

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

LUIZ FERNANDO PEREIRA DO PRADO

**ESTUDO NUMÉRICO DO CONECTOR CRESTBOND
E DE CHAPA PASSANTE EM PILARES MISTOS
TUBULARES CIRCULARES PREENCHIDOS COM
CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ORIENTADOR: PROF. DR. RODRIGO BARRETO CALDAS

BELO HORIZONTE, 2017

P896e	<p>Prado, Luiz Fernando Pereira do.</p> <p>Estudo numérico do conector Crestbond e de chapa passante em pilares mistos tubulares circulares preenchidos com concreto em situação de incêndio [manuscrito] / Luiz Fernando Pereira do Prado. – 2017. xxvii, 181 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: Rodrigo Barreto Caldas.</p> <p>Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 178-181.</p> <p>1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Colunas - Teses. 3. Incêndios - Teses. 4. Cisalhamento - Teses. I. Caldas, Rodrigo Barreto. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 624(043)</p>
-------	--

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**“ESTUDO NUMÉRICO DO CONECTOR CRESTBOND E DE CHAPA PASSANTE
EM PILARES MISTOS TUBULARES CIRCULARES PREENCHIDOS COM
CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO”**

Luiz Fernando Pereira do Prado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão examinadora:

Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas
DEES – UFMG – (Orientador)

Prof. Dr. Ricardo Hallal Fakury
DEES – UFMG

Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira
UFPE

Belo Horizonte, 04 de Agosto de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus e aos meus pais ter me dado forças para eu poder chegar onde cheguei.

Ao orientador deste trabalho, Professor Rodrigo Barreto Caldas, que mostrou o seu comprometimento, a disponibilidade sempre quando foi necessário, além disso, pela amizade, a confiança e o apoio constante.

Ao professor Ricardo Hallal Fakury pela sua contribuição. Sem ele o trabalho não teria sido o mesmo.

Ao professor Francisco Carlos Rodrigues, pela amizade e pelo incentivo de entrar no mestrado desde os tempos da graduação.

Aos professores Armando César Campos Lavall e Ana Lydia Reis de Castro e Silva pela amizade destes os tempos da graduação.

As secretárias do departamento, em especial a Inês, Fátima e Lucíola pela amizade e disponibilidade.

Aos amigos de pós-graduação, em especial a Laura, José, Lucas, Hermano, Grilo, Karen, Anelize, Mariana, Lapo, Marcelo, Hugo, Sernizon, Billy e aos demais companheiros de pós-graduação pelos momentos vividos durante o mestrado.

"Deus é forte, ele é grande, e quando ele quer não tem quem não queira."

Ayrton Senna

RESUMO

Este trabalho trata do estudo do comportamento dos conectores de cisalhamento Crestbond e de Chapa Passante utilizados como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos tubulares circulares de aço preenchidos com concreto em situação de incêndio. A norma ABNT NBR 14323:2013 propõe que as ligações entre vigas mistas e pilares mistos preenchidos com concreto em situação de incêndio sejam realizadas por consoles e Chapa Passante. O conector Crestbond ainda não se encontra normatizado, sendo de suma importância estudar o seu comportamento de transferência de carga em pilares mistos. Estudos do Crestbond em temperatura ambiente já foram realizados anteriormente, todavia, ainda não foram pesquisados em temperatura elevada. Pesquisas sobre conectores de cisalhamento em pilares mistos em situação de incêndio são escassas e não foram encontrados resultados experimentais na literatura. Sabendo-se que em temperatura elevada ocorre a degradação das propriedades dos materiais, faz-se necessário conhecer como os conectores irão se comportar térmica e estruturalmente nesta situação. Diante disso, o presente trabalho realiza uma investigação numérica, por meio do programa Abaqus, que busca entender o comportamento do Crestbond e da Chapa Passante em pilares mistos em temperatura elevada. Por meio da revisão bibliográfica buscou-se na literatura trabalhos realizados sobre conectores de cisalhamento, pilares mistos tubulares preenchidos com concreto em situação de incêndio e análises numéricas realizadas com o programa Abaqus, com o objetivo de identificar quais aspectos devem ser estudados para realização desta dissertação. Em seguida, foi realizada uma calibração numérica com os resultados experimentais de transferência de calor e de análise estrutural em pilares mistos, em temperatura elevada, para posteriormente inserir os conectores de cisalhamento nos modelos. Foi avaliado o comportamento do Crestbond e da Chapa Passante com diferentes níveis de carga e em diferentes diâmetros do tubo de aço com o objetivo de comparar como cada conector irá se comportar. Nas análises térmicas, independente do diâmetro do tubo de aço, o Crestbond apresentou temperatura maior do que a Chapa Passante, porém as diferenças foram pequenas, sendo de no máximo 98°C e até 12% e elas ocorreram em apenas alguns instantes. Isto mostra que os dois conectores tiveram comportamento térmico bem parecidos, independente de qual fosse o comprimento da Chapa Passante. O modelo numérico desenvolvido apresentou dificuldades na obtenção dos resultados nas análises estruturais realizadas com expansão térmica e por este motivo também foram realizadas simulações sem o uso da expansão térmica. Nos resultados com expansão térmica, não se manteve um padrão de qual conector resiste a um maior tempo para todos os diâmetros e/ou níveis de carga aplicado. O comportamento dos conectores nas análises sem expansão térmica mostrou ser bem diferentes, sendo que a Chapa Passante teve tempo resistente maior do que o Crestbond em todos os casos, porém para a maioria dos resultados as diferenças foram pequenas (menor que 20%). Isto mostra que a Chapa Passante teve comportamento semelhante ao Crestbond, não sendo conclusivo para ela ser considerada melhor. Além disso, o Crestbond tem a vantagem de poder proporcionar uma maior facilidade de colocação de estribos nas armaduras longitudinais nos pilares mistos do que a Chapa Passante.

Palavras-chave: Pilar Misto; Crestbond; Chapa Passante; Expansão Térmica; Situação de Incêndio.

