Flambagem à Temperatura Ambiente . . . . .	24
3.1.4	Análise não Linear de Flambagem a Temperaturas Elevadas . . . . .	25
3.1.5	Análise Térmica . . . . .	26
3.1.6	Análise Termo-mecânica . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Validação Numérica</b>	<b>29</b>
4.1	Primeira Validação Numérica . . . . .	29
4.1.1	Geometria . . . . .	30
4.1.2	Propriedades dos Materiais . . . . .	31
4.1.3	Malha . . . . .	32
4.1.4	Condições de Fronteira . . . . .	32
4.1.5	Imperfeições . . . . .	33
4.1.6	Simulação à Temperatura Ambiente . . . . .	33
4.1.7	Simulação a Temperaturas Elevadas . . . . .	36
4.2	Segunda Validação Numérica . . . . .	41
4.2.1	Geometria . . . . .	42
4.2.2	Propriedades dos Materiais . . . . .	42
4.2.3	Malha . . . . .	45
4.2.4	Condições de Fronteira . . . . .	45
4.2.5	Imperfeições . . . . .	45
4.2.6	Simulação à Temperatura Ambiente . . . . .	47
4.2.7	Simulação a Temperaturas Elevadas . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Análise Paramétrica</b>	<b>55</b>
5.1	Estudo Paramétrico de Colunas CHS . . . . .	55
5.1.1	Efeito do Regime de Aquecimento . . . . .	56
5.1.2	Efeito do Fator de Carga . . . . .	57
5.1.3	Efeito da Espessura . . . . .	58
5.1.4	Efeito do Comprimento . . . . .	61
5.2	Estudo Paramétrico de Colunas Híbridas . . . . .	66
5.2.1	Efeito do Regime de Aquecimento . . . . .	66
5.2.2	Efeito do Fator de Carga . . . . .	68
5.2.3	Efeito da Espessura . . . . .	69

5.2.4	Efeito do Comprimento . . . . .	69
5.2.5	Comparação . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>79</b>
6.1	Futuros Trabalhos . . . . .	80
<b>A</b>	<b>Equações de Projeto</b>	<b>A1</b>
<b>B</b>	<b>Coluna CHS</b>	<b>B1</b>
B.1	Simulações . . . . .	B1
B.1.1	CHS L0.78 t3.1 . . . . .	B1
B.1.2	CHS L0.78 t6 . . . . .	B9
B.1.3	CHS L3 t3.1 . . . . .	B17
B.1.4	CHS L3 t6 . . . . .	B28
B.1.5	CHS L6 t3.1 . . . . .	B39
B.1.6	CHS L6 t6 . . . . .	B50
<b>C</b>	<b>Colunas Híbridas</b>	<b>C1</b>
C.1	Simulações . . . . .	C1
C.1.1	HB L0.78 t3.1 . . . . .	C1
C.1.2	HB L0.78 t6 . . . . .	C12
C.1.3	HB L3 t3.1 . . . . .	C23
C.1.4	HB L3 t6 . . . . .	C34
C.1.5	HB L6 t3.1 . . . . .	C45
C.1.6	HB L6 t6 . . . . .	C56
<b>D</b>	<b>Gráficos</b>	<b>D1</b>
D.1	Coluna CHS . . . . .	D1
D.2	Coluna Híbrida . . . . .	D1

# Lista de Tabelas

2.1	Fatores de Redução . . . . .	10
2.2	Expansão ou Deformação Térmica . . . . .	11
2.3	Condutividade Térmica . . . . .	11
2.4	Calor específico . . . . .	12
3.1	Tabela de Força . . . . .	26
4.1	Resultados Experimentais da Coluna CHS . . . . .	30
4.2	Propriedades Mecânicas a Temperatura Ambiente . . . . .	31
4.3	Fatores de Redução UHSS grau 1200 . . . . .	31
4.4	Resultados da Coluna CHS para R20 . . . . .	40
4.5	Resultados da Coluna CHS para R5 . . . . .	40
4.6	Resultados Experimentais da Coluna Híbrida . . . . .	41
4.7	Propriedades Mecânicas a Temperatura Ambiente para as Placas de SS . . . . .	43
4.8	Fatores de Redução para o SS . . . . .	44
4.9	Resultados da Coluna Híbrida para R20 . . . . .	51
4.10	Resultados da Coluna Híbrida para R5 . . . . .	51
5.1	Estudo Paramétrico para CHS . . . . .	55
5.2	Geometrias para Estudo Paramétrico para CHS . . . . .	56
5.3	Estudo Paramétrico para Híbrido . . . . .	66
5.4	Geometrias para Estudo Paramétrico para HB . . . . .	66
A.1	Equações de Projeto para Temperatura Crítica para Colunas CHS para fator de carga entre 20% a 80% . . . . .	A1
A.2	Equações de Projeto para Temperatura Crítica para Colunas Híbridas para fator de carga entre 20% a 80% . . . . .	A1

# Lista de Figuras

2.1	Ponte Militar com a Utilização de UHSS [11] . . . . .	6
2.2	Centro Amagasaki de Pesquisa e Desenvolvimento com a Utilização de Colunas de BT-HT880 [12] . . . . .	7
2.3	Fases do Desenvolvimento de um Incêndio [17] . . . . .	8
2.4	Método de "Crossed Stings"de Hottel [20] . . . . .	9
2.5	Tensão-deformação do Aço para Altas Temperaturas [22] . . . . .	10
2.6	Fator de Comprimento Efetivo [22] . . . . .	13
2.7	Tipos de imperfeição [26] . . . . .	13
2.8	Classe de CHS em compressão [27] . . . . .	15
2.9	Temperatura Crítica em Função do Grau de Utilização [15] . . . . .	16
3.1	Elemento de Casca 181 [37] . . . . .	22
3.2	Elemento de Casca 131 [37] . . . . .	23
3.3	Orientação das Superfícies do Elemento . . . . .	23
4.1	Ensaio Experimental da Coluna CHS [3] . . . . .	29
4.2	Geometria do CHS . . . . .	30
4.3	Grafico de Tensão-deformação do UHSS . . . . .	32
4.4	Modelagem com Elemento de Cascas sem e com forma . . . . .	33
4.5	Condições de Fronteira do CHS . . . . .	34
4.6	Imperfeições do CHS . . . . .	34
4.7	Validação da Capacidade Portante à Temperatura Ambiente . . . . .	35
4.8	Comparação do Modo de Falha da Coluna UHSS. Valores Experimentais e Numéricos (Carga a 850 kN) à Temperatura Ambiente, com Apresentação da Deformação Principal na Direção 1 . . . . .	35
4.9	Validação para CHS com fator de carga de 25% e R5 . . . . .	36
4.10	Validação para CHS com fator de carga de 25% e R20 . . . . .	37

4.11	Validação para CHS com fator de carga de 50% e R5 . . . . .	38
4.12	Validação para CHS com fator de carga de 50% e R20 . . . . .	38
4.13	Validação para CHS com fator de carga de 75% e R5 . . . . .	39
4.14	Validação para CHS com fator de carga de 75% e R20 . . . . .	39
4.15	Modos de Colapso Experimental das Colunas CHS [3] . . . . .	40
4.16	Modos de Colapso das Colunas Numéricos CHS . . . . .	41
4.17	Ensaio experimental da Coluna Híbrida [35] . . . . .	42
4.18	Geometria da coluna híbrida . . . . .	43
4.19	Grafico de tensão-deformação do SS . . . . .	44
4.20	Malha da Coluna Híbrida . . . . .	45
4.21	Condições de fronteira da Coluna Híbrida . . . . .	46
4.22	Imperfeições da Coluna Híbrida . . . . .	46
4.23	Validação da capacidade portante à temperatura ambiente da Coluna Híbrida . . . . .	47
4.24	Validação para HB com fator de carga de 30% e R5 . . . . .	48
4.25	Validação para HB com fator de carga de 30% e R20 . . . . .	49
4.26	Validação para HB com fator de carga de 45% e R5 . . . . .	49
4.27	Validação para HB com fator de carga de 45% e R20 . . . . .	50
4.28	Validação para HB com fator de carga de 60% e R5 . . . . .	50
4.29	Validação para HB com fator de carga de 60% e R20 . . . . .	51
4.30	Modos de colapso experimental das colunas Híbridas [35] . . . . .	52
4.31	Modos de colapso numéricos das colunas Híbridas . . . . .	52
5.1	Distribuição de Temperatura na Coluna CHS em 5 min, 10 min e 15 min . . . . .	56
5.2	Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para CHS com comprimento de 0,78 m e Espessura de 3,1 mm . . . . .	57
5.3	CHS com comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	58
5.4	CHS com Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	58
5.5	CHS com comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	59
5.6	Efeito da Variação da Espessura de CHS na Resistência a Temperatura Ambiente . . . . .	59
5.7	Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para CHS com comprimento de 0,78 m e Espessura de 6 mm . . . . .	60
5.8	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	60

5.9	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	61
5.10	Coluna CHS com 3 m de comprimento a temperatura ambiente . . . . .	62
5.11	Coluna CHS com 6 m de comprimento a temperatura ambiente . . . . .	62
5.12	Efeito do comprimento na Coluna CHS para R5 . . . . .	62
5.13	Efeito do comprimento na Coluna CHS para R20 . . . . .	63
5.14	Efeito do comprimento na Coluna CHS para ISO 834 . . . . .	63
5.15	Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para CHS com comprimento de 3 m e Espessura de 3 mm .1 . . . . .	64
5.16	Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para CHS com comprimento de 3 m e Espessura de 6 mm . . . . .	64
5.17	Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para CHS com comprimento de 6 m e Espessura de 3 mm .1 . . . . .	65
5.18	Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para CHS com comprimento de 6 m e Espessura de 6 mm . . . . .	65
5.19	Distribuição de Temperatura na Coluna Híbrida em 5 min, 10 min e 15 min . . .	67
5.20	Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para HB com comprimento de 0,78 m e espessura de 3,1 mm . . . . .	67
5.21	HB com comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	68
5.22	HB com comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	68
5.23	HB com comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	69
5.24	Efeito da variação da espessura do Híbrido na resistência a temperatura ambiente	70
5.25	Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para HB com comprimento de 0,78 m e espessura de 6 mm . . . . .	70
5.26	Coluna Híbrida com 3 m de comprimento à temperatura ambiente . . . . .	71
5.27	Coluna Híbrida com 6 m de comprimento à temperatura ambiente . . . . .	72
5.28	Efeito do comprimento na Coluna Híbrida para R5 . . . . .	72
5.29	Efeito do comprimento na Coluna Híbrida para R20 . . . . .	72
5.30	Efeito do comprimento na Coluna Híbrida para ISO 834 . . . . .	73
5.31	Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para HB com comprimento de 3 m e espessura de 3,1 mm . . . . .	73
5.32	Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para HB com comprimento de 3 m e espessura de 6 mm . . . . .	74

5.33	Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para HB com comprimento de 6 m e espessura de 3,1 mm . . . . .	74
5.34	Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para HB com comprimento de 6 m e espessura de 6 mm . . . . .	75
5.35	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	75
5.36	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	76
5.37	Comparação entre equações para colunas com comprimento de 0,78 m e espessura de 3,1 mm . . . . .	77
5.38	Comparação entre equações para colunas com comprimento de 3 m e espessura de 3,1 mm . . . . .	77
5.39	Comparação entre equações para colunas com comprimento de 6 m e espessura de 3,1 mm . . . . .	78
B.1	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B1
B.2	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B2
B.3	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B2
B.4	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B2
B.5	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B3
B.6	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B3
B.7	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B3
B.8	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B4
B.9	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B4

B.10 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B4
B.11 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B5
B.12 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B5
B.13 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B5
B.14 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B6
B.15 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B6
B.16 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B6
B.17 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B7
B.18 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B7
B.19 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B7
B.20 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B8
B.21 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B8
B.22 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B9
B.23 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B9
B.24 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B10
B.25 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B10
B.26 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B10

B.27 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B11
B.28 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B11
B.29 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B11
B.30 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B12
B.31 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B12
B.32 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B12
B.33 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B13
B.34 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B13
B.35 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B13
B.36 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B14
B.37 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B14
B.38 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B14
B.39 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B15
B.40 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B15
B.41 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B15
B.42 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B16
B.43 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B17

B.44 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B17
B.45 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B18
B.46 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B18
B.47 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B19
B.48 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B19
B.49 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B20
B.50 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B20
B.51 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B21
B.52 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B21
B.53 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B22
B.54 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B22
B.55 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B23
B.56 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B23
B.57 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B24
B.58 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B24
B.59 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B25
B.60 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B25

B.61 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B26
B.62 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B26
B.63 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B27
B.64 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B28
B.65 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B29
B.66 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B29
B.67 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B30
B.68 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B30
B.69 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B31
B.70 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B31
B.71 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B32
B.72 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B32
B.73 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B33
B.74 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B33
B.75 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B34
B.76 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B34
B.77 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B35

B.78 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B35
B.79 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B36
B.80 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B36
B.81 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B37
B.82 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B37
B.83 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B38
B.84 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B38
B.85 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B39
B.86 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B39
B.87 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B40
B.88 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B40
B.89 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B41
B.90 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B41
B.91 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B42
B.92 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B42
B.93 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B43
B.94 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B43

B.95 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B44
B.96 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B44
B.97 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B45
B.98 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B45
B.99 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B46
B.100 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B46
B.101 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B47
B.102 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B47
B.103 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	B48
B.104 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	B48
B.105 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	B49
B.106 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B50
B.107 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B51
B.108 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B51
B.109 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B52
B.110 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B52
B.111 Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B53

B.112	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B53
B.113	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B54
B.114	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B54
B.115	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B55
B.116	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B55
B.117	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B56
B.118	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B56
B.119	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B57
B.120	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B57
B.121	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B58
B.122	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B58
B.123	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B59
B.124	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	B59
B.125	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	B60
B.126	Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	B60
C.1	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	C1

C.2	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20 . . . . .	C2
C.3	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834 . . . . .	C2
C.4	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5 . . . . .	C3
C.5	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20 . . . . .	C3
C.6	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834 . . . . .	C4
C.7	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5 . . . . .	C4
C.8	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20 . . . . .	C5
C.9	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834 . . . . .	C5
C.10	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5 . . . . .	C6
C.11	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20 . . . . .	C6
C.12	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834 . . . . .	C7
C.13	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5 . . . . .	C7
C.14	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20 . . . . .	C8
C.15	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834 . . . . .	C8
C.16	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5 . . . . .	C9
C.17	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20 . . . . .	C9
C.18	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834 . . . . .	C10

C.19 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5 . . . . .	C10
C.20 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20 . . . . .	C11
C.21 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834 . . . . .	C11
C.22 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C12
C.23 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C12
C.24 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C13
C.25 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C13
C.26 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C14
C.27 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C14
C.28 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C15
C.29 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C15
C.30 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C16
C.31 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C16
C.32 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C17
C.33 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO834 . . . . .	C17
C.34 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C18
C.35 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C18

C.36 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C19
C.37 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C19
C.38 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C20
C.39 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C20
C.40 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C21
C.41 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C21
C.42 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C22
C.43 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5 . . . . .	C23
C.44 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20 . . . . .	C24
C.45 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834 . . . . .	C24
C.46 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5 . . . . .	C25
C.47 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20 . . . . .	C25
C.48 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834 . . . . .	C26
C.49 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5 . . . . .	C26
C.50 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20 . . . . .	C27
C.51 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834 . . . . .	C27
C.52 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5 . . . . .	C28

C.53 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20 . . . . .	C28
C.54 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834 . . . . .	C29
C.55 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5 . . . . .	C29
C.56 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20 . . . . .	C30
C.57 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834 . . . . .	C30
C.58 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5 . . . . .	C31
C.59 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20 . . . . .	C31
C.60 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834 . . . . .	C32
C.61 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5 . . . . .	C32
C.62 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20 . . . . .	C33
C.63 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834 . . . . .	C33
C.64 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C34
C.65 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C35
C.66 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C35
C.67 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C36
C.68 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C36
C.69 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C37

C.70 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C37
C.71 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C38
C.72 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C38
C.73 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C39
C.74 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C39
C.75 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO834 . . . . .	C40
C.76 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C40
C.77 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C41
C.78 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C41
C.79 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C42
C.80 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C42
C.81 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C43
C.82 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C43
C.83 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C44
C.84 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C44
C.85 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	C45
C.86 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	C45

C.87 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	C46
C.88 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	C46
C.89 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	C47
C.90 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	C47
C.91 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	C48
C.92 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	C48
C.93 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	C49
C.94 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	C49
C.95 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	C50
C.96 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	C50
C.97 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	C51
C.98 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	C51
C.99 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	C52
C.100 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	C52
C.101 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	C53
C.102 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	C53
C.103 Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	C54

C.104	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	C54
C.105	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	C55
C.106	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C56
C.107	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C57
C.108	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C57
C.109	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C58
C.110	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C58
C.111	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C59
C.112	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C59
C.113	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C60
C.114	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C60
C.115	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C61
C.116	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C61
C.117	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO834 . . . . .	C62
C.118	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C62
C.119	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C63
C.120	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C63

C.121	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C64
C.122	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C64
C.123	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C65
C.124	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	C65
C.125	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	C66
C.126	Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	C66
D.1	CHS com Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1mm e R5 . . . . .	D1
D.2	CHS com Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1mm e R20 . . . . .	D2
D.3	CHS com Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1mm e ISO 834 . . . . .	D2
D.4	CHS com Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	D2
D.5	CHS com Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	D3
D.6	CHS com Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	D3
D.7	CHS com Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	D3
D.8	CHS com Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	D4
D.9	CHS com Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	D4
D.10	CHS com Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	D4
D.11	CHS com Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	D5
D.12	CHS com Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	D5
D.13	HB com Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	D5
D.14	HB com Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	D6
D.15	HB com Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	D6
D.16	HB com Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	D6
D.17	HB com Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	D7
D.18	HB com Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	D7
D.19	HB com Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5 . . . . .	D7
D.20	HB com Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20 . . . . .	D8
D.21	HB com Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834 . . . . .	D8

D.22 HB com Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5 . . . . .	D8
D.23 HB com Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20 . . . . .	D9
D.24 HB com Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834 . . . . .	D9

# Acrónimos

**AHSS** Aços Avançados de Alta Resistência. 5

**CHS** Seções Ocas Circulares. 30, 42, 55, 57, 68, 71, 76, 79

**GMNIA** Análise Geométrica e Material Não Linear com Imperfeições. 24, 58

**HB** Seção Composta por Tubos de Aço de Ultra-alta Resistência e Placas de Aço Inoxidável.  
41

**HSS** Aços de Alta Resistência. 18

**SS** Aço Inoxidável. 42–44, 66

**UHSS** Aços de Ultra-alta Resistência. 1, 2, 5, 6, 9, 18, 19, 21, 31, 42, 55, 57, 66, 67, 79, 80



# Capítulo 1

## Introdução

Nos últimos anos, o avanço no desenvolvimento de aços de ultra-alta resistência tem se destacado como uma área de pesquisa crucial. Estes aços apresentam propriedades mecânicas superiores em comparação com os aços convencionais, possibilitando a utilização de menores seções e mais leves, capazes de possuir uma maior capacidade de carga. Isso, por sua vez, resulta em uma redução significativa nas emissões de carbono [1].

Este tipo de aço já encontrou inúmeras aplicações na indústria, incluindo o seu uso em componentes automotivos e aeronáuticos. Recentemente, pesquisadores têm explorado a substituição dos aços convencionais por Aços de Ultra-alta Resistência (UHSS) em elementos estruturais na construção civil [2].

Uma possível aplicação desses materiais como elementos estruturais pode ser nas colunas, onde uma alta capacidade de carga é essencial, e onde não é necessário uma alta ductilidade pois as colunas que suportam cargas de compressão geralmente não sofrem grandes deformações plásticas antes da falha. [3], [4].

No entanto, a utilização desse material também apresenta desvantagens. Com a adoção de uma menor espessura, a flambagem, que depende mais da geometria do que da resistência do material, pode se tornar um fator importante a ser considerado no projeto de colunas[1].

Além disso, devido à sensibilidade dos aços a altas temperaturas, a resposta dos UHSS a essas situações também deve ser encarada como uma das principais considerações de projeto para estruturas metálicas [3].

Contudo, atualmente, a norma europeia prEN 1993-1-2:2023 considera apenas aços com resistência de até 700 MPa para compressão e tensão em altas temperaturas [5].

Dessa forma, a simulação desse material em situações de incêndio surge como uma ferramenta essencial para compreender os riscos associados às condições de exposição ao fogo.

Portanto, será simulado um número considerável de colunas com diferentes dimensões de secções transversais para comparar os resultados obtidos com a futura geração da norma europeia prEN 1993-1-2:2023 [5] e verificar a adequação dessas normas ao projeto de colunas de UHSS. Este trabalho visa apresentar uma nova proposta para a curva de flambagem no projeto de colunas de UHSS.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo do trabalho proposto é realizar um estudo de compressão em colunas de UHSS em situações de incêndio. Isso será feito através de uma revisão da bibliografia existente para identificar lacunas na pesquisa e pela utilização do software de elementos finitos Ansys para comparar os resultados com métodos simplificados, bem como com outros resultados numéricos e experimentais disponíveis na literatura.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Validar o modelo de elementos finitos, utilizando modelos de elementos de casca;
- Fazer um estudo paramétrico para analisar como as diferentes secções de UHSS em altas temperaturas reagem a diferentes valores de fatores de carga, aquecimento, comprimento e espessura;
- Realizar uma revisão da literatura sobre compressão em colunas de UHSS em situações de incêndio para identificar lacunas e contribuições existentes;
- Investigar e analisar os resultados quanto ao tempo e temperatura de falha do material de forma a estabelecer parâmetros para comparação;
- Analisar a resistência mecânica do material com secções diferentes.

## **1.2 Organização da Tese**

Esta tese será dividida em seis capítulos, com subsecções em número variável e ajustável a cada um.

O segundo capítulo apresentará uma breve revisão bibliográfica sobre os aços de ultra-alta resistência, o projeto de colunas em situações de fogo, as normas pertinentes nesse contexto, além de abordar os testes experimentais de fogo. Adicionalmente, serão apresentados alguns resultados experimentais e numéricos relacionados a este tema.

No Capítulo 3, será exposto o modelo numérico desenvolvido ao longo desta tese para a realização das simulações das colunas em situação de incêndio, incluindo as análises necessárias e os elementos utilizados para a simulação.

No Capítulo 4, será conduzida a validação utilizando os artigos experimentais selecionados.

No Capítulo 5, será realizada a análise paramétrica, incluindo o estudo da influência do fator de carga, do aquecimento, da espessura e do comprimento da coluna.

E, finalmente, no Capítulo 6, será apresentada a conclusão do presente trabalho, acompanhada de sugestões para futuras pesquisas.



# Capítulo 2

## Estado da Arte

Este capítulo contextualiza, por meio de uma revisão literária, os principais conceitos utilizados neste trabalho. Além disso, é dedicada uma seção à apresentação dos trabalhos numéricos e experimentais relacionados a este tema, oferecendo uma visão abrangente do estado atual da pesquisa nesse campo.

### 2.1 Revisão Bibliográfica

#### 2.1.1 Aço UHSS

Diversas formas de categorização são aplicadas aos aços utilizados na indústria automotiva, sendo uma delas baseada em designações metalúrgicas que fornecem informações cruciais sobre os processos de manufatura. Entre as designações comuns, incluem-se os aços de baixa resistência, os aços de alta resistência convencionais (endurecíveis por recozimento), os aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) e os Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS). Este último engloba os aços bifásicos e os aços de plasticidade induzida por transformação [6].

Outra classificação relevante leva em conta a resistência do material. Dentro da categoria dos AHSS, que engloba aços com resistência à tração acima de 440 MPa, encontramos os Ultra High Strength Steels (UHSS), que são aços estruturais com limites de resistência significativamente elevados. No entanto, a designação dos UHSS não é definida exatamente por um valor específico, uma vez que nenhum termo universalmente aceito foi estabelecido [6], [7], [8].

Como exemplo, a ASM Internacional [7] define UHSS como aços com limite de escoamento acima de 1380 MPa, enquanto [6] indica que diversas empresas adotam o limite de 980 MPa para essa categoria de aço. Por sua vez, alguns autores, como [3] e [9], estabelecem a definição de UHSS com valores superiores a 700 MPa, ou seja, acima dos graus de aços compreendidos

pela norma europeia prEN 1993-1-2:2023 [5].

Essa falta de uma definição rigorosa para a designação dos UHSS justifica-se, como destacado por [10], à evolução significativa das estruturas ao longo dos últimos anos. O crescente avanço e complexidade dos requisitos estruturais têm impulsionado a procura por materiais cada vez mais resistentes.

Dentre diversas aplicações, destaca-se a utilização desse tipo de aço no projeto e construção da Fast Bridge 48, na Suécia, como mostrado na figura 2.1. Trata-se de um sistema de ponte de vão único que pode ser implantado em menos de 90 minutos para fins militares, permitindo carregamentos de até 64 toneladas. Na construção dessa ponte, foram empregados aços com classificação de graus S960 e S1100.



Figura 2.1: Ponte Militar com a Utilização de UHSS [11]

Como esses graus de aço não estavam inicialmente contemplados nas normas, foram conduzidos extensivos testes de flambagem e fadiga. No entanto, dado que pontes militares não possuem limites estritos para a deflexão, os UHSS puderam ser utilizados sem problemas, resultando em uma significativa redução de peso e aumento de sua vida útil [11].

Outra aplicação notável reside na utilização de aços de alta resistência BT-HT880 nas colunas do primeiro andar do Centro Amagasaki de pesquisa e desenvolvimento da Nippon Steel and Sumitomo Metal, no Japão, conforme ilustrado na Figura 2.2. O propósito dessa escolha é absorver eficientemente a maior parte da energia sísmica em caso de terremotos, concentrando-se no primeiro andar, e controlar a deformação dos materiais das colunas e vigas dentro do critério elástico, mesmo em eventos sísmicos de grande magnitude.

Este centro de pesquisa foi escolhido para demonstrar a viabilidade e eficácia do uso de Ultra High Strength Steels (UHSS) em edifícios de pesquisa e desenvolvimento, possibilitando

explorar as capacidades do aço de alta resistência em termos de resistência sísmica, controle de deformações e eficiência estrutural [12].

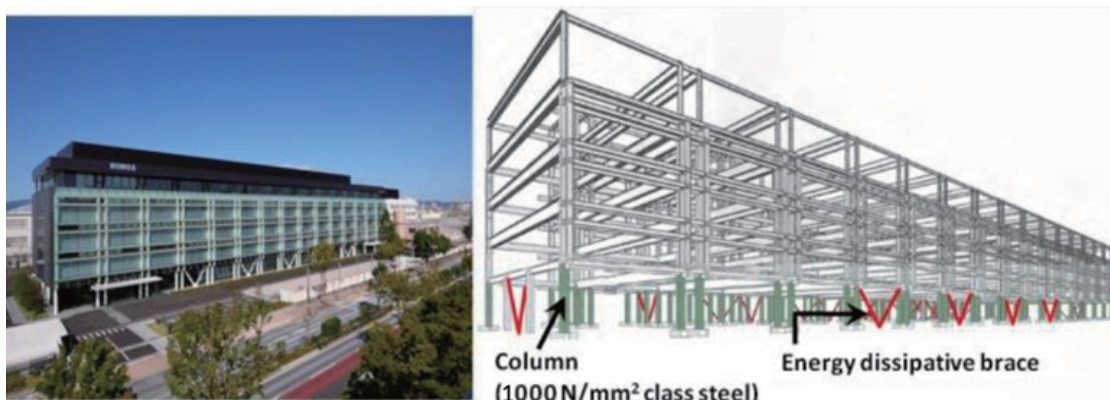


Figura 2.2: Centro Amagasaki de Pesquisa e Desenvolvimento com a Utilização de Colunas de BT-HT880 [12]

### 2.1.2 Testes em Fogo

O objetivo principal do projeto, considerando a segurança contra incêndios, é proteger vidas e propriedades. Para alcançar esse propósito, podem ser empregados materiais mais resistentes ao fogo ou métodos de proteção adicionais, visando prolongar o tempo disponível para evacuação antes que ocorra o colapso do edifício [13], [14].

Embora o aço tenha uma boa condutividade, o que acelera a propagação da temperatura na estrutura, é importante ressaltar que ele apresenta um desempenho inferior em altas temperaturas, visto que suas propriedades mecânicas diminuem consideravelmente em situações de incêndio. Assim, compreender o comportamento das estruturas metálicas ao fogo é crucial para garantir a segurança e a integridade das construções [15].

Para atingir esse objetivo, a realização de testes em altas temperaturas se apresenta como uma maneira crucial de determinar as propriedades dos materiais nessas condições específicas. Existem dois tipos principais de ensaios:

- Testes estacionários: nesse tipo de ensaio, a temperatura é mantida constante, enquanto uma carga aplicada aumentará.
- Testes transientes: neste tipo de ensaio, a carga aplicada permanece constante, enquanto a temperatura aumenta.

Os testes transientes são mais desafiadores de serem realizados; no entanto, proporcionam uma representação mais realista de situações de incêndio. O desenvolvimento do fogo em uma

sala pode ser dividido em três etapas: crescimento ou pré-flashover, queima generalizada ou pós-flashover e decaimento, conforme mostrado na Figura 2.3 [14], [16], [17].

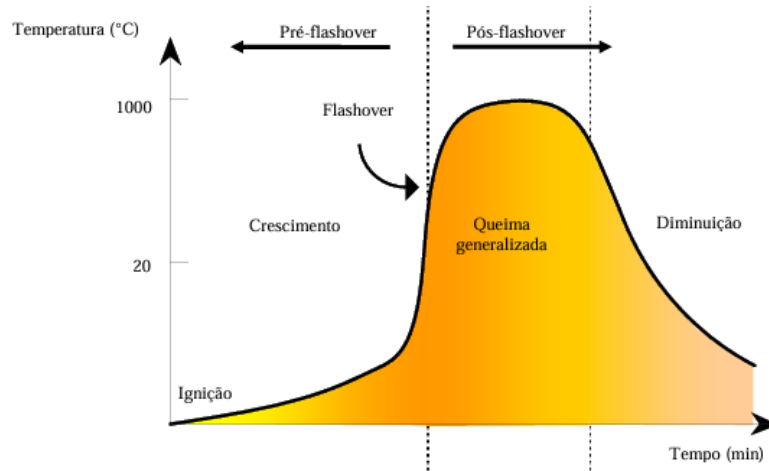


Figura 2.3: Fases do Desenvolvimento de um Incêndio [17]

Assim, como uma alternativa à curva de incêndio natural, curvas padronizadas de incêndio podem ser utilizadas nos ensaios experimentais para determinar a resistência e o comportamento no fogo dos elementos estruturais. Nesse contexto, a curva mais utilizada é a ISO 834 [18], dada pela equação 2.1 .

$$T_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2.1)$$

Onde  $T_g$  é a temperatura do gas no forno em graus Celsius e  $t$  é o tempo em minutos. Para esta equação, é assumida uma temperatura inicial de 20 [°C] e um coeficiente de convecção igual a 25 [ $W/m^2K$ ].

É importante destacar que a curva ISO 834 não representa de forma precisa uma situação real de incêndio em um edifício. No entanto, essa curva padronizada possui a vantagem de uniformizar os ensaios térmicos em fornos, possibilitando a comparação de resultados experimentais [15], [19].

### 2.1.2.1 Transferência de Calor

A transferência de calor é a troca de energia decorrente de diferenças de temperatura, ocorrendo por condução, que envolve a transferência através da vibração de partículas em sólidos ou fluidos estacionários; por convecção, que implica o movimento de um fluido sobre uma superfície; e por radiação, que consiste no fluxo eletromagnético emitido por qualquer corpo [20].

Conforme a EN 1991-1-2 [21], a transferência de calor em uma superfície exposta ao fogo resulta da soma da convecção e radiação, sendo o fluxo de calor por convecção determinado

pela Equação 2.2

$$h_c = \alpha_c * (T_g - T_m)[W/m^2] \quad (2.2)$$

Onde,  $\alpha_c$  é o coeficiente de transferência por convecção,  $T_g$  é a temperatura do gás nas proximidades do membro exposto ao fogo, enquanto  $T_m$  refere-se à temperatura do membro.

Enquanto o fluxo de calor por radiação é dado pela Equação 2.3:

$$h_r = \phi * \epsilon_m * \epsilon_f * \sigma * [(T_g + 273)^4 - (T_m + 273)^4][W/m^2] \quad (2.3)$$

Onde,  $\phi$  é o fator de forma,  $\epsilon_m$  é a emissividade do material,  $\epsilon_f$  é a emissividade do fogo e  $\sigma$  é a constante de Stephan Boltzmann (  $5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$  ). A emissividade do fogo é geralmente considerada igual a 1, a emissividade do material (aço) igual a 0,7, a emissividade do aço inoxidável é 0.4, enquanto o fator de forma é igual a 1 para superfícies côncavas, e, para o caso de superfícies convexas, pode ser aplicado o método simplificado "crossed stings" de Hottel [20], conforme apresentado na equação 2.4 e Figura 2.4. Este método teria sido necessário no caso de utilização de perfis abertos.

$$F_{12} = \frac{(L_5 + L_6) - (L_3 + L_4)}{2 \times L_1} \quad (2.4)$$

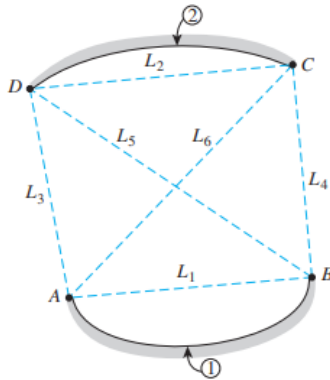


Figura 2.4: Método de "Crossed Stings" de Hottel [20]

## 2.1.3 Propriedades dos Materiais

### 2.1.3.1 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas do aço diminuem significativamente com o aumento da temperatura, e os UHSS não são exceção. Nesse contexto, o Eurocódigo EN1993-1-2 [5] considera o efeito da

temperatura, apresentando fatores de redução para os cálculos dessas propriedades, conforme estabelecido pelas normas europeias.

Esses fatores de redução podem ser aplicados tanto para a tensão de cedência quanto para o módulo elástico em aços até S500, considerando uma taxa de aquecimento entre 2 e 50 K/min, conforme especificado na Tabela 2.1. Valores intermediários podem ser obtidos por interpolação linear.

Temperatura do aço $\theta_a$ [C]	Fator de redução (referência a $f_y$ ) para a tensão de cedência efectiva $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Fator de redução (referência a $f_y$ ) para o limite proporcional $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Fator de redução (referência a $E_a$ ) para o declive do domínio elástico linear $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,807	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,0375	0,0675
1000	0,040	0,025	0,045
1100	0,020	0,0125	0,0225
1200	0,000	0,000	0,000

Tabela 2.1: Fatores de Redução

Esses valores de redução podem ser utilizados para determinar a relação entre tensão e deformação em altas temperaturas, conforme modelo constitutivo (elástico-elíptico – plástico) apresentado na Figura 2.5.

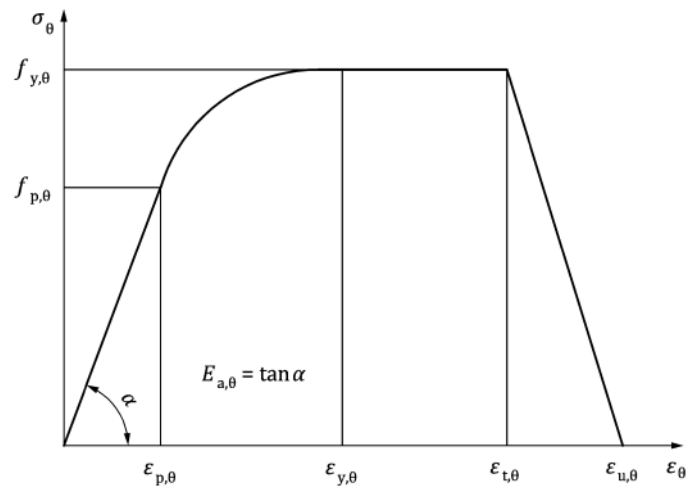


Figura 2.5: Tensão-deformação do Aço para Altas Temperaturas [22]

Uma maneira alternativa de expressar a curva de tensão-deformação é através do uso do modelo de Ramberg-Osgood, que descreve as relações não lineares entre tensão e deformação [23].

A partir disso, o modelo de Ramberg-Osgood pode ser descrito pela Equação 2.5 quando  $\sigma_\theta \leq f_{p0,2,\theta}$  e pela Equação 2.6 quando  $f_{p0,2,\theta} < \sigma \leq f_{u,\theta}$ .

$$\epsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E_{a,\theta}} + 0,002 \times \left(\frac{\sigma_\theta}{f_{p0,2,\theta}}\right)^{n_o} \quad (2.5)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta - f_{p0,2,\theta}}{E_{p0,2,\theta}} + (\epsilon_{u,\theta} - \epsilon_{p0,2,\theta} - \frac{f_{u,\theta} - f_{p0,2,\theta}}{E_{p0,2,\theta}}) \times \left(\frac{\sigma_\theta - f_{p0,2,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{p0,2,\theta}}\right)^{m_o} + \epsilon_{p0,2,\theta} \quad (2.6)$$

Onde  $\epsilon_\theta$  é a deformação na temperatura  $\theta_a$ ,  $\sigma_\theta$  é a tensão na temperatura  $\theta_a$ ,  $E_{p0,2,\theta}$  é a inclinação da curva elástica nessa temperatura,  $f_{p0,2,\theta}$  é a resistência de escoamento (0,2% de prova),  $\epsilon_{p0,2,\theta}$  é a deformação para  $f_{p0,2,\theta}$  e por fim  $E_{p0,2,\theta}$  equivale ao módulo tangente de  $f_{p0,2,\theta}$ .

Outra propriedade mecânica relevante a ser considerada é a expansão térmica, definida como a variação no comprimento de um material sólido devido ao efeito da temperatura [24].

Conforme o EN1993-1-2 [5], a expansão térmica relativa ( $\Delta l/l$ ), pode ser determinada com base na tabela 2.2

Temperatura do aço $\theta_a$ [C]	Expansão térmica relativa $\Delta l/l$
20 [C] < $\theta_a$ < 750 [C]	$1,2 \times 10^{-5}\theta_a + 0,4 \times 10^{-8}\theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4}$
750 [C] $\leq \theta_a \leq$ 860 [C]	$1,1 \times 10^{-2}$
860 [C] < $\theta_a \leq$ 1200 [C]	$2 \times 10^{-5}\theta_a - 6,2 \times 10^{-3}$

Tabela 2.2: Expansão ou Deformação Térmica

### 2.1.3.2 Propriedades Térmicas

A condutividade termica se refere a capacidade do material de conduzir calor [20]. Essa propriedade pode ser determinada, conforme apresentada no Eurocódigo EN1993-1-2 [5], pela tabela 2.3.

Temperatura do aço $\theta_a$ [C]	Condutividade térmica $\lambda_a$ (W/(m × K))
20 [C] < $\theta_a$ < 800 [C]	$54 - 3,33 \times 10^{-2}\theta_a$
800 [C] $\leq \theta_a \leq$ 1200 [C]	27,3

Tabela 2.3: Condutividade Térmica

Outra propriedade térmica importante é o calor específico, que determina a capacidade do material de armazenar energia térmica. Esta propriedade pode ser determinado pela tabela 2.4, como definido pelo EN1993-1-2 [5].

Temperatura do aço $\theta_a$ [C]	Calor específico $\theta_a$ $c_a$ ( $J/(kg \times K)$ )
$20 [C] \leq \theta_a < 600 [C]$	$425 + 7,73 \times 10^{-1}\theta_a - 1,69 \times 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6}\theta_a^3$
$600 [C] \leq \theta_a < 735 [C]$	$666 + \frac{13002}{738-\theta_a}$
$735 [C] \leq \theta_a < 900 [C]$	$545 + \frac{17820}{\theta_a-731}$
$900 [C] \leq \theta_a \leq 1200 [C]$	650

Tabela 2.4: Calor específico

Além disso, a emissividade do aço ( $\epsilon_m$ ) pode ser considerada igual a 0,7 enquanto a densidade do aço ( $\rho_a$ ) pode ser considerada igual a  $7850 \text{ kg/m}^3$ .

#### 2.1.4 Projeto de Colunas em Fogo

Colunas são membros estruturais projetados para resistir, essencialmente, a forças axiais de compressão. A falha desses componentes pode ocorrer devido à deformação plástica ou por instabilidade (flambagem), dependendo da razão de esbelteza. Colunas com esbelteza mais baixa têm maior probabilidade de falhar por deformação plástica, para valores intermediários tendem a levar à flambagem inelástica e para valores mais elevados à flambagem elástica. A razão de esbelteza pode ser calculada pela equação 2.7 [25].

$$\lambda = L_e/r \quad (2.7)$$

Onde  $L_e$  equivale ao comprimento efetivo da coluna, o qual é igual ao comprimento real da coluna multiplicado por um fator K, conforme apresentado na Figura 2.6.

Enquanto  $r$  representa o raio de giração, que pode ser definido pela equação 2.8, onde I é o momento de inércia em relação ao eixo mais fraco e A é a área da secção transversal da coluna.

$$r = \sqrt{I/A} \quad (2.8)$$

A flambagem em colunas pode ser definida como uma deflexão lateral resultante de uma força de compressão que causa instabilidade na estrutura. Essas instabilidades podem ser originadas por imperfeições globais ou locais, conforme ilustrado na Figura 2.7 [25] [22].

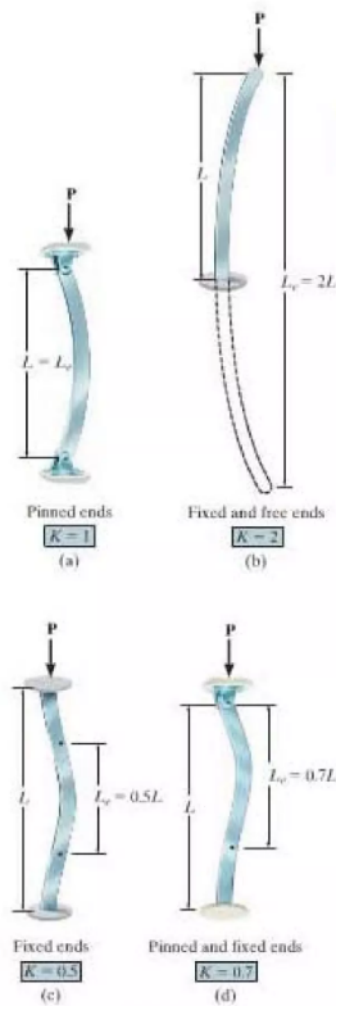


Figura 2.6: Fator de Comprimento Efetivo [22]

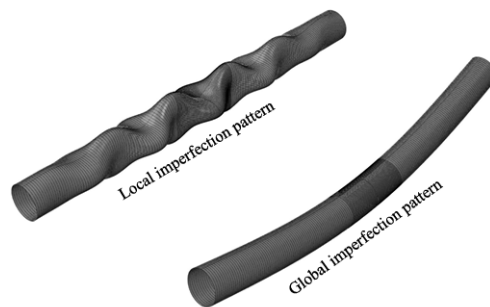


Figura 2.7: Tipos de imperfeição [26]

Este fenômeno ocorre quando a carga axial aplicada ultrapassa a capacidade da coluna de suportar essa carga, levando a um modo de falha onde ocorre uma flexão lateral significativa. Essa carga pode ser definida como carga crítica ( $P_{cr}$ ) e pode ser descrita pela fórmula de Euler conforme a equação 2.9, onde  $E$  é o módulo de elasticidade.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{(L_e)^2} \quad (2.9)$$

No entanto, essa equação deve ser utilizada apenas para colunas ideais à temperatura ambiente. Para outros casos, equações empíricas baseadas em experimentos foram desenvolvidas para a utilização do aço em projetos [22].

#### 2.1.4.1 Classificação das Secções Transversais

De acordo com o EN 1993-1-1 [27], as secções transversais podem ser classificadas em quatro classes [15]:

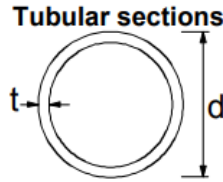
- Classe 1: São aquelas que podem utilizar sua resistência plástica sem o risco de ocorrência de flambagem local, apresentando uma significativa capacidade de rotação.
- Classe 2: São aquelas que podem empregar sua resistência plástica sem o risco de ocorrência de flambagem local, porém, com uma capacidade de rotação limitada.
- Classe 3: São aquelas que podem mobilizar sua resistência elástica nas fibras extremas, mas não a resistência plástica, devido ao perigo de flambagem local.
- Classe 4: São aquelas que não conseguem atingir sua resistência elástica devido ao risco de flambagem local.

Para o caso envolvendo secções tubulares circulares em temperatura ambiente, elas podem ser definidas com base na Figura 2.8. Onde  $f_y$  refere-se a tensão de cedência.

No entanto, a norma EN 1993-1-2 [5] especifica que, para secções em altas temperaturas, o fator  $\epsilon$  deve ser substituído pelo fator  $\epsilon_{fi}$ , conforme citado pela equação 2.10.

$$\epsilon_{fi} = 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (2.10)$$

Onde  $C$  se refere ao deslocamento axial,  $dC/dt$  se refere à taxa de deslocamento e  $L$  ao comprimento.



Class	Section in bending and/or compression					
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$					
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460
	$\epsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	$\epsilon^2$	1.00	0.85	0.66	0.56	0.51

Figura 2.8: Classe de CHS em compressão [27]

#### 2.1.4.2 Resistência a Fogo para Colunas

Para determinação da carga crítica para altas temperaturas, pode ser utilizado a equação 2.11 para as classes de 1 a 3 e a equação 2.12 para a classe 4, como determinado pelo EN 1993-1-2 [5].

$$N_{b,Rd,fi,t} = \frac{\chi_{fi} \times A \times k_{y,\theta} \times f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (2.11)$$

$$N_{b,Rd,fi,t} = \frac{\chi_{fi} \times A_{eff} \times k_{y,\theta} \times f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (2.12)$$

Onde  $N_{b,Rd,fi,t}$  equivale à resistência de projeto para flambagem em um tempo  $t$  quando o membro em compressão está sujeito a uma temperatura  $\theta_a$  no tempo  $t$ ,  $\chi_{fi}$  é o fator de redução para a flambagem por flexão em projeto de incêndio, e  $k_{y,\theta}$  equivale ao fator de redução para tensão de cedência para a temperatura  $\theta_a$  no tempo  $t$ .

Em certos casos, exceto quando se consideram os critérios de deformação ou quando é necessário considerar os fenômenos de instabilidade, a verificação da resistência ao fogo pode ser realizada ao impor que a estrutura não ultrapasse a temperatura crítica. Essa temperatura pode ser determinada pelo EN 1993-1-2 [5], como apresentado pela Figura 2.9 [15].

O grau de utilização  $\mu$  pode ser determinado com base na equação 2.13, onde  $E_{d,fi}$  é o efeito de projeto das ações para a situação de projeto de incêndio, e  $R_{d,fi,0}$  é a resistência de cálculo correspondente da barra de aço para a situação de cálculo de incêndio para o tempo igual a zero.

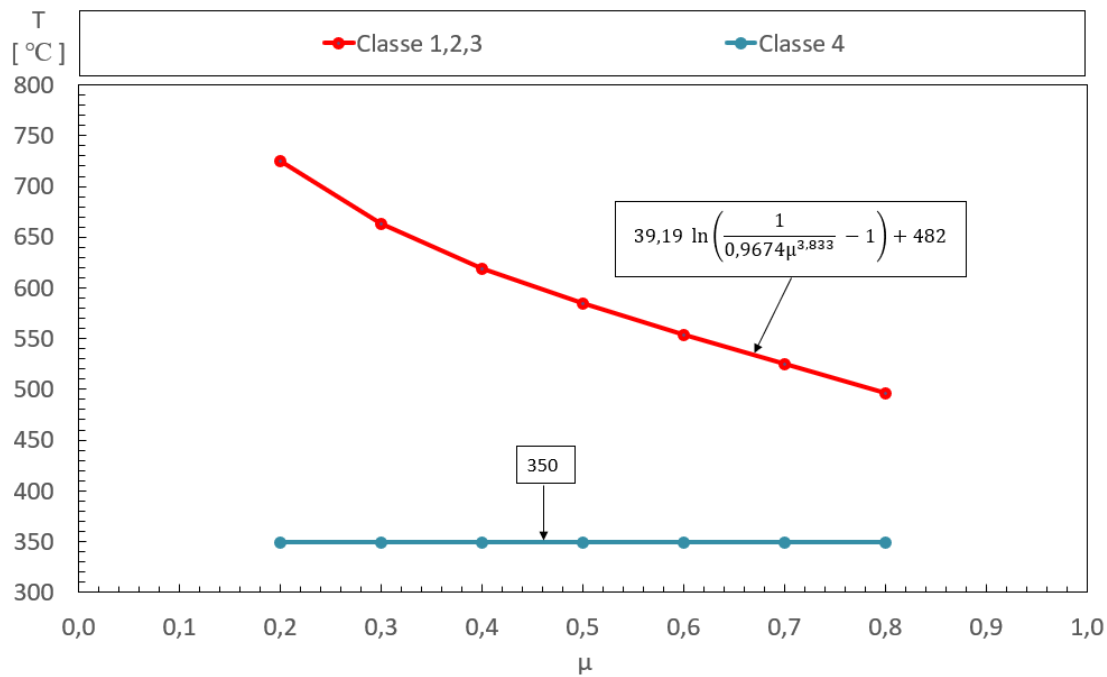


Figura 2.9: Temperatura Crítica em Função do Grau de Utilização [15]

$$\mu = \frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi,0}} \quad (2.13)$$

### 2.1.4.3 Critérios de Resistência ao Fogo

Para a realização de qualquer projeto, é necessário estabelecer um limite que indique a falha do material. Assim, de acordo com [28], o método experimental de resistência ao fogo padrão possui três critérios.