ABSTRACT

This research presents the study of the behavior of the Crestbond and Shear Flat used as shear load transfer in Concrete Filled Tubular Circular Columns in fire conditions. The standard ABNT NBR 14323: 2013 proposes that connections between composite beams and composite columns with concrete filled hollow sections in fire conditions are made by Bearing Blocks and Shear Flats. The Crestbond is not yet standardized, and it is extremely important to study its behavior as shear load transfer in columns. Studies about Crestbond at room temperature have already been done, however, have not yet been investigated at elevated temperature. Investigations about shear connectors in composite columns in fire conditions are scarce and did not find any experimental results in the literature. At elevated temperatures occurs the degradation of the properties of the materials and because of it, is necessary to know how the shear connectors will behave thermally and structurally in this situation. Therefore, the present work is dedicated to do a numerical investigation, through the Abaqus software, trying to understand the behavior of Crestbond and Shear Flat in composite columns at elevated temperatures. Through the state of art, this work tried to find in the literature studies about shear connectors, composite columns filled with concrete in fire conditions and numerical analyzes using the Abaqus software, to identify which aspects should be investigated in this dissertation. Then, it was made a numerical calibration of experimental results of heat transfer and structural analysis about composite columns, at elevated temperature, to be able to insert the shear connectors in the models. The behavior of Crestbond and Shear Flats was studied with different load levels and different tubes diameters to evaluated to compare how each will behave in each situation. In the thermal analyzes, independent of the diameter of the steel tube, Crestbond presented a higher temperature than the Shear Flat, but the differences were small, being at most 98 ° C and up to 12% and they occurred in only a few moments. This shows that the two connectors had very similar thermal behavior, regardless of the length of the Shear Flat. The numerical model developed presented difficulties in obtaining the results in the structural analyzes carried out with thermal expansion. For this reason, also were made simulations without the use of thermal expansion. In the results with thermal expansion, it has not remained a standard of which shear connector resists a longer time in all the diameters and levels of applied load. The behavior of the shear connectors in the analyzes without thermal expansion showed to be very different, with Shear Flat having more resistant time than Crestbond in all cases, but the majority of the results were small (less than 20%). This shows that Shear Flat had a slightly better behavior than the Crestbond, but, it's not conclusive that can be considered better. In addition, Crestbond has the advantage of being able to provide greater ease of placement of stirrups in longitudinal bars on Composite Columns than Shear Flat.

Key words: Composite Columns, Crestbond, Shear Flat, Thermal Expansion, Fire Conditions.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xxiv
LISTA DE SÍMBOLOS	xxv
LISTA DE ABREVIATURAS	xxvii
Introdução	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Justificativa	5
1.4 Organização da Dissertação	6
Revisão Bibliográfica	8
2.1 Considerações Iniciais	8
2.2 Estudos Realizados	8
2.2.1 Hong <i>et al</i> (2009)	8
2.2.2 Rodrigues <i>et al</i> (2011)	10
2.2.3 Espinos (2012)	11
2.2.4 Laím <i>et al</i> (2013)	14
2.2.5 Pires <i>et al</i> (2013)	16
2.2.6 Wang <i>et al</i> (2013)	17
2.2.7 Aguiar (2015)	19
2.3 Observações do Capítulo	21
Modelo Numérico de Pilar Misto Tubular Preenchido com Concreto em Situação de Incêndio..	23
3.1 Considerações Iniciais	23
3.2 Calibração de um Modelo	23
3.3 Transferência de calor	24
3.3.1 Propriedades Térmicas do Aço	24
3.3.2 Propriedades Térmicas do Concreto	25
3.3.3 Curva Padrão de Incêndio	28
3.3.4 Transferência de Calor	29
3.3.5 Elemento Finito	30
3.3.6 Validação do Modelo Numérico	31

3.4	Análise Estrutural	33
3.4.1	Propriedades Mecânicas do Aço e Modelo Constitutivo no Abaqus	33
3.4.2	Propriedades Mecânicas do Concreto e Modelo Constitutivo no Abaqus	36
3.4.3	Elemento Finito	43
3.4.4	Condições de Contorno e Carregamento.....	43
3.4.5	Contato.....	44
3.4.6	Validação do Modelo Numérico	44
3.5	Observações do Capítulo	48
	Desenvolvimento de um Modelo Numérico de Pilar Misto Tubular Preenchido com Concreto com a Presença de Conector de Cisalhamento em Situação de Incêndio.....	49
4.1	Considerações Iniciais	49
4.2	Propriedades dos Materiais	49
4.3	Transferência de Calor	50
4.4	Etapas no Abaqus e Tipo de Elemento Finito	50
4.5	Geometria	50
4.6	Comparação de Temperaturas nos Conectores.....	52
4.6.1	Diâmetro de 200 mm	53
4.6.2	Diâmetro de 400 mm	54
4.6.3	Diâmetro de 600 mm	55
4.6.4	Conclusões sobre Temperatura no Crestbond e na Chapa Passante	56
4.7	Condições de Contorno e Carregamento.....	56
4.8	Contato.....	58
4.9	Malha	58
4.10	Cargas nos Conectores	58
4.11	Observações do Capítulo.....	61
	Resultados da Análise Estrutural Com Expansão Térmica	62
5.1	Considerações Iniciais	62
5.2	Principais Parâmetros Avaliados	62
5.3	Diâmetro de 200 mm	63
5.3.1	70% de Carga.....	63
5.3.2	50% de Carga.....	68
5.3.3	30% de Carga.....	73
5.4	Diâmetro de 400 mm	78
5.4.1	70% de Carga.....	78