- Capacidade de carga (R): Este critério baseia-se na capacidade do elemento de suportar a carga aplicada.
- Integridade (E): Este critério baseia-se na condição do elemento de manter sua função sem permitir a penetração em chamas ou fumos.
- Isolamento (I): Este critério baseia-se na capacidade de compartimentação do elemento em manter a sua função de isolamento sem o desenvolvimento de temperaturas elevadas na sua superfície não exposta.

No entanto, nos casos de colunas (elementos verticais), o critério de capacidade de carga será relevante. Assim, para as colunas, a falha (tempo de resistência ao fogo) ocorrerá quando a equação 2.14 ou a equação 2.15 forem excedidas [14]. Onde C equivale ao deslocamento axial e dC/dt a taxa de deslocamento.

$$C_{limit} = \frac{L}{100} \quad (2.14)$$

$$\left(\frac{dC}{dt}\right)_{limit} = \frac{3 \times L}{1000} \quad (2.15)$$

## 2.2 Estudos Experimentais de Materiais UHSS a Altas Temperaturas

Esta secção apresentará uma breve revisão de alguns estudos experimentais relacionados a esse tema.

Em 2016, Qiang et al[10] conduziram um estudo experimental sobre as propriedades mecânicas do aço de grau S960 em condições de incêndio, abrangendo tanto estados estacionários quanto transitórios, com o intuito de realizar comparações com as principais normas. Os resultados revelaram que a deterioração das propriedades mecânicas do aço é dependente do grau e do método de fabricação. Além disso, foram propostas equações de projeto para o cálculo das propriedades do aço S960 nessas condições.

Em 2020, Wang et al[29] investigaram as propriedades mecânicas do aço Q960 a altas temperaturas, tanto a partir de testes estacionários quanto transitórios. Os resultados indicaram que as propriedades do grau Q960 apresentam uma deterioração distinta em comparação com outros aços, como Q460, Q690 e S960. Como conclusão, foram propostas equações preditivas para a resistência e módulo de elasticidade do aço Q960 a temperaturas elevadas.

Em 2021, Xing et al[30] analisaram as propriedades térmicas de sete aços de alta resistência diferentes (Q460, Q500, Q550, Q620, Q690, Q890, Q960) e um aço convencional Q345, comparando-os com as propriedades propostas pelo Eurocódigo e ASCE. Os resultados indicaram que as propriedades térmicas não foram adequadamente previstas pelas normas comparadas, levando à apresentação de novas equações para esses aços.

Em 2021, Farmani et al[2] realizaram um estudo sobre o efeito da fluência térmica na performance de um UHSS de grau 1200 em altas temperaturas, utilizando um teste em estado transiente. Inicialmente, conduziram ensaios para obter as curvas de tensão-deformação do material para um determinado aquecimento, comparando-as com normas para aços convencionais. Posteriormente, realizou experimentos para mais dois aquecimentos, buscando obter um modelo térmico da fluência. Ao final, concluiu que a mudança na taxa de aquecimento pode influenciar significativamente a resistência do aço.

## 2.3 Simulação Numérica de Colunas de UHSS

Esta secção apresentará uma breve revisão de alguns artigos que relataram simulações numéricas relacionados a esse tema.

Em 2017, Winful et al[31] utilizaram simulação computacional para analisar o comportamento à flexão de colunas fabricadas com aços de alta resistência das classes S690QL e S700MC a temperaturas elevadas. Os resultados indicam que as recomendações do Eurocódigo são geralmente conservadoras para colunas de S700MC, mas pode ser necessário um valor inferior para a curva de encurvamento das colunas de S690QL.

Em 2021, Mohammed et al[32] investigaram o desempenho estrutural de colunas, feitas de secções ocas circulares, quadradas e retangulares, de Aços de Alta Resistência (HSS) de classes S690QL e S700MC, sem proteção em situações de incêndio, utilizando o software Abaqus. Os estudos realizados com modelos de elementos finitos demonstraram a viabilidade de prever o desempenho de colunas de secção oca de HSS em condições de incêndio, especialmente com a introdução de novas curvas de flambagem.

## 2.4 Resultados Experimentais de Colunas de UHSS

Esta secção apresentará uma breve revisão de alguns artigos que relataram resultados experimentais relacionados a esse tema.

Em 2012, Tondini et al[33] conduziram um estudo experimental e numérico sobre o comportamento de colunas feitas de aços de alta resistência, com uma resistência na ordem de 820 MPa. O estudo abrangeu tanto tubos circulares com secção oca quanto tubos circulares preenchidos com concreto. Foi realizada uma comparação entre os fatores de redução dos Eurocodes (na época, válidos até S460) e os valores propostos na literatura, baseados em testes de aços de alta resistência (HSS). Os resultados indicaram que ambos os métodos superestimaram a resistência ao fogo.

Em 2014, Heidarpour et al[34] realizaram uma comparação do comportamento mecânico entre tubos de UHSS e aço convencional, soldados nos cantos de placas convencionais de aço em orientações quadradas e triangulares a altas temperaturas, conforme especificado pela norma ISO 834, com 70 por cento do fator de carga. Nestas secções híbridas, foram observadas falhas locais nas placas em forma de telhado. Adicionalmente, as secções híbridas de UHSS apresentaram temperaturas de falha menores do que as secções convencionais, considerando o mesmo fator de segurança, embora demonstrassem uma capacidade de carga mais de três vezes

superior.

Em 2023, Farmani et al[3], foram desenvolvidas equações de projeto simplificadas para colunas de aço de ultra-alta resistência (UHSS) CHS de grau 1200 em condições de incêndio transitório, considerando dois diferentes regimes de aquecimento. Esse desenvolvimento baseou-se em estudos experimentais e simulação computacional detalhada utilizando o software ABAQUS, incorporando não-linearidades geométricas, materiais, incluindo a fluência. Como resultado, foram obtidas equações capazes de prever as temperaturas críticas de flambagem e falha das colunas UHSS, com uma margem de erro dentro de aproximadamente 4 por cento.

Em 2023, Wang et al[9] realizaram uma investigação sobre a resistência ao fogo de colunas de aço Q960 de alta resistência com formato de H sob compressão. O estudo analisou o impacto de diversos parâmetros, como esbelteza, imperfeição geométrica inicial, carga axial e fluência térmica. Os resultados indicaram que as normas de projeto existentes oferecem previsões inseguras para colunas de aço Q960, sugerindo a necessidade de uma abordagem diferente dessas normas.

Em 2023, Farmani et al[35] conduziram um estudo sobre o comportamento de colunas de aço híbridas em condições transitórias de incêndio. O estudo empregou uma seção composta por tubos de aço de ultra-alta resistência e placas de aço inoxidável, visando analisar o impacto da fluência térmica no comportamento estrutural e nas considerações de projeto das colunas de aço sob condições de incêndio. O modelo demonstrou uma elevada precisão, possibilitando a formulação de equações de projeto para colunas híbridas.



# Capítulo 3

## Modelo de Elementos Finitos

Simulações com a utilização de elementos finitos tornaram-se um passo essencial no projeto em diversas áreas da engenharia. Para o trabalho em questão, será utilizado o software Ansys Mechanical APDL para a simulação de colunas de UHSS em altas temperaturas. Neste capítulo, será apresentado o modelo numérico de maneira geral, empregado ao longo do presente trabalho.

### 3.1 Desenvolvimento da Simulação

A análise em elementos finitos no Ansys Mechanical APDL pode ser praticamente dividida em três etapas [36]:

- Pré-processamento: Envolve a modelação da geometria a ser estudada, a escolha dos tipos de elementos, a definição das propriedades dos materiais e a geração da malha e aplicação das condições fronteira.
- Solução: A definição dos métodos de solução e, por fim, a resolução do problema.
- Pós-processamento: Compreende a visualização, verificação, impressão e exportação dos resultados obtidos na simulação.

No presente trabalho, foram conduzidos cinco tipos de análises, detalhados nas subsecções abaixo, além de uma breve descrição dos elementos utilizados.

#### 3.1.1 Elementos Utilizados

Dado que esta simulação trata de longas colunas com espessuras reduzidas, devido à utilização do UHSS, optou-se por utilizar elementos de casca. Esses elementos são adequados para estruturas em que uma dimensão é significativamente menor que as outras duas.

Nas análises realizadas, foram empregados dois tipos diferentes de elementos de casca: o elemento de casca 181 para análises estruturais e o elemento de casca 131 para análises térmicas.

### 3.1.1.1 Elemento de Casca 181

O elemento de casca 181 é um elemento 3D de quatro nós utilizado para simulações estruturais com seis graus de liberdade em cada nó (translação nas direções  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e rotação em torno dos eixos  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), conforme ilustrado na 3.1. Este elemento possui funções de interpolação lineares e integração completa de Gauss ( $2 \times 2$ ) modificada. Na espessura são utilizados 5 pontos de Gauss. A face superior (TOP) está identificada com a LKEY = 2, enquanto que a face inferior (BOTTOM) está identificada com a LKEY = 1. Este elemento foi definido apenas com uma camada [37].

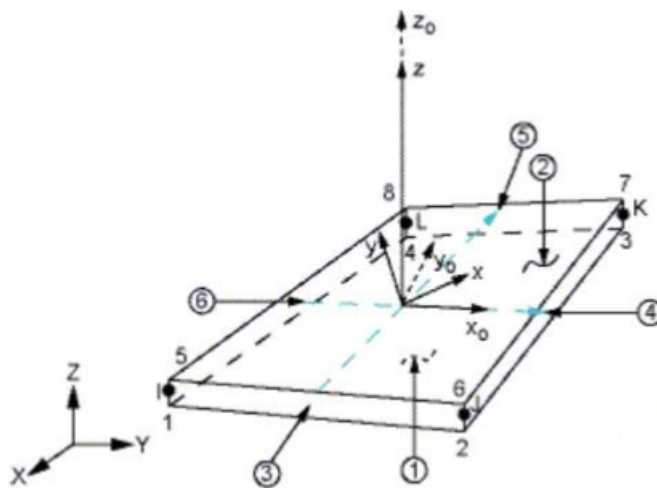


Figura 3.1: Elemento de Casca 181 [37]

### 3.1.1.2 Elemento de Casca 131

O elemento de casca 131 é um elemento 3D de quatro nós utilizado para simulações térmicas que pode ter até 32 graus de liberdade relacionados à sua temperatura, quantidade essa que dependerá da quantidade de camadas definidas pelo usuário. Esse elemento pode ser ilustrado pela Figura 3.2. Este elemento utiliza funções de interpolação lineares, com integração completa de Gauss ( $2 \times 2$ ). Foi considerada apenas uma camada, com variação de temperatura linear, tendo em consideração a elevada condutividade dos materiais envolvidos. Foi ainda ativada a opção “PAINT” para que a temperatura da superfície inferior (BOTTOM), identificada com a LKEY = 1, seja assumida na ligação com a temperatura do nó correspondente. Esta definição apenas tem significado na ligação com elementos sólidos, que apenas possuem um grau de liberdade por nó [37].

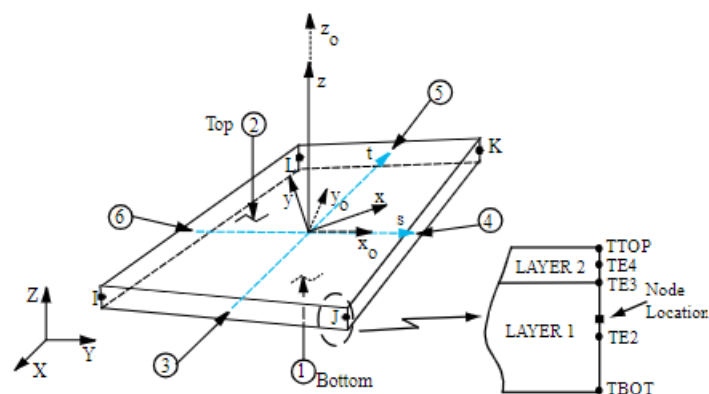


Figura 3.2: Elemento de Casca 131 [37]

Assim, para este trabalho, devido ao fato de possuir apenas uma camada, haverá apenas três graus de liberdade, correspondentes às temperaturas TBOT, TE2 e TTOP.

É importante destacar que, em relação a este elemento, as normais desempenham um papel crucial. Dependendo da aplicação, a convecção e a condução térmica podem ser aplicadas dos dois lados da superfície definida pelo elemento. Portanto, as superfícies podem ser especificadas de acordo com a Figura 3.3.

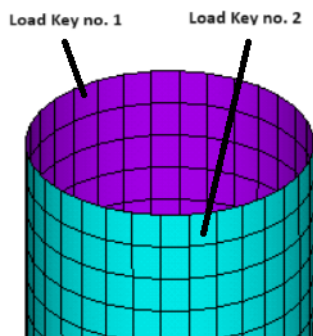


Figura 3.3: Orientação das Superfícies do Elemento

### 3.1.2 Análise Linear Elástica de Flambagem à Temperatura Ambiente

A análise de estabilidade linear elástica, também conhecida como análise de autovalor de flambagem, uma análise estrutural que pode ser utilizada para calcular a carga de flambagem teórica em um corpo elástico [38] [39].

Para realizar esta análise, foi necessário, primeiramente, conduzir a etapa de pré-processamento, que incluiu a modelação da coluna, a definição dos tipos de elementos, a inclusão das propriedades elásticas do material e das condições de fronteira, além da geração da malha.

Para a análise de autovalor de flambagem, foi calculado um fator de escala para a carga aplicada. Portanto, se a carga aplicada for uma carga de referência unitária, esse fator de escala equivale à carga crítica de flambagem, sendo este valor uma superestimação do valor real.

Antes de realizar a simulação de autovalor de flambagem, foi necessário efetuar uma solução estática para determinar matriz de rigidez das tensões da coluna sob a carga aplicada. Após isso, determina-se o número de modos de flambagem a serem extraídos, e, por fim, realiza-se a simulação.

Os autovalores de flambagem obtidos foram determinados pela equação 3.1, em que  $n$  equivale ao número do módulo de flambagem. Portanto, a carga crítica corresponde ao primeiro autovetor, pois esse será o menor valor de força necessário para gerar instabilidades na estrutura, tornando-se, assim, a carga crítica de Euler, conforme apresentado pela equação 2.9 [40].

$$P_{cr} = \frac{n^2 \times \pi^2 \times E \times I}{(L)^2} \quad (3.1)$$

No contexto deste trabalho, o objetivo principal desta etapa foi utilizar a deformação encontrada para implementar uma imperfeição geométrica a ser empregada na análise não linear.

### 3.1.3 Análise não Linear de Flambagem à Temperatura Ambiente

Para a análise não linear de flambagem, foi utilizado o método incremental e iterativo, conhecido como Análise Geométrica e Material Não Linear com Imperfeições (GMNIA). Esse método refere-se a uma análise com imperfeições explicitamente incluídas, fundamentada nos princípios da teoria de flexão de casca aplicada a estruturas imperfeitas que incorpora a teoria não linear de grandes deslocamentos [41]. Sendo esta uma análise estrutural.

Foi necessário, portanto, implementar as imperfeições geométricas obtidas na simulação anterior. Para isso, foi preciso multiplicar o deslocamento encontrado para cada modo de instabilidade por um fator de escala, conforme demonstrado na Equação 3.2, para incorporar a imperfeição real no Ansys.

$$\text{Fator de Escala} = \frac{\text{Imperfeição Real}}{\text{Imperfeição da Análise Linear}} \quad (3.2)$$

Para as propriedades do material, é necessário adicionar ao modelo constitutivo do material. Foi definido um comportamento não linear inelástico isotrópico multilinear. Assim, é importante ressaltar que não foi considerado o efeito da fluência térmica no material. Esse

efeito relaciona-se à deformação permanente causada pela duração da exposição a uma alta temperatura [24].

O método de solução utilizado nesta análise foi o método do comprimento de arco, um método usado para resolver sistemas não lineares de equações quando o problema em questão apresenta um ou mais pontos críticos. Num contexto de comportamento estrutural, um ponto crítico pode ser interpretado como aquele em que o corpo carregado não consegue suportar um aumento nas forças externas, resultando em instabilidade [42]. Neste caso, a força aplicada à coluna deve ser superior à força máxima obtida na simulação. O incremento da força iniciará com um valor igual à força aplicada no corpo dividido pela quantidade de subetapas definida, conforme mostrado pela equação 3.3.

$$\Delta F = \frac{\text{Força aplicada}}{\text{Número de sub-etapas}} \quad (3.3)$$

Esse incremento ainda varia entre os limites apresentados na Equação 3.4 e Equação 3.5, onde  $R_{max}$  e  $R_{min}$  são constantes definidas nas opções de solução.

$$\Delta F_{max} = \Delta F \times R_{max} \quad (3.4)$$

$$\Delta F_{min} = \Delta F \times R_{min} \quad (3.5)$$

Assim, o objetivo principal desta análise foi realizar a validação à temperatura ambiente com os resultados experimentais e determinar a capacidade portante à temperatura ambiente.

### 3.1.4 Análise não Linear de Flambagem a Temperaturas Elevadas

Essa análise estrutural foi realizada para validar os resultados em situações de incêndio, conforme descritos nas referências bibliográficas escolhidas, nos quais foi fornecido o perfil de temperatura nas colunas por meio de termopares em suas superfícies.

Inicialmente, deve-se adicionar a propriedade de expansão térmica de cada material, através da deformação térmica proposta pelo Eurocódigo 3-1-2 [5].

O perfil de temperatura dos termopares que varia com o tempo foi aplicado na coluna de modo uniforme e foi definida uma temperatura de referencia de 20 °C para deformação térmica nula.

A força foi inserida com o fator de carga desejado. Apesar de ser constante, foi representada como uma tabela no Ansys, conforme mostrado na Tabela 3.1, onde  $t_{sim}$  corresponde ao tempo

de simulação. Essa abordagem foi necessária, pois ao adicionar apenas a força constante, a simulação não apresentou a deformação inicial devido à força. Com esta opção de carregamento foi utilizado uma solução incremental no tempo.

Tempo (s)	Força (N)
0	0
10	$F_z$
$t_{sim}$	$F_z$

Tabela 3.1: Tabela de Força

O método de solução empregado nesta etapa foi o de Newton-Raphson, realizado com incrementos de tempo. O critério adotado baseou-se na força e momento, ambos com uma tolerância de 0,001 e um valor mínimo de referência de 1 N e 1 Nm.

### 3.1.5 Análise Térmica

Para incluir no estudo a curva de aquecimento ISO 834 [18], que corresponde à temperatura do forno, em alguns casos foi necessário realizar previamente uma análise térmica para obter o perfil de temperatura na coluna ao longo do tempo, a ser utilizado na análise posterior termo-mecânica.

O primeiro passo foi alterar os elementos estruturais (elemento de casca 181) para elementos térmicos (elemento de casca 131), pois esta análise trata-se de uma análise térmica. Esta operação é feita de forma automática no programa de elementos finitos, com as necessárias adaptações.

Para a simulação térmica, foi necessário adicionar propriedades térmicas, como condutividade térmica, calor específico, emissividade e densidade, tanto em temperatura ambiente quanto para altas temperaturas. Além disso, exclusivamente para esta análise, os pontos de integração das seções foram reduzidos de 5 (análise mecânica) para 3 (análise térmica).

Em seguida, um nó localizado fora da coluna foi designado para representar a temperatura do forno, sendo identificado como "enclosure 1". Após isso, foram aplicadas a convecção e radiação nas superfícies exteriores da coluna, e a temperatura inicial foi definida como 20 °C.

Para realizar a solução da análise térmica, a equação que governa a transferência de calor através de um sólido para um material isotrópico pode ser expressa pela Equação 3.6, onde  $Q$  é o calor gerado no corpo, que neste caso será desprezado [43].

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda \times \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \times \frac{\partial \theta}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \times \frac{\partial \theta}{\partial z}) + Q = \rho \times c_p \times \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.6)$$

A Equação 3.6 é resolvida por meio do método dos resíduos pesados, que permite transformar a equação da forma diferencial para sua forma integral. A solução da simulação é obtida de maneira incremental e iterativa pelo método de Newton-Raphson.

O tipo de análise foi configurado como transiente, com um tempo incremental de 60 s, podendo ser reduzido para 1 s. O critério de convergência adotado foi o de fluxo de calor, com uma tolerância de 0,005 e um valor mínimo de referência de  $1 \times 10^{-6}$  W.

### 3.1.6 Análise Termo-mecânica

A partir do perfil de temperatura ao longo do tempo obtido pela simulação térmica, foi conduzida uma análise termo-mecânica não linear. Para isso, foi necessário extrair os valores de temperatura da análise anterior, utilizando um comando para ler os arquivos “\*.rth” obtidos na solução térmica.

Este comando lê, com incrementos de 10 segundos, os resultados da análise térmica obtidos anteriormente. Para valores intermediários, é definida uma variável KBC. Quando KBC é igual a 1, os valores de temperatura intermediários permanecem constantes até atingir o próximo ponto. Enquanto, quando KBC é igual a 0, os valores intermediários podem ser definidos por interpolação linear (rampa).

Também foi necessário alterar o tipo de elemento de térmico para estrutural, pois essa análise se trata de uma análise estrutural. Além disso, foi preciso redefinir as condições de fronteira, as forças e os pontos de integração da secção, voltando às condições da análise não linear de flambagem a altas temperaturas.

Assim, o método de solução empregado nesta etapa foi conduzido com incrementos de tempo definidos pelo comando utilizado anteriormente. O critério adotado baseou-se no deslocamento, com uma tolerância de 0,001 e um valor mínimo de referência de 3 m. Isto significa que a determinação de equilíbrio do elemento é definido por uma tolerância de 3mm.



# Capítulo 4

## Validação Numérica

Neste capítulo, foram realizadas as validações numéricas dos artigos com resultados experimentais selecionados.

### 4.1 Primeira Validação Numérica

O primeiro trabalho experimental utilizado para validação foi o artigo de 2023 de Mohammad Amin Farmani e Amin Heidarpour, intitulado 'Development of design equations for ultra-high strength steel CHS columns under transient fire conditions considering thermal creep and axial restraint effects' [3]. Esse ensaio experimental pode ser visualizado na Figura 4.1. Trata-se de um ensaio de compressão com uma placa fixa (superior) e uma placa móvel (inferior).

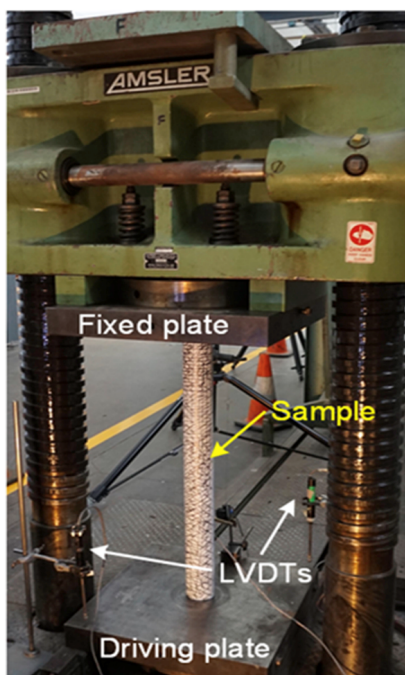


Figura 4.1: Ensaio Experimental da Coluna CHS [3]

Neste estudo, foram conduzidos testes de compressão e modelagem numérica em colunas Seções Ocas Circulares (CHS) de aço grau 1200, em condições de incêndio transitórias não padronizadas, com duas taxas diferentes de aquecimento (5 °C/min e 20 °C/min) e três fatores de carga diferentes (25%, 50% e 75%). Os resultados experimentais podem ser visualizados na tabela 4.1

Espécime	Fator de carga (%)	Capacidade de Carga (kN)	Carga (kN)	Temperatura Crítica R20 [°C]	Temperatura Crítica R5 [°C]
U0.25	25	936	234	641	617
U0.50	50	936	468	553	522
U0.75	75	936	702	454	431

Tabela 4.1: Resultados Experimentais da Coluna CHS

#### 4.1.1 Geometria

A coluna é definida por uma seção CHS, possui um diâmetro de 76.1 mm, espessura de 3.1 mm e comprimento de 780 mm. A coluna está simplesmente apoiada em duas placas. Além disso, para os ensaios realizados com taxas de aquecimento variáveis, estão instalados 5 termopares ao longo de seu comprimento, conforme ilustrado na Figura 4.2.

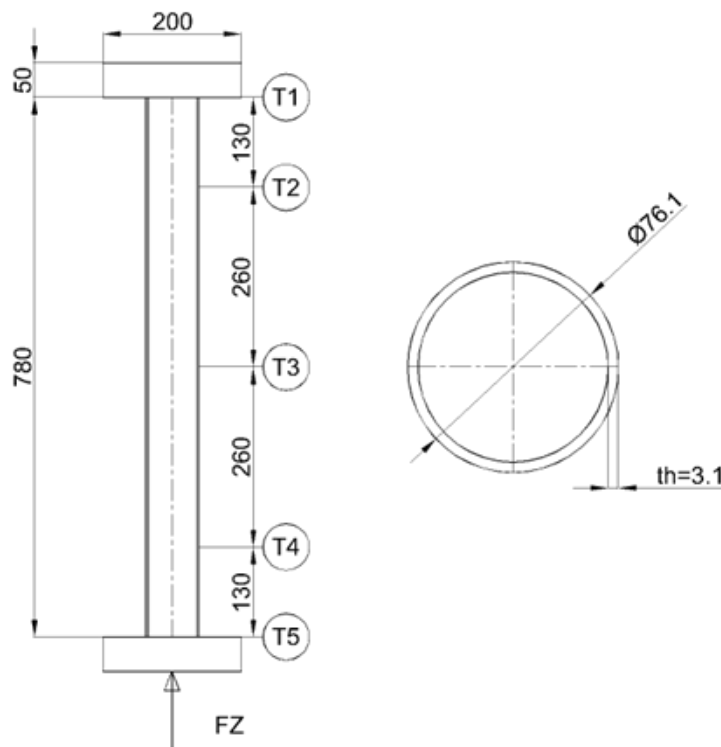


Figura 4.2: Geometria do CHS

### 4.1.2 Propriedades dos Materiais

A lei constitutiva do aço UHSS presente neste estudo segue um modelo de Ramberg-Osgood modificado, conforme demonstrado pelas equações 4.1 e 4.2.

$$\epsilon_T = \frac{\sigma}{E_T} + 0,002 \times \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2,T}}\right)^{n_T} \quad (4.1)$$

$$\epsilon_T = \frac{\sigma - \sigma_{0,2,T}}{E_{0,2,T}} + (0,015 - \epsilon_{t0,2,T} - \frac{\sigma_{t1,5,T} - \sigma_{t0,2,T}}{E_{0,2,T}}) \times \left(\frac{\sigma - \sigma_{0,2,T}}{\sigma_{t1,5,T} - \sigma_{0,2,T}}\right)^{n'_T} + \epsilon_{t0,2,T} \quad (4.2)$$

As propriedades em temperatura ambiente estão definidas na Tabela 4.2

$E_T(GPa)$	$\sigma_{0,2,T}(MPa)$	$\sigma_{1,5,T}(MPa)$
198	1200	1375

Tabela 4.2: Propriedades Mecânicas a Temperatura Ambiente

As propriedades em altas temperaturas podem ser obtidas com os fatores de redução da Tabela 4.3. Os valores de 20 a 750 foram obtidos experimentalmente [3].

Os valores foram extrapolados até 1100 °C. Para  $k_{E,T}$  foram utilizados os valores da Tabela 4.3, e para  $k_{\sigma_{0,2,T}}$  e  $k_{\sigma_{1,5,T}}$  foi empregada a interpolação linear entre 750 °C e 1200 °C (considerando zero para 1200 °C). Enquanto para  $n_T$ , foi considerado o valor constante de 5 e, a partir disso, calculado o  $n'_T$ .

T [C]	$k_{E,T}$	$k_{\sigma_{0,2,T}}$	$k_{\sigma_{1,5,T}}$	$n_T$	$n'_T$
20	1,000	1,000	1,000	5,62	6,55
100	0,9757	0,9292	0,9927	4,58	5,38
200	0,9265	0,8208	0,9462	4,56	4,62
300	0,8194	0,7333	0,8778	4,23	6,13
400	0,7388	0,6333	0,7564	3,31	4,18
500	0,6381	0,5042	0,5818	4,27	2,17
600	0,3558	0,2350	0,2720	4,39	1,64
700	0,1708	0,1083	0,1455	5,13	1,10
750	0,0957	0,0367	0,0487	5,65	4,07
800	0,0900	0,0326	0,0433	5	3,03
900	0,0675	0,0244	0,0325	5	3,06
1000	0,045	0,0163	0,0217	5	2,97
1100	0,0225	0,0082	0,0108	5	2,99

Tabela 4.3: Fatores de Redução UHSS grau 1200

Assim, por meio das equações 4.1 e 4.2 e dos fatores de redução encontrados na 4.3, foi possível obter os gráficos de tensão-deformação mostrados na Figura 4.3.

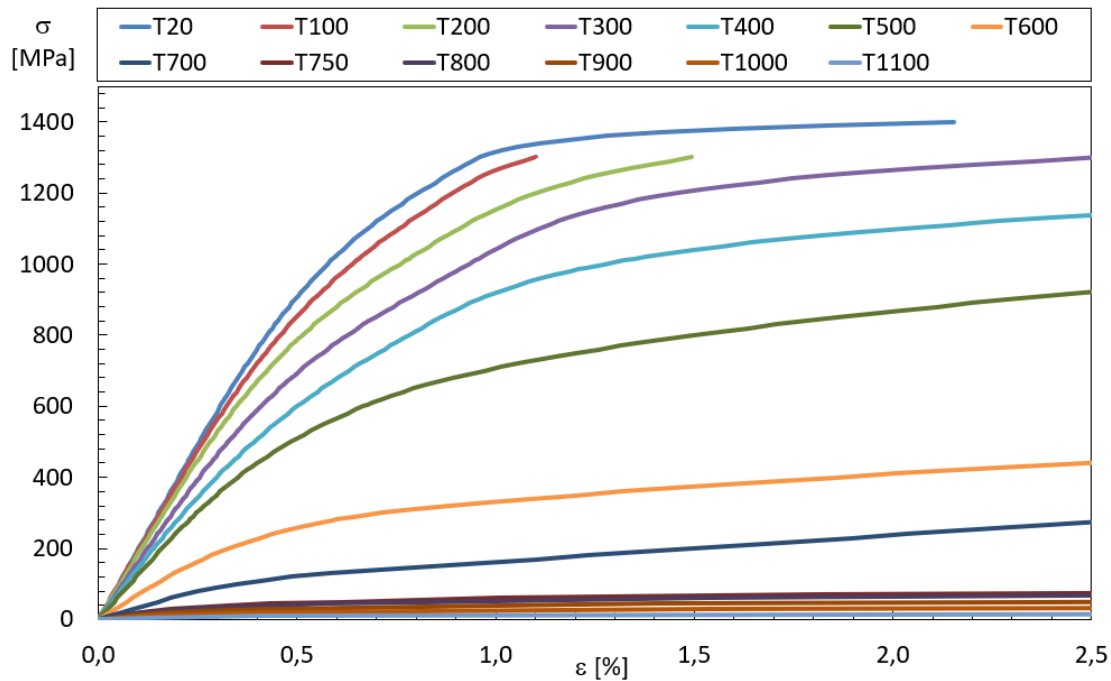


Figura 4.3: Gráfico de Tensão-deformação do UHSS

Para a expansão térmica, foi utilizada a equação 4.3 conforme apresentado em [3].

$$\epsilon_{th} = (5,7 + 1,55 \times 10^{-1}T - 7,19 \times 10^{-6}T^2) \times (T - 20) \times 10^{-6} \quad (4.3)$$

As propriedades térmicas a serem utilizadas na análise térmica foram adotadas conforme as tabelas 2.3 e 2.4 estabelecida pelo Eurocódigo EN1993-1-2 [5].

Para as placas, foi considerado apenas o comportamento elástico, sendo aplicado um módulo de elasticidade elevado ( $E_T = 2000GPa$ ) e uma espessura elevada, para simular um material mais rígido.

### 4.1.3 Malha

A Figura 4.4 mostra a malha da simulação realizada com elementos de casca.

Para este trabalho, a coluna na direção do seu comprimento foi dividida em 80 divisões e 16 em torno de seu diâmetro, totalizando 2560 elementos nas colunas. Ao considerar os elementos das placas para a validação, o total foi de 3200 elementos. O número total de nós foi 3202.

### 4.1.4 Condições de Fronteira

A Figura 4.5 apresenta as condições de contorno consideradas neste trabalho. Uma força constante em Z foi aplicada no nó central da placa inferior, a qual possui deslocamento de

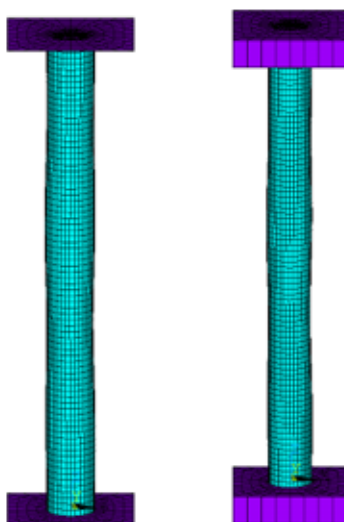


Figura 4.4: Modelagem com Elemento de Cascas sem e com forma

translação em X e Y igual a zero em todos os seus nós, além de rotação em X e Y igual a zero. Por outro lado, a placa superior encontra-se completamente fixa.

#### 4.1.5 Imperfeições

A Figura 4.6 mostra as imperfeições consideradas para este trabalho, com base no EN-10219-2 [44], foram consideradas imperfeições locais (ovalização) e globais (falta de retidão).

#### 4.1.6 Simulação à Temperatura Ambiente

Após a realização da análise GMNIA em temperatura ambiente, foi possível comparar os resultados obtidos no Ansys com os resultados experimentais e numéricos apresentados por Farmani et al.[3], conforme ilustrado na Figura 4.7. Nessa grafico, C equivale ao deslocamento axial no nó central da placa inferior(contração).

Como pode ser observado, a simulação realizada no Ansys apresenta uma boa concordância com os resultados comparados, mostrando apenas uma pequena diferença em sua região final da curva. A força máxima obtida foi de 917,91 kN, equivalendo assim a um erro relativo de -1,93 % com relação ao resultado experimental.

Também foi possível comparar o modo de falha obtido no Ansys com o modo de falha obtido experimentalmente no artigo [3], como pode ser mostrado pela Figura 4.8. Nesta figura estão representadas as deformações principais para os últimos instantes de deformação da coluna. A diferença está relacionada com o facto de no ensaio experimental se ter determinado um deslocamento maior do que na simulação.

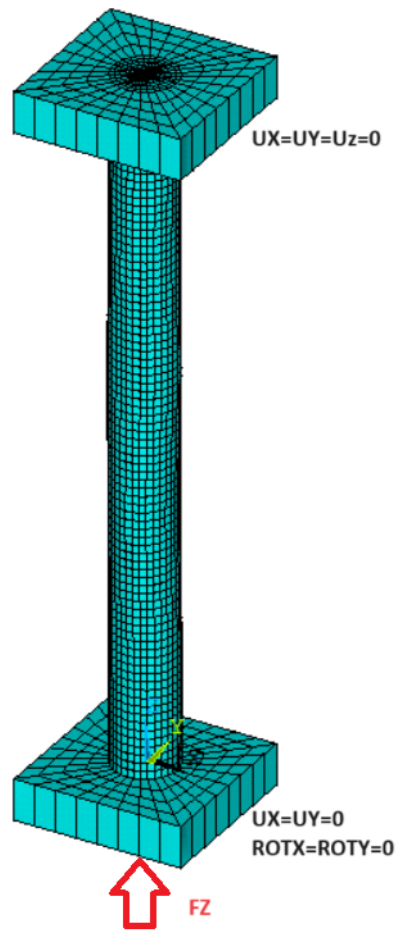


Figura 4.5: Condições de Fronteira do CHS

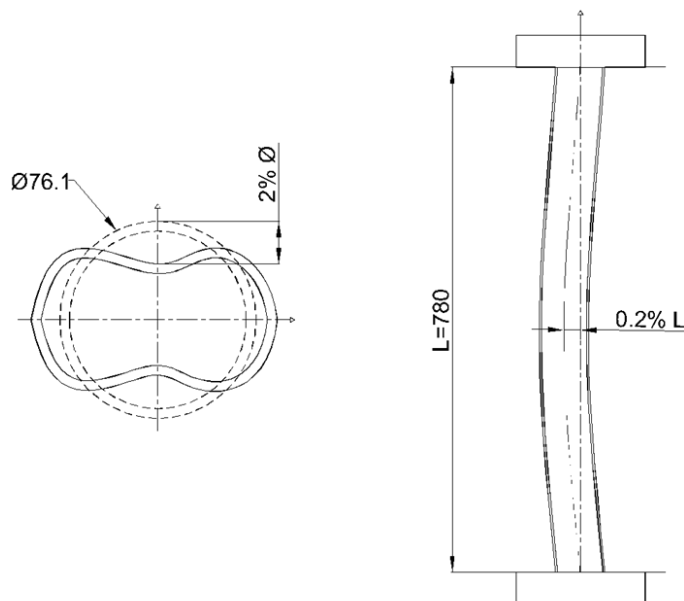


Figura 4.6: Imperfeições do CHS

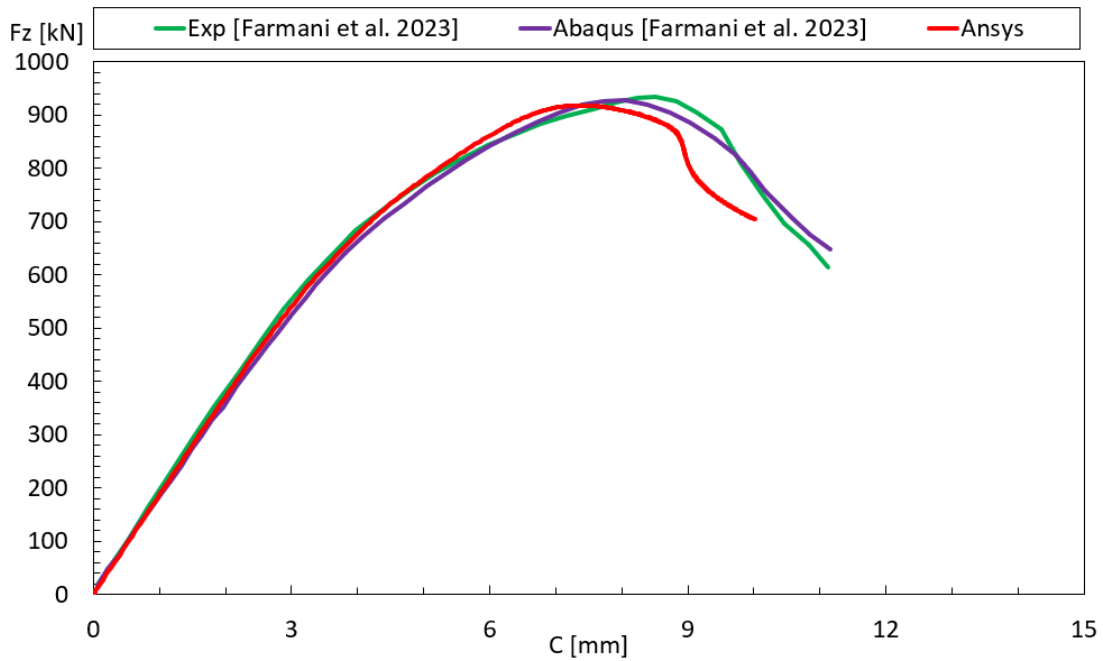


Figura 4.7: Validação da Capacidade Portante à Temperatura Ambiente

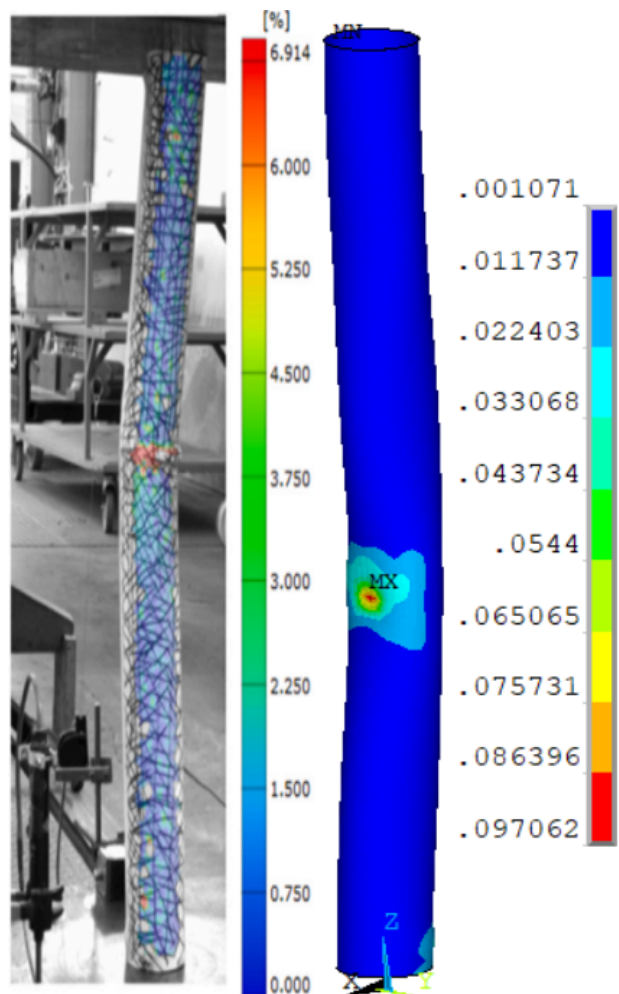


Figura 4.8: Comparação do Modo de Falha da Coluna UHSS. Valores Experimentais e Numéricos (Carga a 850 kN) à Temperatura Ambiente, com Apresentação da Deformação Principal na Direção 1

### 4.1.7 Simulação a Temperaturas Elevadas

Com a realização das simulações GMNIA em altas temperaturas, foi possível realizar a validação. Foram conduzidas seis simulações com três fatores de carga e dois regimes de aquecimentos diferentes. Cada uma dessas simulações foi comparada com seu respectivo resultado experimental e numérico do artigo e apresentada nas Figuras 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14. Na Figura 4.9 está representado o ensaio realizado com uma taxa de aquecimento de 5 °C/min, com uma carga mecânica constante correspondente a 25% da capacidade portante.

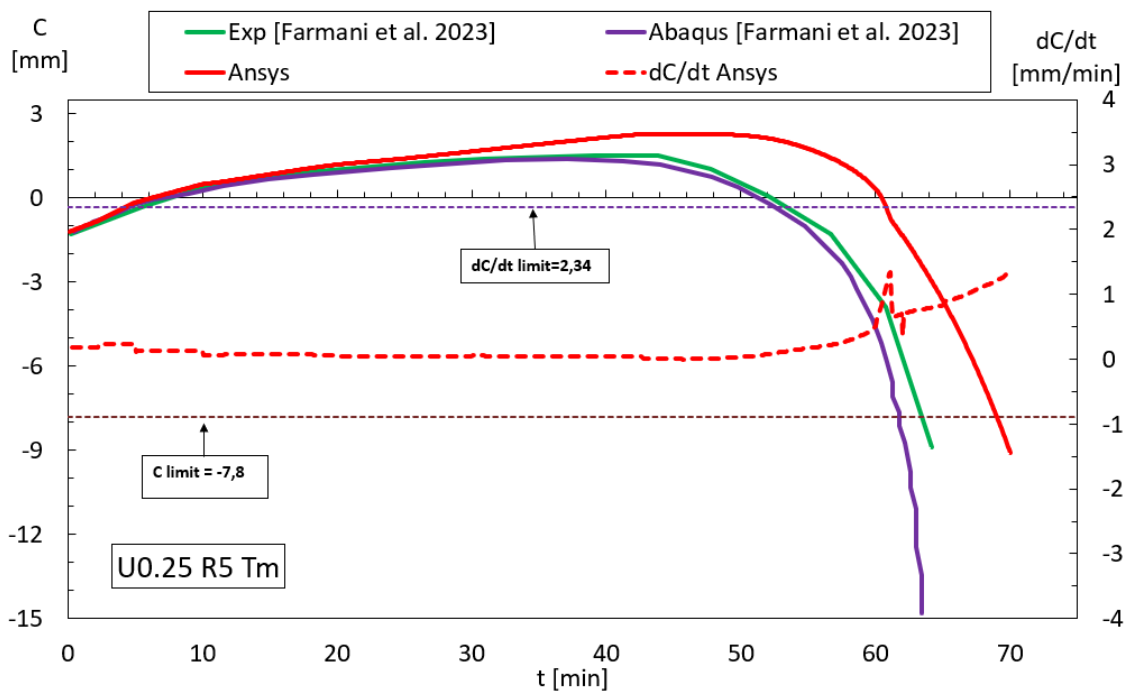


Figura 4.9: Validação para CHS com fator de carga de 25% e R5

Os resultados numéricos o deslocamento axial ( $C$ ) concordam com os ensaios experimentais até aos primeiros 30 minutos, divergindo um pouco nos instantes posteriores. Também está representada a evolução da taxa de deslocamento ( $dC/dt$ ) que é muito sensível à forma de cálculo (derivada por diferenças finitas ou calculado como média móvel de um conjunto de diferenças finitas). É importante ressaltar que o artigo não utilizou o critério da taxa de deslocamento.

Na Figura 4.10 estão representados os resultados determinados com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min, utilizando a mesma carga mecânica (25%). Neste caso as diferenças para o deslocamento axial são muito menores e a concordância é muito maior.

Em ambos os casos, a simulação termo-mecânica do ANSYS foi desenvolvida com a aplicação de uma temperatura média ( $T_m$ ), baseadas nas curvas de 5 termopares e aplicadas de uma forma uniforme em todos os elementos finitos da coluna circular. Este campo uniforme da

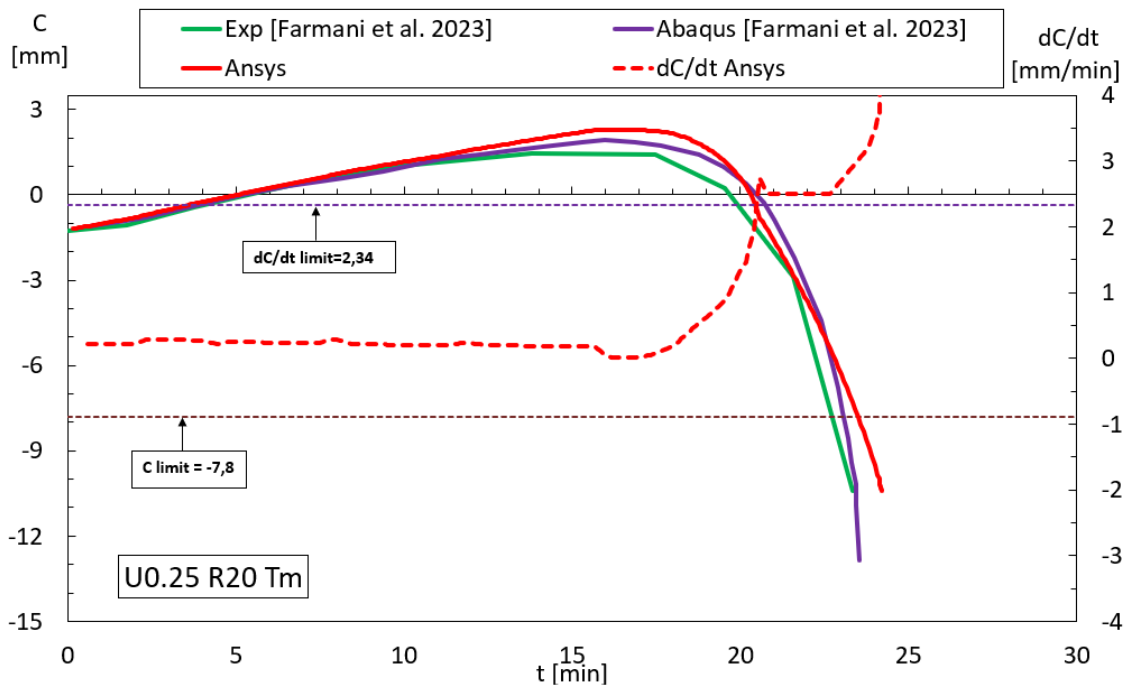


Figura 4.10: Validação para CHS com fator de carga de 25% e R20

temperatura não coincide com os resultados experimentais [3].

Na Figura 4.11 estão representados os resultados determinados com uma taxa de aquecimento de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , utilizando a carga mecânica correspondente a 50% da capacidade portante.