5.4.2	50% de Carga.....	83
5.4.3	30% de Carga.....	89
5.5	Diâmetro de 600 mm	95
5.5.1	70% de Carga.....	95
5.5.2	50% de Carga.....	101
5.5.3	30% de Carga.....	108
5.6	Quadro Resumo	114
5.7	Observações do Capítulo	115
	Resultados da Análise Estrutural Sem Expansão Térmica.....	117
6.1	Considerações Iniciais	117
6.2	Principais Parâmetros Avaliados	117
6.3	Diâmetro de 200 mm	118
6.3.1	70% de Carga.....	118
6.3.2	50% de Carga.....	123
6.3.3	30% de Carga.....	128
6.4	Diâmetro de 400 mm	133
6.4.1	70% de Carga.....	133
6.4.2	50% de Carga.....	138
6.4.3	30% de Carga.....	144
6.5	Diâmetro de 600 mm	150
6.5.1	70% de Carga.....	150
6.5.2	50% de Carga.....	156
6.5.3	30% de Carga.....	162
6.6	Quadro Resumo	169
6.7	Comparação dos Tempos Resistentes com e sem Expansão Térmica	170
6.8	Observações do Capítulo	172
	Conclusões	174
7.1	Considerações Gerais	174
7.2	Sugestões para Estudos Futuros	176
	Referências Bibliográficas	178

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Ligação de Consoles em Pilar Misto Tubular. (ABNT NBR 14323:2013).....	3
Figura 1.2 - Ligação Viga-Pilar com Chapa Passante. (Santos, 2014).....	3
Figura 1.3 - Dimensões em mm dos Conectores Crestbond (Aguiar, 2015).....	4
Figura 1.4 - Proposta de Utilização do Crestbond em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto (Aguiar, 2015).....	4
Figura 2.1 - Comparação Numérica e Experimental de Tempo-Temperatura de Dois Pilares Mistos Tubulares em Função do Tempo (Adaptado de Hong et al, 2009).....	9
Figura 2.2 - Comparação Numérica e Experimental de Deslocamento Axial de Quatro Pilares Mistos Tubulares em Função do Tempo (Adaptado de Hong et al, 2009).....	10
Figura 2.3 - Geometria dos Conectores Perfobond (Rodrigues et al, 2011)	11
Figura 2.4 - Estágios do Pilar Misto Tubular Submetido a Carregamento Axial em situação de Incêndio (Adaptado de Espinos, 2012).....	13
Figura 2.5 - Temperaturas na Seção Transversal de Um Pilar Misto Tubular (Adaptado de Laim et al, 2013).....	15
Figura 2.6 - Comparação da Evolução das Forças em Função do Tempo em Simulações Numéricas e Testes Experimentais (Adaptado de Laim et al, 2013)	15
Figura 2.7 - Tempos Críticos em Função do Nível de Carregamento com uma Porcentagem de Armadura de 0% (Pires et al, 2013)	17
Figura 2.8 - Comparação Numérica e Experimental de Tempo-Temperatura de dois Pilares Mistos Tubulares em Função do Tempo (Adaptado de Wang et al, 2013).....	18
Figura 2.9 - Comparação Numérica e Experimental de Deslocamento Axial de Dois Pilares em Função do Tempo (Adaptado de Hong et al, 2009)	19
Figura 2.10 - Protótipos B, P e U Respectivamente (Aguiar, 2015)	20
Figura 2.11 - Sobreposição das Curvas Versus Deslizamento das Séries B, P e U (Aguiar, 2015)	20
Figura 2.12 - Modelos Numéricos das Séries B, P e U (Aguiar, 2015)	20
Figura 3.1 - Calor Específico do Aço (EN 1993.1.2:2005).....	24
Figura 3.2 - Condutividade Térmica do Aço (EN 1993.1.2:2005).....	25
Figura 3.3 - Massa Específica do Concreto (EN 1992.1.2:2004).....	26
Figura 3.4 - Calor Específico do Concreto (EN 1992.1.2:2004).....	26

Figura 3.5 - Condutividade Térmica do Concreto (EN 1994.1.2:2005).....	27
Figura 3.6 - Comparação de Curvas de Incêndio (Junior, 2012).....	28
Figura 3.7 - Curva-Padrão de Incêndio da ABNT NBR 14432:2001.	29
Figura 3.8 - Elemento Finito DC3D8 (Modificado de ABAQUS MANUAL 6.9).....	30
Figura 3.9 - Pilar Misto Tubular Preenchido com Concreto no Abaqus	30
Figura 3.10 - Malha na Seção Transversal do Modelo Numérico.....	31
Figura 3.11 - Transferência de Calor com a Condução Perfeita de Calor na Interface Aço-Concreto	32
Figura 3.12 - Transferência de Calor por condução com o coeficiente condutância térmica (hj) igual a 200 W/m ² K na Interface Aço-Concreto.....	32
Figura 3.13 - Curvas de Tensão-Deformação para o Aço em Diferentes Temperaturas Pela Formulação Presente no EN 1993-1-2:2005	36
Figura 3.14 - Curva Característica de Tensão-Deformação para o Concreto em Situação de Incêndio	37
Figura 3.15 - Curvas de Tensão-Deformação para o Concreto em Diferentes Temperaturas pela formulação presente no EN 1992-1-2:2004	38
Figura 3.16 - Curvas de Tensão-Deformação para o Concreto em Diferentes Temperaturas pela formulação presente em Lie (1984).....	39
Figura 3.17 - Comparação de Curvas de Tensão-Deformação para o Concreto em Diferentes Temperaturas Presente no EN 1992-1-2:2004 e no Modelo de Lie (1984) (Adaptado de Espinos, 2012).....	39
Figura 3.18 - Coeficiente $k_{c,t}$ em Função da Temperatura (EN 1992-1-2:2004).....	41
Figura 3.19 - Curva Representativa do Concreto Tracionado no Modelo Numérico (Aguiar, 2015).....	42
Figura 3.20 - Curvas de Tensão-Deslocamento de Tração no Concreto em Situação de Incêndio	43
Figura 3.21 - Elemento Finito C3D8R	43
Figura 3.22 - Pilar Tubular Misto com Placa de Carregamento (Adaptado de Espinos, 2012).....	44
Figura 3.23 - Curva Deslocamento Axial ao Longo do Tempo do Pilar C-05.....	45
Figura 3.24 - Curva Deslocamento Axial ao Longo do Tempo do Pilar C-13.....	46
Figura 3.25 - Curva Deslocamento Axial ao Longo do Tempo do Pilar C-17.....	46
Figura 3.26: Comparação da Deformada do Resultado Experimental do Pilar C-17 de Chabot e Lie (1992) e o Numérico Obtido no Presente Trabalho	47
Figura 4.1 - Detalhamento dos Pilares com o Crestbond	51