Mais uma vez, os resultados com esta taxa de aquecimento possuem uma boa concordância nos primeiros 30 minutos, apresentando uma diferença mais significativa nos instantes posteriores. O critério de resistência ao fogo baseado na taxa de contração ( $dC/dt$ ) é muito próximo do critério de resistência baseado no critério da contração ( $C$ ). A justificação do campo de temperatura pode também ser aplicado neste caso.

Na Figura 4.12 estão representados os resultados para o caso de uma taxa aquecimento superior ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ). Neste ensaio foi utilizado um fator de carga de 50%. Os resultados possuem uma melhor concordância em comparação com os resultados determinados com uma taxa de aquecimento inferior.

Na Figura 4.13 estão representados os resultados para uma taxa de aquecimento de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , com um nível de carga correspondente a 75% do valor da capacidade portante. Neste caso os resultados coincidem até ao instante 40 min, antecipando a falha ou colapso da coluna, em relação ao ensaios experimentais.

Na Figura 4.14 estão apresentados os resultados para um nível de carga de 75% da capacidade portante e com uma taxa de aquecimento de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Os resultados são coincidentes até ao instante 17 min, quando antecipa o colapso em relação ao ensaio experimental, para ambos os critérios de resistência ao fogo.

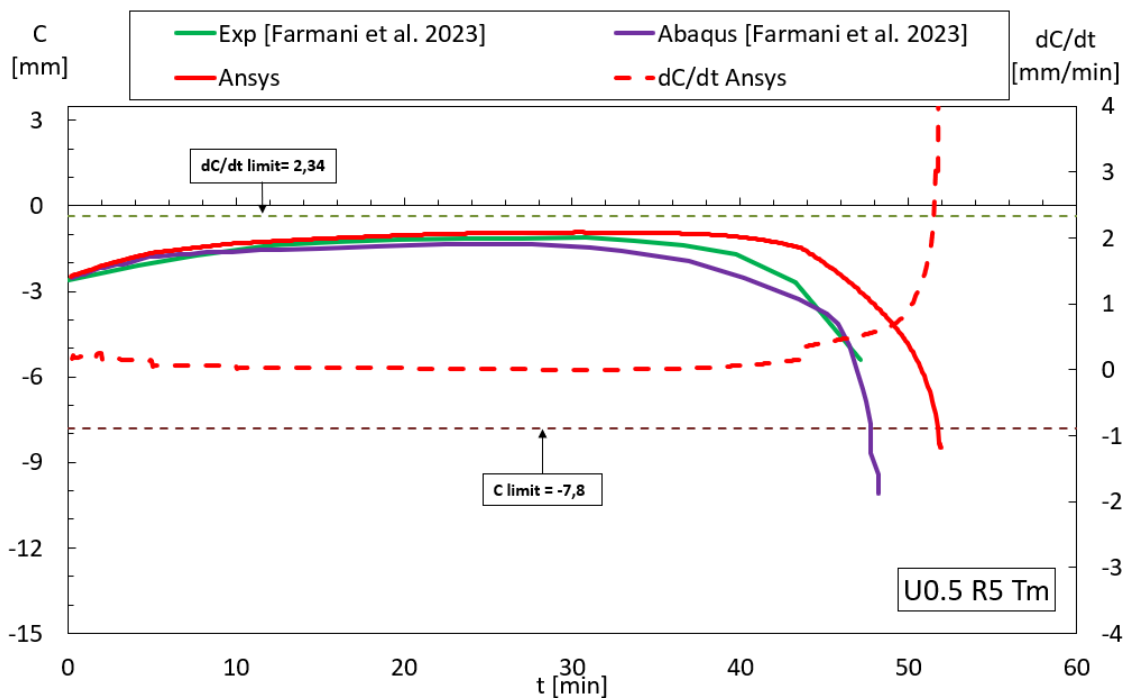


Figura 4.11: Validação para CHS com fator de carga de 50% e R5

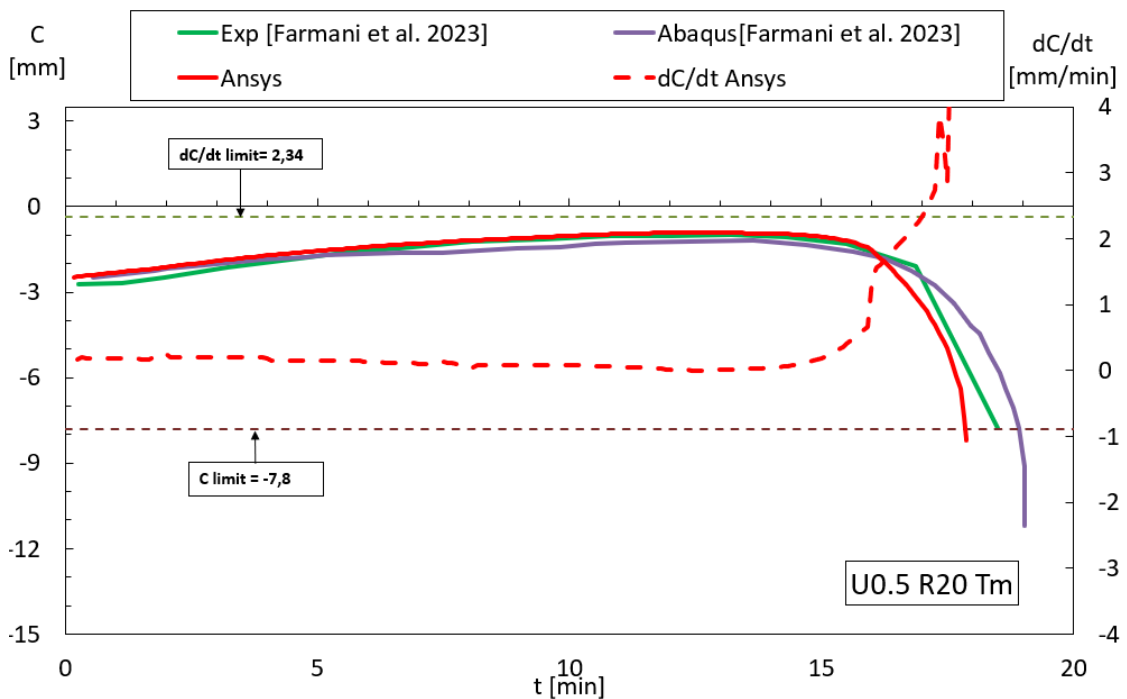


Figura 4.12: Validação para CHS com fator de carga de 50% e R20

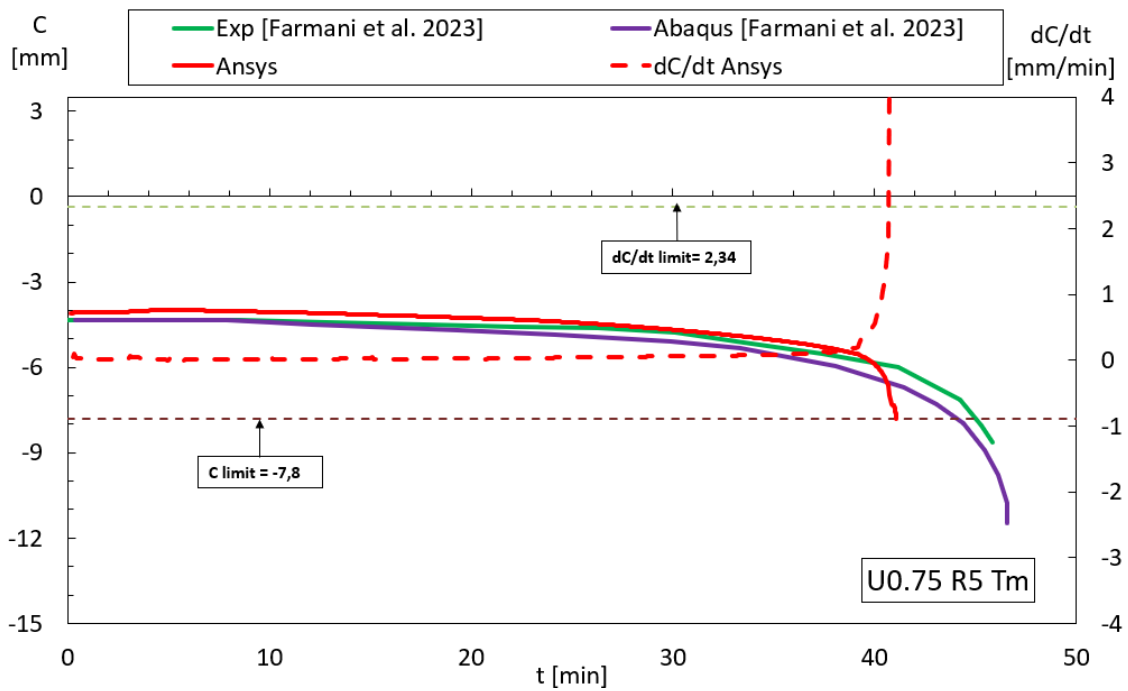


Figura 4.13: Validação para CHS com fator de carga de 75% e R5

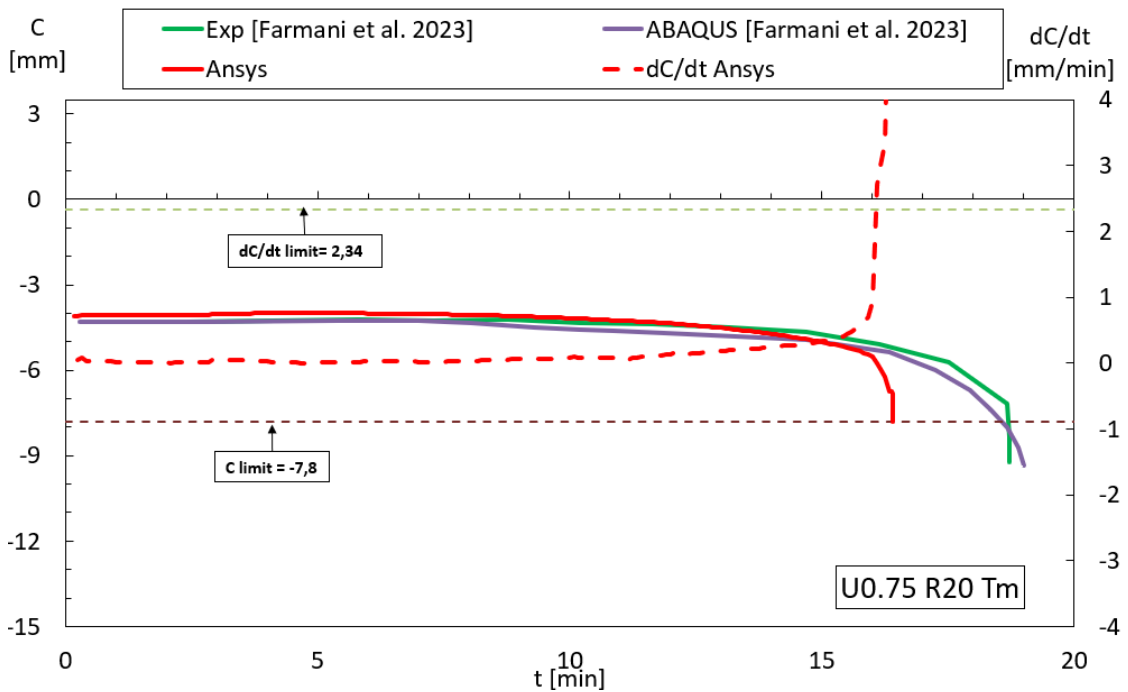


Figura 4.14: Validação para CHS com fator de carga de 75% e R20

Os resultados dessas simulações são resumidos na Tabela 4.4 para R20 e Tabela 4.5 para R5. Sendo o cálculo do erro realizado por meio da equação 4.4.

$$\text{Erro Relativo} = \frac{T_{ANSYS} - T_{EXP}}{T_{EXP}} \quad (4.4)$$

Espécime	Fator de carga (%)	Capacidade de Carga (kN)	Carga (kN)	Temperatura Crítica Ansys [°C]	Erro Relativo (%)	Tempo Crítico C1 [min]	Tempo Crítico C2 [min]
U0.25	25	917,9	229,47	627,3	-2,13	23,50	22,17
U0.50	50	917,9	458,95	521,8	-5,64	17,88	17,00
U0.75	75	917,9	688,43	402,1	-11,43	15,16	14,96

Tabela 4.4: Resultados da Coluna CHS para R20

Espécime	Fator de carga (%)	Capacidade de Carga (kN)	Carga (kN)	Temperatura Crítica Ansys [°C]	Erro Relativo (%)	Tempo Crítico C1 [min]	Tempo Crítico C2 [min]
U0.25	25	917,9	229,47	650,2	5,37	69,00	NA
U0.50	50	917,9	458,95	538,4	3,14	51,83	51,58
U0.75	75	917,9	688,43	407,4	-5,47	41,07	40,75

Tabela 4.5: Resultados da Coluna CHS para R5

Também foi possível comparar os modos de falha experimentais, conforme apresentado na Figura 4.15, com os obtidos pelo Ansys, como demonstrado pela Figura 4.16.



Figura 4.15: Modos de Colapso Experimental das Colunas CHS [3]

É importante ressaltar que, para as simulações com regime de aquecimento de 5 °C/min e 20 °C/min, não foi necessário realizar as análises térmicas e termo-mecânicas, pois as temperaturas

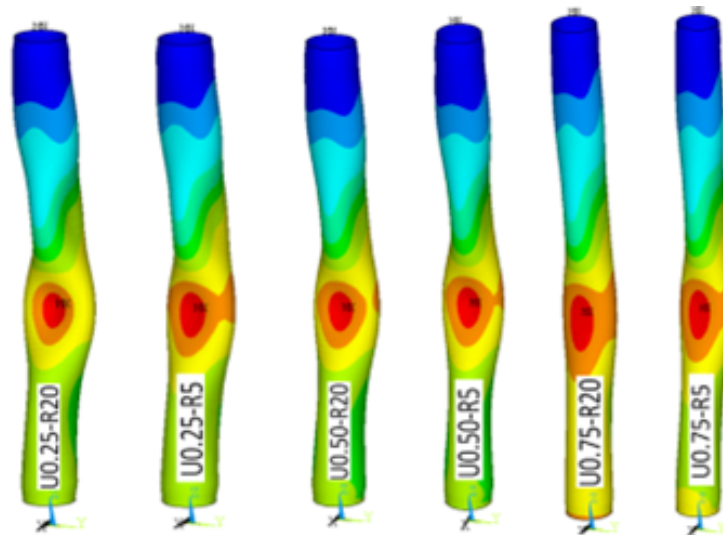


Figura 4.16: Modos de Colapso das Colunas Numéricos CHS

desses aquecimentos foram obtidas por meio dos termopares. Na análise de flambagem com temperatura elevada, a temperatura utilizada foi a média das temperaturas dos três termopares centrais e aplicada de forma uniforme na coluna.

## 4.2 Segunda Validação Numérica

O segundo trabalho experimental utilizado para validação foi o artigo de 2023 de Mohammad Amin Farmani, Amin Heidarpour e Clive Woo, intitulado 'Thermal creep of hybrid steel columns comprising ultra-high strength steel tubes and stainless steel plates under transient fire conditions' [35]. Esse ensaio experimental pode ser visualizado na Figura 4.17. Trata-se de um ensaio de compressão com uma placa fixa (superior) e uma placa móvel (inferior).

Neste estudo, foram realizados testes de compressão e modelagem numérica em colunas com uma Seção Composta por Tubos de Aço de Ultra-alta Resistência e Placas de Aço Inoxidável (HB), em condições de incêndio transitórias não padronizadas, com duas taxas diferentes de aquecimento (5 °C/min e 20 °C/min) e três fatores de carga diferentes (30%, 45% e 60%). Os resultados experimentais podem ser visualizados na tabela 4.6

Espécime	Fator de carga (%)	Capacidade de Carga (kN)	Carga (kN)	Temperatura Crítica R20 [°C]	Temperatura Crítica R5 [°C]
U0.30	30	4120	1236	626	604
U0.45	45	4120	1854	571	537
U0.60	60	4120	2472	551	483

Tabela 4.6: Resultados Experimentais da Coluna Híbrida

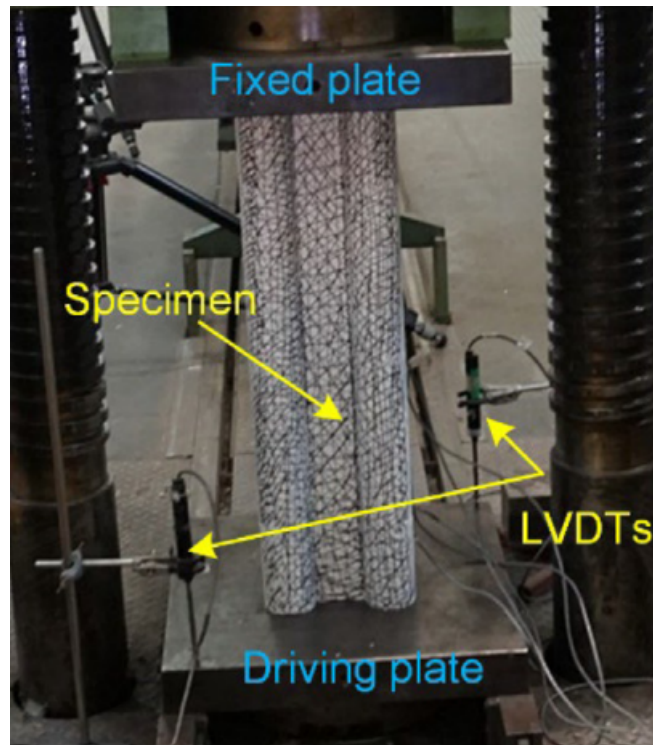


Figura 4.17: Ensaio experimental da Coluna Híbrida [35]

#### 4.2.1 Geometria

A coluna utilizada para este estudo possui quatro tubos de CHS de UHSS com diâmetro de 76.1 mm e espessura de 3.1 mm soldadas entre si por placas de Aço Inoxidável (SS) com largura de 75 mm e espessura de 3 mm com comprimento de 780 mm. A coluna está simplesmente apoiada em duas placas. Além disso, para os ensaios realizados com taxas de aquecimento variáveis, estão instalados 5 termopares ao longo de seu comprimento, conforme ilustrado na Figura 4.18.

#### 4.2.2 Propriedades dos Materiais

As propriedades dos tubos do aço UHSS são as mesmas que as utilizadas para a validação do tubo CHS. A lei constitutiva do material pode ser expressa pelas equações 4.1 e 4.2. As propriedades em temperatura ambiente são fornecidas pela Tabela 4.2, enquanto as propriedades em altas temperaturas são apresentadas na Tabela 4.2.

Para a lei constitutiva das placas de SS segue um modelo de Ramberg-Osgood, como definido pelas equações 4.5 e 4.6.

$$\epsilon_T = \frac{\sigma}{E_T} + 0,002 \times \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2,T}} \right)^{n_T} \quad (4.5)$$

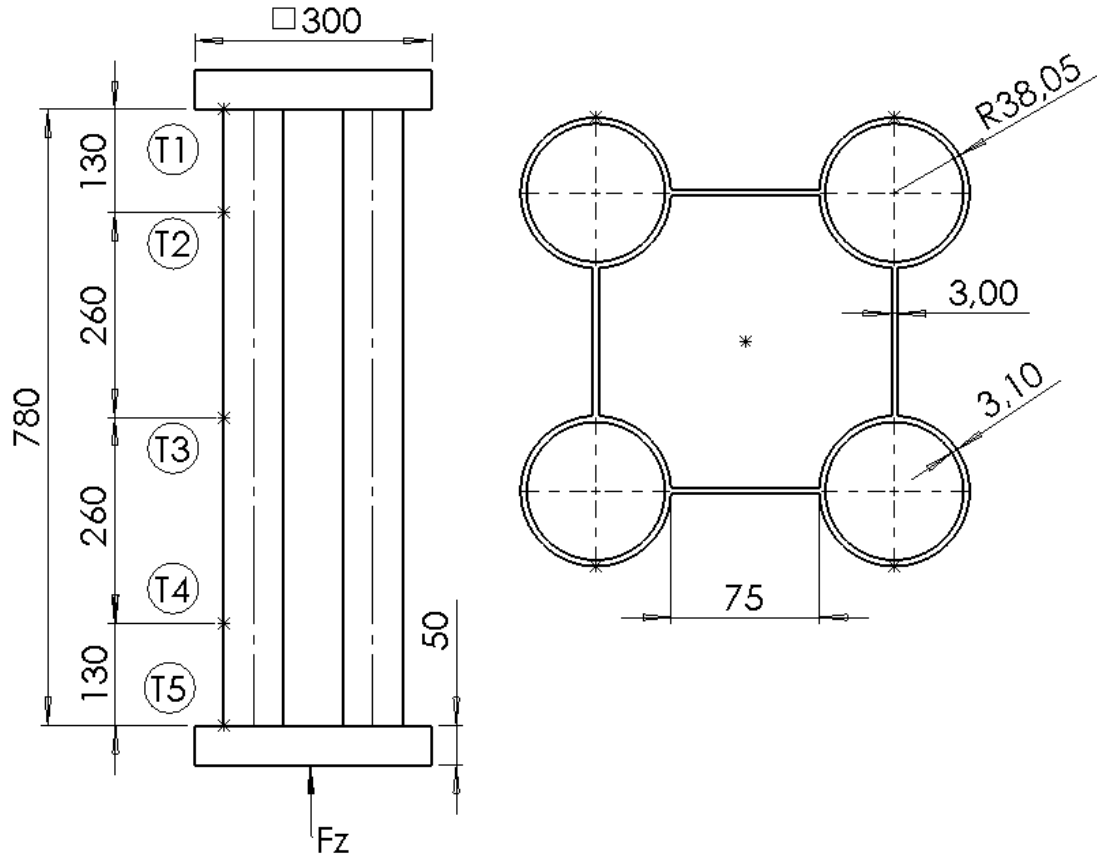


Figura 4.18: Geometria da coluna híbrida

$$\epsilon_T = \frac{\sigma - \sigma_{0,2,T}}{E_{0,2,T}} + (0.02 - \epsilon_{t0,2,T} - \frac{\sigma_{t2,0,T} - \sigma_{t0,2,T}}{E_{0,2,T}}) \times \left( \frac{\sigma - \sigma_{0,2,T}}{\sigma_{t2,0,T} - \sigma_{0,2,T}} \right)^{n'_T} + \epsilon_{t0,2,T} \quad (4.6)$$

As propriedades em temperatura ambiente das placas de SS estão definidas na Tabela 4.7

$E_T(GPa)$	$\sigma_{0,2,T}(MPa)$	$\sigma_{2,0,T}(MPa)$
193	250	315

Tabela 4.7: Propriedades Mecânicas a Temperatura Ambiente para as Placas de SS

É importante ressaltar que não foram considerados o efeito da solda nas propriedades dos materiais para as simulações no Ansys.

As propriedades em altas temperaturas podem ser obtidas com os fatores de redução da Tabela 4.8. Esses valores foram obtidos por [35].

A partir disso, foi possível obter os gráficos de tensão-deformação mostrados na Figura 4.19.

Para a expansão térmica, foi utilizada a equação 4.7 conforme apresentado em [35].

$$\epsilon_{th} = (12,67 + 4,7 \times 10^{-3}T - 1,43 \times 10^{-6}T^2) \times (T - 20) \times 10^{-6} \quad (4.7)$$

T [C]	$k_{E,T}$	$k_{\sigma_{0.2},T}$	$k_{\sigma_{1.5},T}$	$n_T$	$n'_T$
20	1,00	1,00	1,00	10,23	1,99
100	0,97	0,89	0,89	12,00	1,78
200	0,91	0,76	0,79	17,68	2,37
300	0,88	0,72	0,75	24,71	3,16
400	0,83	0,69	0,70	7,89	1,46
500	0,76	0,61	0,64	6,28	1,35
600	0,71	0,54	0,59	5,95	1,52
700	0,65	0,45	0,51	5,13	1,98
800	0,56	0,25	0,35	2,74	3,31
900	0,35	0,14	0,19	3,58	1,64

Tabela 4.8: Fatores de Redução para o SS

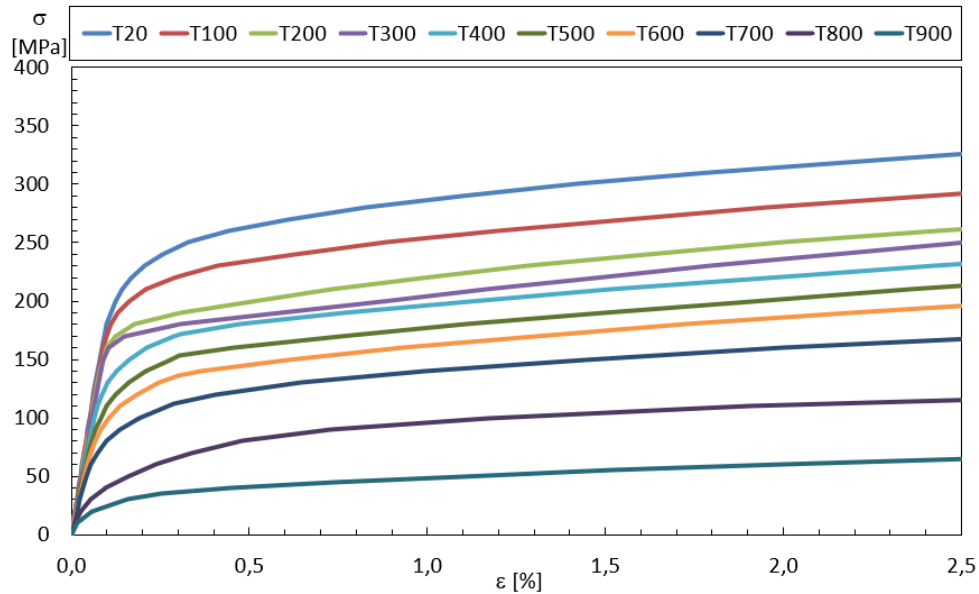


Figura 4.19: Grafico de tensão-deformação do SS

As propriedades térmicas a serem utilizadas para a análise térmica, conforme estabelecidas pelo Eurocódigo EN1993-1-2 [5], foram definidas conforme a equação 4.8 para a condutividade térmica, a equação 4.9 para o calor específico. Enquanto a emissividade do SS pode ser definida como igual a 0,4.

$$\lambda_a(W/(m \times K)) = 14,6 + 1,27 \times 10^{-2}\theta_a \quad (4.8)$$

$$c_a(J/(kg \times K)) = 450 + 2,8 \times 10^{-1}\theta_a - 2,91 \times 10^{-4}\theta_a^2 + 1,34 \times 10^{-7}\theta_a^3 \quad (4.9)$$

### 4.2.3 Malha

Para esta trabalho, a coluna híbrida foi dividida na direção do seu comprimento em 78 divisões, 24 divisões para cada tubo em torno do seu diâmetro e 6 divisões para cada placa na direção da sua largura, totalizando 9360 elementos na coluna híbrida. Ao considerar os elementos das placas para a validação, o total foi de 10800 elementos. O número total de nós foi 10422.

A malha da simulação realizada com elementos de casca pode ser visualizada na Figura 4.20.

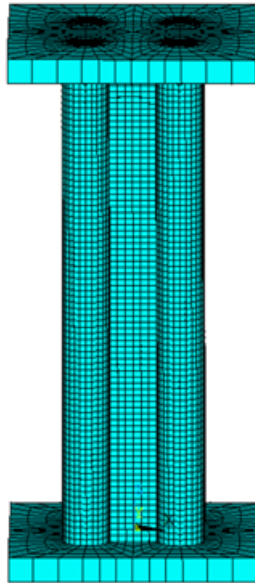


Figura 4.20: Malha da Coluna Híbrida

### 4.2.4 Condições de Fronteira

A Figura 4.21 apresenta as condições de contorno consideradas neste trabalho. Uma força constante foi aplicada no nó central da placa inferior ao longo do eixo Z. Essa placa possui deslocamento de translação em X e Y igual a zero em todos os seus nós, além de rotação nula em X e Y. Enquanto a placa superior está totalmente fixa.

### 4.2.5 Imperfeições

A Figura 4.22 mostra as imperfeições consideradas para este trabalho, com base em [35]. Essa imperfeição considerada é uma imperfeição local das placas que pode ser definida pela equação 4.10.

$$\text{Imperfeição Local} = \frac{\text{Largura}}{150} \quad (4.10)$$

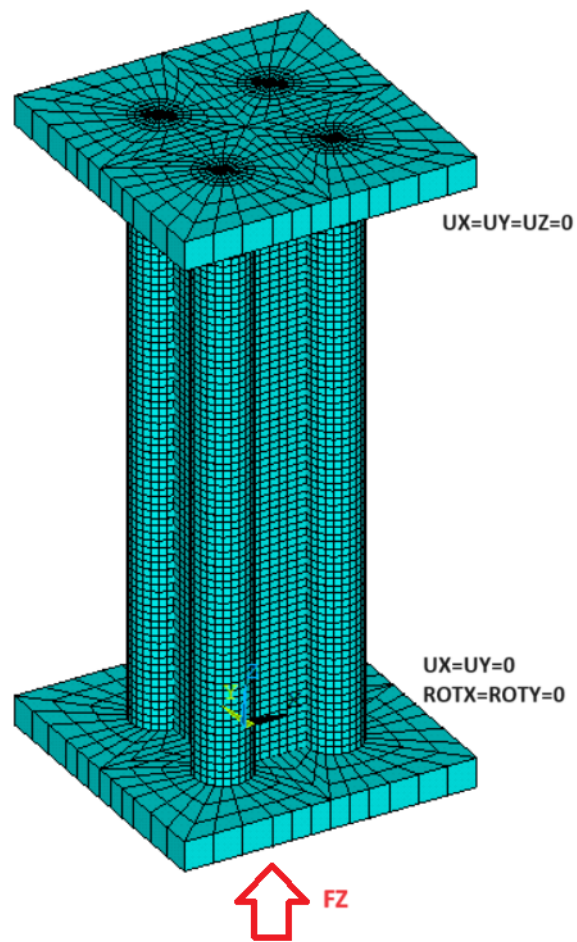


Figura 4.21: Condições de fronteira da Coluna Híbrida

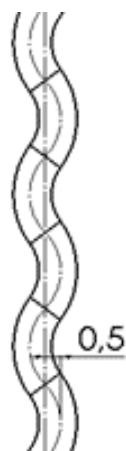


Figura 4.22: Imperfeições da Coluna Híbrida

## 4.2.6 Simulação à Temperatura Ambiente

Após a realização da análise GMNIA em temperatura ambiente, foi possível comparar os resultados obtidos no Ansys com os resultados experimentais e numéricos apresentados por Farmani et al.[35], conforme ilustrado na Figura 4.23. Neste gráfico, C equivale ao deslocamento axial no nó central da placa inferior (contração) e  $dC/dt$  a taxa de deslocamento.

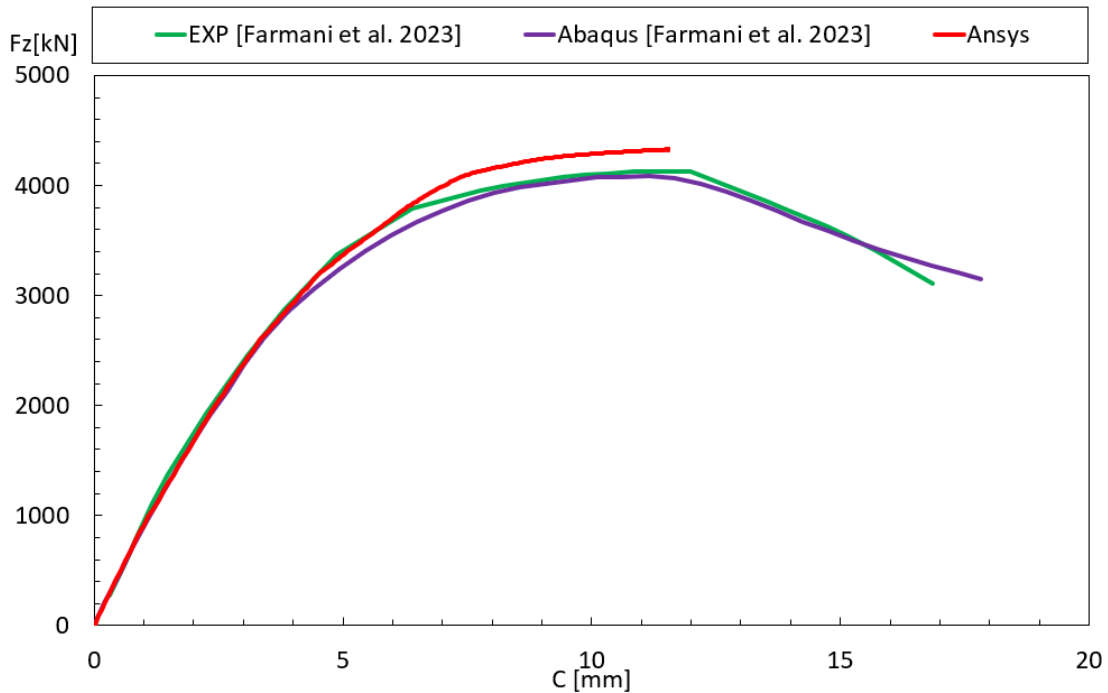


Figura 4.23: Validação da capacidade portante à temperatura ambiente da Coluna Híbrida

Os resultados da simulação realizada no Ansys se aproximaram das curvas experimental e numérica comparada. A força máxima obtida foi de 4328,4 kN, equivalendo assim a um erro relativo de 5,06 % com relação ao resultado experimental.

## 4.2.7 Simulação a Temperaturas Elevadas

Foram realizadas seis simulações, abrangendo três fatores de carga e dois regimes de aquecimento diferentes. Cada uma dessas simulações foi comparada com os resultados experimentais e numéricos correspondentes, conforme descritos em [35], e os gráficos foram apresentados nas Figuras 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29. Na Figura 4.24 está representado o ensaio realizado com uma taxa de aquecimento de  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , com uma carga mecânica constante correspondente a 30% da capacidade portante.

Os resultados numéricos do deslocamento axial (C) concordam bem com os ensaios experimentais, divergindo apenas a partir de 65 minutos. Também está representada a evolução da taxa de deslocamento ( $dC/dt$ ).

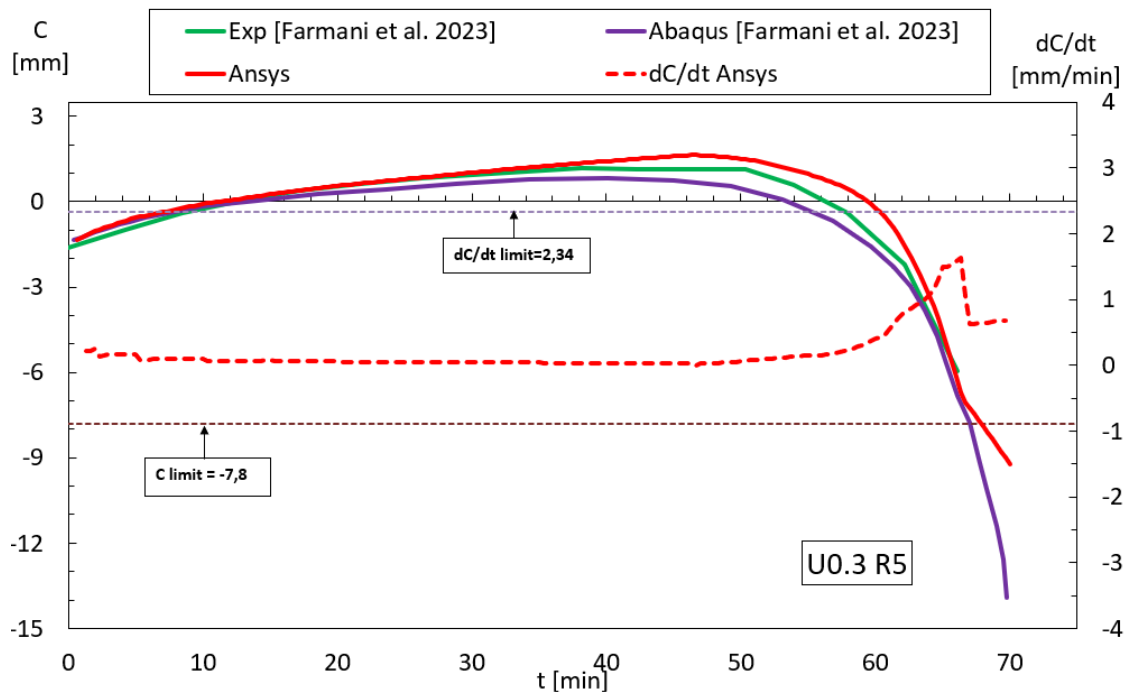


Figura 4.24: Validação para HB com fator de carga de 30% e R5

Na Figura 4.25 estão representados os resultados determinados com uma taxa de aquecimento de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , utilizando a mesma carga mecânica (30%). Neste caso, os resultados possuem uma boa concordância nos primeiros 20 minutos, quando antecipa a falha ou colapso da coluna, em relação ao ensaios experimentais.

Em ambos os casos, a simulação termo-mecânica do ANSYS foi desenvolvida com a aplicação de uma temperatura média ( $T_m$ ), baseadas nas curvas de 5 termopares e aplicadas de uma forma uniforme em todos os elementos finitos da coluna circular. Este campo uniforme da temperatura não coincide com os resultados experimentais [35].

Na Figura 4.26 estão representados os resultados determinados com uma taxa de aquecimento de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , utilizando a carga mecânica correspondente a 45% da capacidade portante.

Mais uma vez, os resultados com esta taxa de aquecimento possuem uma boa concordância nos primeiros 45 minutos, apresentado uma diferença mais significativa nos instantes posteriores.

Na Figura 4.27 estão representados os resultados para o caso de uma taxa aquecimento superior ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ). Neste ensaio foi utilizado um fator de carga de 45%. Os resultados são coincidentes até ao instante 17 min, quando antecipa o colapso em relação ao ensaio experimental, para ambos os critérios de resistência ao fogo.

Na Figura 4.28 estão representados os resultados para uma taxa de aquecimento de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , com um nível de carga correspondente a 60% do valor da capacidade portante. Neste caso os resultados coincidem até ao instante 40 min, divergindo nos instantes posteriores.

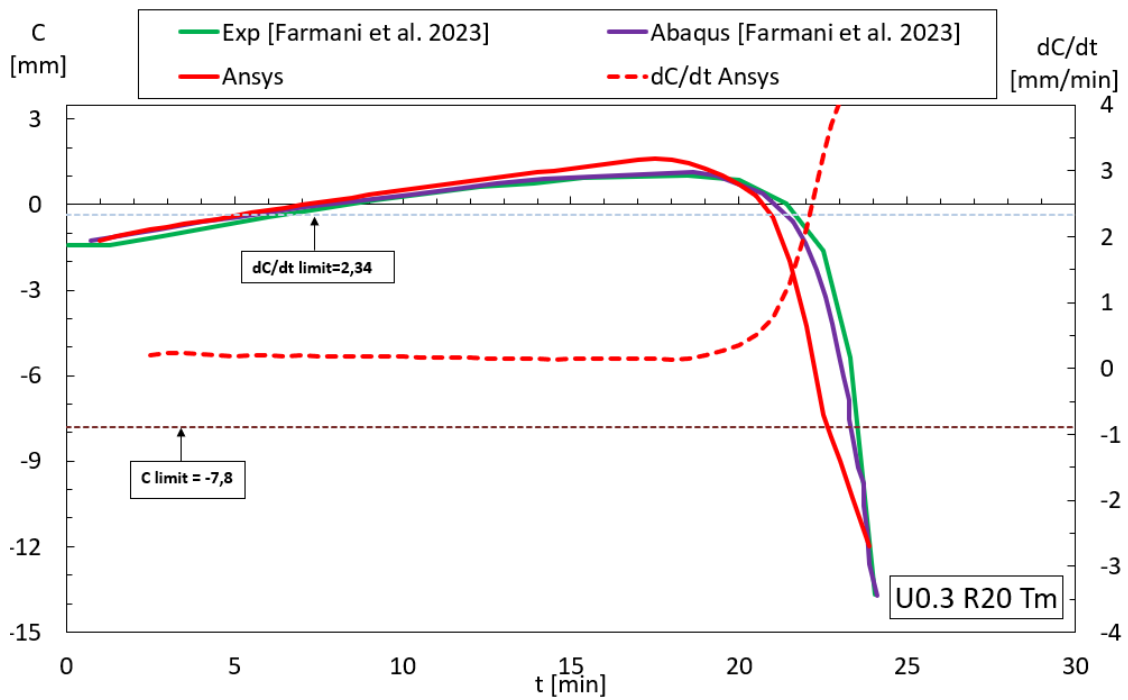


Figura 4.25: Validação para HB com fator de carga de 30% e R20

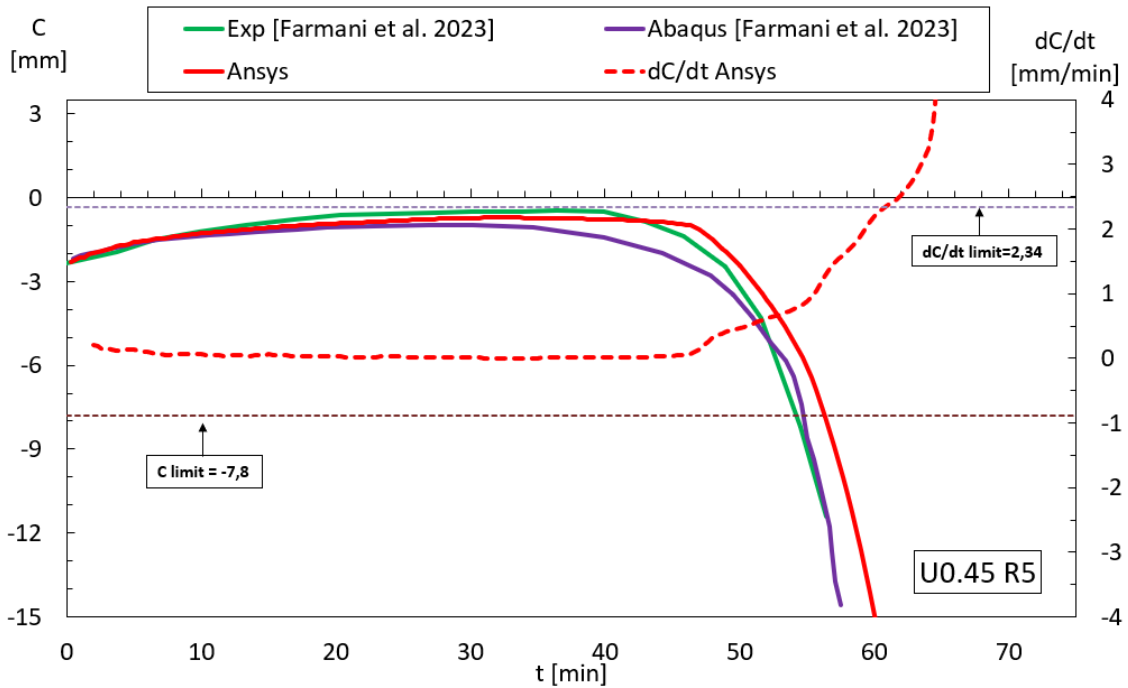


Figura 4.26: Validação para HB com fator de carga de 45% e R5

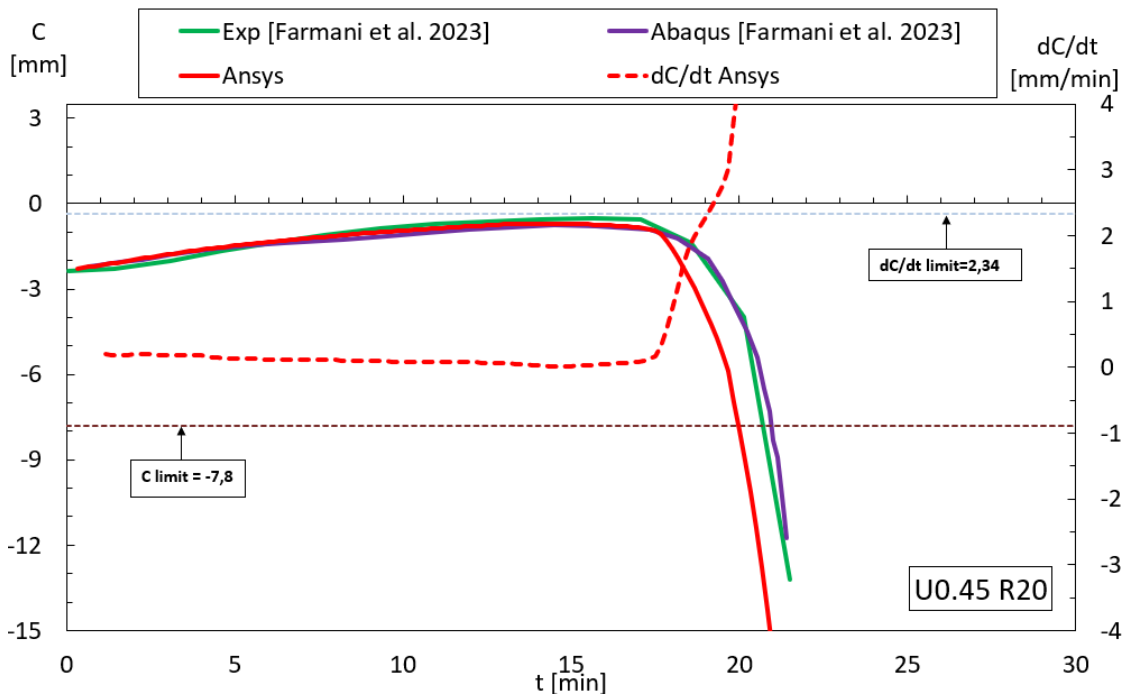


Figura 4.27: Validação para HB com fator de carga de 45% e R20

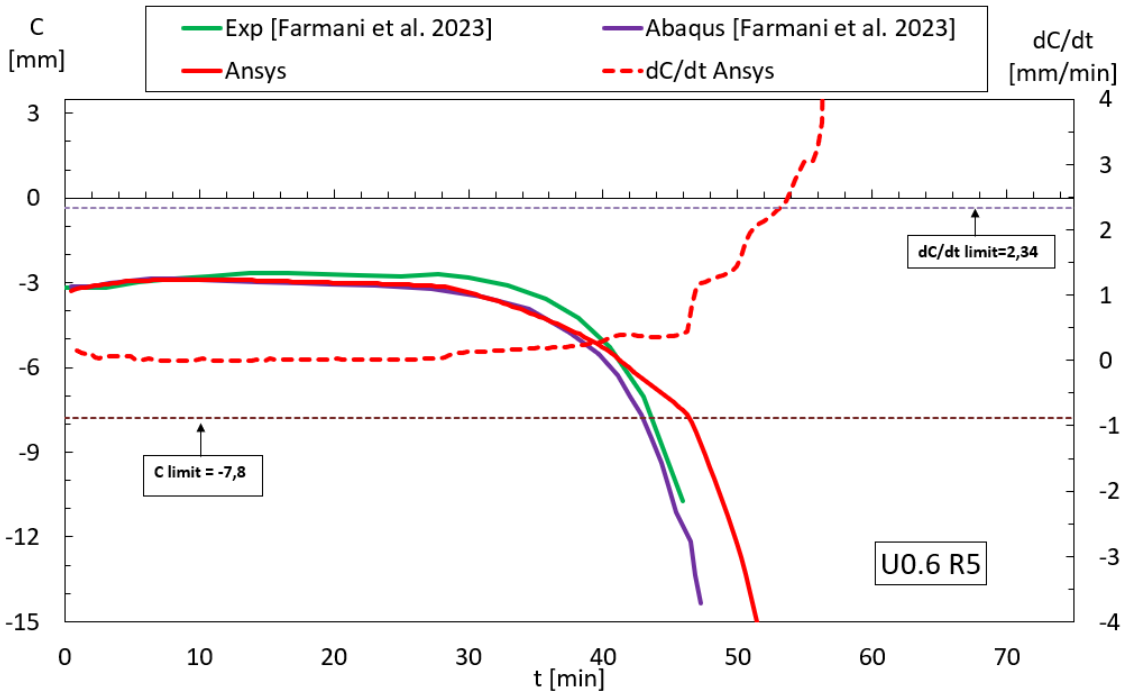


Figura 4.28: Validação para HB com fator de carga de 60% e R5

Na Figura 4.29 estão apresentados os resultados para um nível de carga de 60% da capacidade portante e com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min. Os resultados são coincidentes até ao instante 12 min, quando antecipa o colapso em relação ao ensaio experimental.