Figura 4.2 - Detalhamento dos Pilares com a Chapa Passante	52
Figura 4.3 - Pontos de Medição de Temperatura no Crestbond e na Chapa Passante em Pilares de Diâmetro de 200mm	53
Figura 4.4 - Gráfico da Variação da Temperatura no Crestbond e na Chapa Passante em Pilares de Diâmetro de 200mm ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio.....	53
Figura 4.5 - Pontos de Medição de Temperatura no Crestbond e na Chapa Passante em Pilares de Diâmetro de 400mm	54
Figura 4.6 - Gráfico da variação da Temperatura no Crestbond e na Chapa Passante em Pilares de Diâmetro de 400mm ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio.....	54
Figura 4.7 - Pontos de Medição de Temperatura no Crestbond e na Chapa Passante em pilares de Diâmetro de 600mm	55
Figura 4.8 - Gráfico da variação da Temperatura no Crestbond e na Chapa Passante em Pilares de Diâmetro de 600mm ao longo do tempo de Exposição ao Incêndio	55
Figura 4.9 - Ilustração das direções 1,2 e 3 do pilar com Conector de Cisalhamento.....	57
Figura 4.10 - Detalhamento do Carregamento no Conector de Cisalhamento.....	57
Figura 4.11 - Tensão final de Von Mises com o modelo de concreto EN 1992-1-2:2004.....	59
Figura 4.12 - Tensão Final de Von Mises com o modelo de concreto de Lie (1984) do Pilar com o Crestbond.....	60
Figura 4.13 - Tensão Final de Von Mises com o modelo de concreto de Lie (1984) do Pilar com o Crestbond.....	60
Figura 5.1 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	63
Figura 5.2 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	63
Figura 5.3 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	64
Figura 5.4 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	64
Figura 5.5 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica).....	64
Figura 5.6 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica).....	65

Figura 5.7 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de diâmetro de 200 mm com 70% de carga (Resultado com Expansão Térmica)	65
Figura 5.8 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	66
Figura 5.9 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	66
Figura 5.10 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	66
Figura 5.11 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	66
Figura 5.12 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de carga (Resultado com Expansão Térmica)	67
Figura 5.13 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	68
Figura 5.14 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de carga (Resultado com Expansão Térmica)	68
Figura 5.15 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	69
Figura 5.16 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	69
Figura 5.17 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	69
Figura 5.18 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	70
Figura 5.19 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	70
Figura 5.20 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	71
Figura 5.21 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	71
Figura 5.22 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	71

Figura 5.23 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de carga (Resultado com Expansão Térmica)	71
Figura 5.24 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	72
Figura 5.25 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	73
Figura 5.26 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	73
Figura 5.27 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	74
Figura 5.28 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	74
Figura 5.29 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	74
Figura 5.30 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	75
Figura 5.31 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	75
Figura 5.32 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	76
Figura 5.33 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	76
Figura 5.34 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	76
Figura 5.35 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	76
Figura 5.36 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	77
Figura 5.37 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	78

Figura 5.38 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	78
Figura 5.39 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	79
Figura 5.40 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	79
Figura 5.41 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	79
Figura 5.42 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	80
Figura 5.43 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	81
Figura 5.44 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	81
Figura 5.45 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	81
Figura 5.46 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	81
Figura 5.47 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	82
Figura 5.48 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	82
Figura 5.49 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	84
Figura 5.50 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	84
Figura 5.51 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	84
Figura 5.52 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	84

Figura 5.53 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	85
Figura 5.54 - Deformada (tensões longitudinais) no Pilar com o Crestbond de diâmetro de 400 mm com 50% de carga (Resultado com Expansão Térmica)	85
Figura 5.55 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	86
Figura 5.56 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	86
Figura 5.57 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	87
Figura 5.58 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	87
Figura 5.59 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	87
Figura 5.60 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	88
Figura 5.61 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	89
Figura 5.62 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	89
Figura 5.63 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	90
Figura 5.64 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	90
Figura 5.65 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	90
Figura 5.66 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	91
Figura 5.67 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	92

Figura 5.68 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	92
Figura 5.69 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	92
Figura 5.70 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	92
Figura 5.71 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	93
Figura 5.72 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	93
Figura 5.73 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	95
Figura 5.74 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	95
Figura 5.75 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	96
Figura 5.76 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	96
Figura 5.77 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	96
Figura 5.78 - Deformada (Tensões longitudinais) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	97
Figura 5.79 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	98
Figura 5.80 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	98
Figura 5.81 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	98
Figura 5.82 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	99

Figura 5.83 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	99
Figura 5.84 - Deformada (Tensões longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	100
Figura 5.85 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	101
Figura 5.86 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	101
Figura 5.87 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	102
Figura 5.88 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	102
Figura 5.89 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	102
Figura 5.90 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	103
Figura 5.91 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	104
Figura 5.92 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	104
Figura 5.93 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	105
Figura 5.94 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	105
Figura 5.95 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	105
Figura 5.96 - Deformada (tensões longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de diâmetro de 600 mm com 50% de carga (Resultado com Expansão Térmica)	106
Figura 5.97 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	106

Figura 5.98 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	108
Figura 5.99 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	108
Figura 5.100 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	109
Figura 5.101 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	109
Figura 5.102 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	109
Figura 5.103 - Deformada (deslocamento) no Pilar com o Crestbond de diâmetro de 600 mm com 30% de carga (Resultado com Expansão Térmica)	110
Figura 5.104 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de diâmetro de 600 mm com 30% de carga (Resultado com Expansão Térmica)	111
Figura 5.105 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	111
Figura 5.106 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	111
Figura 5.107 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	112
Figura 5.108 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	112
Figura 5.109 - Deformada (tensões longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)	113
Figura 5.110 - Deformada (deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de diâmetro de 600 mm com 30% de carga (Resultado com Expansão Térmica)	113
Figura 6.1 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	118
Figura 6.2 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	118
Figura 6.3 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	119

Figura 6.4 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	119
Figura 6.5 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	119
Figura 6.6 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	120
Figura 6.7 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	120
Figura 6.8 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	121
Figura 6.9 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	121
Figura 6.10 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	121
Figura 6.11 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	121
Figura 6.12 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	122
Figura 6.13 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	123
Figura 6.14 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	123
Figura 6.15 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	124
Figura 6.16 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	124
Figura 6.17 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	124
Figura 6.18 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	125

Figura 6.19 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	125
Figura 6.20 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	126
Figura 6.21 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	126
Figura 6.22 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	126
Figura 6.23 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	126
Figura 6.24 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	127
Figura 6.25 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	128
Figura 6.26 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	128
Figura 6.27 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	128
Figura 6.28 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	129
Figura 6.29 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	129
Figura 6.30 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	130
Figura 6.31 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	130
Figura 6.32 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	130
Figura 6.33 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	131
Figura 6.34 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	131

Figura 6.35 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	131
Figura 6.36 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	132
Figura 6.37 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	133
Figura 6.38 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	133
Figura 6.39 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	134
Figura 6.40 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	134
Figura 6.41 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	134
Figura 6.42 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	135
Figura 6.43 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	136
Figura 6.44 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	136
Figura 6.45 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	136
Figura 6.46 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	136
Figura 6.47 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	137
Figura 6.48 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	137
Figura 6.49 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	139

Figura 6.50 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	139
Figura 6.51 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	139
Figura 6.52 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	139
Figura 6.53 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	140
Figura 6.54 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	140
Figura 6.55 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	141
Figura 6.56 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	141
Figura 6.57 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	142
Figura 6.58 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	142
Figura 6.59 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	142
Figura 6.60 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	143
Figura 6.61 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	144
Figura 6.62 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	145
Figura 6.63 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	145
Figura 6.64 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	145

Figura 6.65 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	145
Figura 6.66 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	146
Figura 6.67 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	147
Figura 6.68 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	147
Figura 6.69 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	147
Figura 6.70 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	148
Figura 6.71 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	148
Figura 6.72 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	149
Figura 6.73 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	150
Figura 6.74 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	150
Figura 6.75 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	150
Figura 6.76 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	151
Figura 6.77 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	151
Figura 6.78 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	152
Figura 6.79 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	153

Figura 6.80 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	153
Figura 6.81 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	153
Figura 6.82 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	154
Figura 6.83 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	154
Figura 6.84 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	155
Figura 6.85 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	156
Figura 6.86 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	157
Figura 6.87 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	157
Figura 6.88 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	157
Figura 6.89 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	157
Figura 6.90 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	158
Figura 6.91 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	159
Figura 6.92 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	159
Figura 6.93 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	160
Figura 6.94 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	160

Figura 6.95 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	160
Figura 6.96 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	161
Figura 6.97 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	163
Figura 6.98 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	163
Figura 6.99 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	163
Figura 6.100 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	163
Figura 6.101 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	164
Figura 6.102 - Deformada (deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	164
Figura 6.103 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	166
Figura 6.104 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	166
Figura 6.105 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	166
Figura 6.106 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	166
Figura 6.107 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica).....	167
Figura 6.108 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)	167

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Fatores de redução do aço	33
Tabela 3.2 - Relação dos parâmetros do modelo matemático do diagrama tensão-deformação presente no EN1992-1-2:2004.....	35
Tabela 3.3 - Parâmetros de Tensão-Deformação do concreto em função da Temperatura (EN 1992-1-2:2004).....	37
Tabela 3.4 - Pares ordenados para a definição do comportamento pós-crítico do concreto à tração	42
Tabela 3.5 - Propriedades geométricas, dos materiais e o carregamento dos pilares escolhidos de Espinos (2012).....	45
Tabela 5.1 - Comparação dos Tempos Resistentes entre o Crestbond e a Chapa Passante (Resultados Com Expansão Térmica)	114
Tabela 5.2 - Comparação dos deslocamentos finais entre o Crestbond e a Chapa Passante (Resultados Com Expansão Térmica)	115
Tabela 6.1 - Comparação dos Tempos Resistentes entre o Crestbond e a Chapa Passante (Resultados Sem Expansão Térmica).....	169
Tabela 6.2 - Comparação dos Deslocamentos Finais entre o Crestbond e a Chapa Passante (Resultados Sem Expansão Térmica).....	169
Tabela 6.3 - Comparação dos Tempos Resistentes do Crestbond com e sem Expansão Térmica	170
Tabela 6.4 - Comparação dos Tempos Resistentes da Chapa Passante com e sem Expansão Térmica.....	170
Tabela 6.5 - Comparação dos Deslocamento Finais do Crestbond com e sem Expansão Térmica	171
Tabela 6.6 - Comparação dos Deslocamentos Finais da Chapa Passante com e sem Expansão Térmica.....	171

LISTA DE SÍMBOLOS

C – Carga Aplicada

D – Diâmetro externo da seção transversal do tubo

$E_{a,\theta}$ – módulo de elasticidade do aço a uma temperatura θ_a ;

E_a – módulo de elasticidade do aço a 20°C

E_{sp} – Espessura do Tubo

K – Parâmetro para definição da superfície de escoamento

L – Comprimento do Pilar

c_a – Calor Específico do Aço

f_c – Resistência à compressão do concreto

f_{ck} – Resistência característica à compressão do concreto

$f_{ct,m}$ – Resistência média à tração do concreto

$f_{p,\theta}$ – Resistência correspondente ao limite de proporcionalidade do aço na temperatura θ_a

f_u – Resistência à ruptura do aço à tração

f_y – Resistência ao escoamento do aço a 20°C;