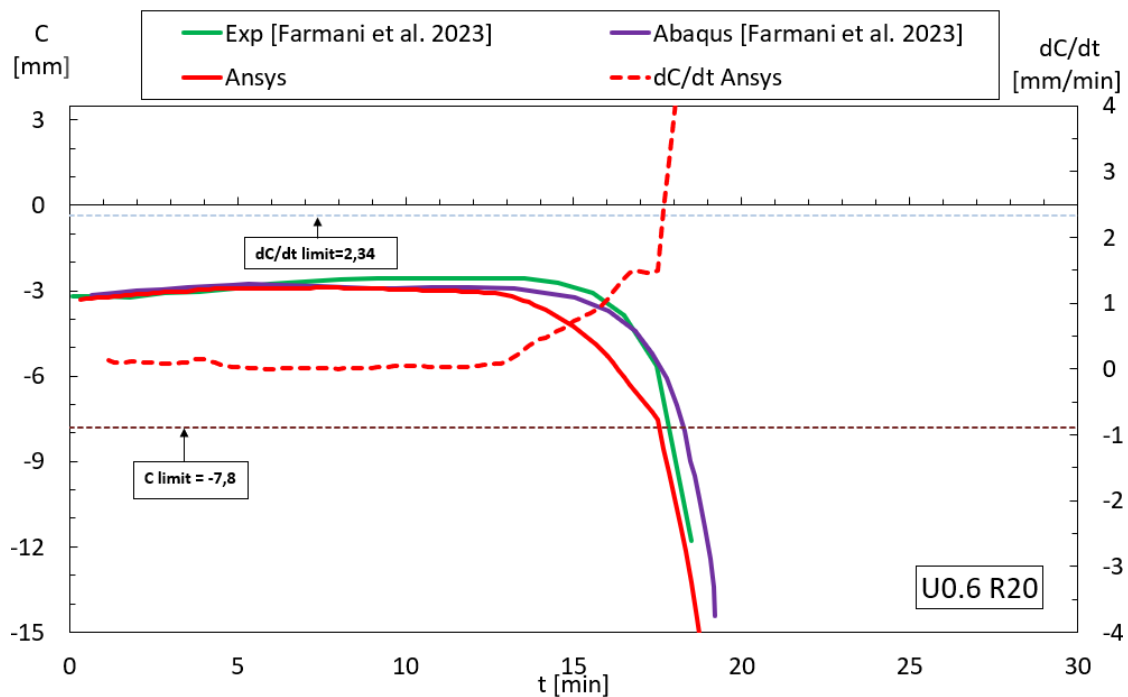


Figura 4.29: Validação para HB com fator de carga de 60% e R20

Os resultados dessas simulações são resumidos na Tabela 4.4 para R20 e Tabela 4.5 para R5.

Espécime	Fator de carga (%)	Capacidade de Carga (kN)	Carga (kN)	Temperatura Crítica Ansys [°C]	Erro Relativo (%)	Tempo Crítico C1 [min]	Tempo Crítico C2 [min]
U0.30	30	4328,4	1298,52	579,4	0,38	22,67	21,33
U0.45	45	4328,4	1947,78	527,9	2,91	20	18,33
U0.60	60	4328,4	2597,04	503,2	3,76	17,67	17,67

Tabela 4.9: Resultados da Coluna Híbrida para R20

Espécime	Fator de carga (%)	Capacidade de Carga (kN)	Carga (kN)	Temperatura Crítica Ansys [°C]	Erro Relativo (%)	Tempo Crítico C1 [min]	Tempo Crítico C2 [min]
U0.30	30	4328,4	1298,52	606,3	-7,44	68	NA
U0.45	45	4328,4	1947,78	552,6	-7,55	56,33	60
U0.60	60	4328,4	2597,04	501,2	-1,53	46,58	53,25

Tabela 4.10: Resultados da Coluna Híbrida para R5

Também foi possível comparar os modos de falha experimentais, conforme apresentado na Figura 4.30, com os obtidos pelo Ansys, como demonstrado pela Figura 4.31.



Figura 4.30: Modos de colapso experimental das colunas Híbridas [35]

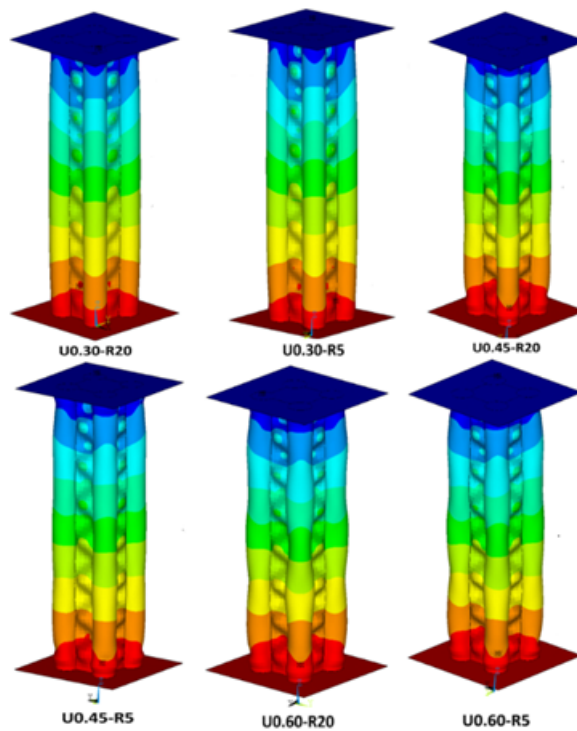


Figura 4.31: Modos de colapso numéricos das colunas Híbridas

Para esse caso, as simulações com regime de aquecimento de 5 °C/min e 20 °C/min, também não foi necessário realizar as análises térmicas e termo-mecânicas, pois as temperaturas desses aquecimentos foram obtidas por meio dos termopares. Na análise de flambagem com temperatura elevada, a temperatura utilizada foi a média das temperaturas dos três termopares centrais e aplicada de forma uniforme na coluna.



# Capítulo 5

## Análise Paramétrica

Neste capítulo, após a validação efetuada por meio de artigos existentes, foi realizado um estudo paramétrico para investigar o comportamento de colunas de UHSS em ambientes de alta temperatura, considerando uma variedade de parâmetros.

Para a visualização das simulações ( ver apêndice B e C) e graficos obtidos no estudo paramétrico ( ver apêndice D).

### 5.1 Estudo Paramétrico de Colunas CHS

Essa secção investigou o comportamento de colunas CHS de UHSS em ambientes de alta temperatura, considerando quatro principais parâmetros de variação: espessura da coluna, comprimento, regime de aquecimento e fator de carga como podem representados pela Tabela 5.1. No total foram realizadas 126 simulações.

Comprimento [m]	Espessura [mm]	Regime de Aquecimento [C/min]	Fator de Carga [%]	Simulações
0,78/3,0/6,0	3,1/6	5/20/ ISO834	20/30/40/50/60/70/80	126

Tabela 5.1: Estudo Paramétrico para CHS

Assim, contando as variações de espessura e comprimento foram utilizadas seis geometrias diferentes, ver Tabela 5.2. Esses valores de espessura e comprimento dos tubos foram escolhidos com base em perfis comerciais no catálogo [45].

Espécime	Comprimento [m]	Espessura [mm]	Esbelteza	Classe EuroCódigo	Esbelteza Adimensional
L0.78 t3.1	0,78	3,1	15,1	Classe 4	0,374
L0.78 t6	0,78	6	15,7	Classe 3	0,388
L3 t3.1	3	3,1	58,1	Classe 4	1,439
L3 t6	3	6	60,3	Classe 3	1,494
L6 t3.1	6	3,1	116,1	Classe 4	2,878
L6 t6	6	6	120,6	Classe 3	2,989

Tabela 5.2: Geometrias para Estudo Paramétrico para CHS

### 5.1.1 Efeito do Regime de Aquecimento

Foi conduzida, inicialmente, uma simulação térmica para incorporar a norma ISO 834[18] como mais um regime de aquecimento para o estudo paramétrico. Dado que a ISO 834 representa uma temperatura de forno, foi necessário determinar a distribuição térmica ao longo da coluna. Assim, consideraram-se os efeitos da radiação e convecção ocorrem apenas na região externa da coluna com a troca de calor no interior considerada desprezível, e, por se tratar de superfícies côncavas, o fator de forma foi estabelecido como igual a 1. As condições fronteira típicas de fogo padrão estão definidas na norma EN1991-1-2 [21].

A Figura 5.1 ilustra a distribuição da temperatura ao longo da coluna em três momentos distintos. Vale a pena referir que se verifica um arrefecimento por condução para as placas de extremidade.

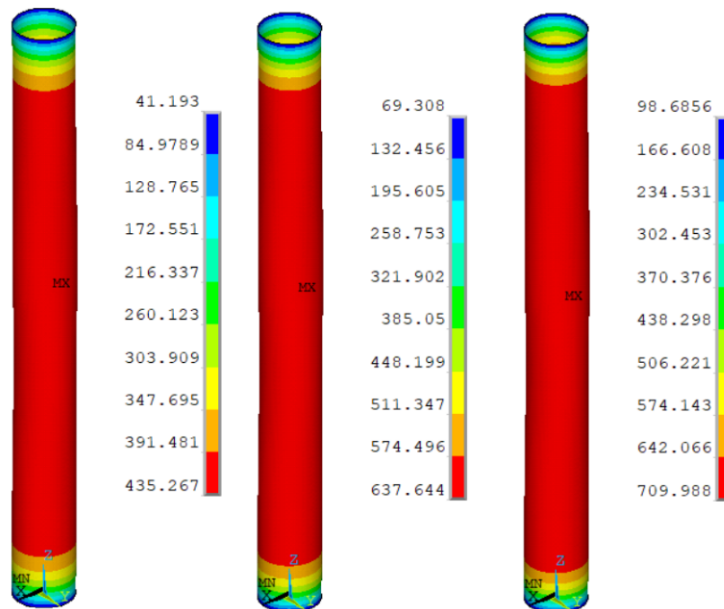


Figura 5.1: Distribuição de Temperatura na Coluna CHS em 5 min, 10 min e 15 min

Com esse perfil de temperatura definido ao longo do tempo, foi possível realizar a simulação termo-mecânica.

A partir dos resultados, foi feita uma comparação com os resultados determinados com as restantes taxas de aquecimentos para serem desenvolvidas equações de projeto para buscar prever o comportamento de colunas CHS de UHSS com a variação do fator de carga.

As curvas de projeto foram desenvolvidas como demonstrado pela equação 5.1, considerando a temperatura crítica para os três regimes de aquecimento utilizados na pesquisa para cada fator de carga. Essas equações podem ser utilizadas entre fatores de carga de 20% a 80%, considerando uma distribuição normal estatística, com um intervalo de confiança de 95%.

$$T_{crítica} = \text{Media} - 2 \times \text{Desvio Padrão} \quad (5.1)$$

Essa equação estatística busca prever que mais de 95% dos valores das temperaturas críticas estejam acima desse valor  $T_{crítica}$  [46].

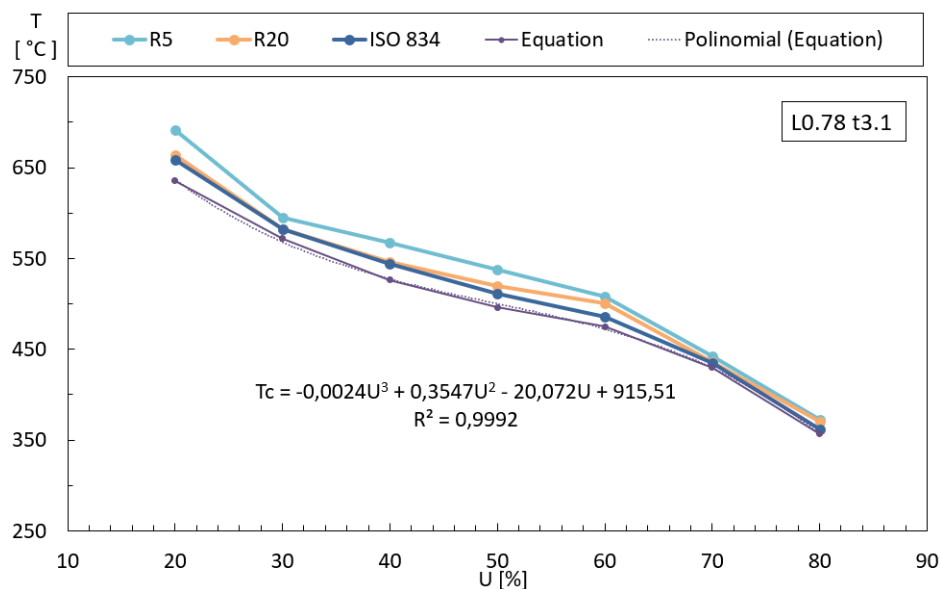


Figura 5.2: Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para CHS com comprimento de 0,78 m e Espessura de 3,1 mm

### 5.1.2 Efeito do Fator de Carga

Como pode ser observado na Figura 5.2, o aumento no fator de carga diminui significativamente a temperatura crítica da coluna. Além disso, nota-se que a variação da temperatura crítica é maior para pequenos e grandes fatores de carga. A equação proposta possui um coeficiente de correlação próximo de 1.

As simulações para os diferentes fatores de carga podem ser visualizadas nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5, tendo em consideração as diferentes taxas de aquecimento. Qualquer que seja a taxa de aquecimento, verifica-se um deslocamento de contração inicial produzido pela carga

mecânica, seguida de uma expansão térmica no sentido contrário, e o retorno a uma contração para determinar o modo de falha da coluna. Este comportamento típico permite definir o tempo de resistência ao fogo, utilizando os critérios definidos na norma EN1363-1 [28], ou em alternativa o critério de equilíbrio limite do elemento.

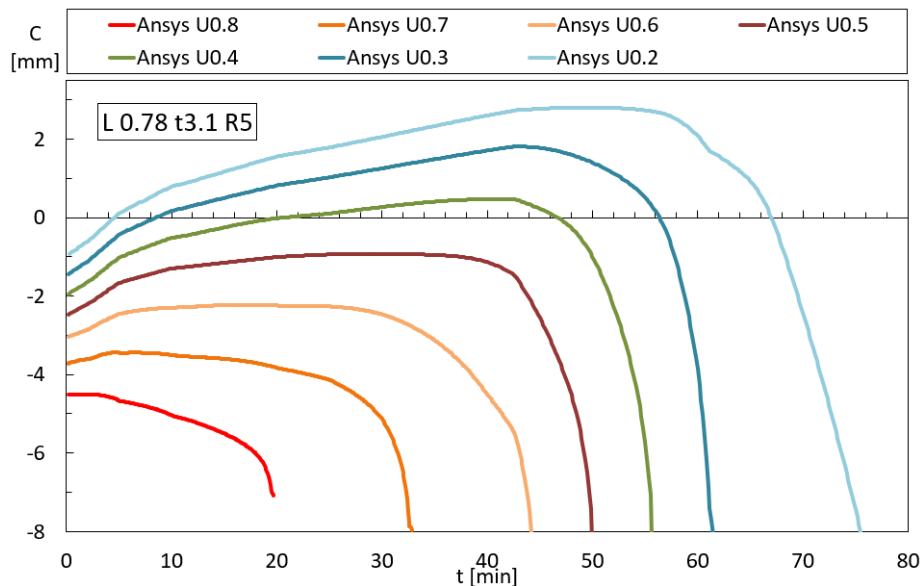


Figura 5.3: CHS com comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5

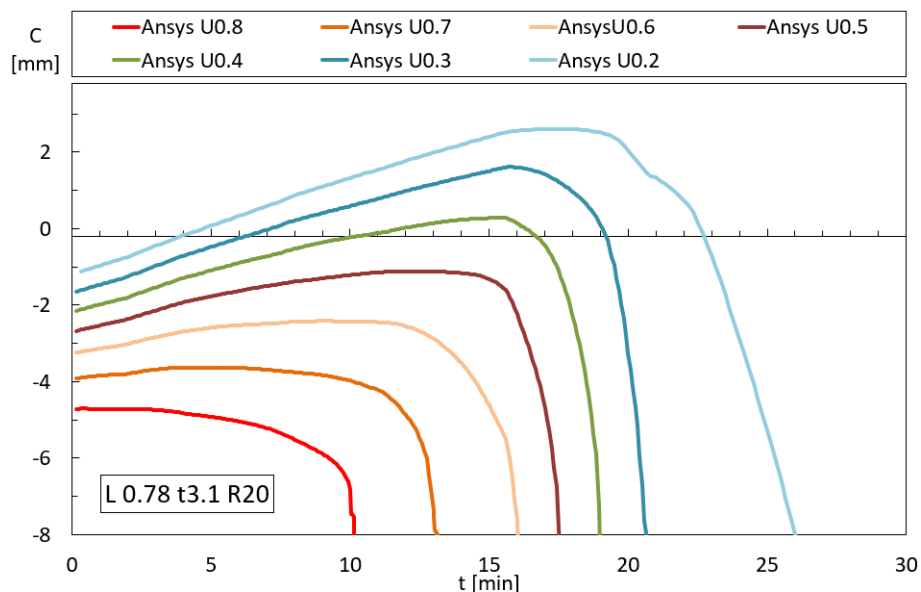


Figura 5.4: CHS com Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20

### 5.1.3 Efeito da Espessura

Antes de realizar as análises GMNIA a temperaturas elevadas, foi necessário realizar análises à temperatura ambiente para encontrar a capacidade portante máxima, para os diferentes valores de espessura utilizados.

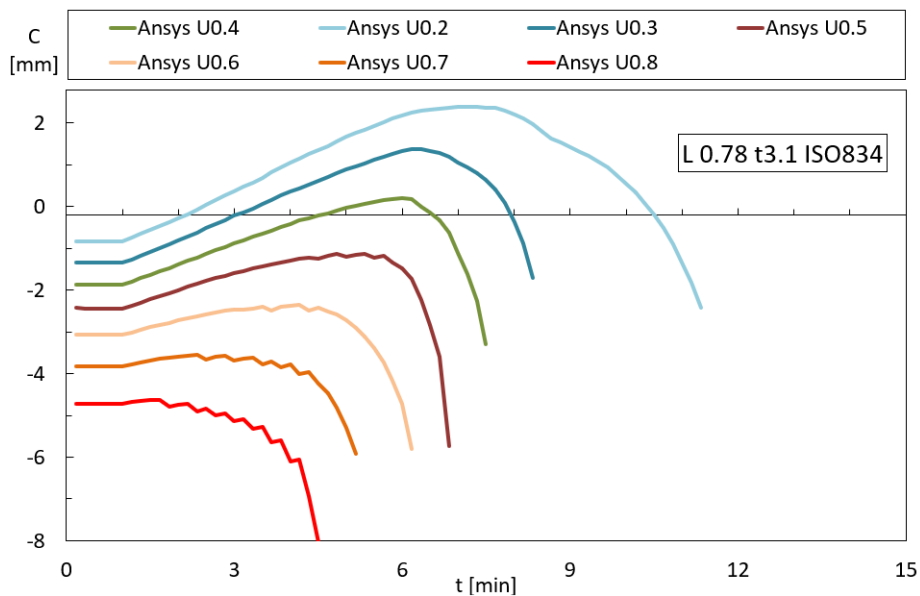


Figura 5.5: CHS com comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

Os resultados obtidos em temperatura ambiente podem ser verificados na Figura 5.6. Inicialmente, foram feitas análises para quatro espessuras diferentes, mas foi decidido utilizar apenas as espessuras de 3.1 mm e 6 mm na análise paramétrica.

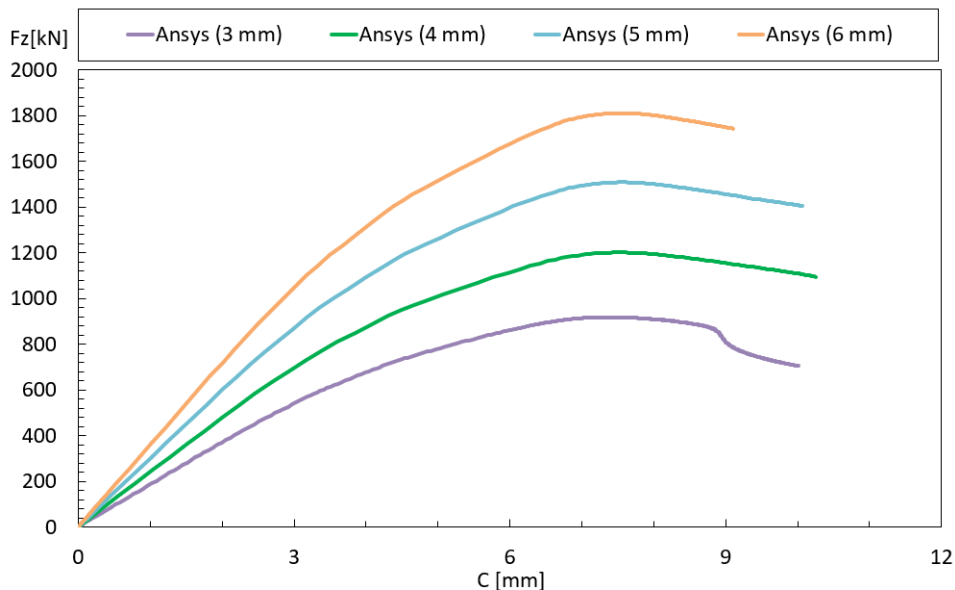


Figura 5.6: Efeito da Variação da Espessura de CHS na Resistência a Temperatura Ambiente

Assim, foram realizadas as simulações para altas temperaturas com os três regimes de aquecimento diferentes é obtido o gráfico na Figura 5.7. A equação de projeto para a temperatura crítica possui uma aproximação ao valor determinado pela equação 5.1, utilizando um coeficiente de correlação aproximado de 1.

Logo, nos casos envolvendo o comprimento de 0,78 m, ao comparar a temperatura crítica em relação ao aumento da espessura, pode-se verificar que para o mesmo fator de carga não ocorreu

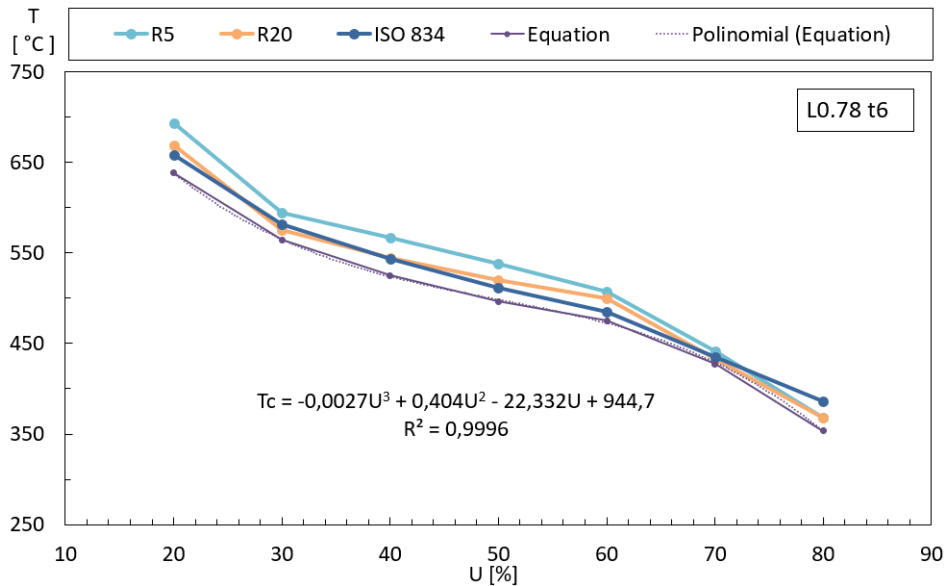


Figura 5.7: Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para CHS com comprimento de 0,78 m e Espessura de 6 mm

uma alteração significativa na temperatura crítica. Isso ocorre porque, embora a espessura tenha aumentado quase 200%, a esbelteza da coluna teve um aumento pouco significativo.

No entanto, como pode ser observado pelas Figuras B.4 e B.25, um aumento na espessura reduz os efeitos da imperfeição local na coluna de 0,78 m. Para as colunas de 3 m e 6 m, os modos de colapso foram globais.

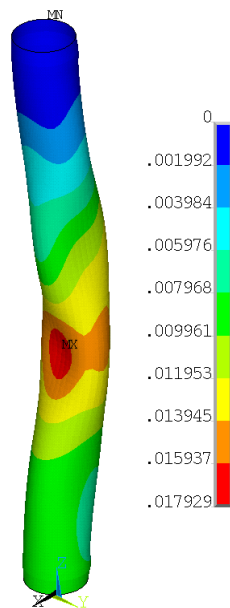


Figura 5.8: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5

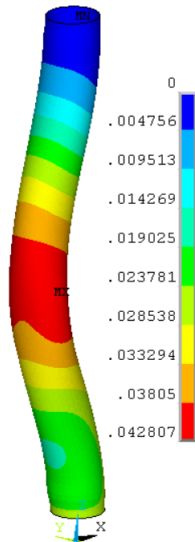


Figura 5.9: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5

#### 5.1.4 Efeito do Comprimento

Para a análise paramétrica envolvendo o comprimento da coluna, foi necessário refazer a malha e reintroduzir as imperfeições. Portanto, para as colunas maiores, o número de divisões na direção do seu comprimento foi aumentado. As colunas com 3 metros de comprimento foram divididas em 150 elementos na direção do seu comprimento, totalizando 5440 elementos, enquanto a coluna com 6 metros foi dividida em 300 elementos, totalizando 10240 elementos.

Com relação às imperfeições para esses comprimentos maiores, foi utilizada apenas a imperfeição global.

Além disso, foi preciso refazer as simulações a temperatura ambiente conforme mostrado pela Figura 5.10 para colunas de 3 m e pela Figura 5.11 para colunas de 6 m. Estas simulações foram desenvolvidas para determinação da capacidade portante.

Com essas simulações realizadas, foi possível conduzir as análises com os três regimes de aquecimento. Assim, para verificar o efeito do comprimento na temperatura crítica, pode ser observado na Figura 5.12 para R5, na Figura 5.13 para R20 e na Figura 5.14 para a ISO 834.

Como observado nos resultados, a variação do comprimento tem um efeito mais complexo na temperatura crítica, corroborando com o que foi mencionado por [3]. "Farmani et al.", citou a complexidade da temperatura crítica em relação à variação da esbelteza.

Além disso, [3] mencionou que, para fatores de carga menores que 60%, valores maiores de esbelteza adimensional geralmente resultam em temperaturas críticas maiores. Por outro lado, para fator de carga superiores a 60%, esbelteza adimensional entre 1 e 1,5 apresentaram os menores valores de temperatura crítica.

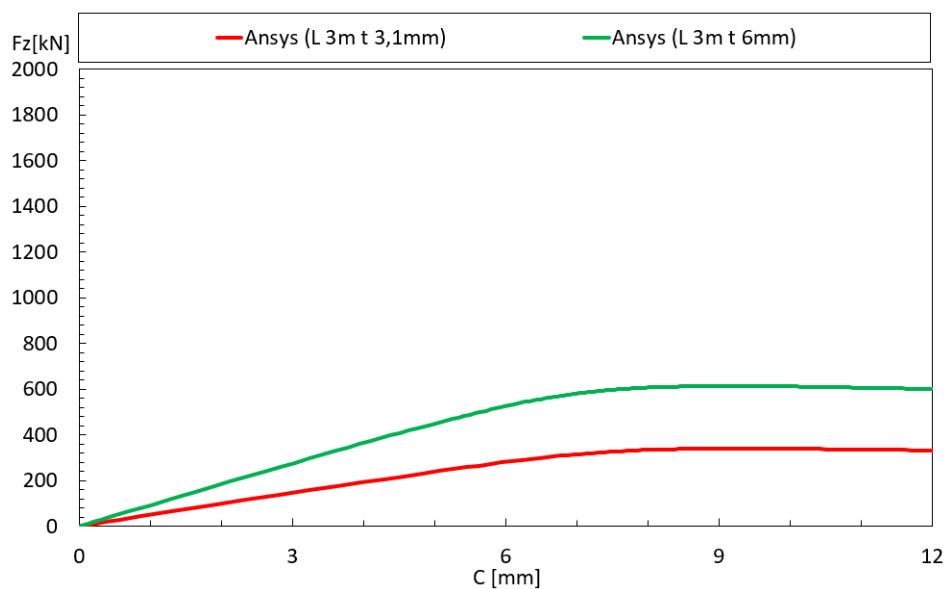


Figura 5.10: Coluna CHS com 3 m de comprimento a temperatura ambiente

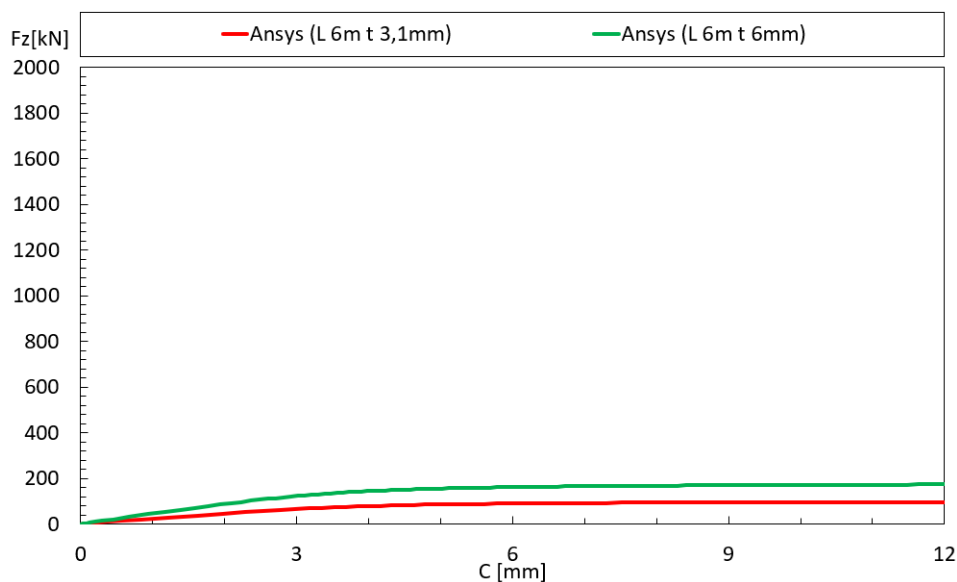


Figura 5.11: Coluna CHS com 6 m de comprimento a temperatura ambiente

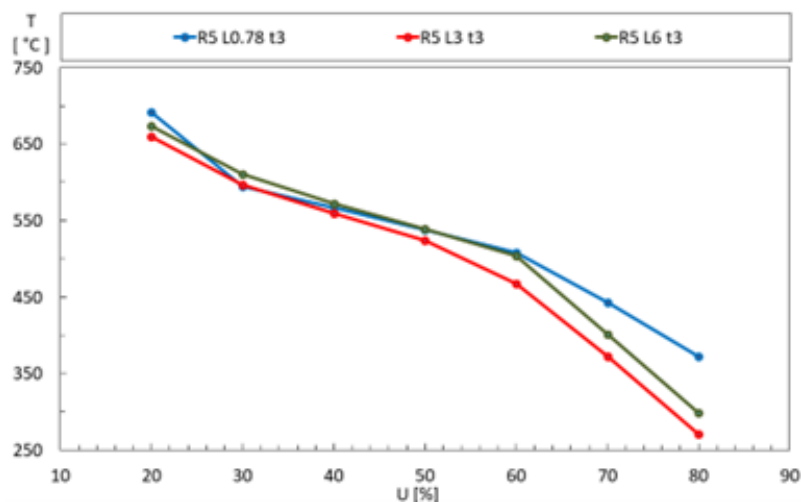


Figura 5.12: Efeito do comprimento na Coluna CHS para R5

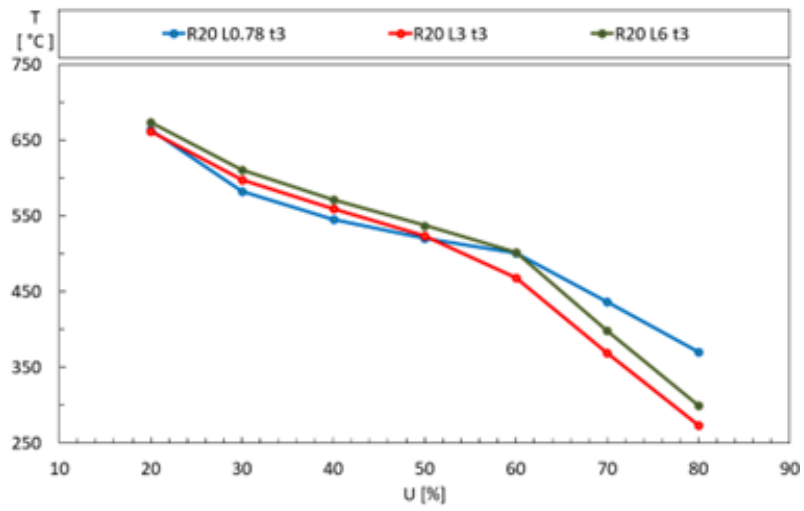


Figura 5.13: Efeito do comprimento na Coluna CHS para R20

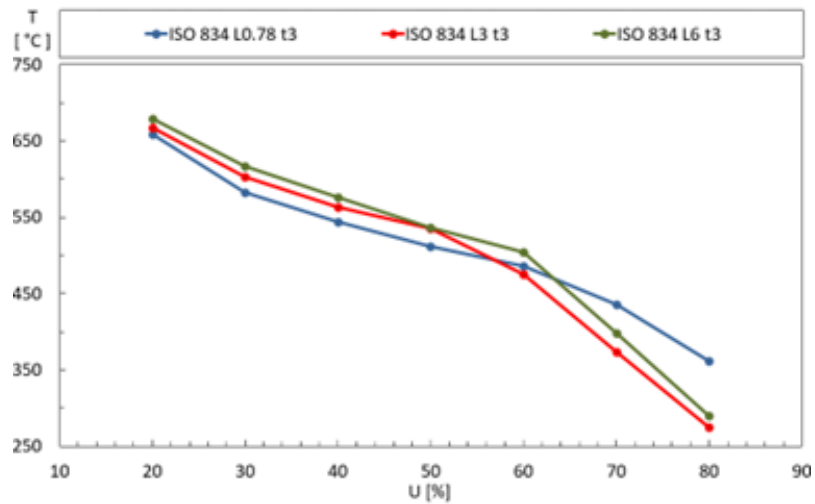


Figura 5.14: Efeito do comprimento na Coluna CHS para ISO 834

Esses resultados concordam com os obtidos no Ansys, pois as colunas com comprimento de 3 m estão nessa faixa. As equações de projeto para os outros valores de comprimento podem ser vistos nas Figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18.

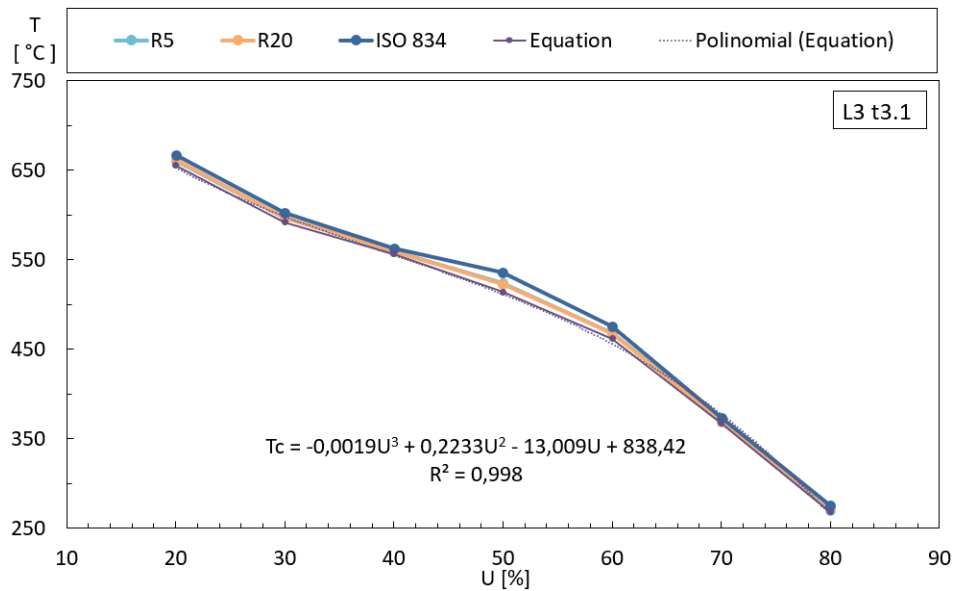


Figura 5.15: Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para CHS com comprimento de 3 m e Espessura de 3 mm .1

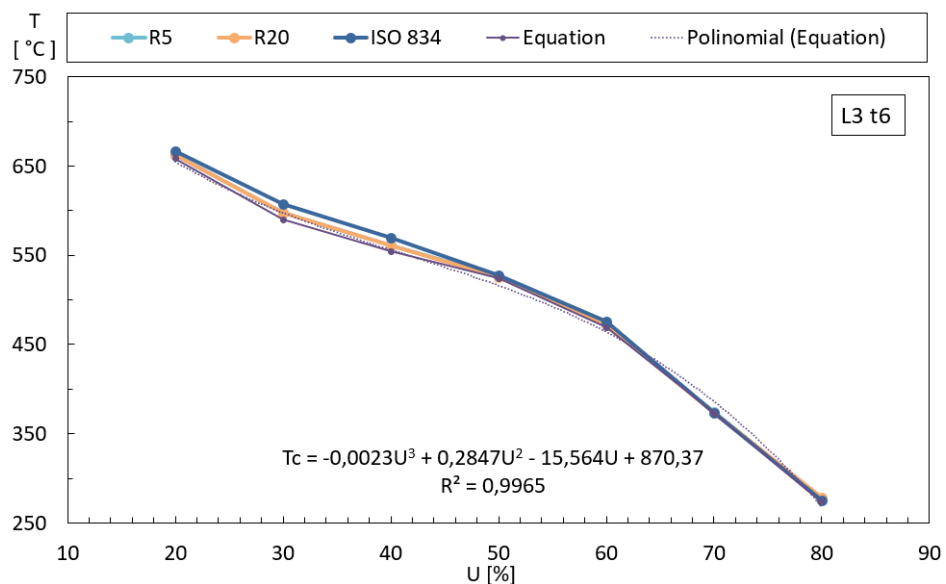


Figura 5.16: Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para CHS com comprimento de 3 m e Espessura de 6 mm

A partir desses gráficos, é possível perceber que, para colunas com comprimentos maiores, o efeito da taxa de aquecimento é menor.

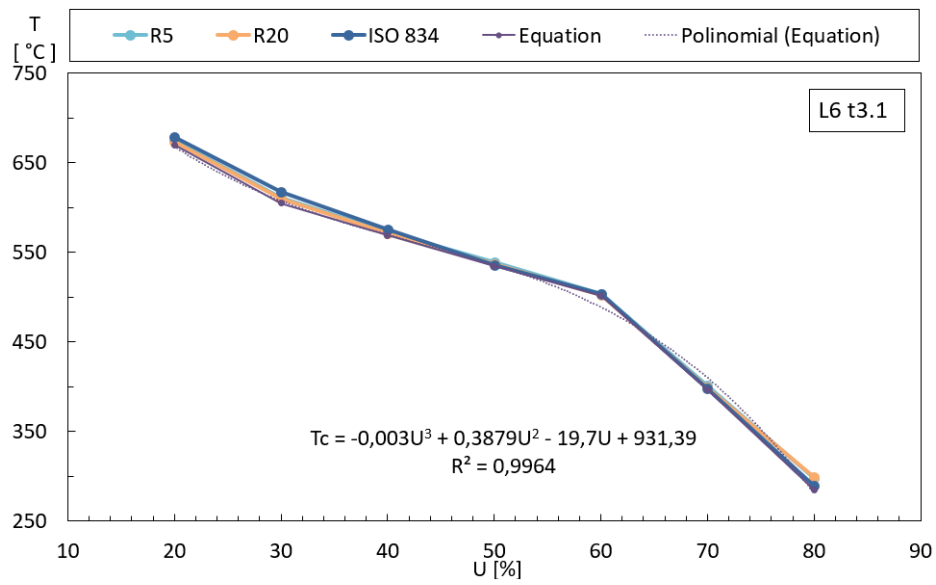


Figura 5.17: Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para CHS com comprimento de 6 m e Espessura de 3 mm .1

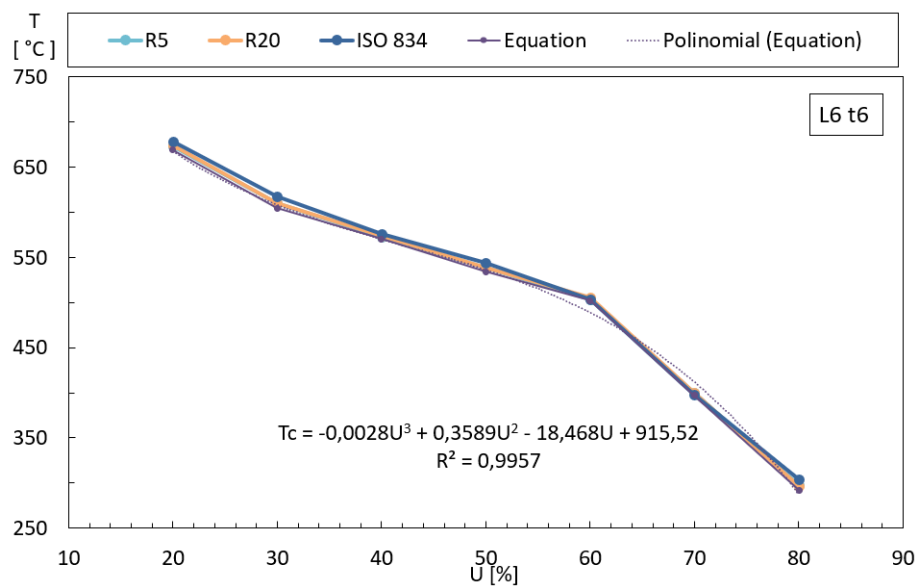


Figura 5.18: Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para CHS com comprimento de 6 m e Espessura de 6 mm

## 5.2 Estudo Paramétrico de Colunas Híbridas

Esta secção prosseguiu com o estudo paramétrico, desta vez para as colunas híbridas de UHSS em ambientes de temperatura elevadas. Foram considerados, também, quatro parâmetros: espessura do tubo, comprimento, regime de aquecimento e fator de carga, conforme apresentado na Tabela 5.3, confirmando o mesmo número de simulações

Comprimento [m]	Espessura do Tubo [mm]	Regime de Aquecimento [C/min]	Fator de Carga [%]	Simulações
0,78/3,0/6,0	3,1/6	5/20/ ISO834	20/30/40/50/60/70/80	126

Tabela 5.3: Estudo Paramétrico para Híbrido

Assim, contando as variações de espessura e comprimento foram utilizadas seis geometrias diferentes, ver Tabela 5.4. Esses valores de espessura e comprimento dos tubos foram escolhidos com base em perfis comerciais no catálogo [45].

Espécime	Comprimento [m]	Espessura [mm]	Esbelteza
L0.78 t3.1	0,78	3,1	4,55
L0.78 t6	0,78	6	4,71
L3 t3.1	3	3,1	17,49
L3 t6	3	6	18,12
L6 t3.1	6	3,1	34,98
L6 t6	6	6	36,24

Tabela 5.4: Geometrias para Estudo Paramétrico para HB

### 5.2.1 Efeito do Regime de Aquecimento

Para incorporar a norma ISO 834[18] como mais um regime de aquecimento para o estudo paramétrico, foi realizada a análise térmica. Neste caso, considerou-se que os efeitos da radiação e convecção estavam presentes apenas na região externa da coluna. Por se tratar de superfícies convexas, tanto os tubos quanto as placas, o fator de forma foi estabelecido como igual a 1.

A Figura 5.19 ilustra a distribuição da temperatura ao longo da coluna em três momentos distintos. A diferença de temperatura mais significativa no início deve-se às propriedades térmicas diferentes do SS. Mais uma vez se verifica a perda de calor por condução para as placas de extremidade (não representadas nesta imagem).

Este campo de temperatura foi utilizado na análise termo-mecânica. A partir dos resultados dessa análise, foi desenvolvida a equação de projeto para essa geometria, com base na equação

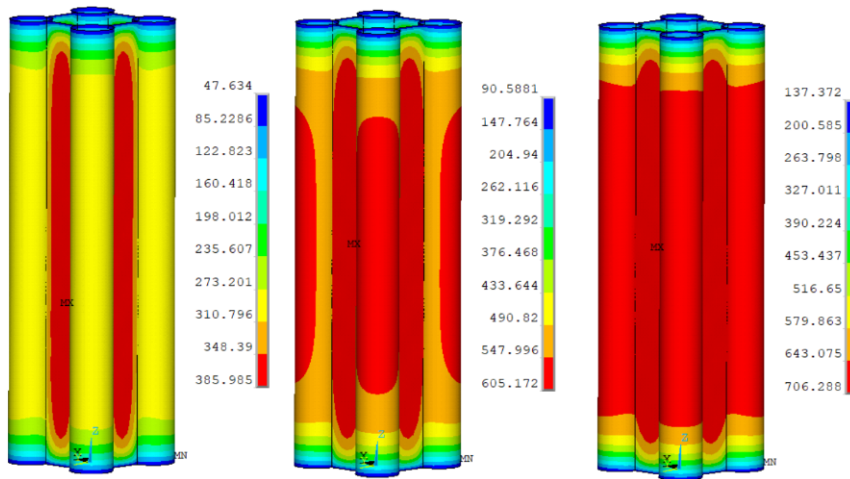


Figura 5.19: Distribuição de Temperatura na Coluna Híbrida em 5 min, 10 min e 15 min

5.1, com o objetivo de prever o comportamento de colunas híbridas de UHSS com a variação do fator de carga. Como pode ser visualizado pela Figura 5.20, a temperatura crítica diminui com o nível de carga, verificando-se uma diferença mais significativa para os valores mais pequenos do fator de carga. Com base nos valores das temperaturas críticas, obtidos para as três taxas de aquecimento, como base na equação 5.1. O limite inferior de segurança foi utilizado pela expressão analítica de segurança, tendo sido determinado um coeficiente de correlação muito próximo de 1.

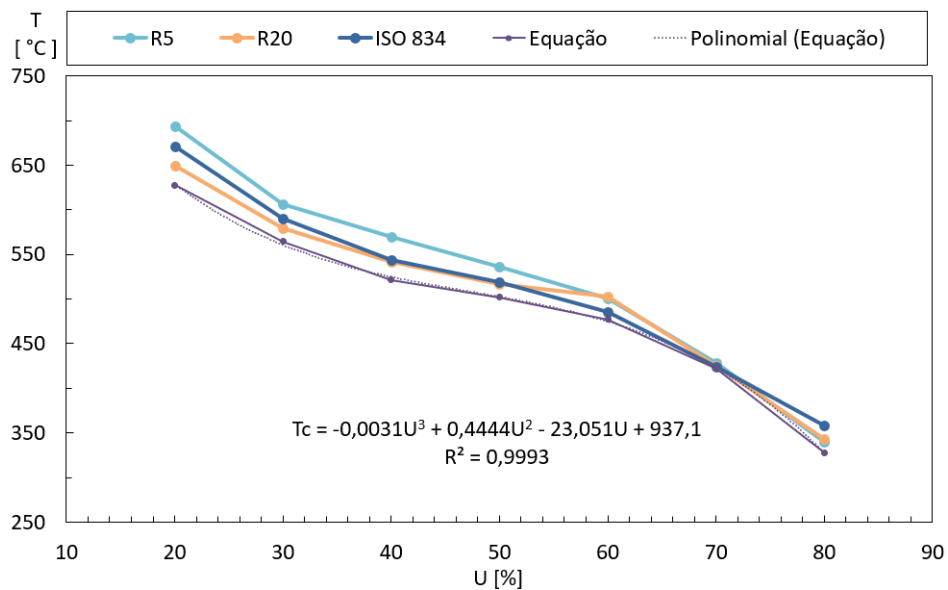


Figura 5.20: Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para HB com comprimento de 0,78 m e espessura de 3,1 mm

## 5.2.2 Efeito do Fator de Carga

As simulações para os diferentes fatores de carga podem ser observadas pelas Figuras 5.22, 5.21 e 5.23. Para fatores de carga elevados (70% ou 80%) a força de compressão é de tal forma elevada que a expansão não consegue inverter o comportamento ou tendência de compressão. Para fatores de carga mais baixos (entre 20% e 60%), a inversão do sentido de deslocamento é observável.

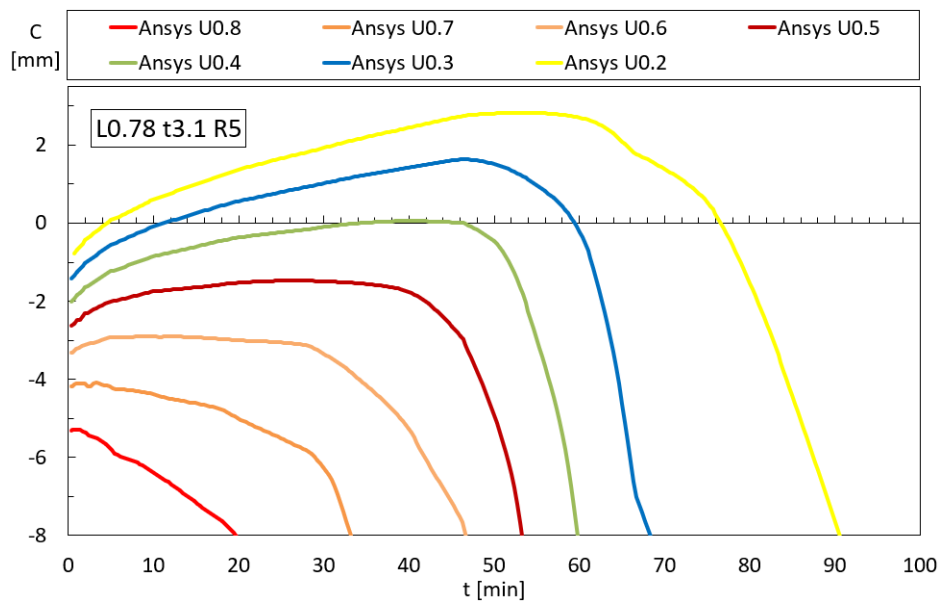


Figura 5.21: HB com comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5

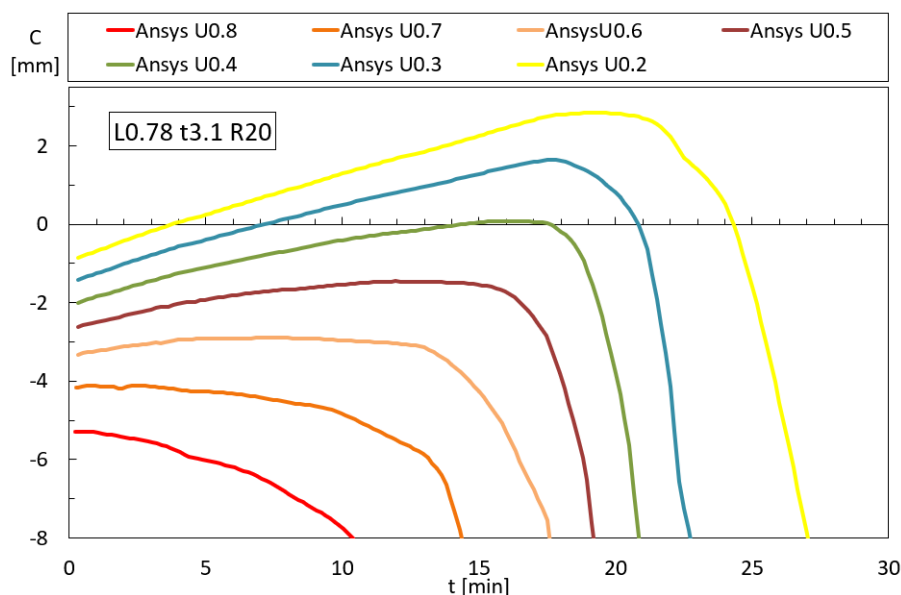


Figura 5.22: HB com comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20

Assim como nos casos das colunas CHS, pode-se perceber que, para as colunas híbridas, o fator de carga é o parâmetro analisado que maior influência possui na temperatura crítica da

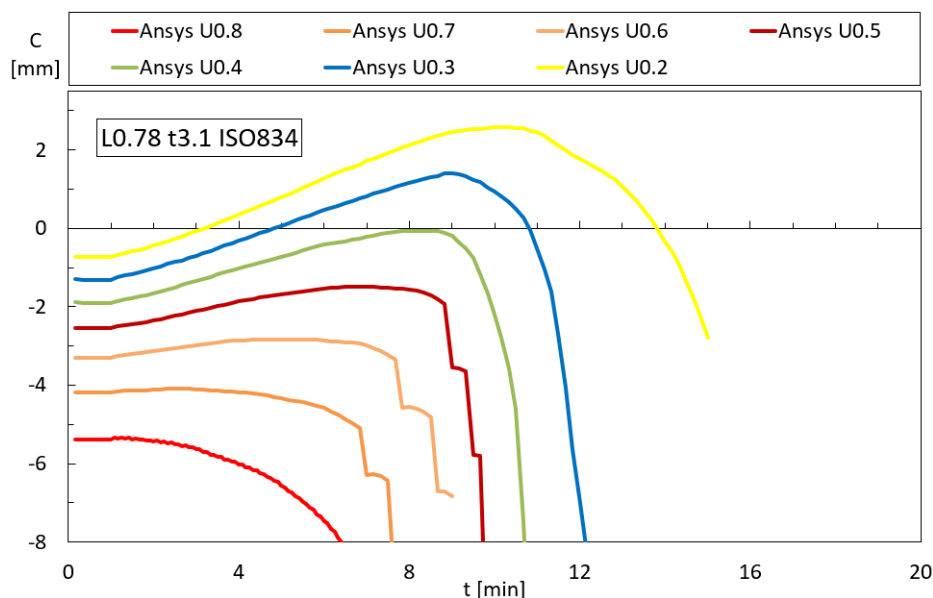


Figura 5.23: HB com comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

coluna. Além disso, nota-se que uma variação dos fatores de carga, quando eles estão muito baixos ou muito altos, pode levar a uma variação maior na temperatura crítica.

Também se observa que para diferentes taxas de aquecimento, as colunas híbridas apresentam uma mudança significativa, como era de se esperar, em relação ao tempo. Além disso, é possível perceber que, para o mesmo fator de carga, mesmo com diferentes taxas de aquecimento, o efeito no comportamento e expansão da coluna foi mínimo.

### 5.2.3 Efeito da Espessura

Antes de conduzir as análises GMNIA a temperaturas elevadas, foram realizadas as simulações à temperatura ambiente, a fim de determinar a máxima capacidade portante das colunas, permitindo a determinação do fator de carga, considerando os diferentes valores de espessura, como podem ser vistos na Figura 5.24.

Sendo que, para a análise paramétrica, foram consideradas apenas as espessuras de 3,1 mm e 6 mm. Assim, foram realizadas as simulações para altas temperaturas com os três regimes de aquecimento diferentes e obtido o gráfico na Figura 5.25 com a nova equação de projeto. O coeficiente de correlação foi determinado com um valor muito próximo da unidade.

### 5.2.4 Efeito do Comprimento

Para a análise paramétrica envolvendo o comprimento da coluna, foi necessário refazer a malha e reintroduzir as imperfeições. Além disso, foi preciso realizar novamente as simulações em temperatura ambiente para determinar as capacidades de carga.

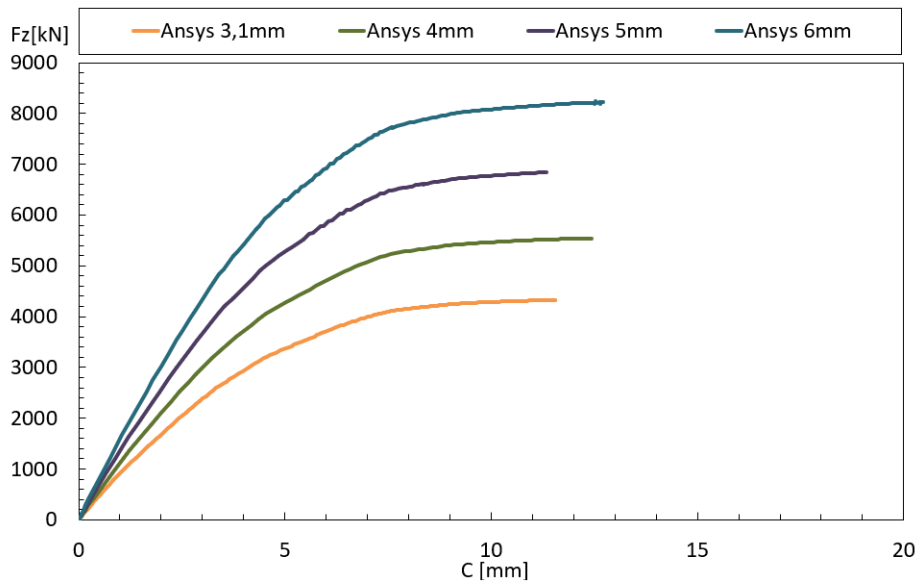


Figura 5.24: Efeito da variação da espessura do Híbrido na resistência a temperatura ambiente

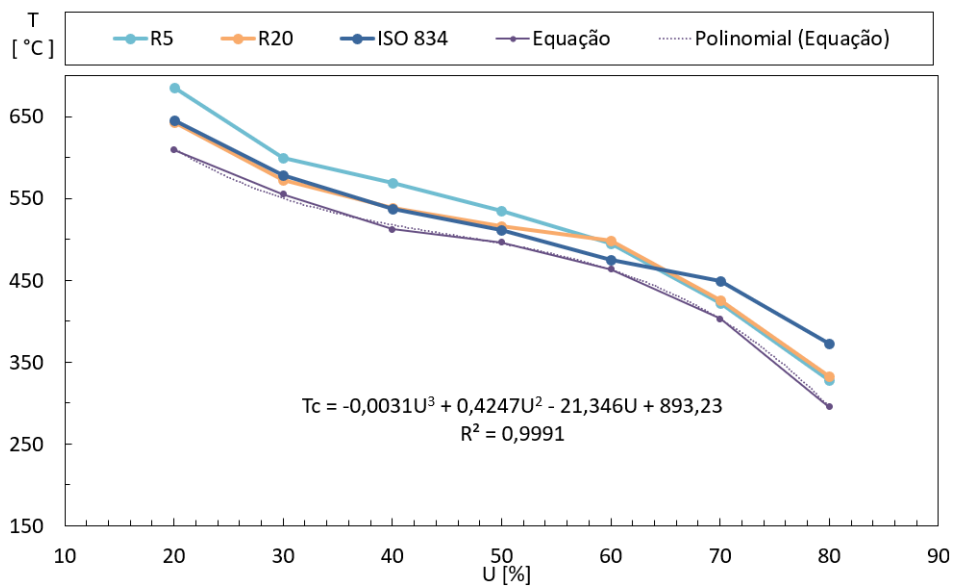


Figura 5.25: Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para HB com comprimento de 0,78 m e espessura de 6 mm

Portanto, para as colunas maiores, o número de divisões na direção do seu comprimento foi aumentado. As colunas com 3 metros de comprimento foram divididas em 150 elementos na direção do seu comprimento, totalizando 19440 elementos, enquanto a coluna com 6 metros foi dividida em 200 elementos, totalizando 25440 elementos.

Para a coluna de 3 m, foram consideradas somente imperfeições locais, pois na análise de autovalor de flambagem para esse comprimento ainda não surgiram imperfeições globais. Já para a coluna com 6 m, foi utilizada apenas imperfeição global, com base na mesma imperfeição de  $L/1000$  mencionada no artigo [35].

Também, foram refeitas as simulações à temperatura ambiente conforme mostrado pela Figura 5.26 para colunas de 3 m e pela Figura 5.27 para colunas de 6 m.

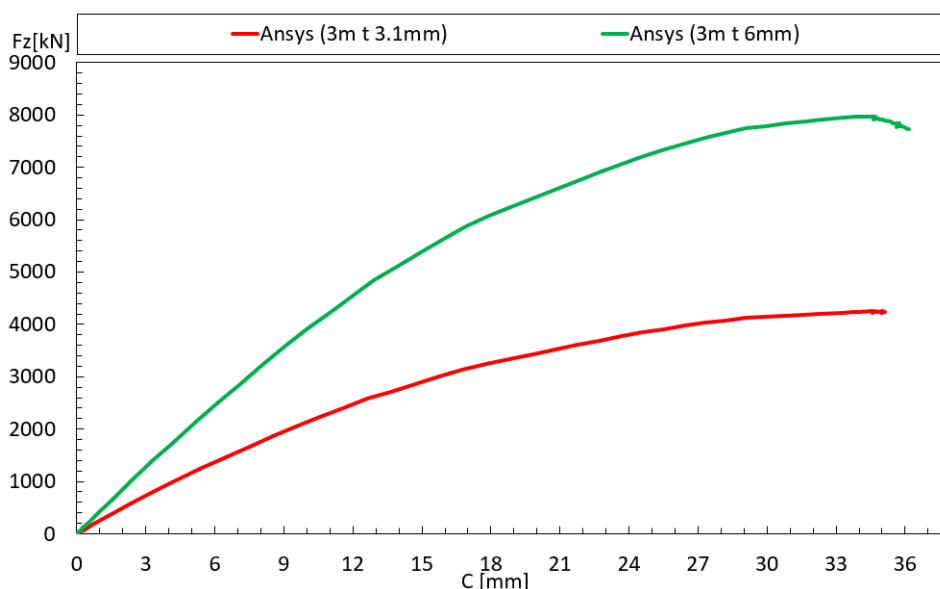


Figura 5.26: Coluna Híbrida com 3 m de comprimento à temperatura ambiente

Ao analisar esses resultados, pode-se observar que as colunas híbridas apresentaram uma perda menor de resistência à temperatura ambiente com o aumento do comprimento em comparação com as colunas CHS.

Enquanto, para 3 m e 6 m, as colunas CHS apresentam, respectivamente, 37% e 11% da sua resistência obtida a 0,78 m de comprimento, as colunas híbridas apresentam 98% a 3 m e 58% a 6 m.

Com essas simulações realizadas, foi possível conduzir as análises com os três regimes de aquecimento. Assim, para verificar o efeito do comprimento na temperatura crítica, pode ser observado na Figura 5.28 para a taxa de aquecimento R5, na Figura 5.29 para R20 e na Figura 5.30 para a ISO 834. Pelos resultados, pode ser observado que a variação do comprimento afeta a temperatura crítica de maneira complexa.

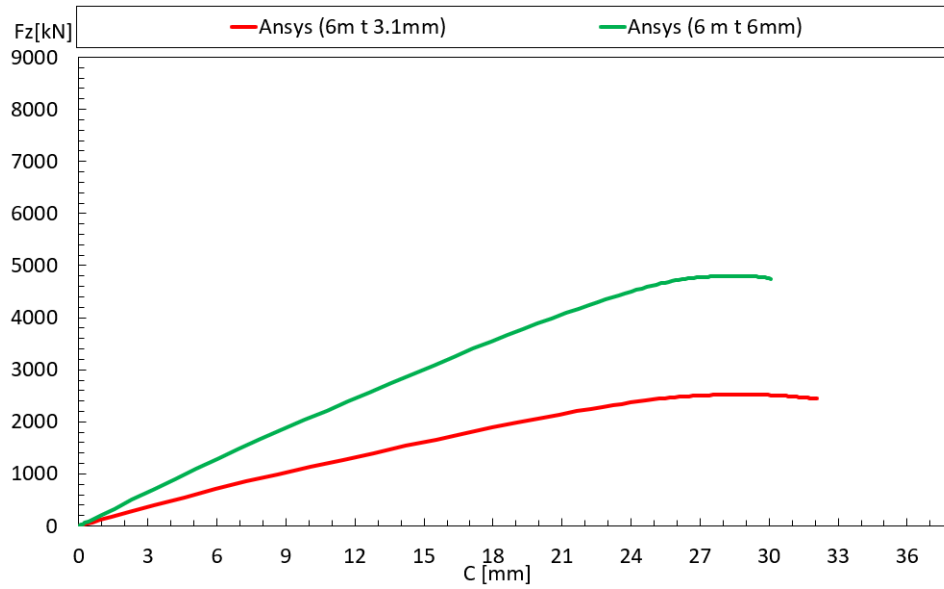


Figura 5.27: Coluna Híbrida com 6 m de comprimento à temperatura ambiente

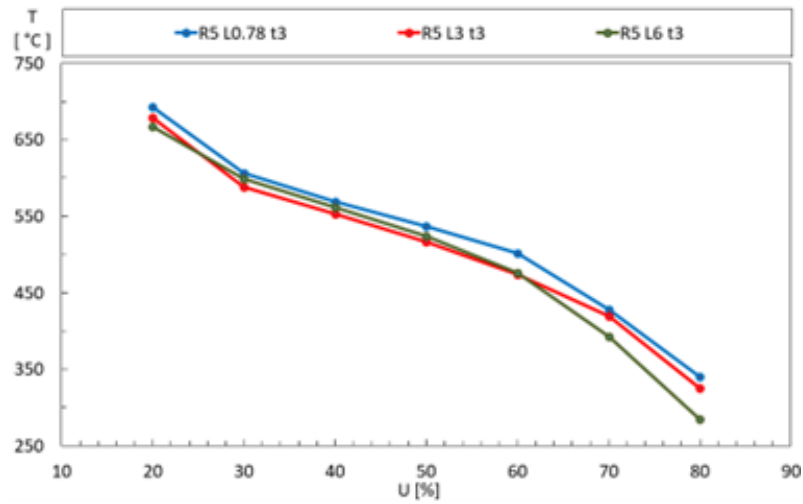


Figura 5.28: Efeito do comprimento na Coluna Híbrida para R5

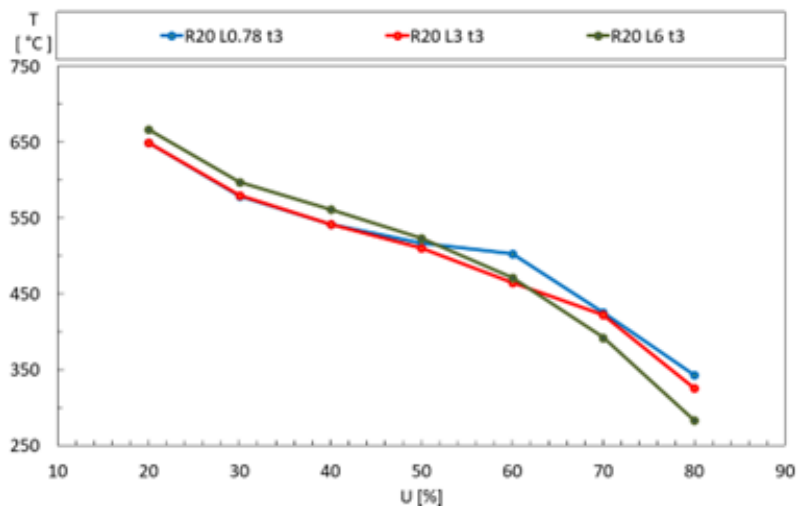


Figura 5.29: Efeito do comprimento na Coluna Híbrida para R20

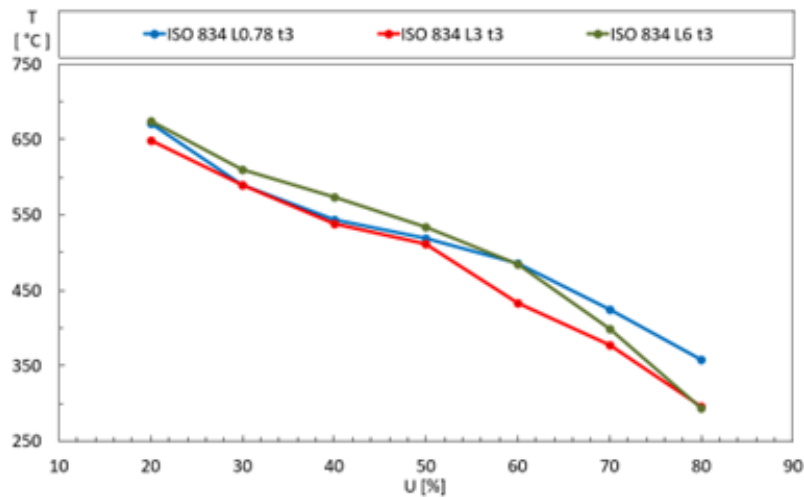


Figura 5.30: Efeito do comprimento na Coluna Híbrida para ISO 834

Ainda assim, é possível perceber que, para valores mais altos de fatores de carga, colunas mais longas sofreram maior diminuição da temperatura crítica, principalmente as colunas de 6 metros para fatores de carga maiores que 60%. Isso pode mostrar que falhas que envolvam imperfeições globais têm desempenho inferior para altos fatores de carga.

As equações de projeto para os outros valores de comprimento podem ser vistos nas Figuras 5.31, 5.32, 5.33 e 5.34.

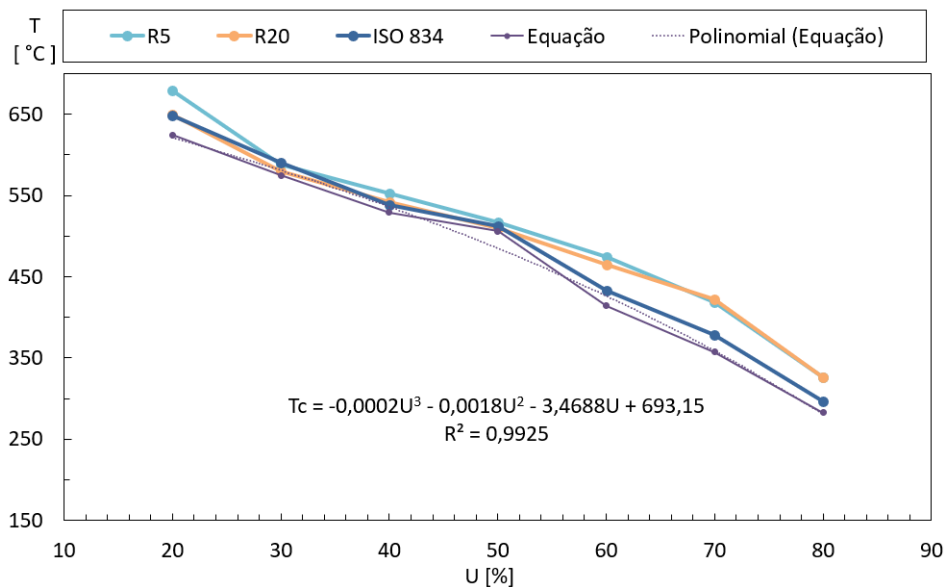


Figura 5.31: Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para HB com comprimento de 3 m e espessura de 3,1 mm

Com os resultados, pode-se visualizar que a variação das taxas de aquecimento apresenta menor variação para a temperatura crítica em comprimentos maiores.

Também é possível perceber que as falhas para a coluna a 0,78 m foram todas devido às imperfeições locais da placa, enquanto para a coluna a 6 m foram devido à imperfeição global.

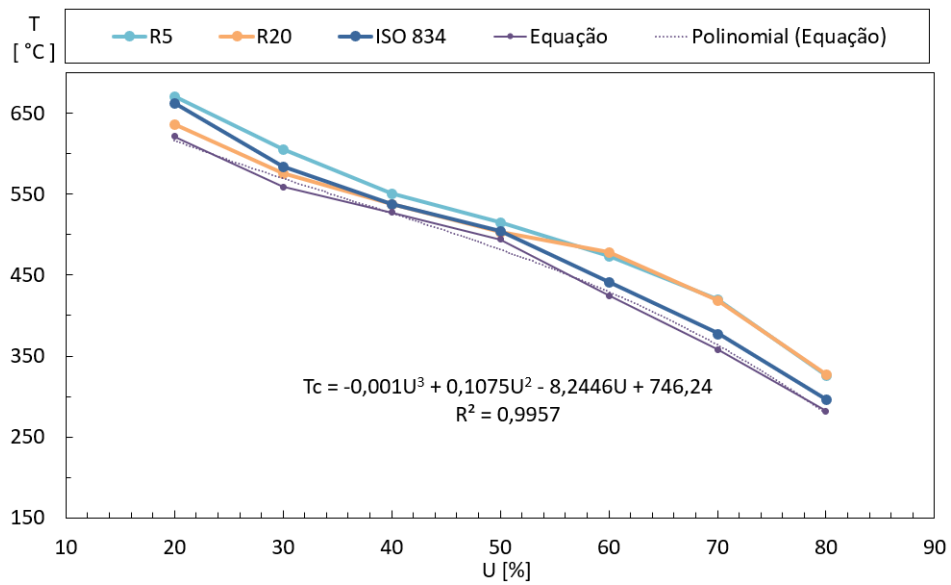


Figura 5.32: Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para HB com comprimento de 3 m e espessura de 6 mm

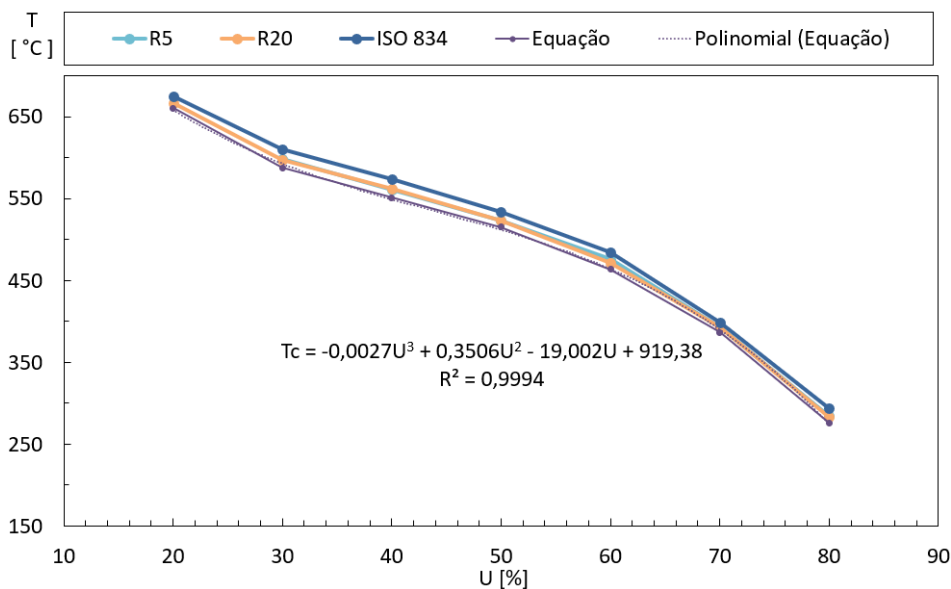


Figura 5.33: Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para HB com comprimento de 6 m e espessura de 3,1 mm

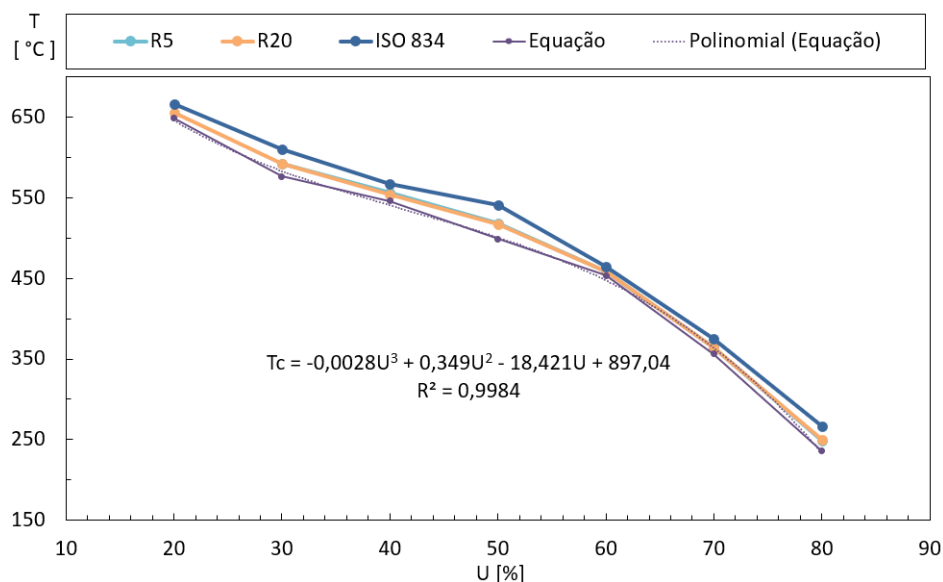


Figura 5.34: Gráfico de Temperatura Crítica por Fator de Carga para HB com comprimento de 6 m e espessura de 6 mm

No entanto, para os casos envolvendo as colunas de 3 metros, as diferentes taxas de aquecimentos e fatores de utilização podem alterar a falha ocorrida na coluna. Aquecimentos mais intensos e fatores de carga mais elevados tendem a gerar falhas mais localizadas, enquanto aquecimentos mais lentos e menores cargas tendem a gerar falhas globais na coluna, como pode ser visualizado nas Figuras 5.35 e 5.36.

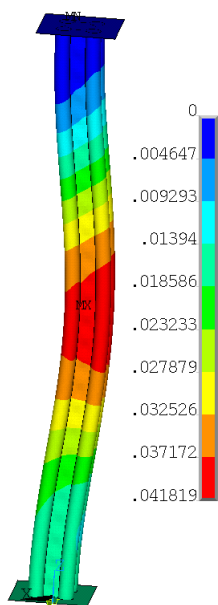


Figura 5.35: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5

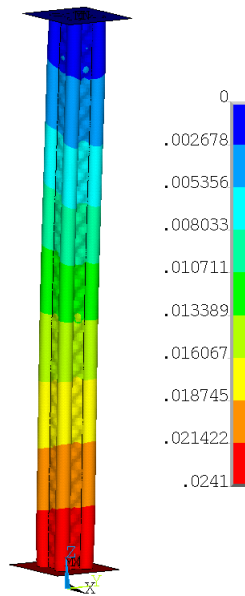


Figura 5.36: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20

### 5.2.5 Comparação

Por fim, como ambos os elementos de colunas utilizam o mesmo material para o tubo, é possível comparar a resistência térmica e mecânica entre eles. Isso pode ser observado nas Figuras 5.37, 5.38 e 5.39, que incluem uma comparação entre as equações obtidas anteriormente. Nota-se que, na maioria dos casos, as colunas híbridas apresentam valores de temperatura crítica abaixo das colunas CHS. No entanto é importante ressaltar que as colunas híbridas suportam uma carga aplicada muito maior e têm uma perda menor de resistência com o aumento do comprimento. Logo embora as colunas híbridas tenham geralmente um temperatura crítica levemente menor do que as colunas CHS, as colunas híbridas para o mesmo fator de carga estão sujeitas a uma carga muito mais elevada.

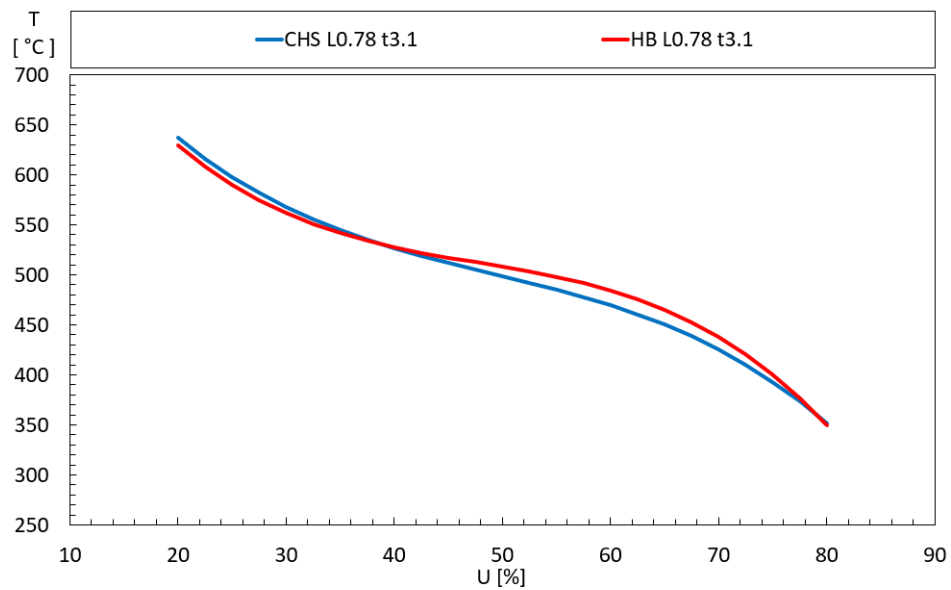


Figura 5.37: Comparação entre equações para colunas com comprimento de 0,78 m e espessura de 3,1 mm

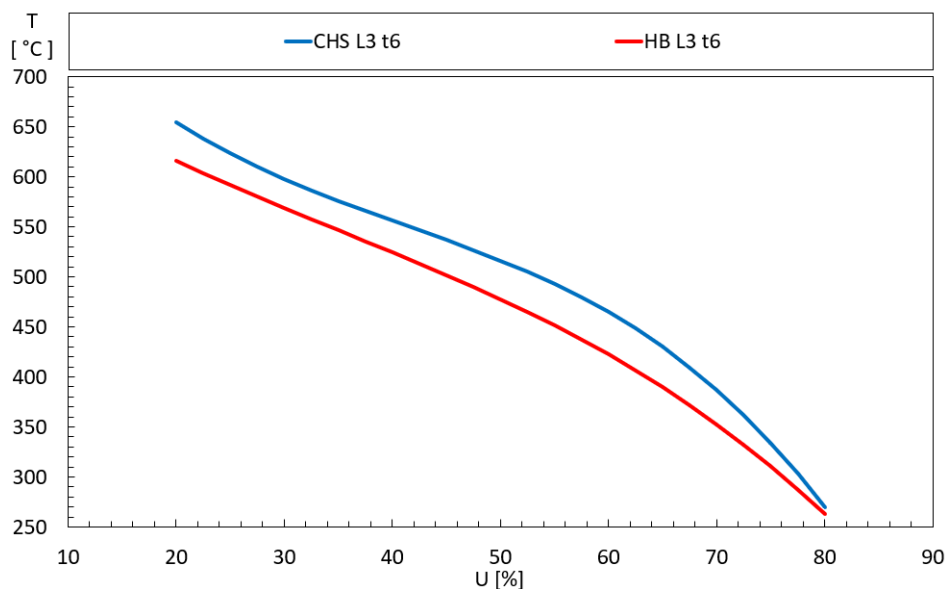


Figura 5.38: Comparação entre equações para colunas com comprimento de 3 m e espessura de 3,1 mm

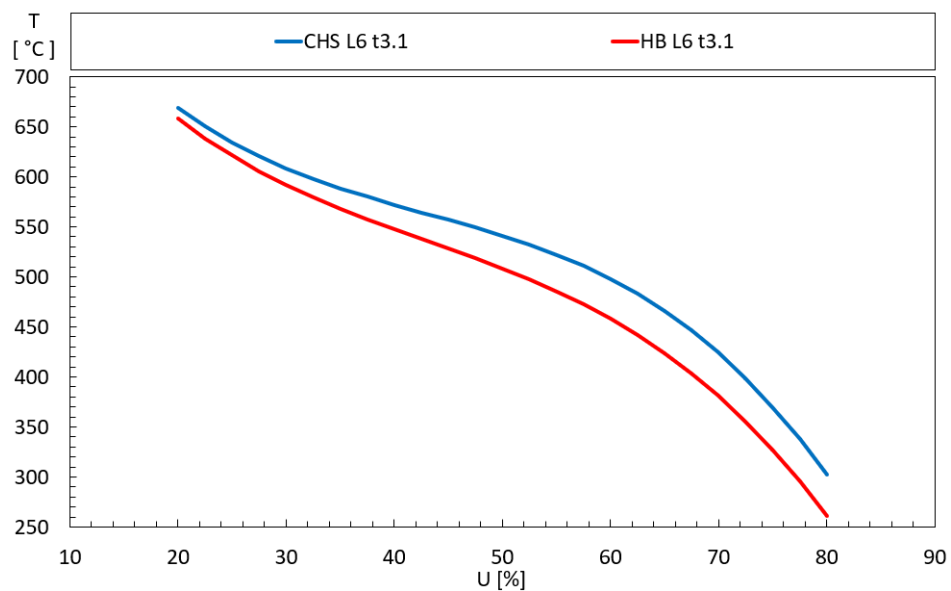


Figura 5.39: Comparação entre equações para colunas com comprimento de 6 m e espessura de 3,1 mm

# Capítulo 6

## Conclusões

Com a realização de todas as simulações propostas, foi possível ampliar o banco de dados sobre as informações existentes relacionadas aos UHSS. Isso buscou proporcionar uma compreensão mais aprofundada do comportamento desses materiais em situações de incêndio. Nesse contexto, foram desenvolvidas as equações de projeto apresentadas.

As simulações realizadas apresentaram resultados satisfatórios, embora tenham utilizado fatores de redução e expansão térmica diferentes dos listados no prEN 1993-1-2:2023 [5]. No entanto, para a análise que envolve a ISO 834 [18], foram utilizadas as propriedades térmicas fornecidas pelo prEN 1993-1-2:2023 [5] e apresentaram resultados aceitáveis. É fundamental destacar que, para uma análise mais precisa, seria necessário considerar o efeito da fluência, o qual não foi abordado neste trabalho.

Pode-se perceber que tanto para as colunas CHS quanto para as híbridas, a variação do diâmetro apresentou mudança pouco significativa na temperatura crítica. Por outro lado, observa-se que colunas com maiores comprimentos têm um desempenho inferior para fatores de carga mais elevados. O efeito do aquecimento é menor em colunas mais longas. Além disso, o fator de carga foi o parâmetro que apresentou a maior influência. Essas considerações corroboram com os artigos [3] e [35].

Sobre a utilização de colunas híbridas em comparação com as colunas CHS, observa-se que as colunas híbridas, para o mesmo fator de carga, geralmente apresentaram menores valores de temperatura crítica. No entanto, é crucial destacar que as colunas híbridas estão sujeitas a cargas significativamente maiores. Além disso, elas demonstram uma perda menor de resistência com o aumento do comprimento, o que torna a utilização de colunas de UHSS mais longas mais viável.

Por fim, é importante realizar mais simulações e desenvolver mais equações de projeto para

diferentes tipos de UHSS com geometrias mais variadas, a fim de obter uma comparação mais precisa com as propriedades apresentadas pelo prEN 1993-1-2:2023 [5].

## 6.1 Futuros Trabalhos

Atualmente, as pesquisas envolvendo colunas de UHSS em situações de fogo ainda são escassas. Por isso, é crucial realizar uma quantidade maior de testes experimentais e análises numéricas com diferentes tipos de UHSS e geometrias, podendo ser levado em consideração também o efeito da fluência.

Também é sugerido a realização de estudos para avaliar as propriedades mecânicas desse material juntamente ao custo envolvido para sua fabricação e utilização, permitindo uma análise de custo e benefício para determinar sua viabilidade para utilização. Por fim, também é recomendada uma análise mais aprofundada do comprimento para colunas de UHSS, buscando formular equações de projeto que levem em consideração essa variável, abrangendo tanto a resistência quanto a temperatura crítica.

# Bibliografia

- [1] L. Keränen, M. Kangaspuoskari e J. Niskanen, “Ultrahigh-strength steels at elevated temperatures”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2021.
- [2] M. A. Farmani, A. Heidarpour e X.-L. Zhao, “A distinctive approach to testing and modeling thermal creep in ultra-high strength steel”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021.
- [3] M. A. Farmani e A. Heidarpour, “Development of design equations for ultra-high strength steel CHS columns under transient fire conditions considering thermal creep and axial restraint effects”, *Fire Safety Journal*, 2023.
- [4] F. P. Beer, J. E. Russell Johnston e J. T. Dewolf, *Mechanics of Materials*, 4st. Mc Graw Hill, 2006, ISBN: 007-124999-0.
- [5] European Committee for Standardization, *Eurocode 3, Design of Steel Structures Part 1-2: General Rules structural Fire Design*, 2023.
- [6] World Auto Stell, *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 6.0*, abr. de 2017.
- [7] ASM Internacional, *ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. 2005.
- [8] SSAB Tunnpååt, “Docol UHS : Cold reduced Ultra High Strength Steels”, rel. téc., 2003.
- [9] W. Wang, D. Huang e Z. Wang, “Experimental study on fire resistance of high strength Q960 steel columns under axial compression”, *Fire Safety Journal*, 2023.
- [10] X. Qiang, X. Jiang, F. S. Bijlaard e H. Kolstein, “Mechanical properties and design recommendations of very high strength steel S960 in fire”, *Engineering Structures*, 2016.
- [11] E. Gogou, “Use of High Strength Steel Grades for Economical Bridge Design”, *Delft University of Technology*, 2012.

- [12] T. Kamo, M. Sasaki, Y. Watanabe, R. Ando e T. Suzuki, “Ultra High Strength Steel for Sustainable Building Structures”, *Nippon Steel Sumitomo Metal Technical Report No. 110*, 2015.
- [13] J. A. Ferreira, “Análise numérica de pilares de aço com seção em perfil "I" de Ultra Alta resistencia (960 MPa) submetidos à flexão em torno dos eixos de maior e menor inércia”, *Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais*, 2022.
- [14] T. T. Lie, *Structural Fire Protection: ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 78*. American Society of Civil Engineers, 1992, ISBN: 0-87262-888-4.
- [15] P. V. Real, *Incendio em Estruturas Metalicas*, 1st. Aveiro, Portugal: Edições Orion, 2003, ISBN: 972-8620-04-7.
- [16] D. B. R. Martins, “Variação das propriedades mecânicas do aço com a temperatura”, *Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra*, 2012.
- [17] K. V. Bonitese, “Segurança contra incêndio em edifício habitacional de baixo custo estruturado em aço”, *Universidade Federal de Minas Gerais*, 2007.
- [18] International Organization for Standardization, *ISO 834-1 : Fire-resistance tests - Elements of building construction – Part 1: general requirements*, 1999.
- [19] A. Fellouh, “Axial buckling load of partially encased columns under fire”, *Polytechnic Institute of Bragança*, 2016.
- [20] Y. A. Cengel e A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 5st. Mc Graw Hill Education, 2015, ISBN: 978-0-07-339818-1.
- [21] European Committee for Standardization, *Eurocode 1: Actions on structures -Part 1-2: General actions Actions on structures exposed to fire*, 2002.
- [22] R. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 8st. Pearson, 2011, ISBN: 978-0-13-602230-5.
- [23] B. P. Anatolyevich e G. N. Yakovlevna, “Generalization of the Ramberg–Osgood Model for Elastoplastic Materials”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019.
- [24] W. D. Callister e D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10st. Wiley, 2018, ISBN: 9781119321590.
- [25] W. Chen, *Handbook of Structural Engineering*. CRC Press, 1997, ISBN: 0-8493-2674-5.
- [26] X. Meng e L. Gardner, “Flexural buckling of normal and high strength steel CHS columns”, *Elsevier*, 2021.

- [27] European Committee for Standardization, *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, 2005.
- [28] ———, *EN 1363-1 : Fire resistance tests - Part 1: General requirements*, 2020.
- [29] W. Wang, Y. Zhang, L. Xu e X. Li, “Mechanical properties of high-strength Q960 at elevated temperatures”, *Fire Safety Journal*, 2020.
- [30] Y. Xing, W. Wang e H. Al-azzani, “Assessment of thermal properties of various types of high-strength steels at elevated temperatures”, *Fire Safety Journal*, 2021.
- [31] D. A. Winful, S. Afshan, K. A. Cashell, A. M. Barnes e R. J. Pargeter, “Flexural buckling behaviour of high strength steel columns under fire conditions”, *Ce/Papers*, 2017.
- [32] A. Mohammed e K. A. Cashell, “Structural fire design of SHS, RHS and CHS high strength steel columns”, *Advances in Structural Engineering*, 2021.
- [33] N. Tondini, V. Hoang, J.-F. Demonceau e J.-M. Franssen, “Experimental and numerical investigation of high-strength steel circular columns subjected to fire”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2012.
- [34] A. Heidarpour, S. Cevro, Q.-Y. Song e X.-L. Zhao, “Behaviour of stub columns utilising mild-steel plates and VHS tubes under fire”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2013.
- [35] M. A. Farmani, A. Heidarpour e C. Woo, “Thermal creep of hybrid steel columns comprising ultra-high strength steel tubes and stainless steel plates under transient fire conditions”, *Thin-Walled Structures*, 2023.
- [36] M. K. Thompson e J. M. Thompson, *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis*. Elsevier, 2017, ISBN: 978-0-12-812981-4.
- [37] Ansys, *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*, 2011.
- [38] E. Madenci e I. Guven, *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®*, 2st. Springer, 2015, ISBN: 978-1-4899-7549-2.
- [39] C. H. C. Garbin, “Analysis of the Fire Effect on Loadbearing LSF Walls and Design of Experimental Test Setup”, *Polytechnic Institute of Bragança*, 2020.
- [40] Z. P. Bazant e L. Cedolin, *Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture, and Damage Theories*. Oxford University Press, 1991.
- [41] European Committee for Standardization, *Eurocode 3 -Design of steel structures -Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures*, 2007.

- [42] N. Vassios, “Nonlinear Analysis of Structures - The Arc Length Method: Formulation, Implementation and Applications”, *Harvard University*, 2015.
- [43] E. M. . Fonseca, C. A. M. Oliveira e F. Q. Melo, “Validação Experimental de um Modelo Teórico para Cálculo de Elevados Gradientes Térmicos em Estruturas de Parede Fina.”, *APAET*, 2002.
- [44] European Committee for Standardization, *EN 10219-2: Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain structural steel Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties*, 1997.
- [45] SSAB, “Hardox Tubos e canos”, rel. téc., jul. de 2020.
- [46] A. Afonso e C. Nunes, *Probabilidades e Estatística: Aplicações e Soluções em SPSS*, 2st. Universidade de Évora, 2019, ISBN: 978-972-778-123-2.