$f_{y,\theta}$ – Resistência ao escoamento do aço a uma temperatura θ_a

h – Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície exposta

h_j – Coeficiente de Condutância Térmica

$k_{y,\theta}$ – Fator de Redução para o Limite de Escoamento

$k_{p,\theta}$ – Fator de Redução do Limite de Proporcionalidade do Aço do Perfil em Temperatura Elevada Relativo ao Valor à Temperatura Ambiente

$k_{E,\theta}$ – Fator de Redução para o Módulo de Elasticidade

t – Segundos

Letras Gregas

α_c – Coeficiente de Expansão Térmica do Concreto

α_a – Coeficiente de Expansão Térmica do Aço

ε_f – Emissividade do fogo

ε_m – Emissividade da superfície exposta

ε_c – Deformação específica do Concreto

$\varepsilon_{c,u}$ – Deformação Última do Concreto

$\varepsilon_{p,\theta}$ – Deformação linear específica do aço correspondente à $f_{p,\theta}$

$\varepsilon_{p,\theta}$ – Deformação linear específica do aço correspondente à $f_{p,\theta}$

$\varepsilon_{y,\theta}$ – deformação linear específica do aço correspondente à $f_{y,\theta}$

$\varepsilon_{u,\theta}$ – deformação linear específica última do aço

θ – Temperatura

θ_a – Temperatura do Aço

θ_{abs} – Valor Absoluto de Temperatura

θ_i – Temperatura inicial

\varnothing – Diâmetro

ρ – Densidade a 20 °C

$p(\theta)$ – Densidade em Função da Temperatura

σ – Constante de Stephan-Boltzmann

σ_{b0} – Resistência à compressão no estado biaxial

σ_{c0} – Resistência à compressão no estado uniaxial

λ_a – Condutividade Térmica do Aço

λ_c – Condutividade Térmica do Concreto

γ_a – Coeficiente de Ponderação da Resistência

ψ – Ângulo de dilatância

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – *Associação Brasileira de Normas Técnicas*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

Eurocode – *Comitê Europeu de Normatização*

ISO – *International Organization for Standardization*

UFMG – *Universidade Federal de Minas Gerais*

1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Estruturas mistas são resultados da associação de perfis de aço com concreto estrutural, formando pilares, vigas, lajes e ligações que combinam as propriedades estruturais e as vantagens de ambos os materiais. Os pilares tubulares de aço funcionam como fôrma e confinam o concreto, o que dificulta a flambagem local do perfil. A presença do concreto melhora a capacidade resistente em situação de incêndio, o que torna os pilares mistos mais eficientes do que os de aço. Os pilares mistos de aço e concreto possuem uma capacidade de carga significativamente aumentada em comparação com os pilares de aço e os de concreto que possuem dimensões exteriores idênticas.

Em situação de incêndio ocorre a degradação das propriedades dos materiais com o aumento de temperatura, sendo que a capacidade resistente dos elementos estruturais nesta situação depende da intensidade, duração e propagação do incêndio aos quais eles estão submetidos. Em função destas variáveis envolvidas, a análise fica mais complexa tornando mais difícil a previsão do colapso estrutural. O surgimento das estruturas mistas está relacionado diretamente às tentativas de proteger os perfis metálicos utilizados na construção civil frente aos efeitos decorrentes do fogo e da corrosão.

O concreto é amplamente usado como um material estrutural na construção, devido a inúmeras vantagens, tais como resistência, durabilidade, facilidade de fabricação, uso tradicional, poder ser fabricado em canteiros de obras, entre outras, sendo que muitos materiais de construção não apresentam todas estas características reunidas. O concreto está entre os materiais de construção que apresentam melhor resistência quando submetido a temperaturas elevadas, por ser um material que apresenta baixa condutividade térmica e possui propriedades não combustíveis.

Com o avanço das pesquisas em estruturas mistas, surgiram modelos analíticos e numéricos de cálculo para estimar a capacidade resistente sob o efeito de temperaturas elevadas. Os modelos numéricos têm como vantagem, em relação aos analíticos, a possibilidade de considerar algumas características importantes para uma representação mais realista do comportamento da transferência de calor, como a condução térmica, coeficientes de expansão térmica dos materiais entre outros parâmetros. Atualmente, existem modelos analíticos e numéricos que abordam, com razoável precisão, a simulação do comportamento de pilares em situação de incêndio. Estes modelos têm como base princípios da transferência de calor nos elementos estruturais e são validados mediante testes experimentais.

Devido ao fato de que os testes experimentais em elementos estruturais expostos ao incêndio apresentam custos elevados para serem realizados, a análise numérica se torna uma importante ferramenta para investigar o comportamento estrutural de pilares e vigas entre outros elementos.

Os conectores de cisalhamento são elementos estruturais que tem como função a transferência de esforços do aço para o concreto e vice-versa, fazendo assim com que trabalhem como um único elemento estrutural.

Vários tipos de conectores de cisalhamento têm sido utilizados, frutos de diversos aspectos econômicos e técnicos, que motivam o desenvolvimento de novos produtos. A norma ABNT NBR 14323:2013 aborda a utilização de perfis tubulares de aço em projetos de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto. Ela apresenta duas alternativas para a transferência de carga entre as ligações de vigas e pilares mistos tubulares preenchidos com concreto em situação de incêndio, que são os consoles e a Chapa Passante. A Figura 1.1 mostra como é o console nos pilares mistos e as Figuras 1.2 e 1.3 a seguir mostra um exemplo de como é a proposta de utilização da Chapa Passante em pilares mistos, sendo este último um dos conectores de cisalhamento estudados neste trabalho.