# Apêndice A

## Equações de Projeto

Comprimento (m)	Espessura (mm)	Equação de Projeto
0,78	3,1	$-0,0024U^3 + 0,3547U^2 - 20,072U + 915,51$
0,78	6	$-0,0027U^3 + 0,404U^2 - 22,332U + 944,7$
3	3,1	$-0,0019U^3 + 0,2233U^2 - 13,009U + 838,42$
3	6	$-0,0023U^3 + 0,2834U^2 - 15,564U + 870,37$
6	3,1	$-0,003U^3 + 0,3879U^2 - 19,7U + 931,39$
6	6	$-0,0028U^3 + 0,3589U^2 - 18,468U + 915,52$

Tabela A.1: Equações de Projeto para Temperatura Crítica para Colunas CHS para fator de carga entre 20% a 80%

Comprimento (m)	Espessura (mm)	Equação de Projeto
0,78	3,1	$-0,0031U^3 + 0,4444U^2 - 23,051U + 937,1$
0,78	6	$-0,0031U^3 + 0,4247U^2 - 21,346U + 893,23$
3	3,1	$-0,0002U^3 - 0,0018U^2 - 3,4688U + 693,15$
3	6	$-0,001U^3 + 0,1075U^2 - 8,2446U + 746,24$
6	3,1	$-0,0027U^3 + 0,3506U^2 - 19,002U + 919,38$
6	6	$-0,0028U^3 + 0,349U^2 - 18,421U + 897,04$

Tabela A.2: Equações de Projeto para Temperatura Crítica para Colunas Híbridas para fator de carga entre 20% a 80%

# Apêndice B

## Coluna CHS

### B.1 Simulações

#### B.1.1 CHS L0.78 t3.1

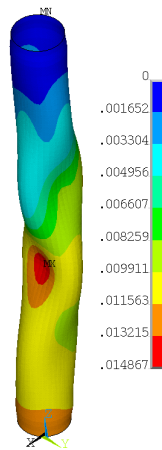


Figura B.1: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5

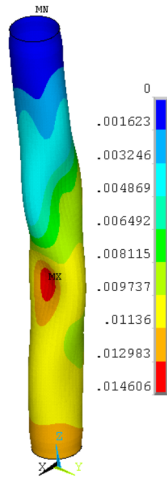


Figura B.2: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20

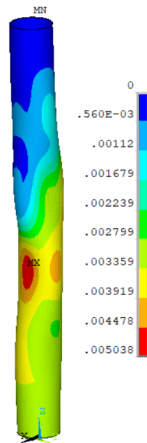


Figura B.3: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

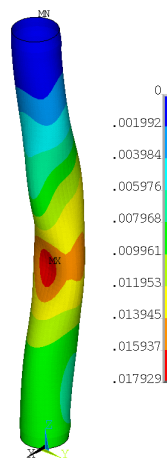


Figura B.4: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5

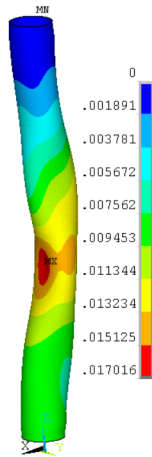


Figura B.5: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20

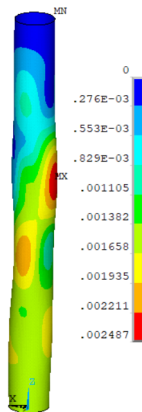


Figura B.6: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

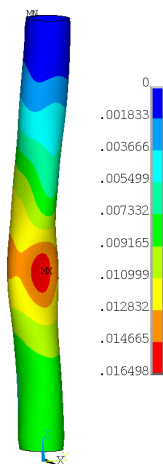


Figura B.7: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5

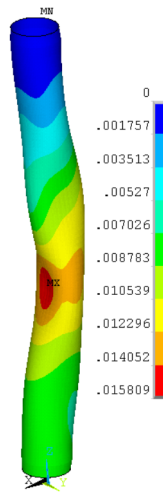


Figura B.8: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20

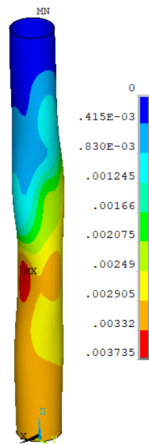


Figura B.9: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

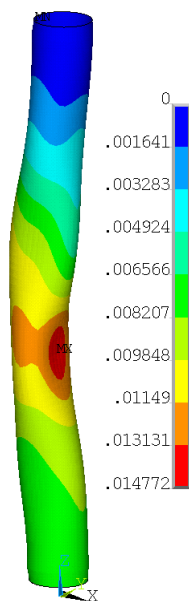


Figura B.10: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5

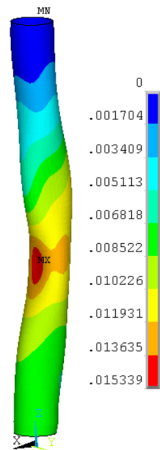


Figura B.11: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20

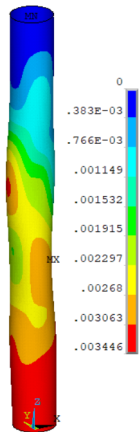


Figura B.12: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

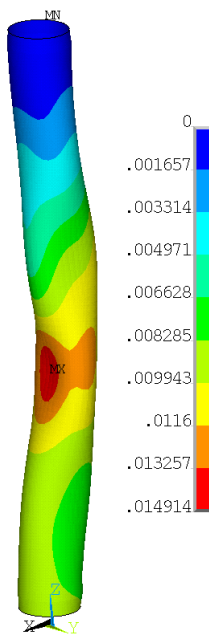


Figura B.13: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5

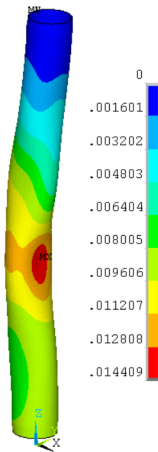


Figura B.14: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20

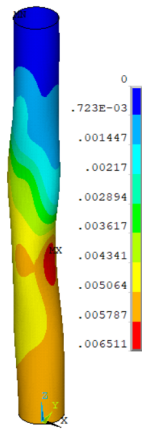


Figura B.15: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

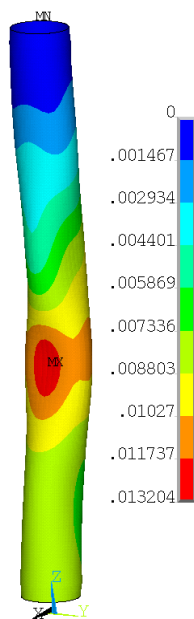


Figura B.16: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5

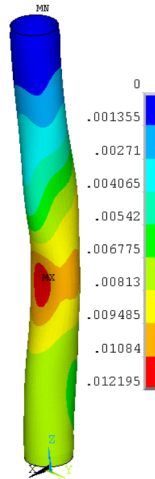


Figura B.17: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20

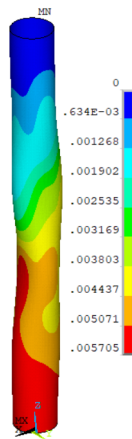


Figura B.18: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

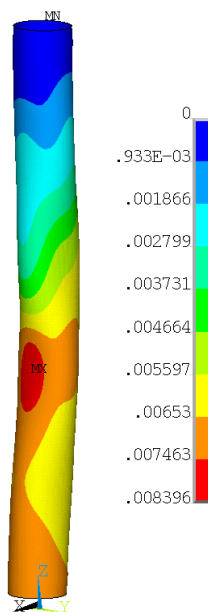


Figura B.19: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R5

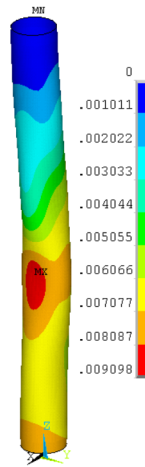


Figura B.20: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e R20

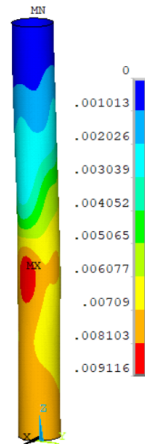


Figura B.21: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

### B.1.2 CHS L0.78 t6

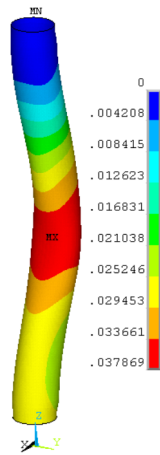


Figura B.22: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5

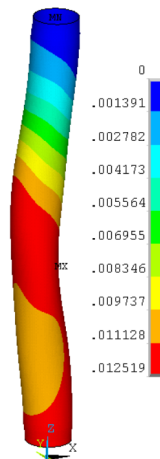


Figura B.23: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20

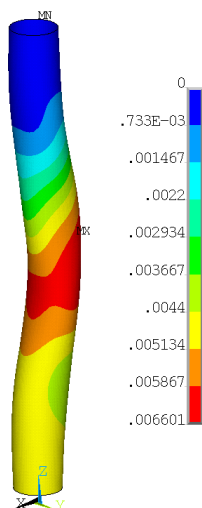


Figura B.24: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

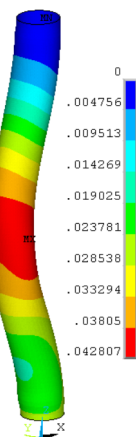


Figura B.25: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5

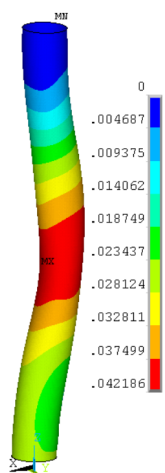


Figura B.26: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20

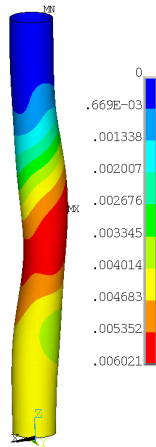


Figura B.27: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

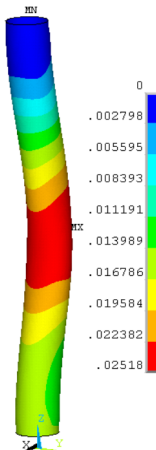


Figura B.28: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5



Figura B.29: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20

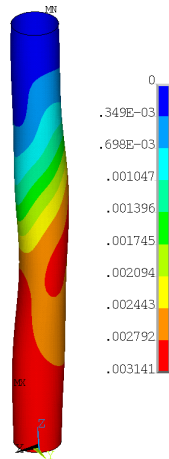


Figura B.30: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

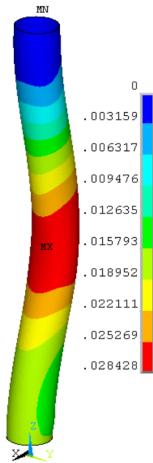


Figura B.31: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5

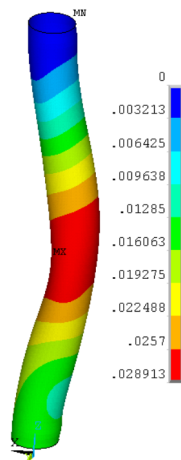


Figura B.32: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20

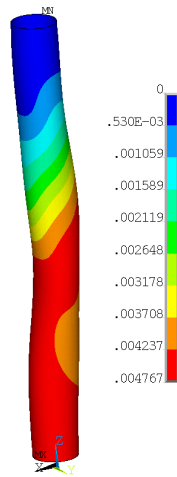


Figura B.33: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

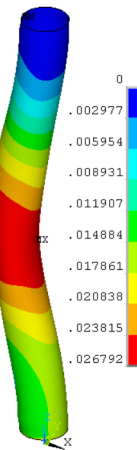


Figura B.34: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5

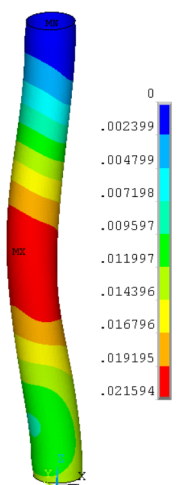


Figura B.35: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20

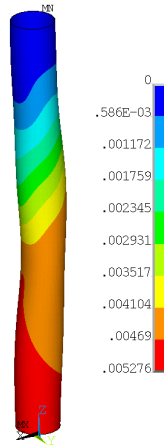


Figura B.36: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

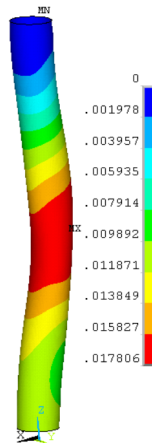


Figura B.37: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5

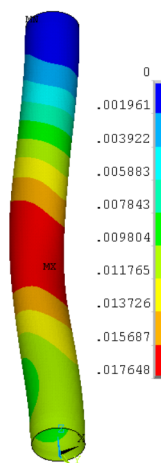


Figura B.38: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20

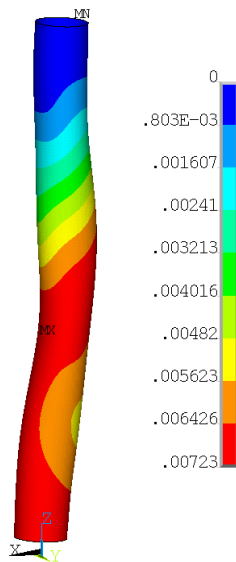


Figura B.39: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

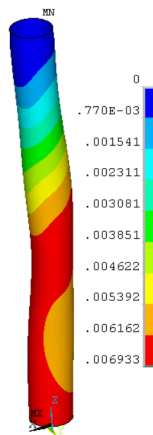


Figura B.40: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5

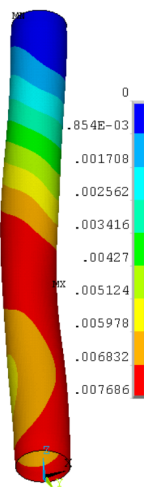


Figura B.41: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20

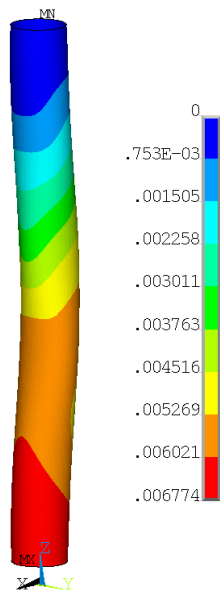


Figura B.42: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

### B.1.3 CHS L3 t3.1

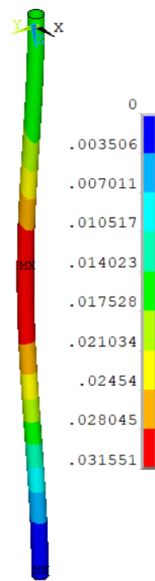


Figura B.43: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5

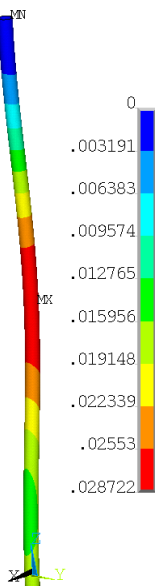


Figura B.44: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20

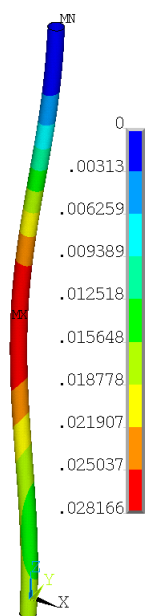


Figura B.45: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

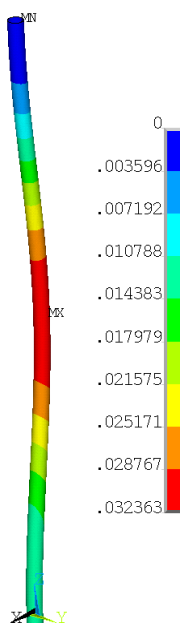


Figura B.46: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5

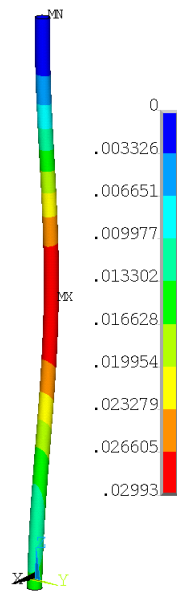


Figura B.47: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20

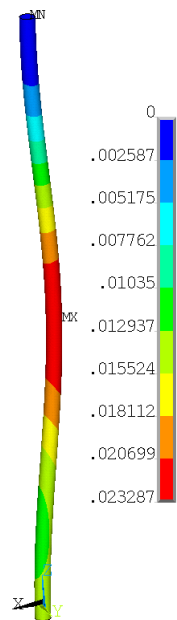


Figura B.48: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

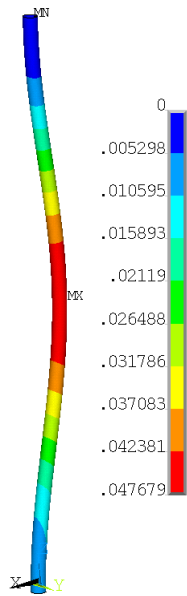


Figura B.49: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5

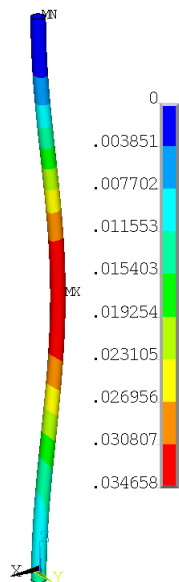


Figura B.50: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20

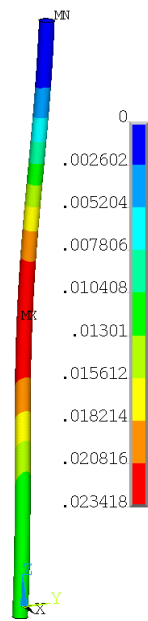


Figura B.51: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

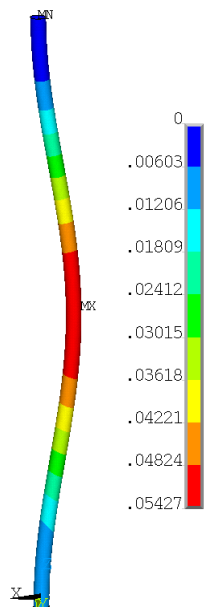


Figura B.52: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5

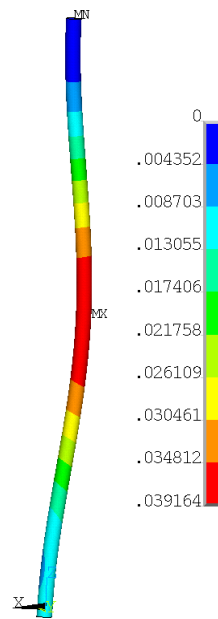


Figura B.53: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20

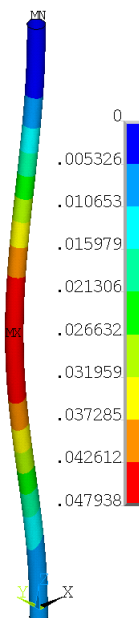


Figura B.54: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

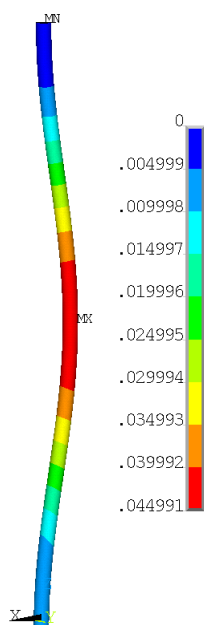


Figura B.55: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5

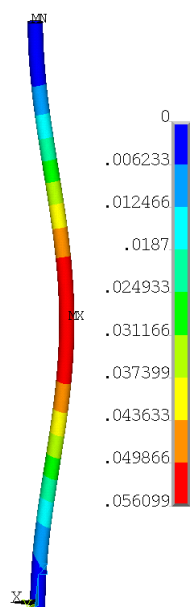


Figura B.56: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20

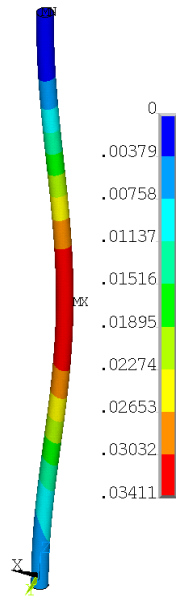


Figura B.57: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

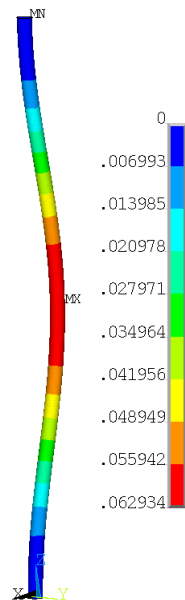


Figura B.58: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5

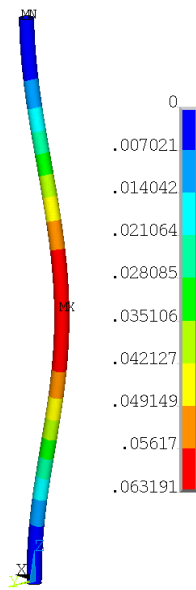


Figura B.59: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20

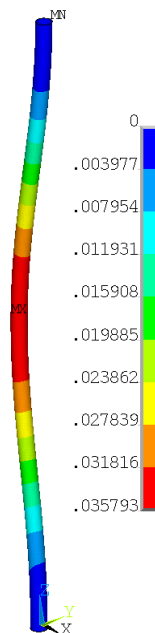


Figura B.60: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

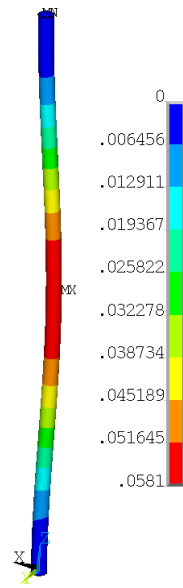


Figura B.61: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5

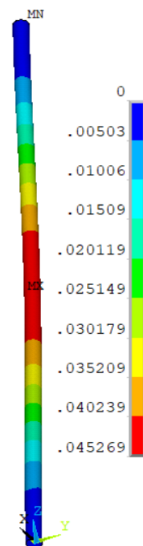


Figura B.62: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20

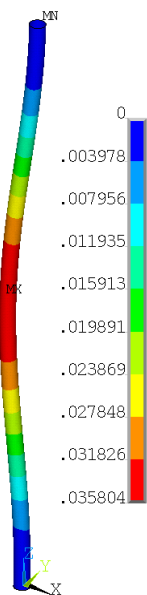


Figura B.63: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

### B.1.4 CHS L3 t6

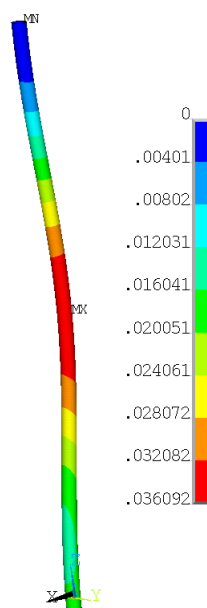


Figura B.64: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5

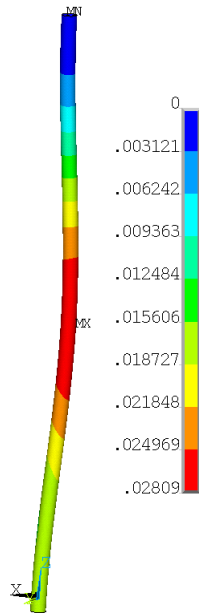


Figura B.65: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

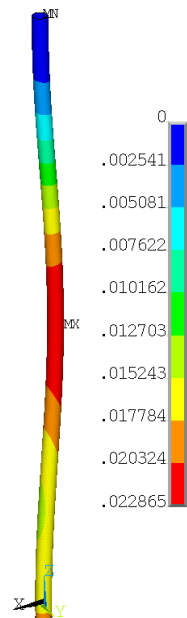


Figura B.66: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

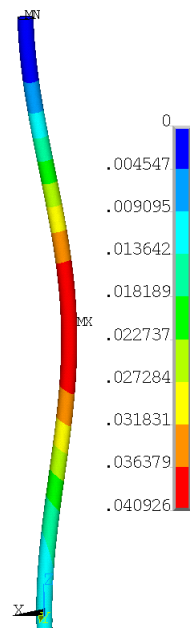


Figura B.67: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5

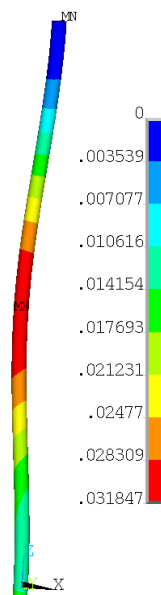


Figura B.68: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

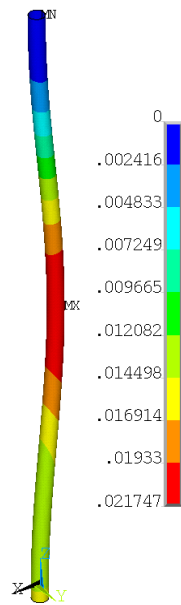


Figura B.69: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

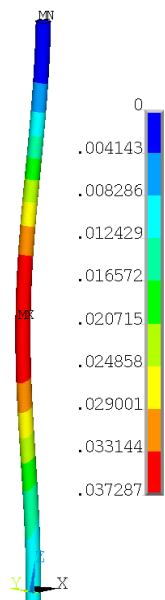


Figura B.70: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5

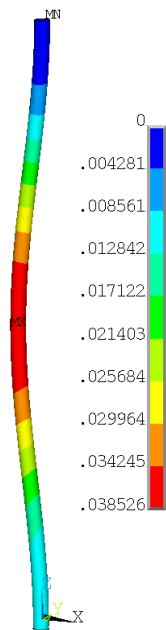


Figura B.71: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

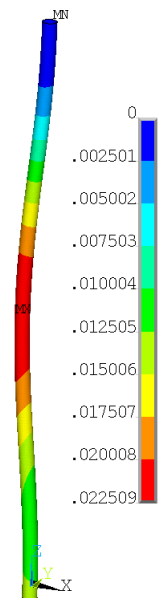


Figura B.72: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

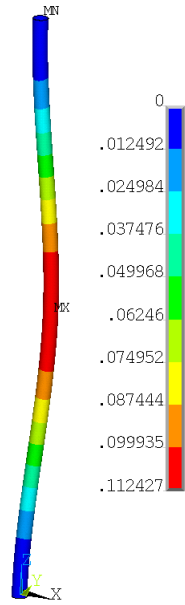


Figura B.73: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5

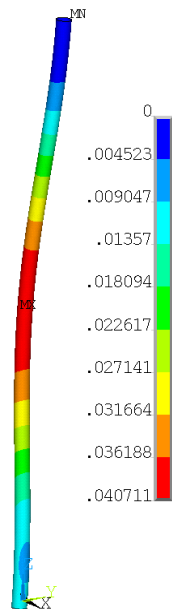


Figura B.74: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

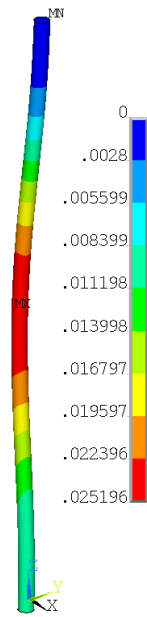


Figura B.75: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

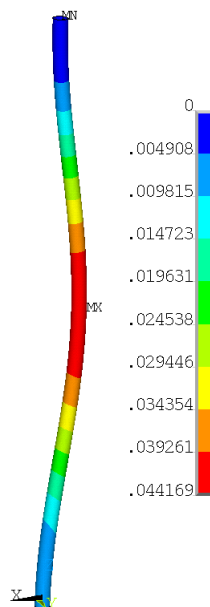


Figura B.76: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5



Figura B.77: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

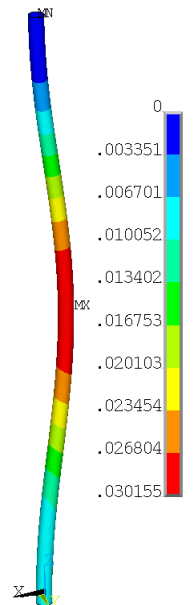


Figura B.78: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

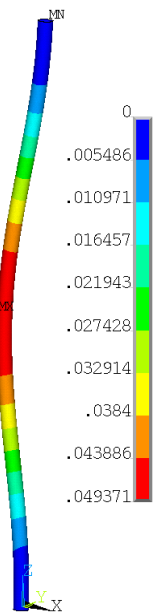


Figura B.79: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5

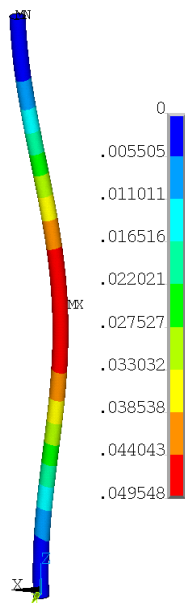


Figura B.80: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

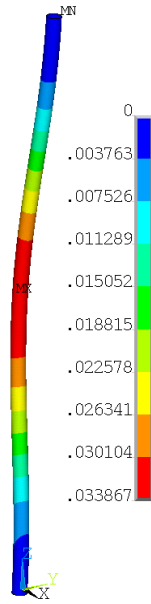


Figura B.81: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

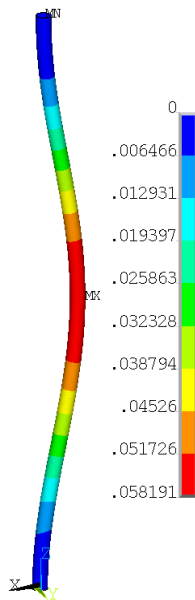


Figura B.82: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5

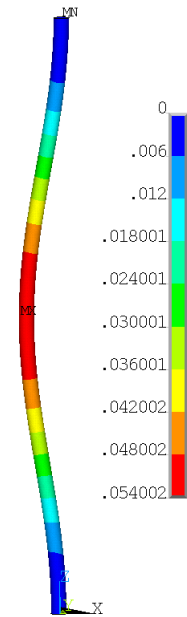


Figura B.83: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

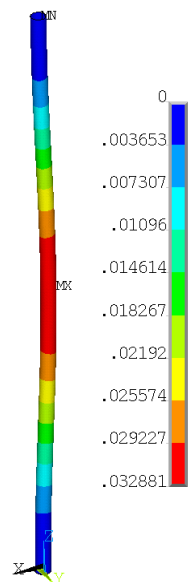


Figura B.84: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

### B.1.5 CHS L6 t3.1

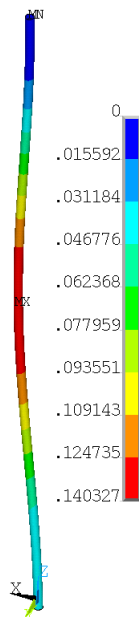


Figura B.85: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

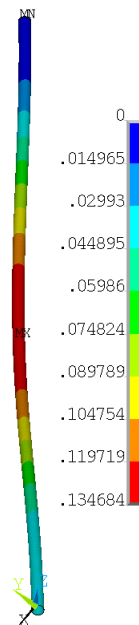


Figura B.86: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20

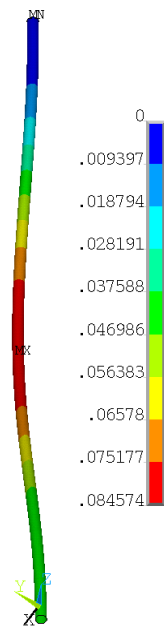


Figura B.87: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

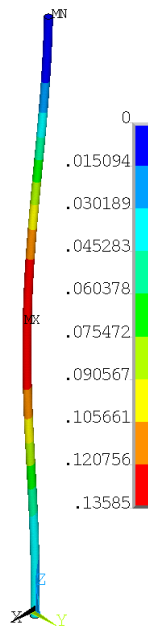


Figura B.88: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

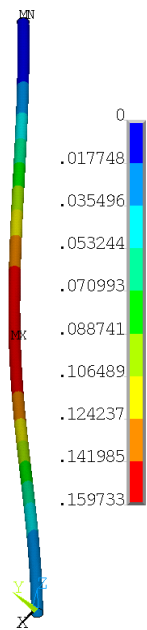


Figura B.89: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20

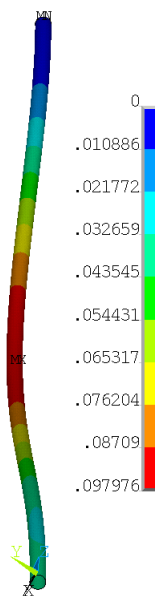


Figura B.90: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

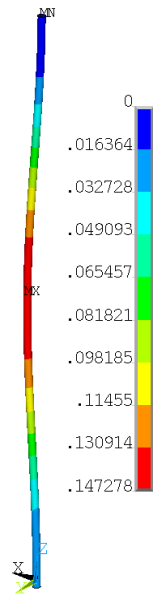


Figura B.91: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

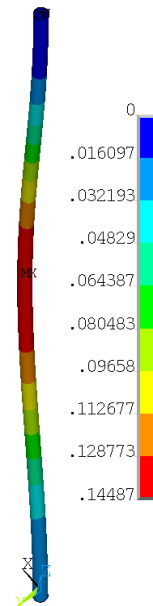


Figura B.92: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20

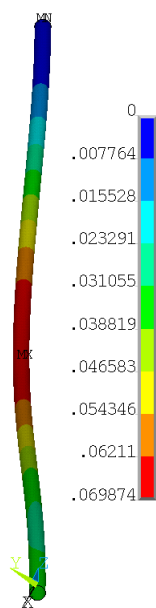


Figura B.93: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

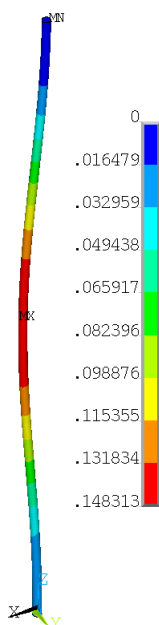


Figura B.94: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

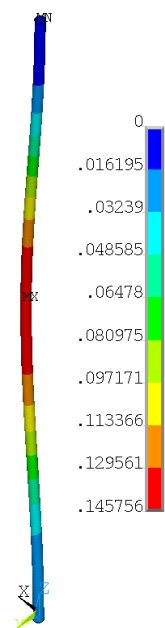


Figura B.95: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20

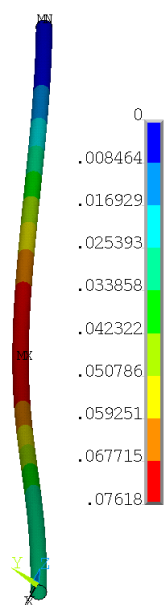


Figura B.96: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

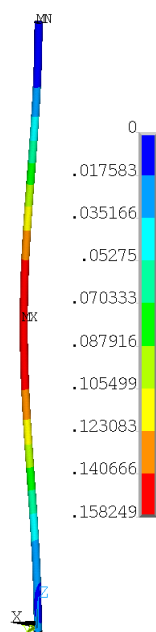


Figura B.97: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

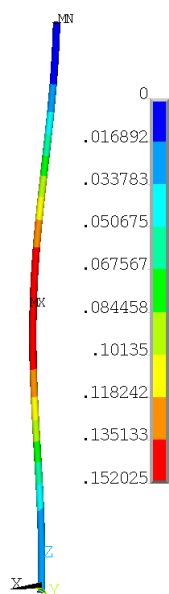


Figura B.98: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20

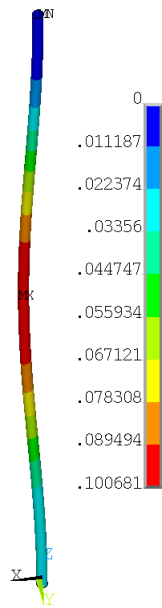


Figura B.99: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

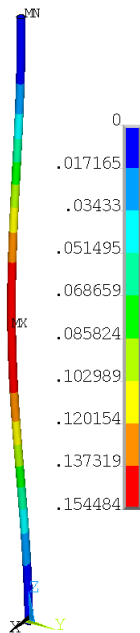


Figura B.100: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

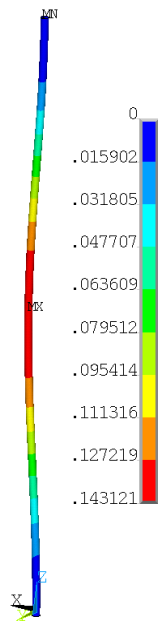


Figura B.101: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20

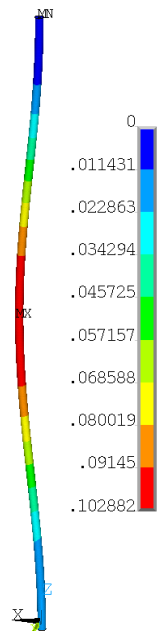


Figura B.102: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

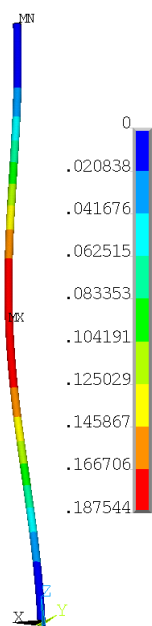


Figura B.103: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

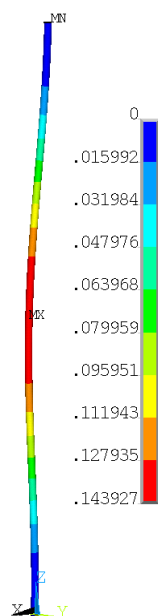


Figura B.104: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20

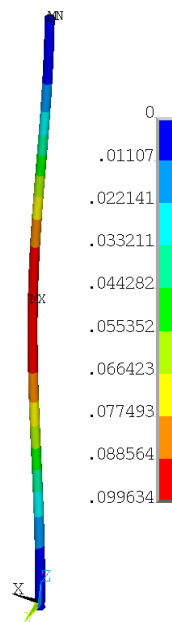


Figura B.105: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

B.1.6 CHS L6 t6

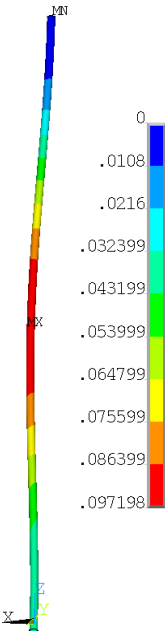


Figura B.106: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

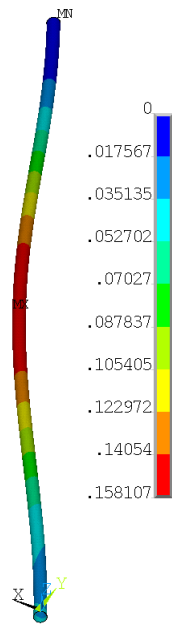


Figura B.107: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

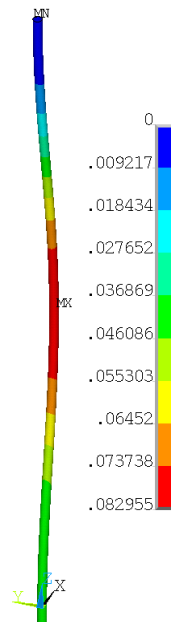


Figura B.108: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

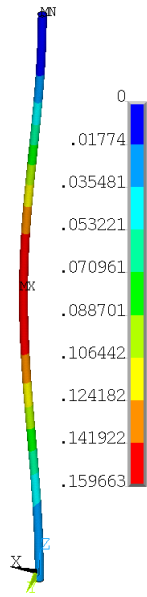


Figura B.109: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

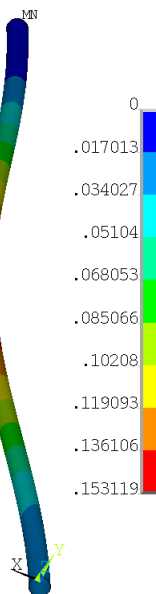


Figura B.110: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

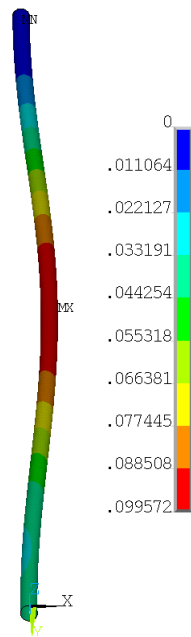


Figura B.111: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

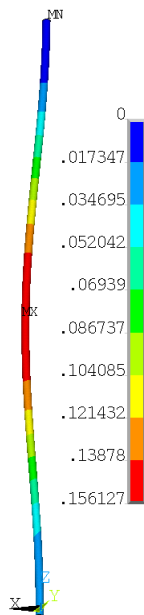


Figura B.112: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

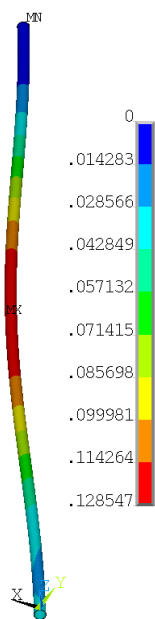


Figura B.113: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

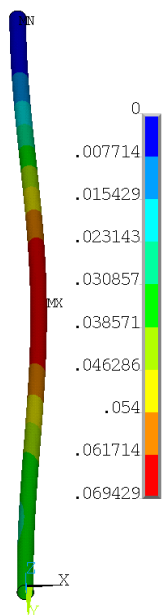


Figura B.114: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

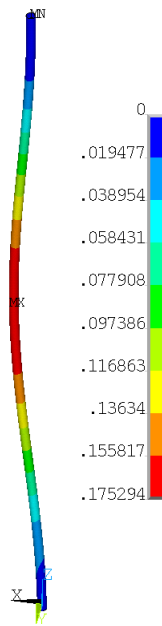


Figura B.115: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

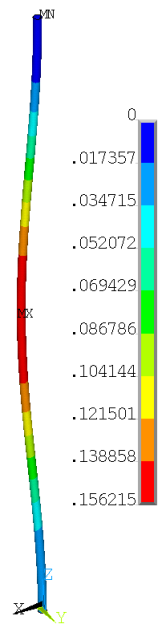


Figura B.116: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

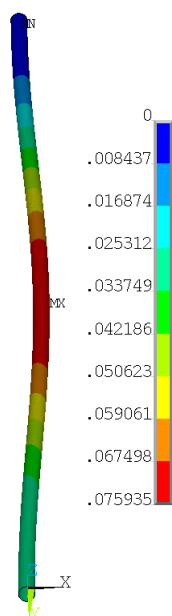


Figura B.117: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

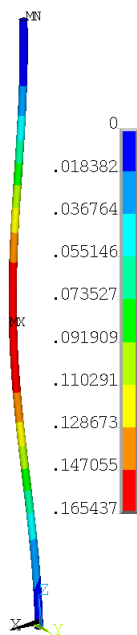


Figura B.118: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

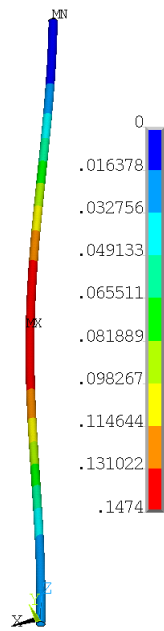


Figura B.119: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

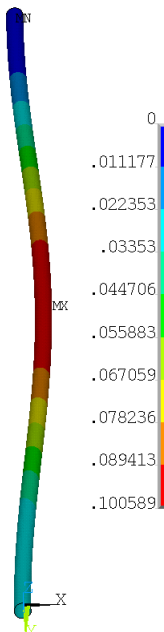


Figura B.120: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

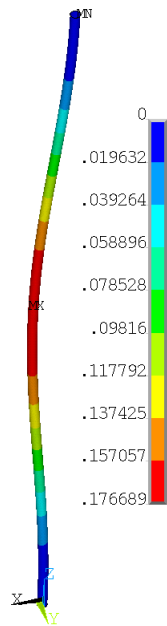


Figura B.121: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

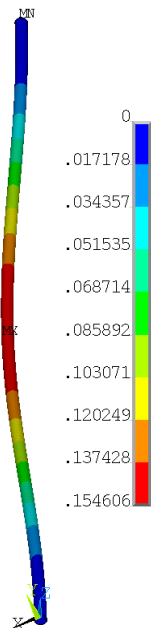


Figura B.122: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

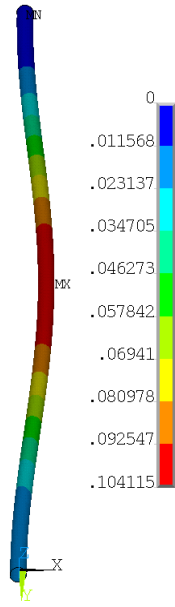


Figura B.123: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

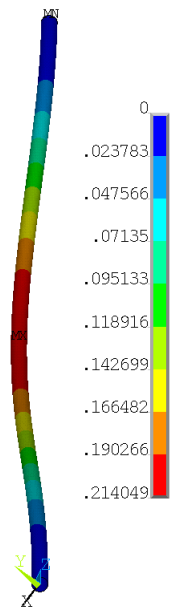


Figura B.124: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

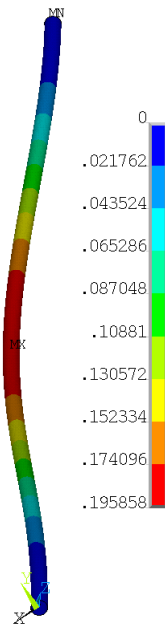


Figura B.125: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

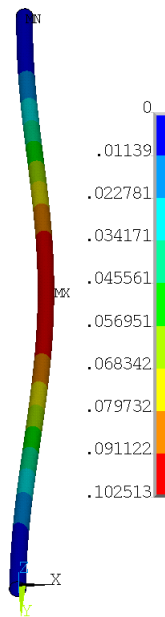


Figura B.126: Soma do Vetor de Deslocamento para CHS com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

# Apêndice C

## Colunas Híbridas

### C.1 Simulações

#### C.1.1 HB L0.78 t3.1

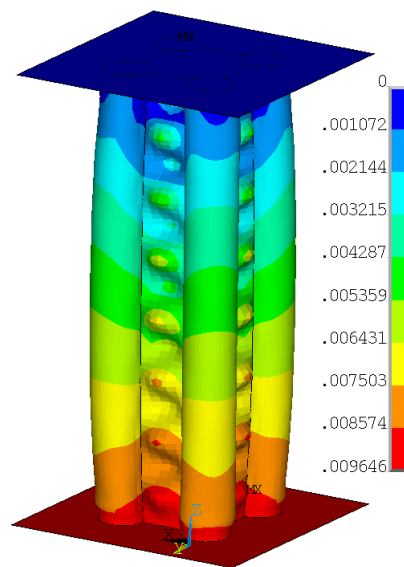


Figura C.1: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5

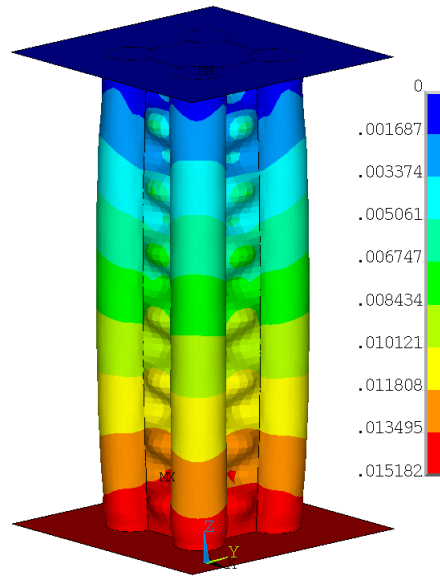


Figura C.2: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20

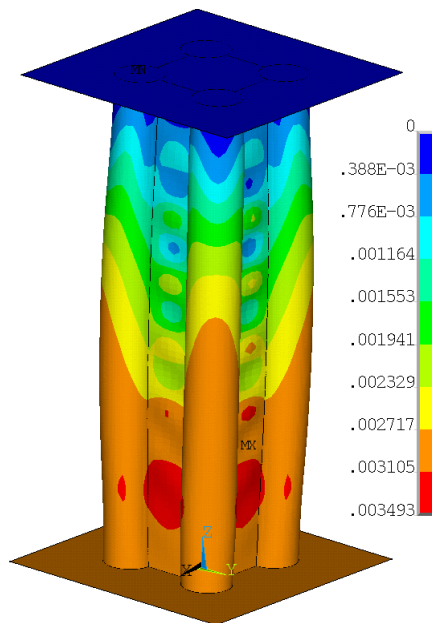


Figura C.3: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834

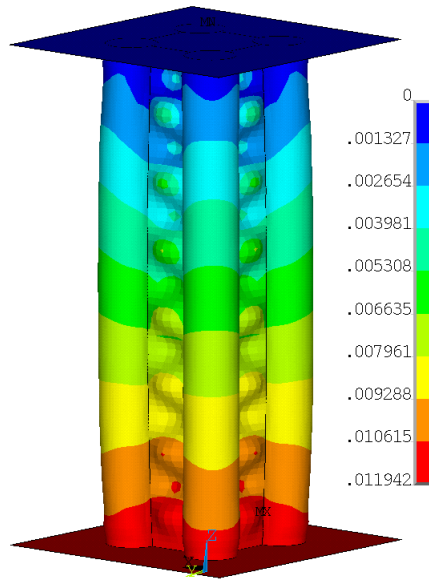


Figura C.4: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5

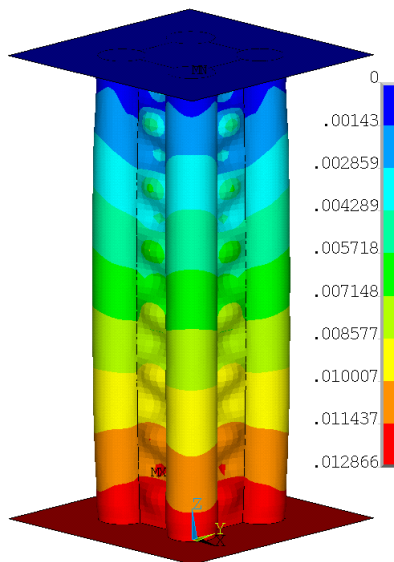


Figura C.5: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20

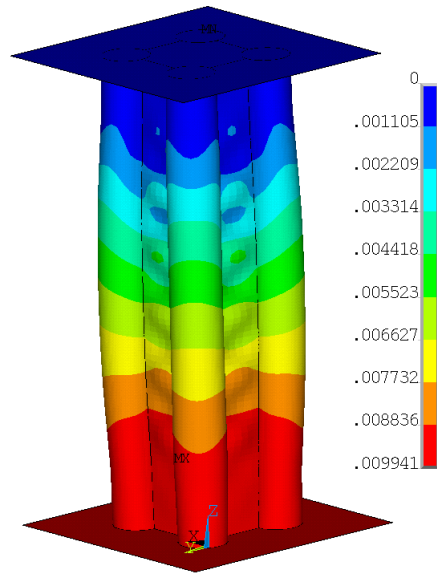


Figura C.6: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834

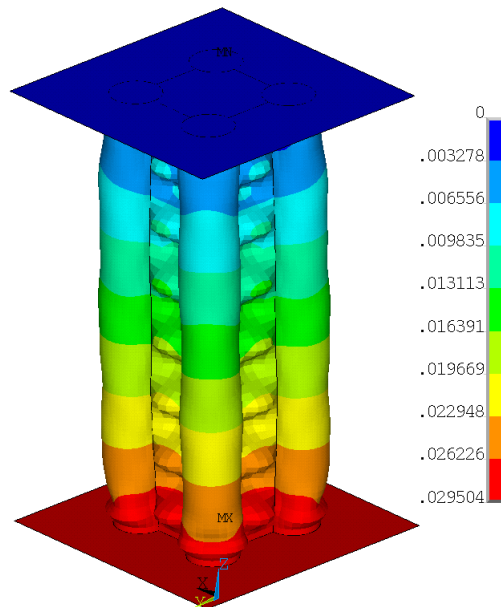


Figura C.7: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5

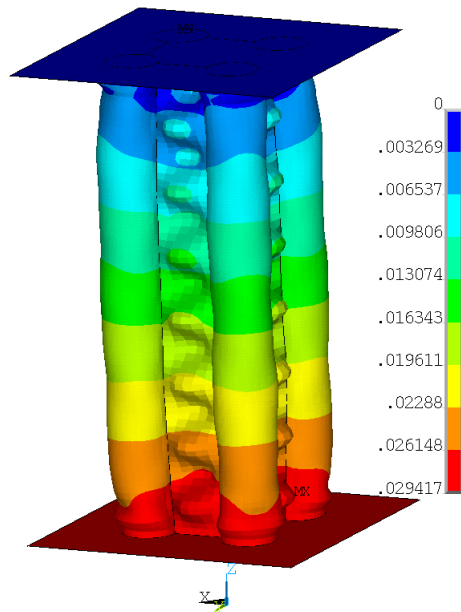


Figura C.8: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20

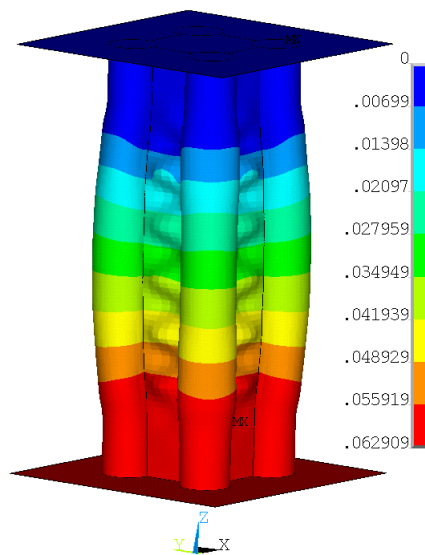


Figura C.9: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834

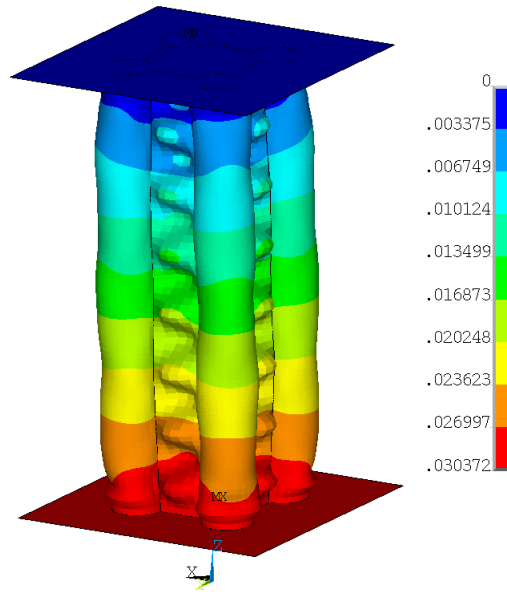


Figura C.10: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5

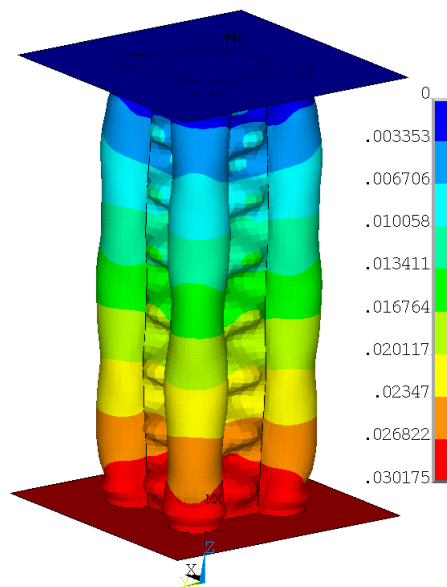


Figura C.11: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20

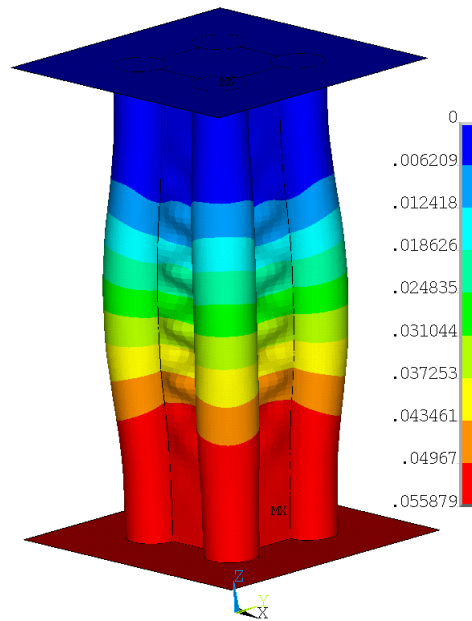


Figura C.12: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834

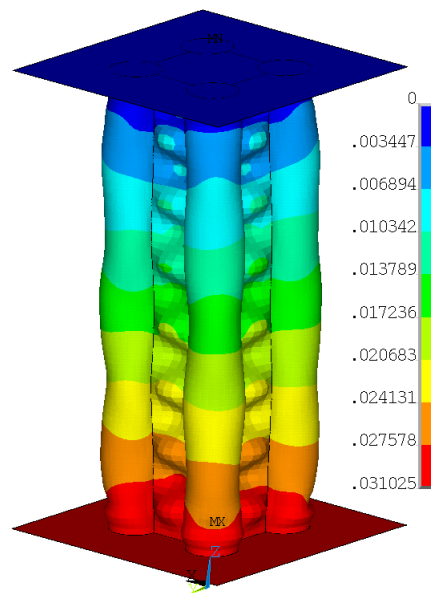


Figura C.13: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5

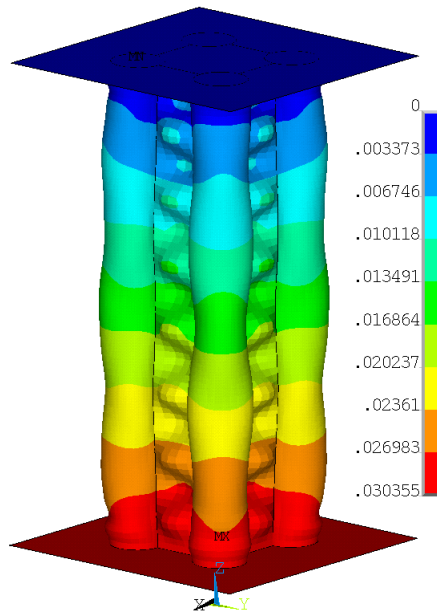


Figura C.14: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20

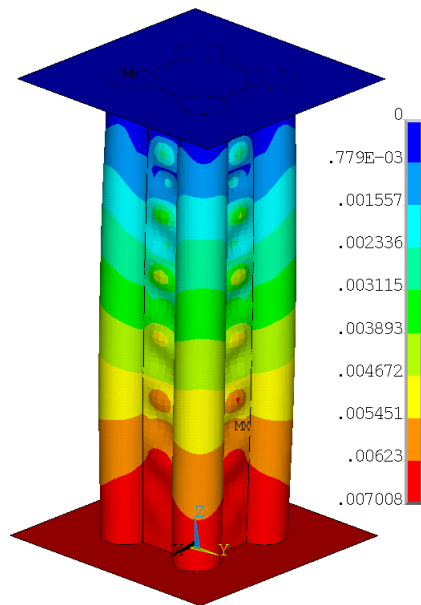


Figura C.15: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834

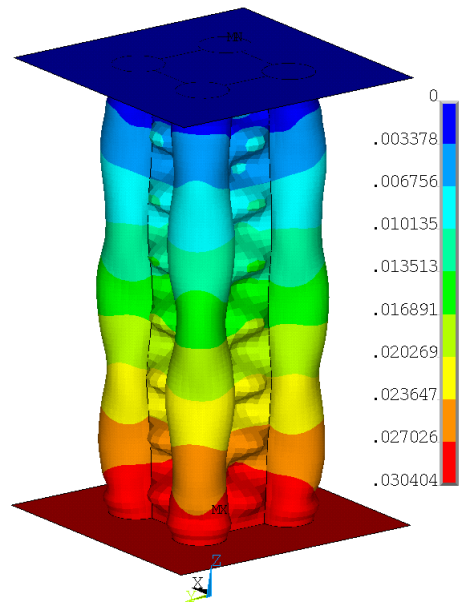


Figura C.16: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5

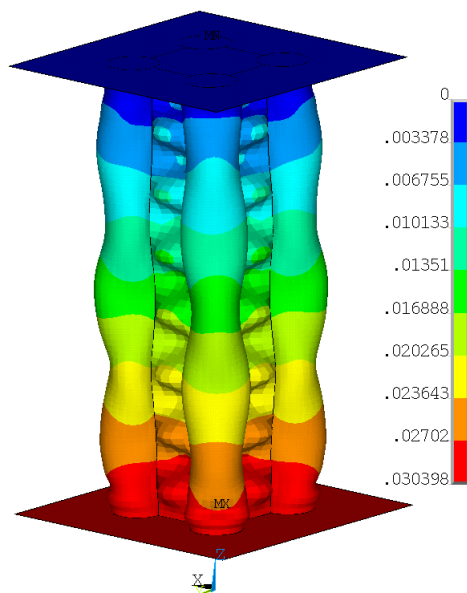


Figura C.17: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20

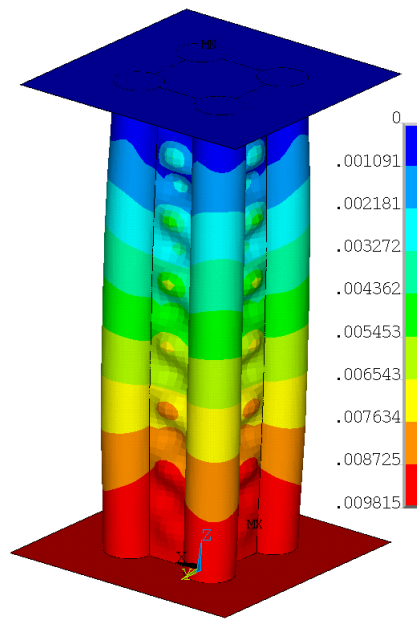


Figura C.18: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834

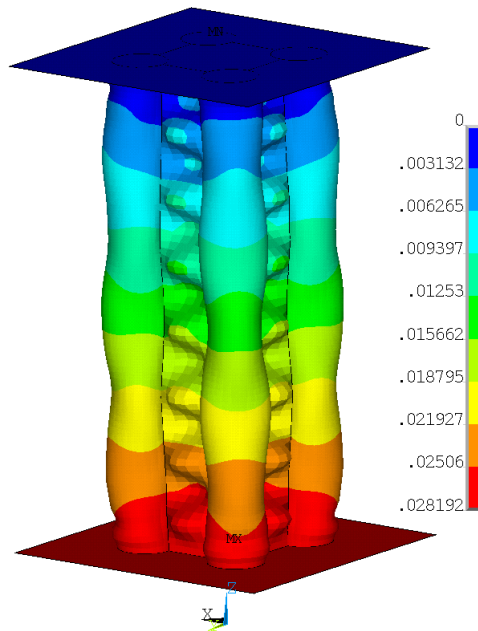


Figura C.19: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5

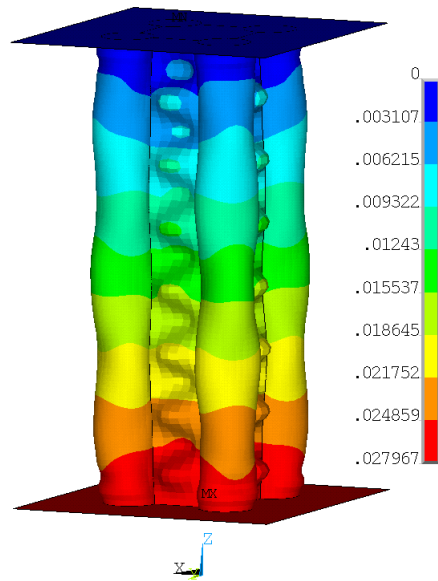


Figura C.20: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20

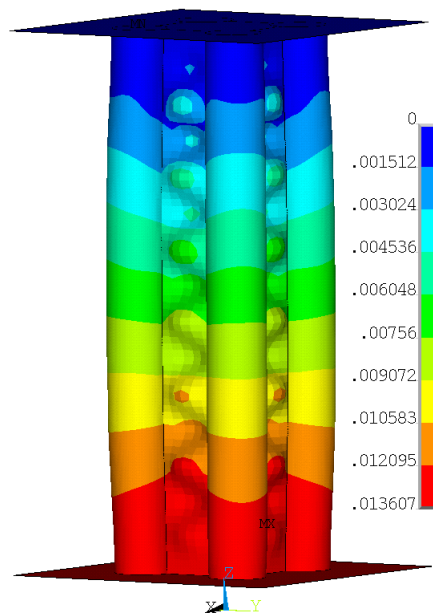


Figura C.21: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834

### C.1.2 HB L0.78 t6

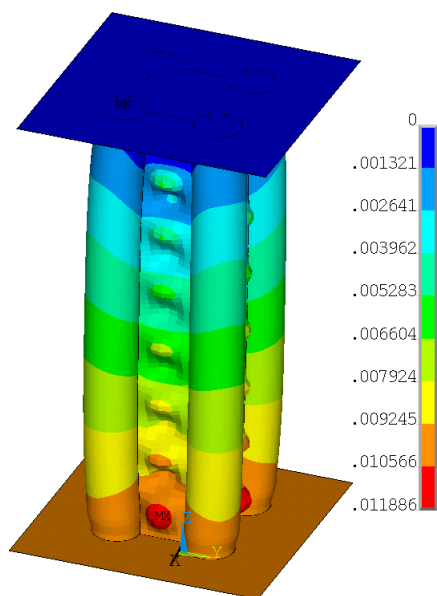


Figura C.22: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5

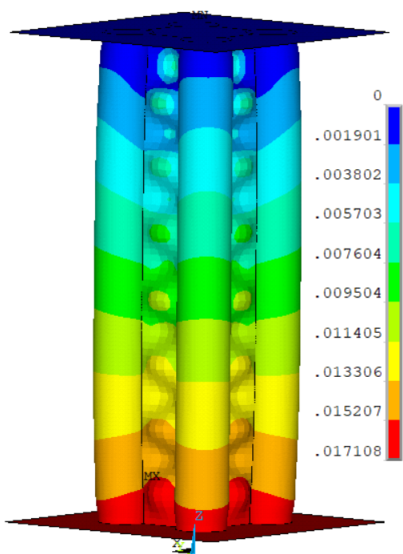


Figura C.23: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20

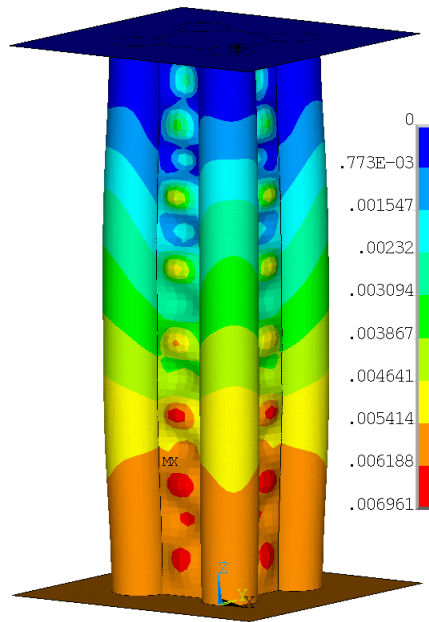


Figura C.24: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

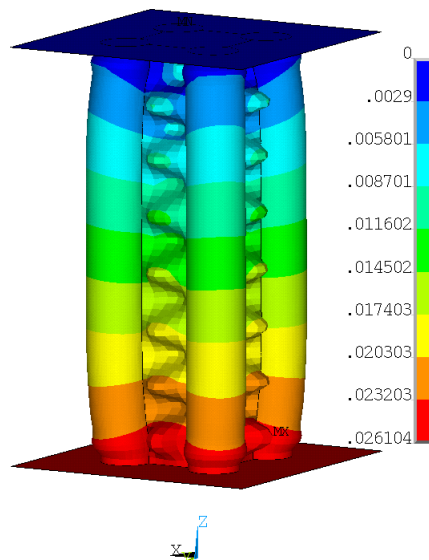


Figura C.25: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5

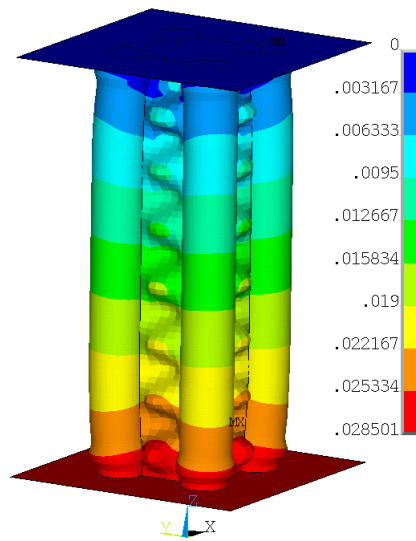


Figura C.26: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20

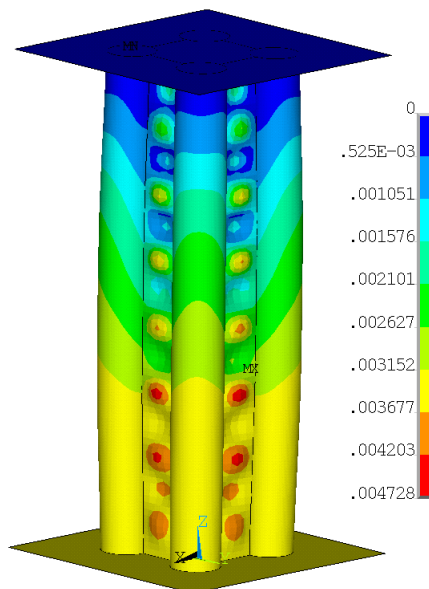


Figura C.27: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

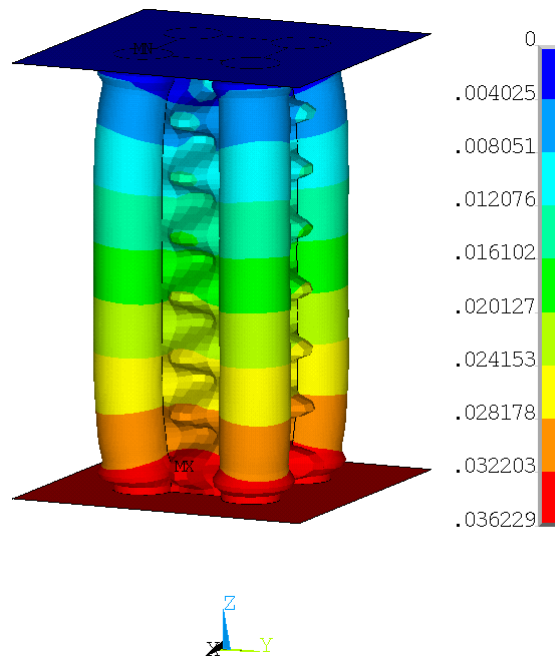


Figura C.28: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5

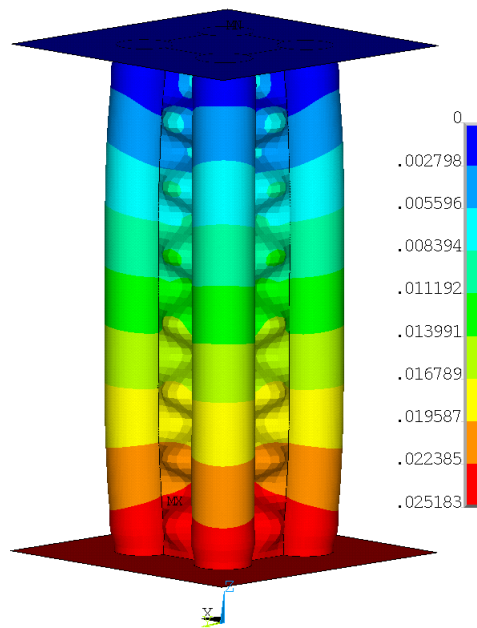


Figura C.29: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20

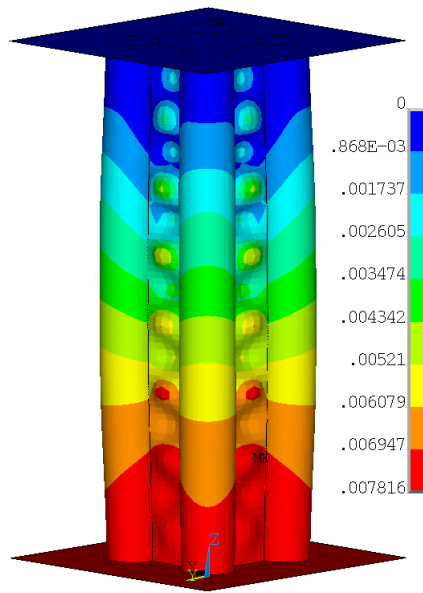


Figura C.30: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

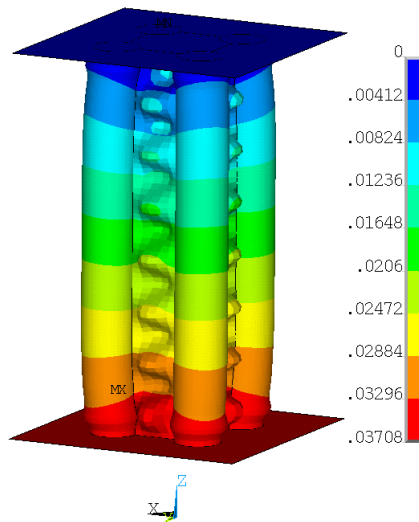


Figura C.31: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5

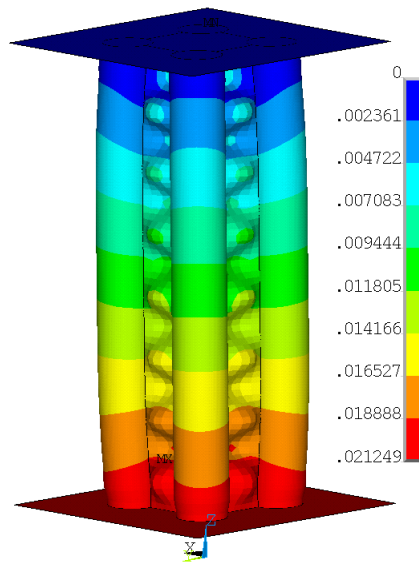


Figura C.32: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20

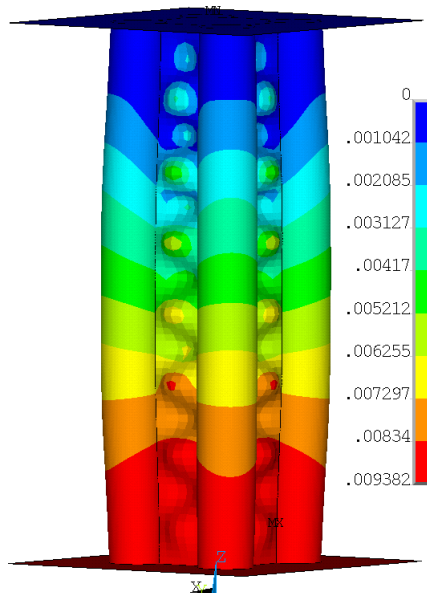


Figura C.33: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO834

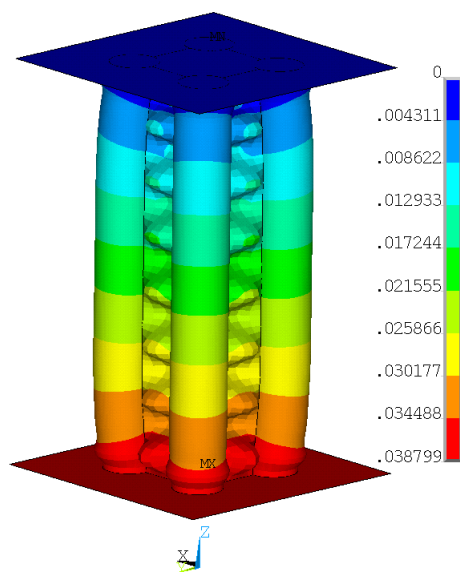


Figura C.34: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5

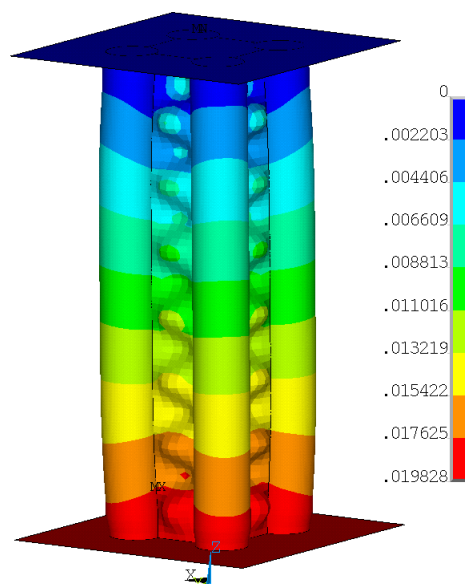


Figura C.35: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20

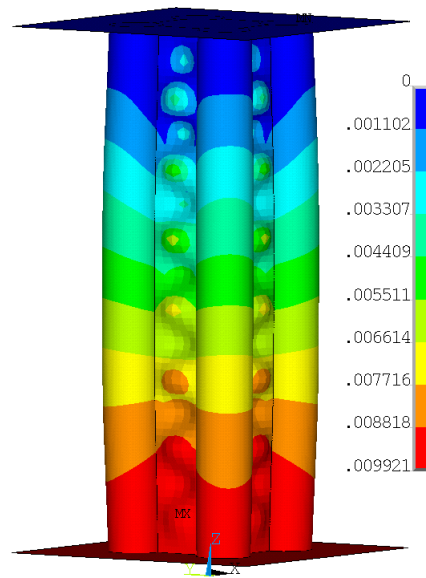


Figura C.36: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

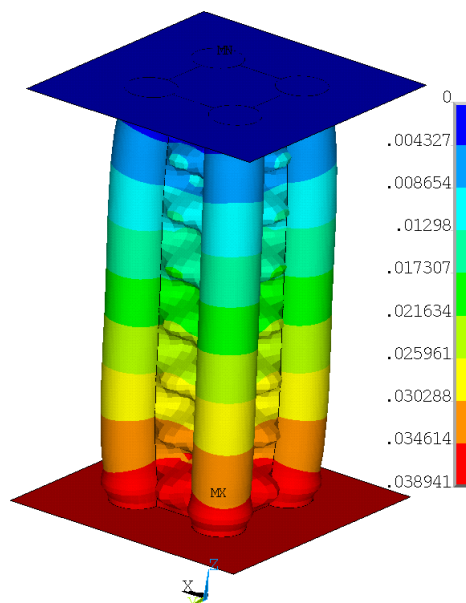


Figura C.37: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5

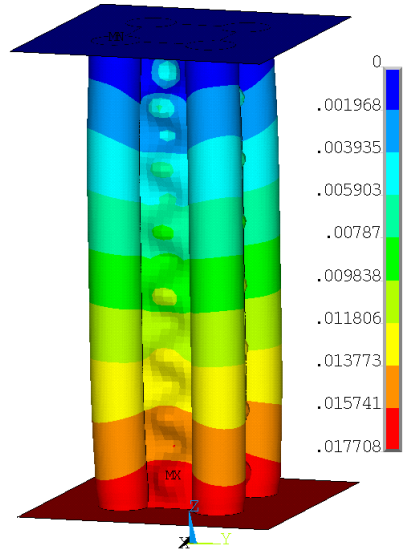


Figura C.38: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20

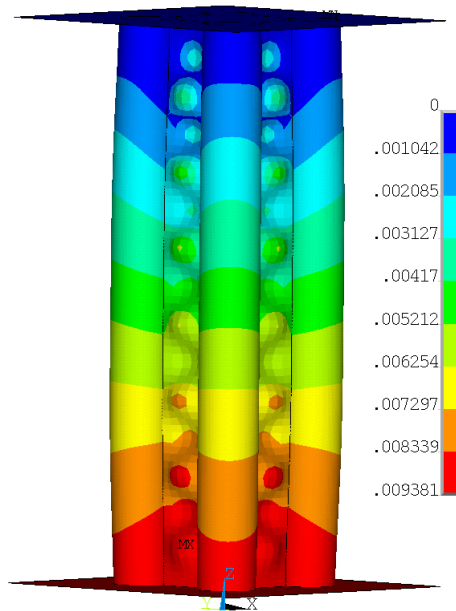


Figura C.39: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

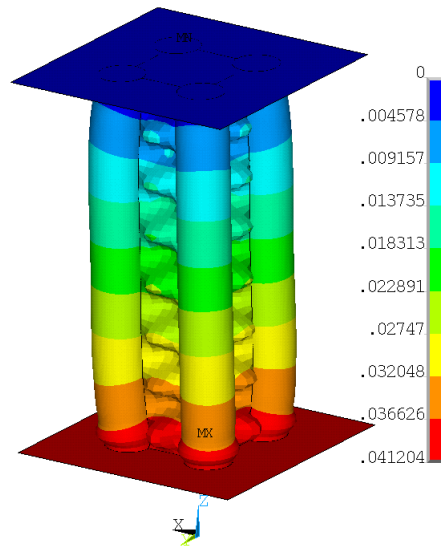


Figura C.40: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R5

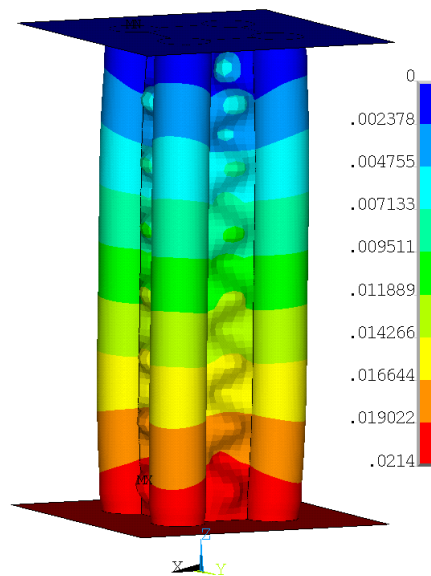


Figura C.41: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e R20

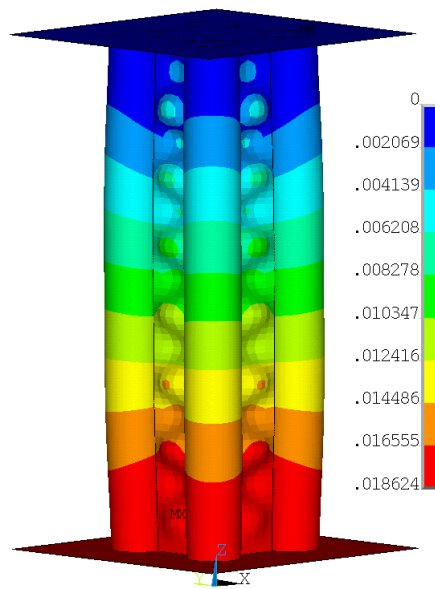


Figura C.42: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 0,78 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

### C.1.3 HB L3 t3.1

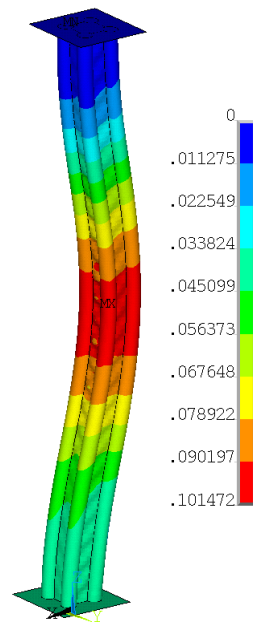


Figura C.43: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5

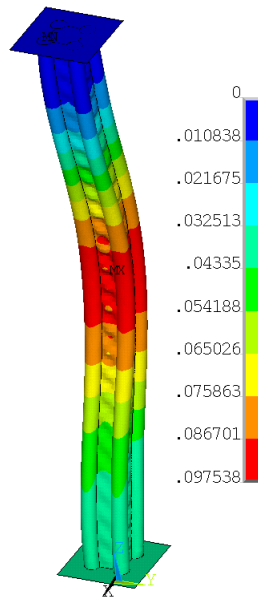


Figura C.44: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20

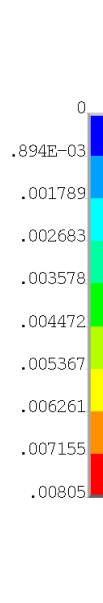


Figura C.45: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834

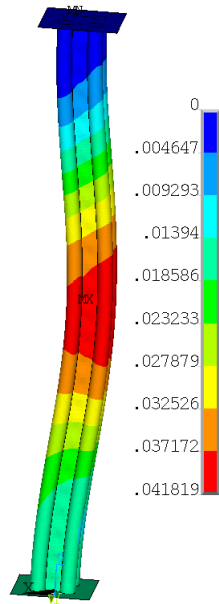


Figura C.46: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5



Figura C.47: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20

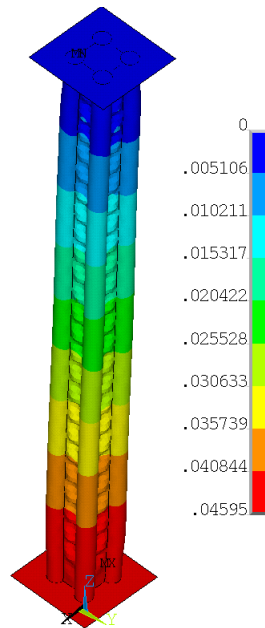


Figura C.48: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834

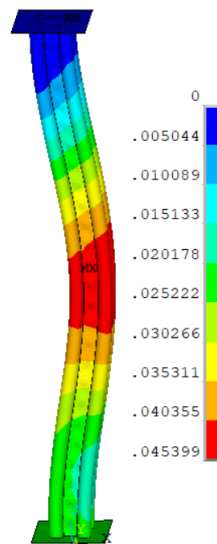


Figura C.49: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5

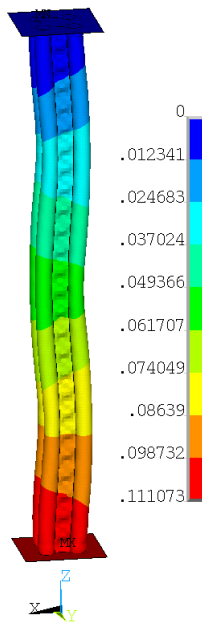


Figura C.50: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20

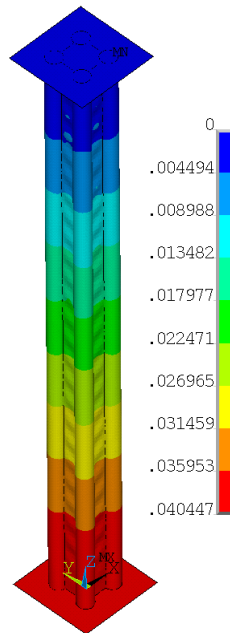


Figura C.51: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834

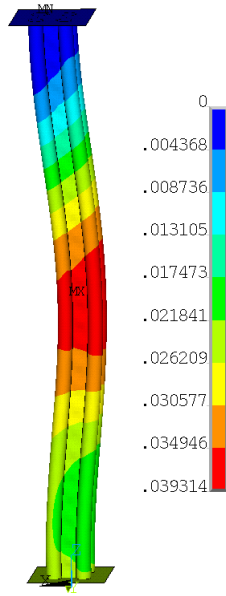


Figura C.52: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5

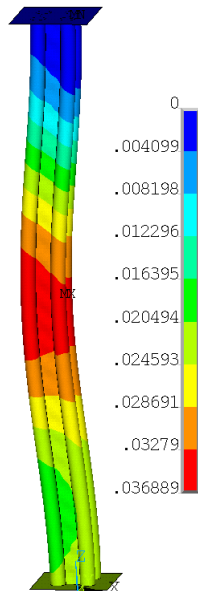


Figura C.53: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20

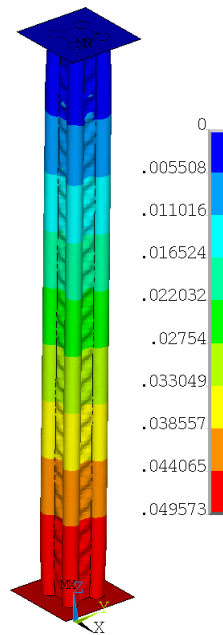


Figura C.54: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834

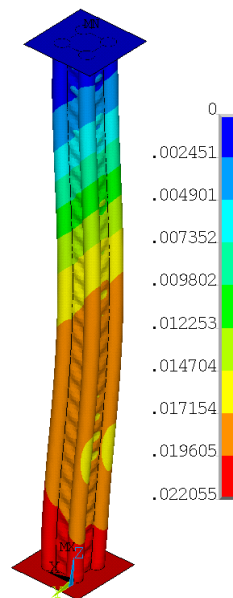


Figura C.55: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5

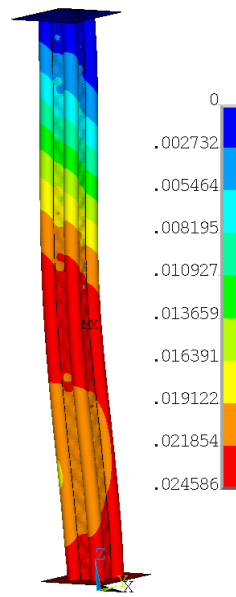


Figura C.56: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20

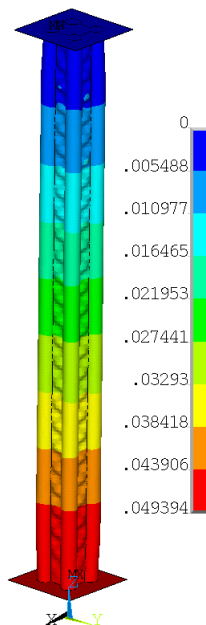


Figura C.57: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834

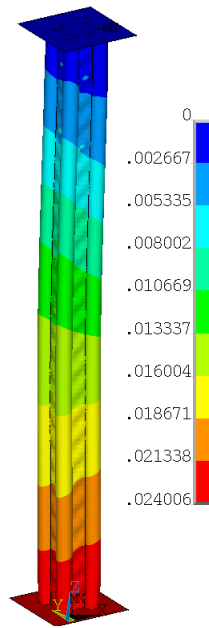


Figura C.58: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5

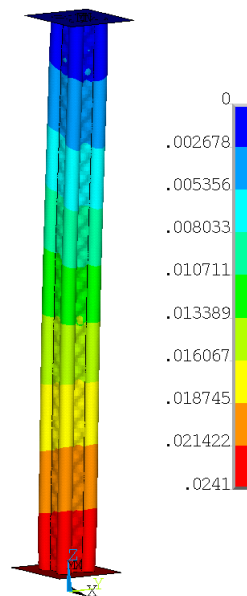


Figura C.59: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20

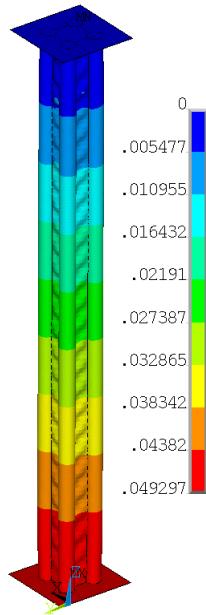


Figura C.60: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834

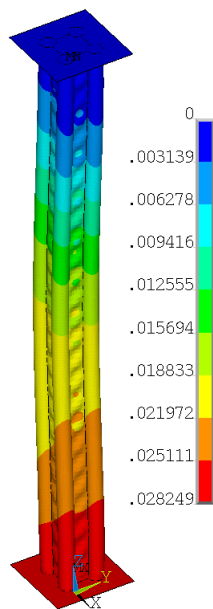


Figura C.61: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R5

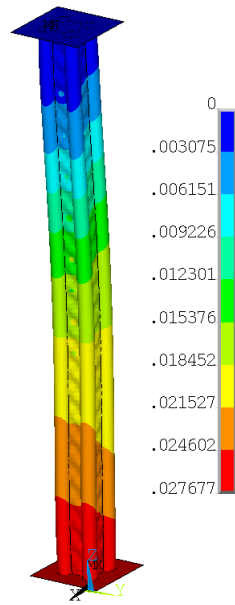


Figura C.62: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 R20

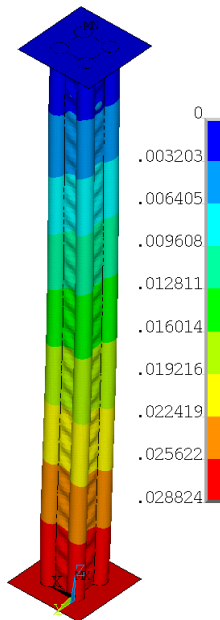


Figura C.63: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e.1 ISO 834

### C.1.4 HB L3 t6

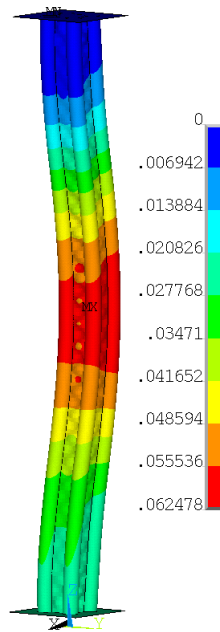


Figura C.64: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5



Figura C.65: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

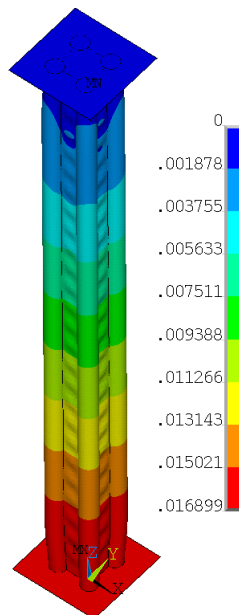


Figura C.66: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

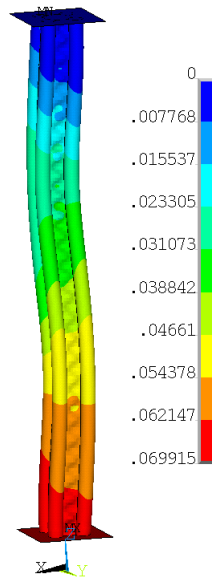


Figura C.67: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5



Figura C.68: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

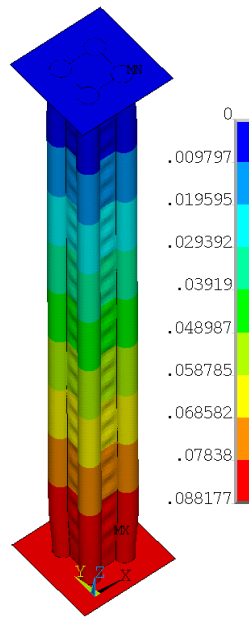


Figura C.69: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

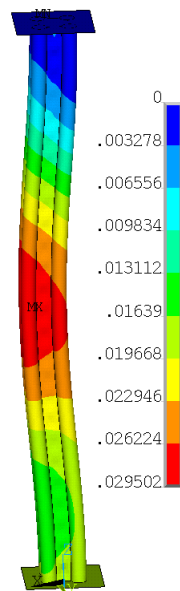


Figura C.70: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5

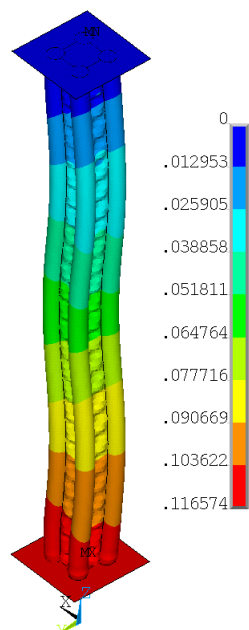


Figura C.71: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

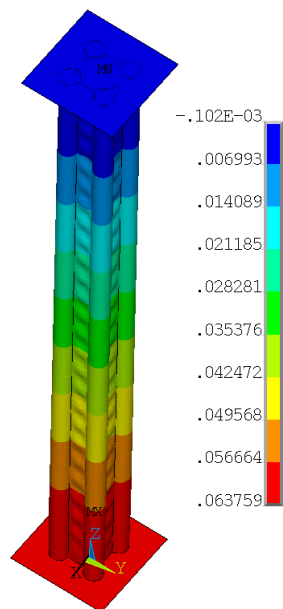


Figura C.72: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

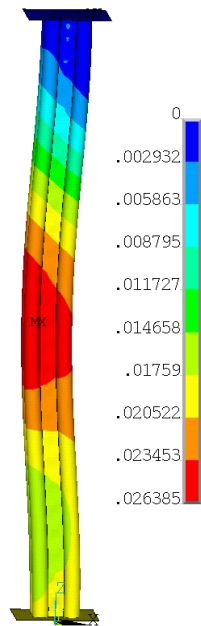


Figura C.73: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5

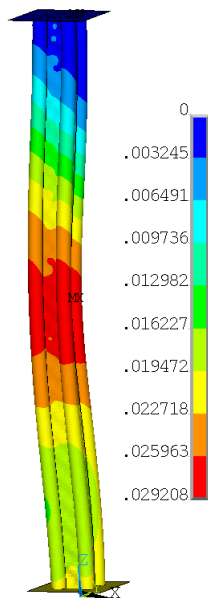


Figura C.74: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

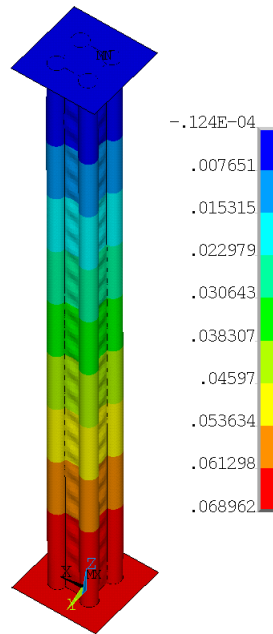


Figura C.75: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO834

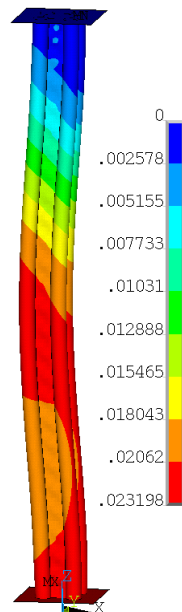


Figura C.76: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5

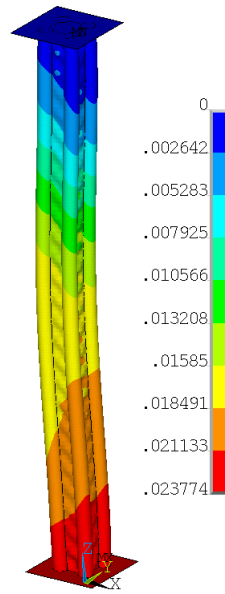


Figura C.77: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

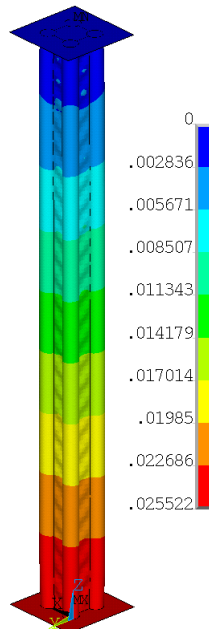


Figura C.78: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

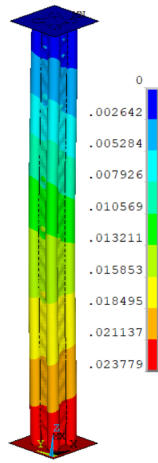


Figura C.79: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5

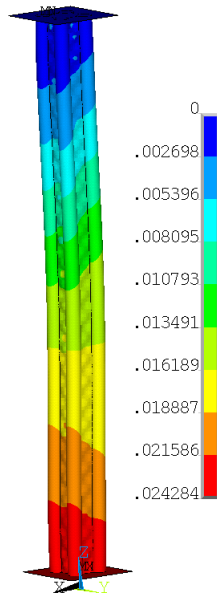


Figura C.80: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

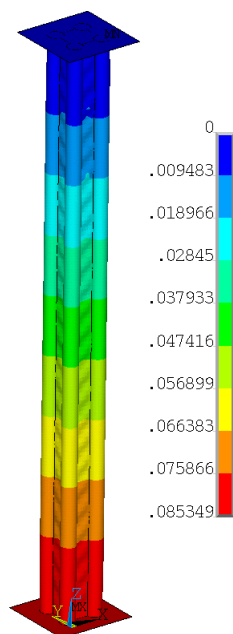


Figura C.81: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

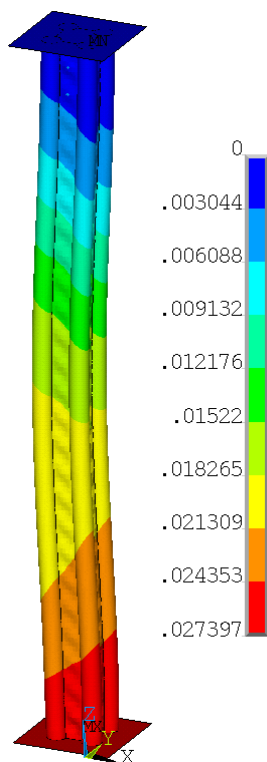


Figura C.82: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5

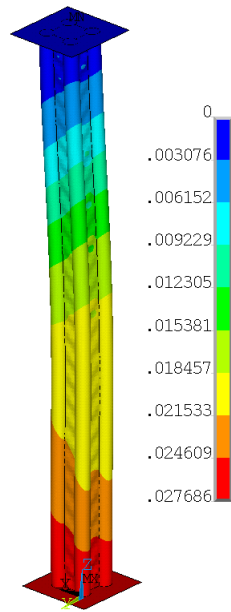


Figura C.83: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

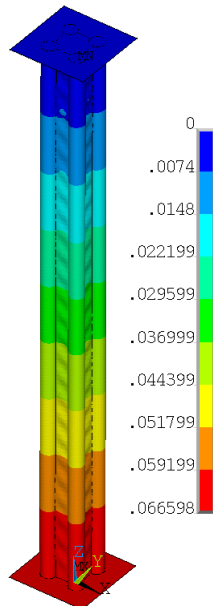


Figura C.84: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

### C.1.5 HB L6 t3.1

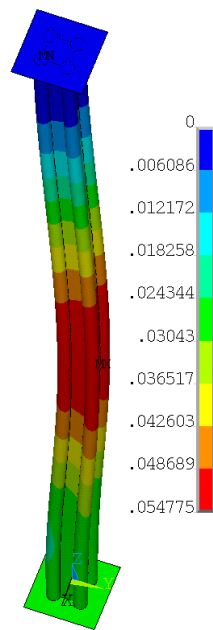


Figura C.85: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

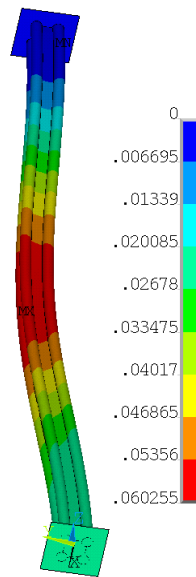


Figura C.86: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20

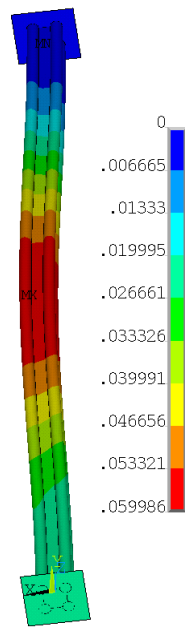


Figura C.87: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

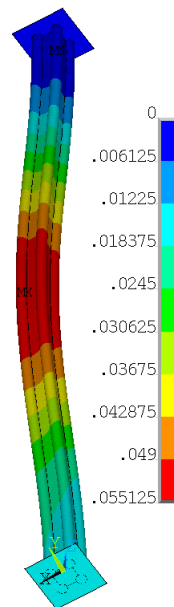


Figura C.88: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

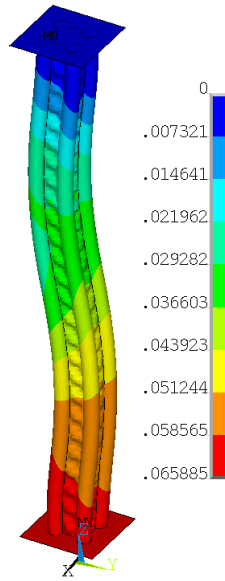


Figura C.89: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20



Figura C.90: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

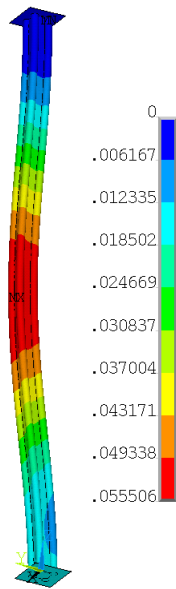


Figura C.91: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

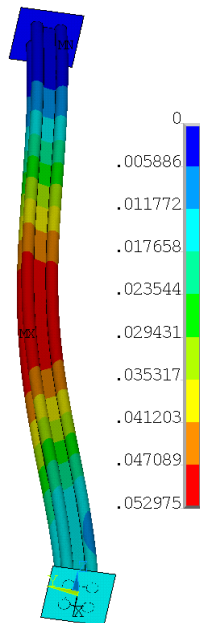


Figura C.92: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20

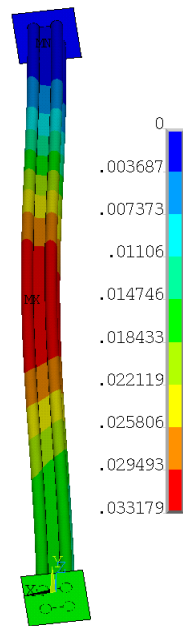


Figura C.93: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

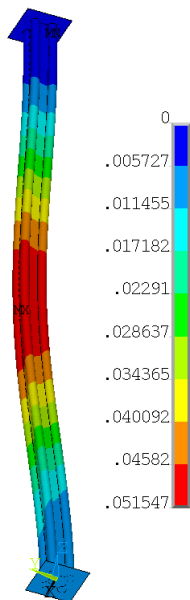


Figura C.94: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5



Figura C.95: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20

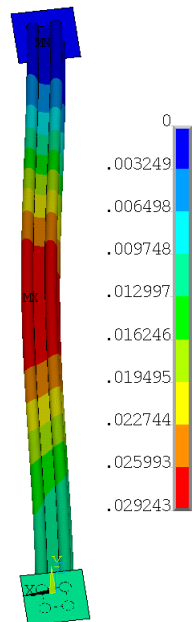


Figura C.96: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

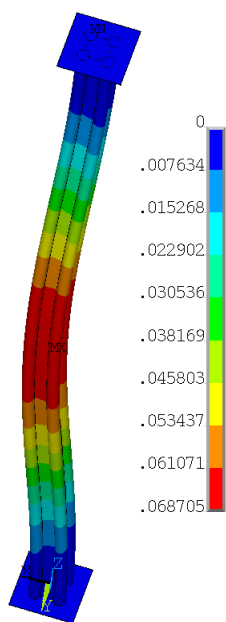


Figura C.97: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

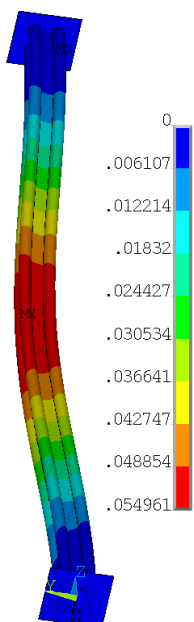


Figura C.98: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20



Figura C.99: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

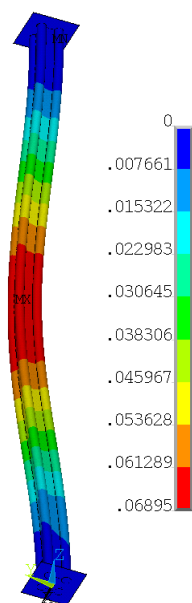


Figura C.100: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

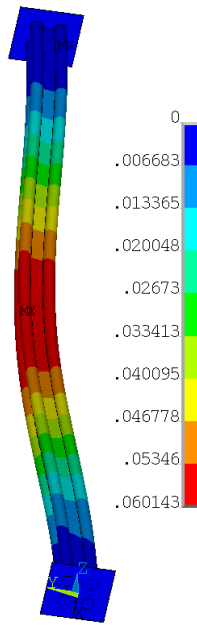


Figura C.101: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20

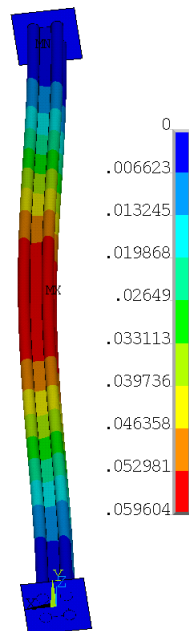


Figura C.102: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 84

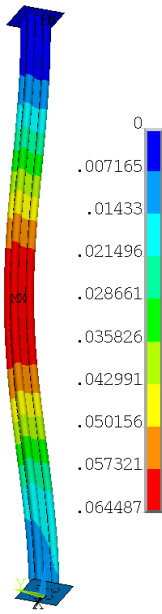


Figura C.103: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

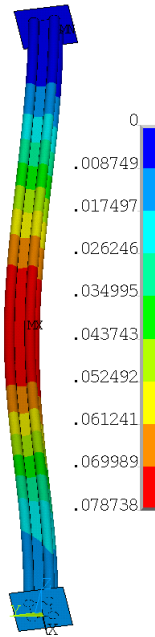


Figura C.104: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20

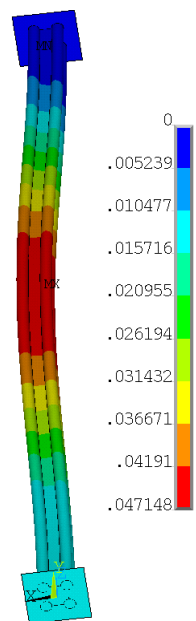


Figura C.105: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

### C.1.6 HB L6 t6

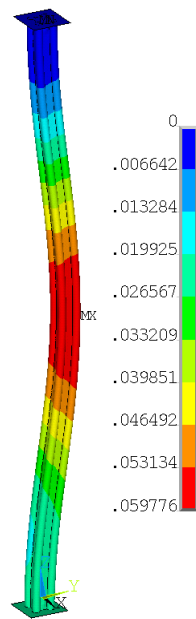


Figura C.106: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

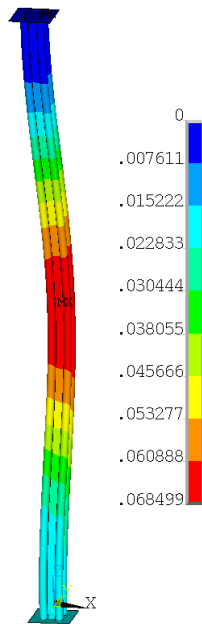


Figura C.107: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

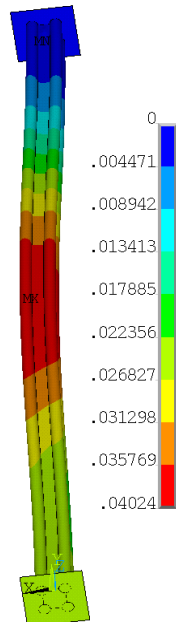


Figura C.108: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 20 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