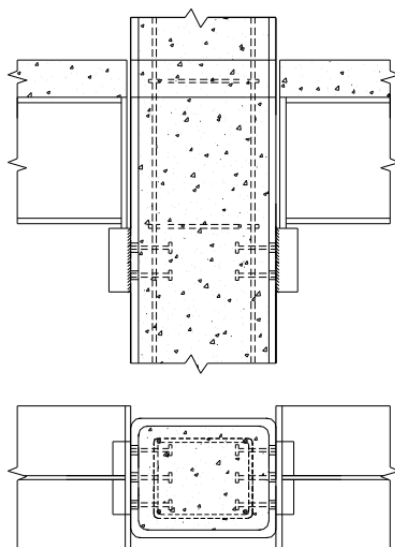


Figura 1.1 - Ligação de Consolos em Pilar Misto Tubular. (ABNT NBR 14323:2013)

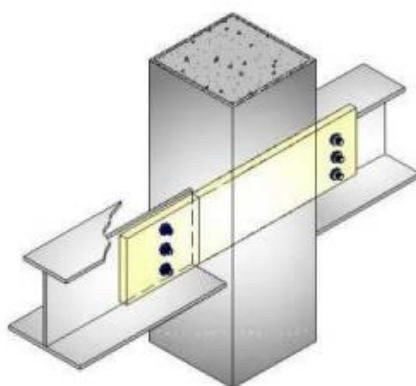


Figura 1.2 - Ligação Viga-Pilar com Chapa Passante. (Santos, 2014)

Além da Chapa Passante, esta dissertação tem por escopo investigar um novo conector para transferência de carga na região de ligações em pilares mistos tubulares em situação de incêndio, denominado Crestbond. Este conector de cisalhamento apresenta algumas vantagens tais como: a simplicidade, o baixo custo de fabricação, ductilidade, bem como o fato de possuir aberturas que permitem a colocação de estribos da armadura de aço no núcleo de concreto.

O Crestbond foi inicialmente estudado no Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais por Veríssimo (2007), originalmente para ser utilizado em vigas, mas recentemente, vem sendo estudado como dispositivo de transferência de carga em pilares mistos tubulares à temperatura ambiente, conforme pode ser visto em Aguiar (2015). As Figuras 1.3 e 1.4 mostram como é a geometria do Crestbond e como é proposta de utilização do conector nas ligações de vigas a pilares mistos tubulares.

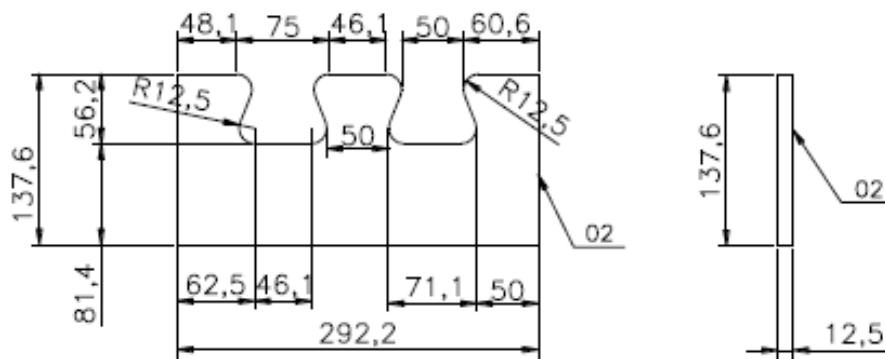


Figura 1.3 - Dimensões em mm dos Conectores Crestbond (Aguiar, 2015)

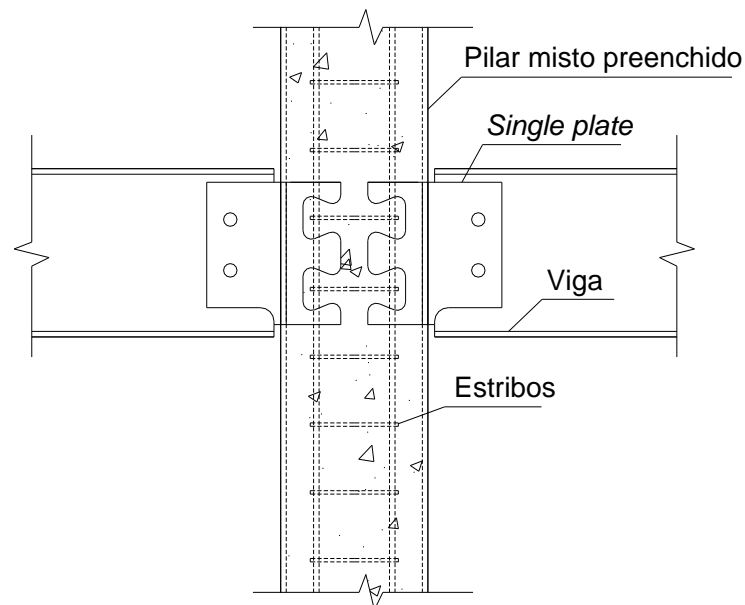


Figura 1.4 - Proposta de Utilização do Crestbond em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto (Aguiar, 2015)

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo numérico do comportamento do Crestbond e da Chapa Passante como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto em situação de incêndio. O programa Abaqus 6.14 foi a ferramenta utilizada nas simulações numéricas. Para alcançar o objetivo deste trabalho, as seguintes etapas foram desenvolvidas:

- Reprodução de um modelo numérico presente na literatura de pilares mistos tubulares preenchidos com concreto em situação de incêndio, validado mediante resultados experimentais;
- Desenvolvimento de um modelo numérico com a aplicação de carga diretamente no Crestbond e na Chapa Passante e que estes conectores de cisalhamento funcionem como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos tubulares em temperatura elevada;
- Comparação de como ocorre a distribuição de temperatura com o Crestbond e a Chapa Passante presente nos pilares mistos tubulares;
- Comparação de como se apresenta as tensões, as deformações e os tempos resistentes nos pilares mistos tubulares com o Crestbond e com a Chapa Passante;
- Procurar entender o desempenho estrutural dos conectores de cisalhamento em pilares mistos tubulares em situação de incêndio.