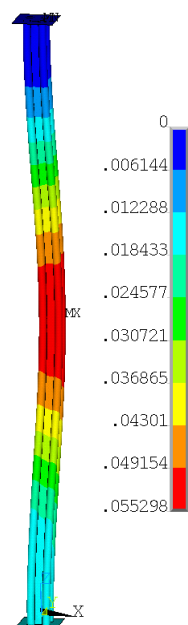


Figura C.109: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

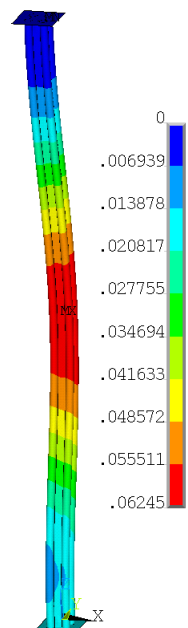


Figura C.110: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

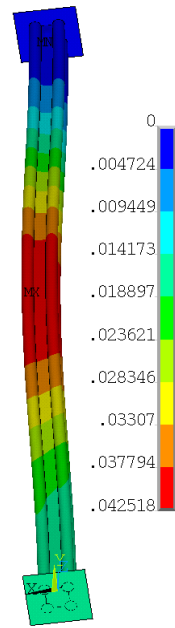


Figura C.111: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 30 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

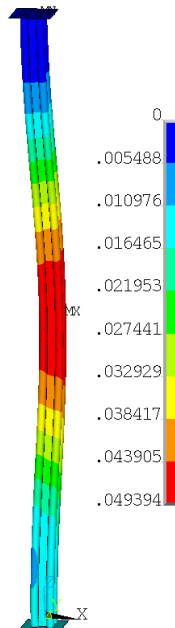


Figura C.112: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

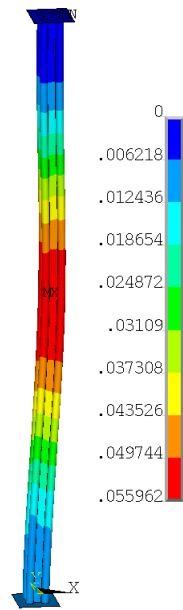


Figura C.113: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

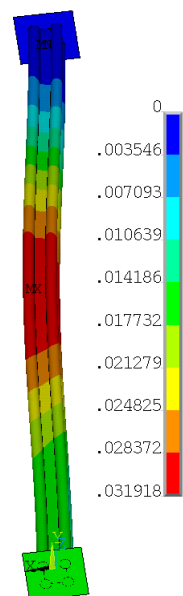


Figura C.114: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 40 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834



Figura C.115: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

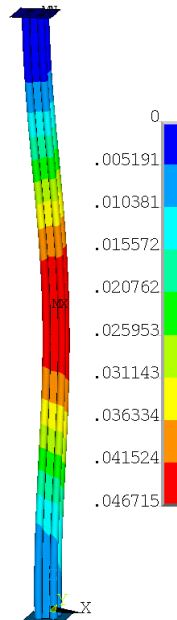


Figura C.116: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

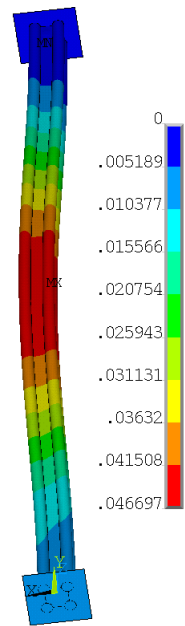


Figura C.117: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 50 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO834

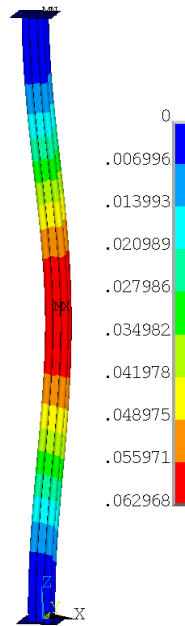


Figura C.118: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

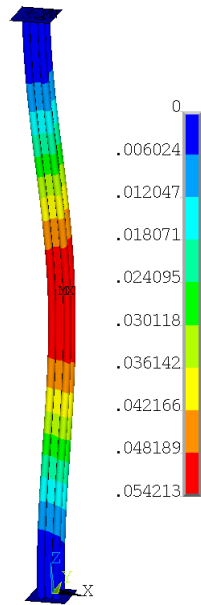


Figura C.119: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

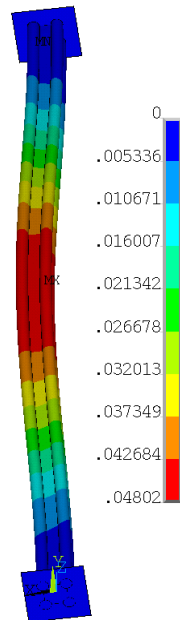


Figura C.120: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 60 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

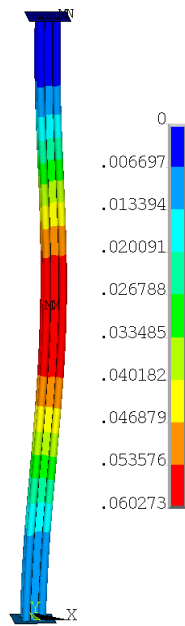


Figura C.121: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

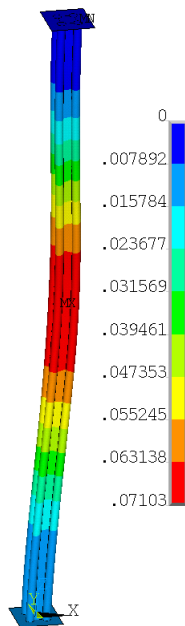


Figura C.122: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20



Figura C.123: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 70 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

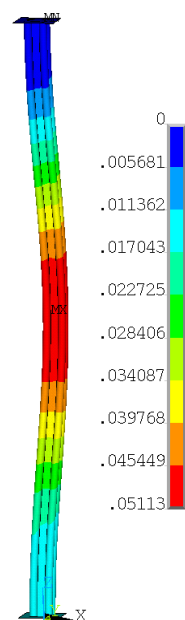


Figura C.124: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

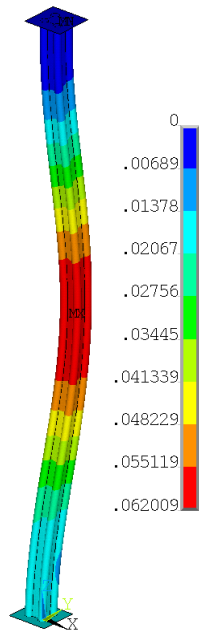


Figura C.125: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

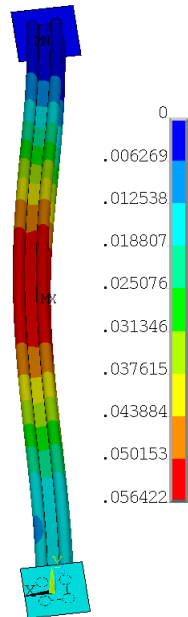


Figura C.126: Soma do Vetor de Deslocamento para HB com Fator de Carga de 80 %, Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

# Apêndice D

## Gráficos

### D.1 Coluna CHS

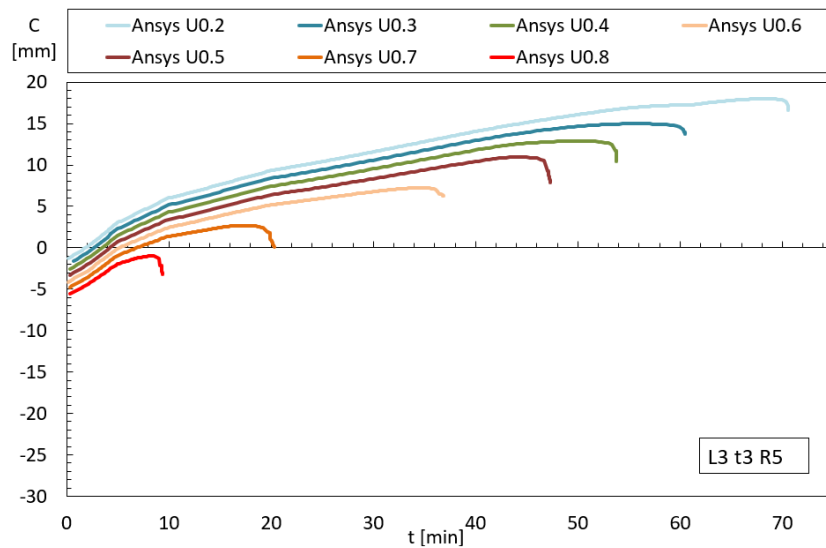


Figura D.1: CHS com Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1mm e R5

### D.2 Coluna Híbrida

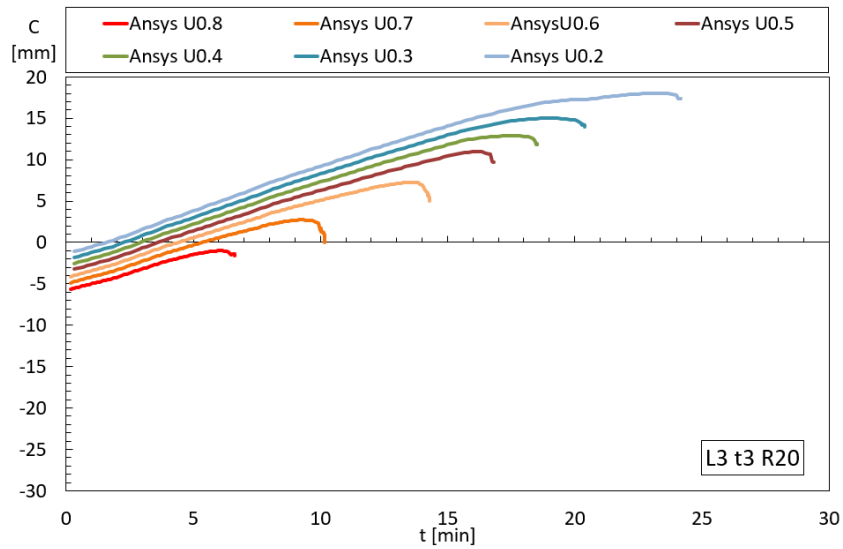


Figura D.2: CHS com Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1mm e R20

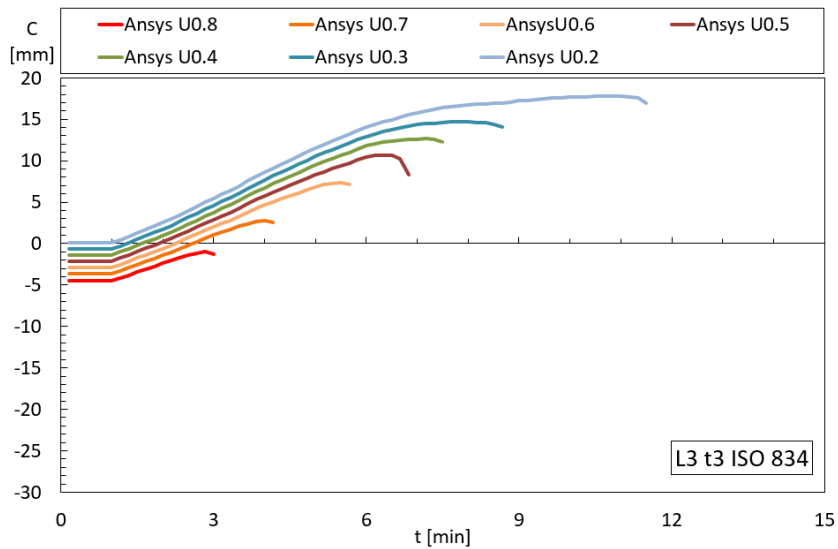


Figura D.3: CHS com Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1mm e ISO 834

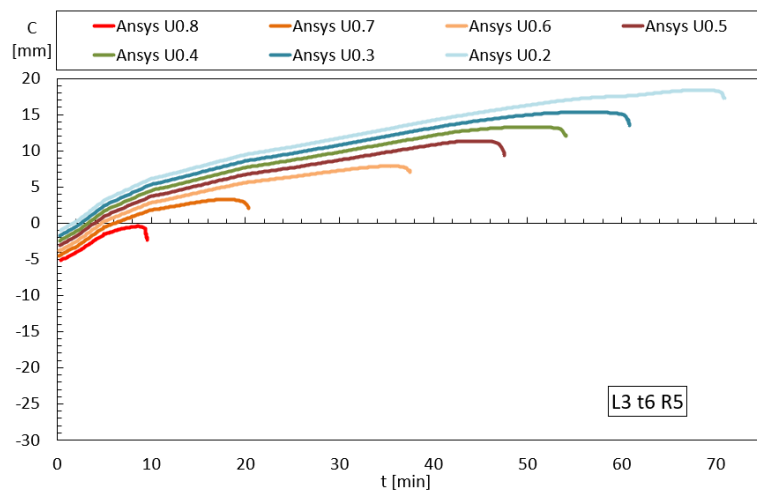


Figura D.4: CHS com Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5

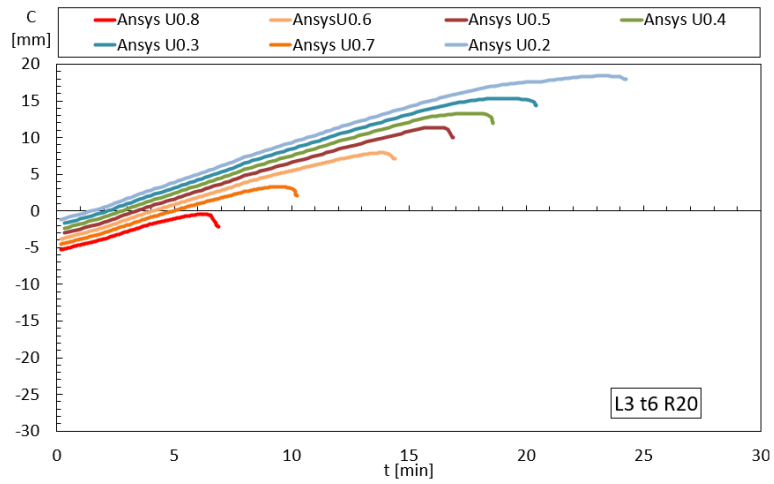


Figura D.5: CHS com Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

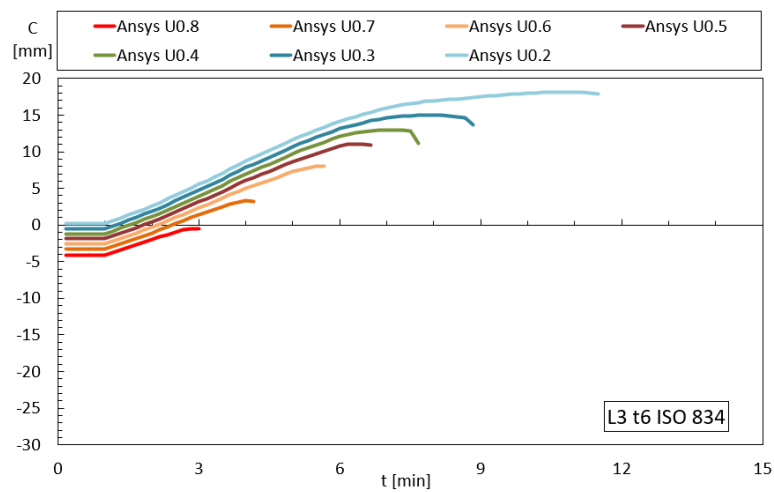


Figura D.6: CHS com Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

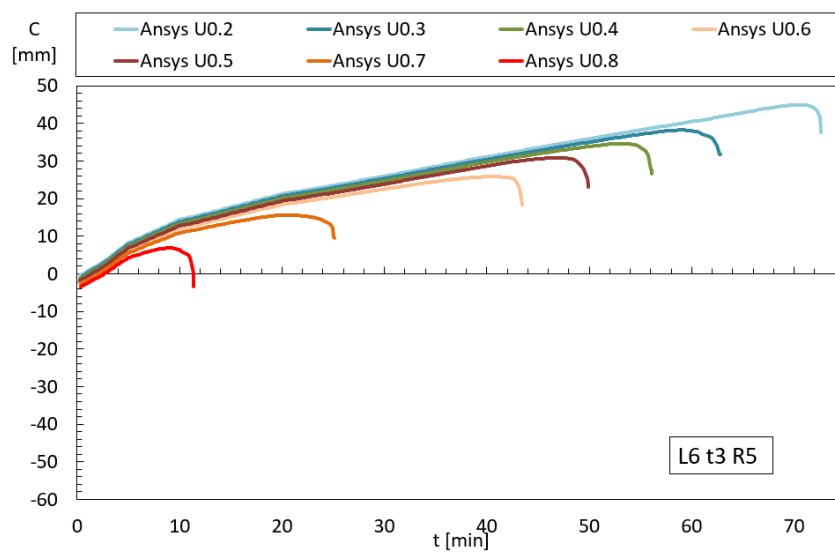


Figura D.7: CHS com Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

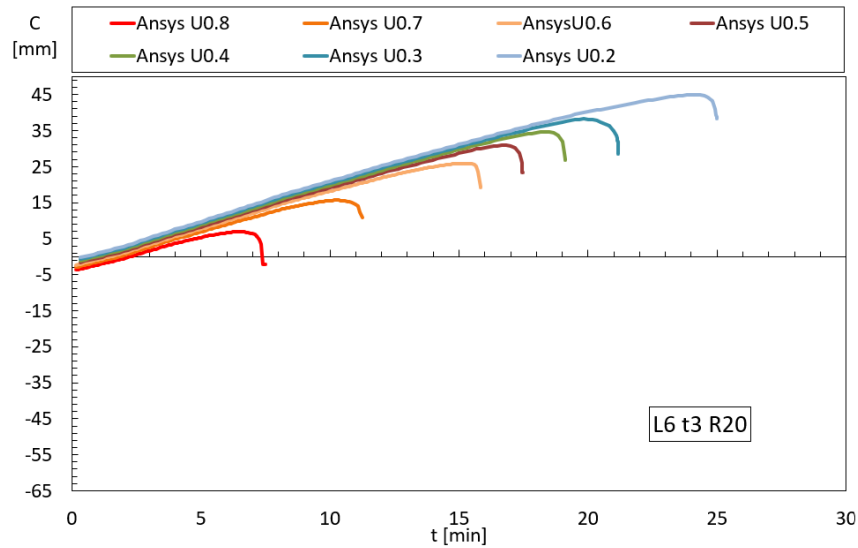


Figura D.8: CHS com Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20

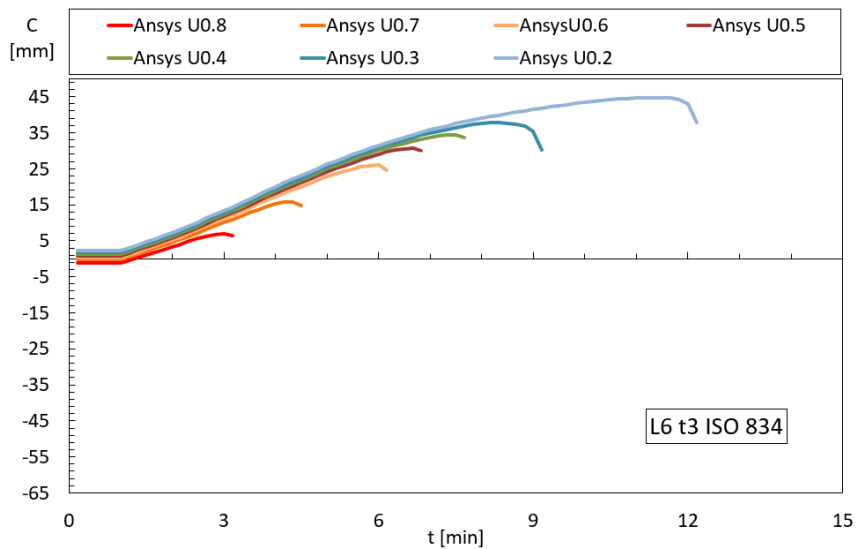


Figura D.9: CHS com Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

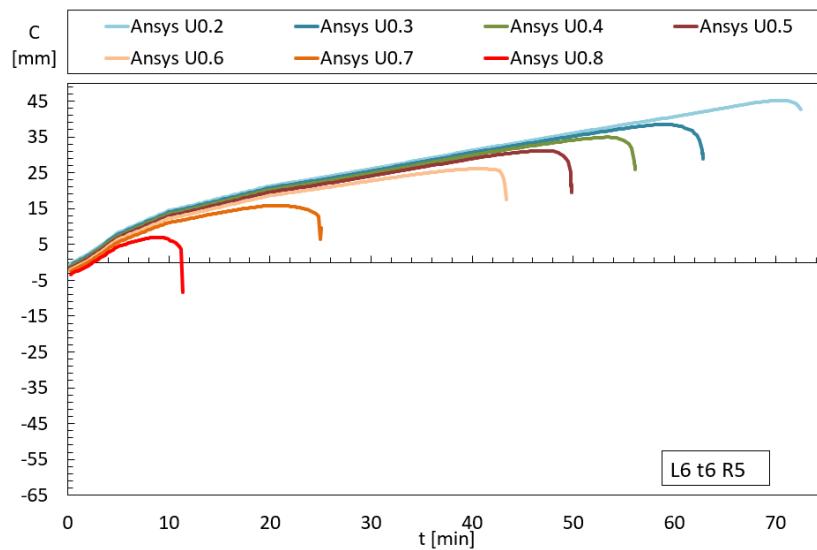


Figura D.10: CHS com Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

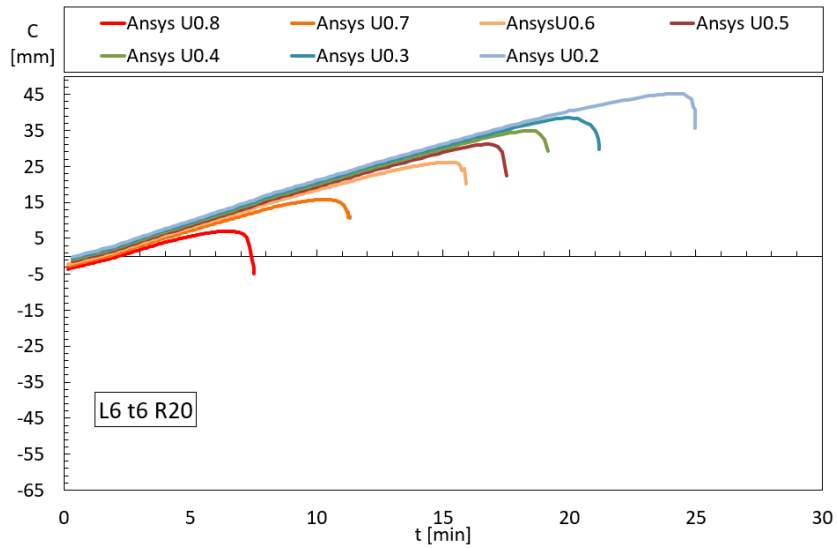


Figura D.11: CHS com Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

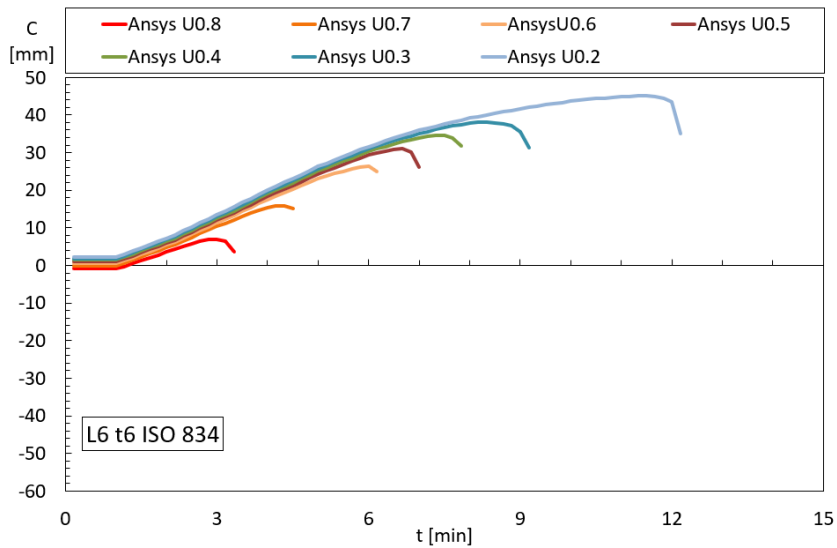


Figura D.12: CHS com Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

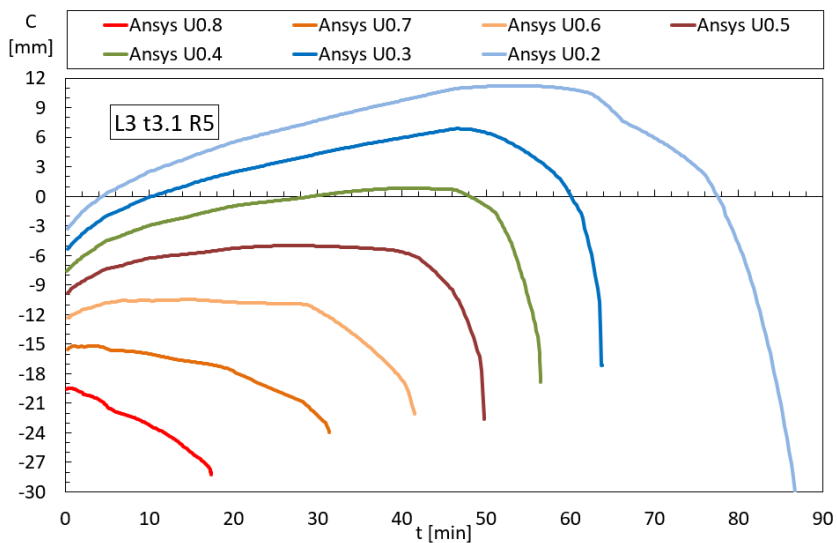


Figura D.13: HB com Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R5

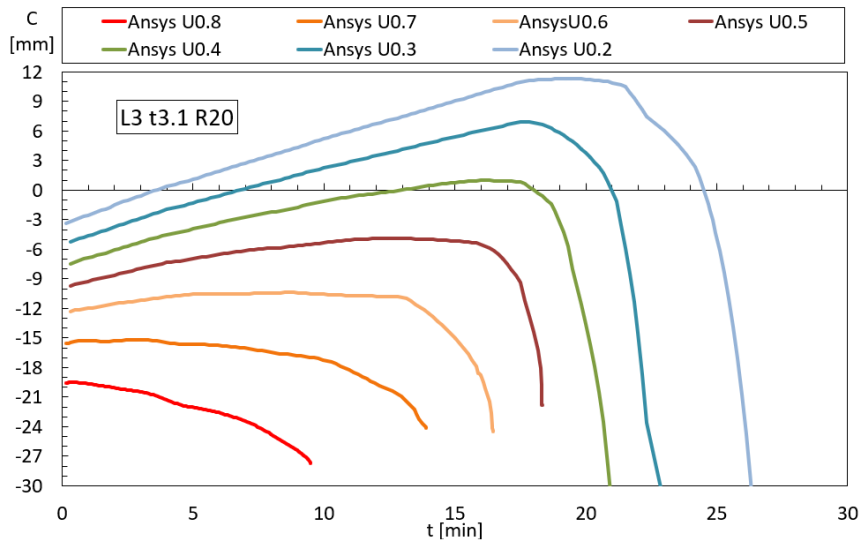


Figura D.14: HB com Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e R20

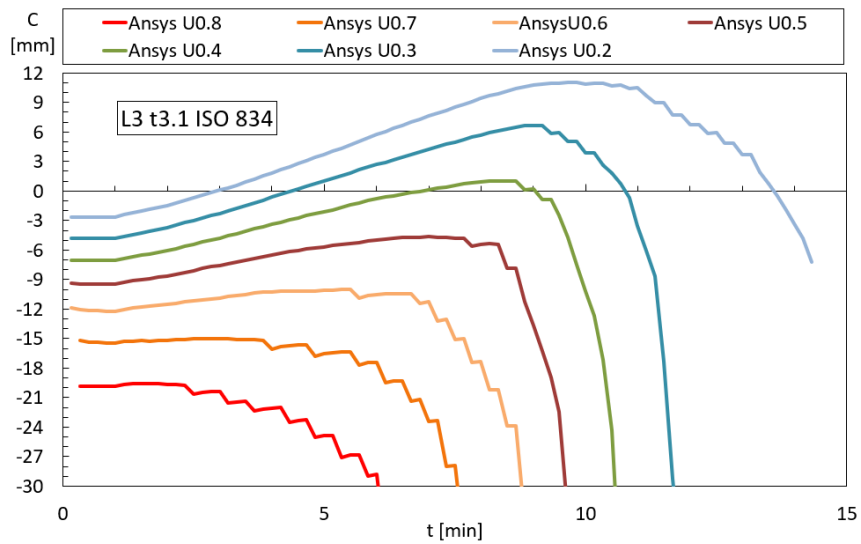


Figura D.15: HB com Comprimento de 3 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

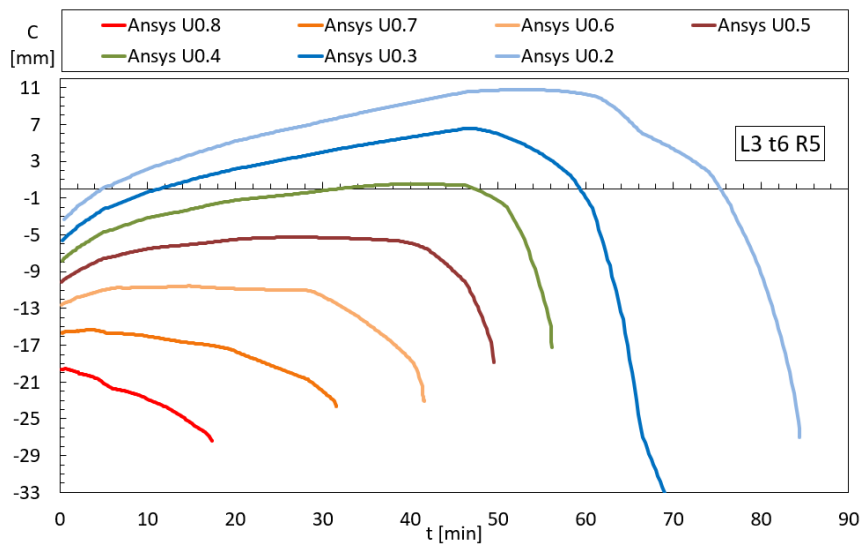


Figura D.16: HB com Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R5

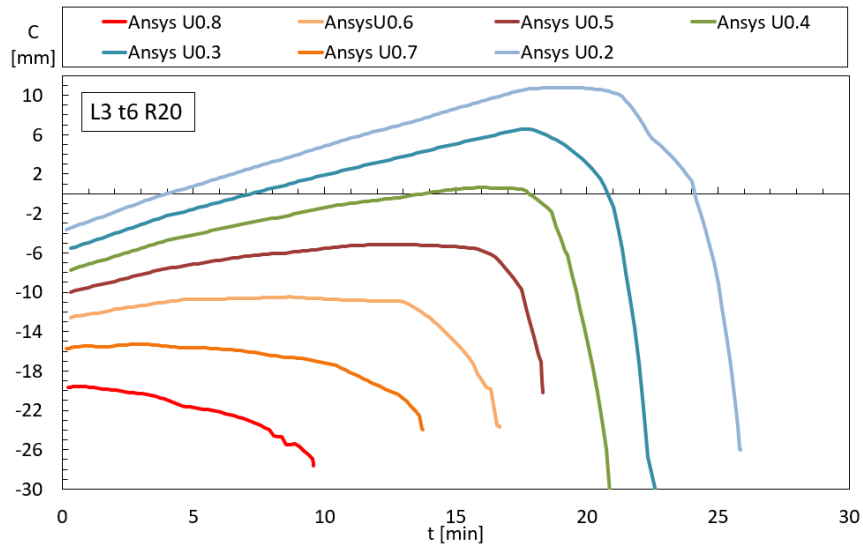


Figura D.17: HB com Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e R20

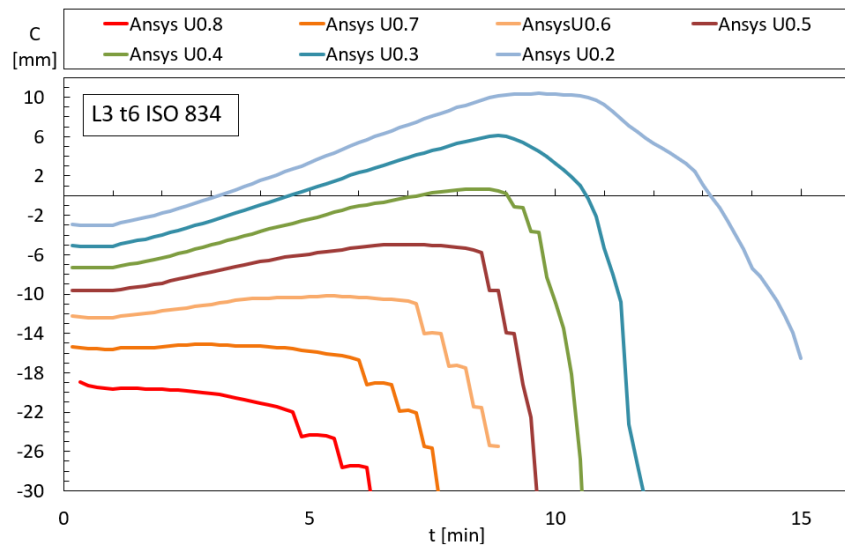


Figura D.18: HB com Comprimento de 3 m, Espessura de 6 mm e ISO 834

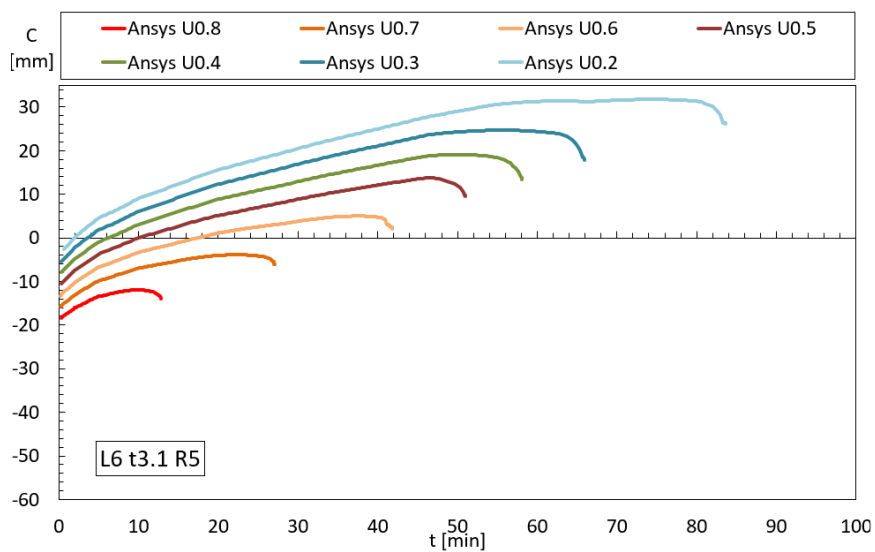


Figura D.19: HB com Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R5

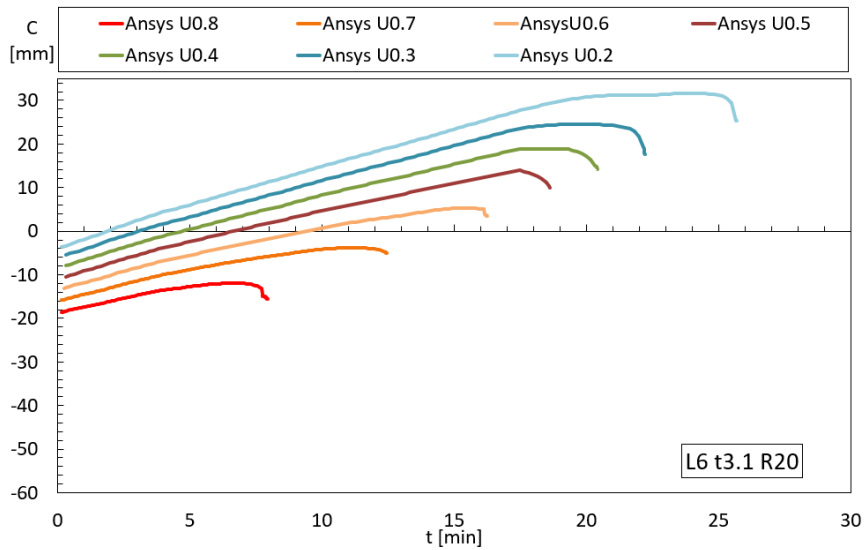


Figura D.20: HB com Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e R20

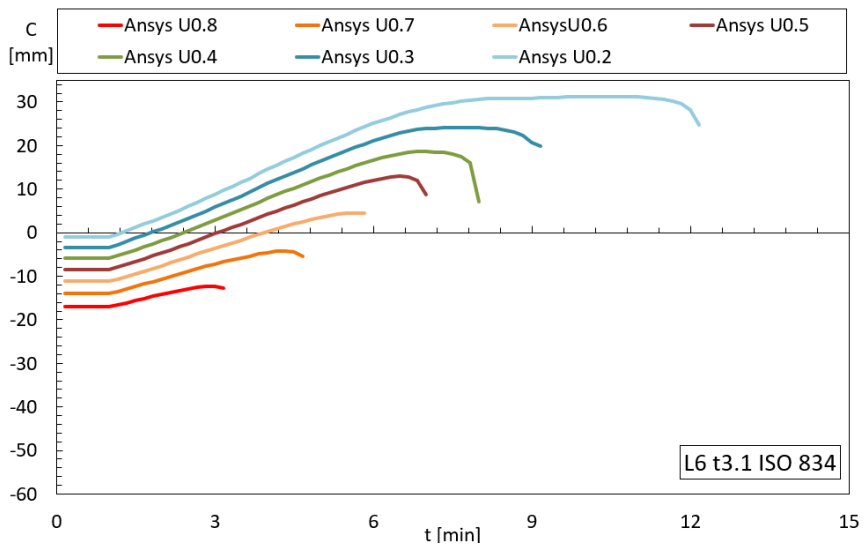


Figura D.21: HB com Comprimento de 6 m, Espessura de 3,1 mm e ISO 834

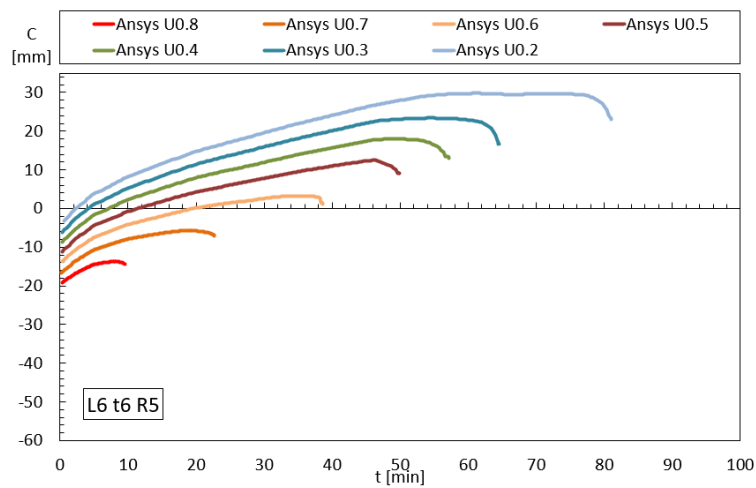


Figura D.22: HB com Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R5

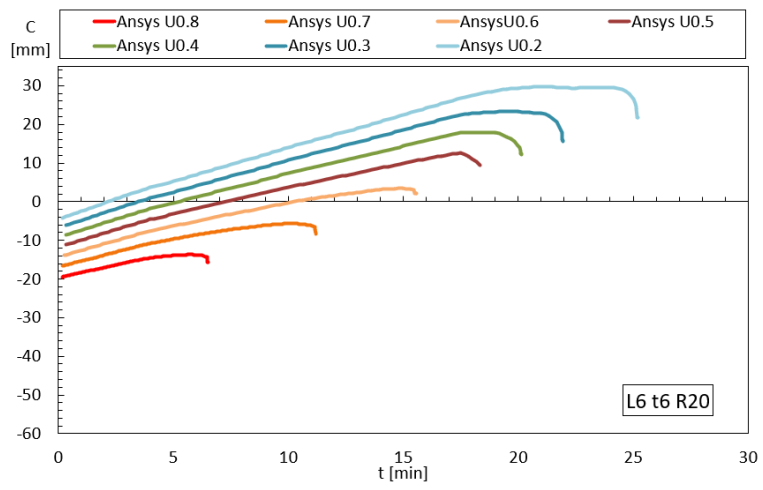


Figura D.23: HB com Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e R20

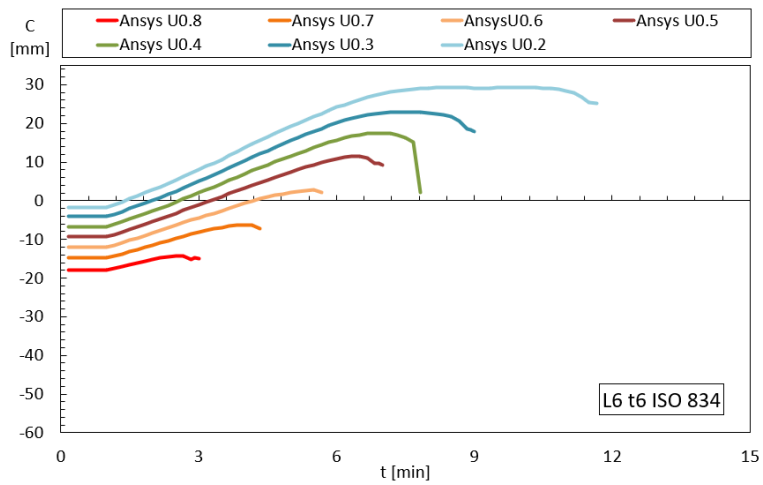


Figura D.24: HB com Comprimento de 6 m, Espessura de 6 mm e ISO 834