1.3 Justificativa

As estruturas mistas estão sendo cada vez mais utilizadas no Brasil, e a norma ABNT NBR 14323:2013, destinada a projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio, apresenta apenas consoles e a Chapa Passante como conectores de cisalhamento em ligações entre vigas e pilares mistos preenchidos com concreto em situação de incêndio. Porém, mesmo a norma já apresentando algumas alternativas, estudos sobre conectores de cisalhamento em pilares mistos tubulares em temperatura elevada são escassos na literatura. Por causa disso não se sabe como realmente a temperatura influencia neste tipo de ligação. Além de acontecer a degradação das propriedades dos materiais com o aumento de temperatura, o efeito da expansão térmica pode influenciar de forma significativa o núcleo de concreto, principalmente a parte que está em contato com o conector de cisalhamento, que pode sofrer muita fissuração diminuindo assim a capacidade resistente do pilar. Por estes motivos são necessárias investigações mais detalhadas sobre este tipo de ligação entre vigas e pilares mistos.

O conector de cisalhamento Crestbond ainda não se encontra normatizado, sendo, portanto, de suma importância estudar o seu comportamento em pilares mistos tubulares em situação de incêndio, sendo que em temperatura ambiente já existem trabalhos realizados.

O Crestbond e a Chapa Passante possuem uma característica em comum, além se serem conectores de cisalhamento, ambos servem como chapa simples de ligação (paralela a alma da viga) da viga ao pilar misto. Porém, a Chapa Passante atravessa toda a seção transversal do tubo de aço, sendo que isso pode ser um problema na colocação de estribos das armaduras longitudinais no núcleo de concreto. Já o Crestbond não atravessa totalmente a seção transversal do tubo de aço, sendo que em diâmetros maiores apenas uma pequena parte do núcleo do concreto está em contato com este conector de cisalhamento. Pelo fato do Crestbond apresentar menor comprimento do que a Chapa Passante, a presença dele em pilares mistos poderá facilitar a colocação de estribos das armaduras longitudinais no concreto. Entretanto, não somente a facilidade ou não de colocação de armaduras, mas o tamanho do comprimento dos conectores de cisalhamento poderá ter grande influência no comportamento estrutural dos pilares mistos em temperatura elevada. Portanto, o objetivo desta dissertação é entender como o Crestbond e a Chapa Passante se comportam em situação de incêndio e a partir disso entender as vantagens e desvantagens que cada um proporciona.

1.4 Organização da Dissertação

Este trabalho está dividido em sete capítulos, sendo que cada um deles apresenta os determinados assuntos:

- Capítulo 2: é apresentada uma revisão bibliográfica mostrando aspectos importantes para a compreensão do tema em estudo, bem como resultados de trabalhos úteis à construção de modelos numéricos.
- Capítulo 3: são mostrados aspectos fundamentais e comuns de modelagens numéricas presentes na literatura a respeito de pilares mistos tubulares de aço preenchidos com concreto em situação de incêndio por meio do programa Abaqus.

- Capítulo 4: é proposto um modelo numérico que tenha o Crestbond e a Chapa Passante como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos tubulares em situação de incêndio.
- Capítulo 5: são mostrados os resultados obtidos considerando os efeitos do fenômeno da expansão térmica dos materiais.
- Capítulo 6: neste capítulo são apresentados os resultados sem considerar a expansão térmica dos materiais. Além disto, é realizada a comparação com os valores obtidos no capítulo 5.
- Capítulo 7: são realizadas as considerações finais a respeito desta dissertação e são feitas sugestões para trabalhos futuros para a continuação do tema proposto neste trabalho.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Inicialmente foram buscados na literatura artigos e trabalhos específicos com resultados úteis para o entendimento das análises que serão desenvolvidas neste trabalho. Assim sendo, foram encontradas referências sobre modelos numéricos criados para simular o comportamento de pilares mistos de aço preenchidos com concreto submetidos a carregamento axial em situação de incêndio. Estes modelos juntamente com o estudo numérico do Crestbond em temperatura ambiente feito por Aguiar (2015), constituem o ponto de partida para entender os principais aspectos para a realização de análises numéricas de conectores de cisalhamento em pilares mistos em temperatura elevada.

2.2 Estudos Realizados

Os subitens a seguir mostram os principais trabalhos encontrados na literatura que serviram como as principais referências para o desenvolvimento desta dissertação. A intenção foi buscar estudos a respeito de pilares mistos, com ou sem conector de cisalhamento, e entender como é comportamento deles em situação de incêndio. Além disso, foi importante entender como pode ser realizada a modelagem de pilares em temperatura elevada no programa Abaqus.

2.2.1 Hong *et al* (2009)

Hong *et al* realizaram um estudo sobre uma abordagem analítica em três etapas sequencialmente acopladas para prever o comportamento de pilares mistos tubulares de aço preenchidos com concreto em situação de incêndio. A abordagem consistiu das seguintes etapas: (1) análise do comportamento do incêndio pelo uso do programa Fire Dynamics Simulator (FDS), que simulou a transferência de calor por convecção e radiação a partir da fonte do incêndio até a superfície externa do pilar; (2) análise de transferência de calor não

linear da superfície externa do tubo por condução até o núcleo de concreto e (3) análise estrutural não linear, para avaliar as tensões e deformações. Estas duas últimas etapas foram realizadas pelo programa Abaqus.

Para realizar as simulações numéricas no programa Abaqus, foi escolhido o elemento DC3D8 para a análise térmica e C3D8 para a análise estrutural, dessa maneira estas duas etapas aconteceram de forma desacoplada.

Os autores buscaram na literatura dados experimentais e escolheram 15 pilares diferentes. O estudo avaliou diversos parâmetros entre eles: diferentes seções transversais, espessuras de tubos de aço, comprimentos de pilares, resistência ao escoamento do aço, a resistência à compressão do concreto, proteções contra incêndio, entre outros.

Os modelos numéricos foram criados para analisar a sensibilidade dos efeitos de vários parâmetros, sendo comparados com resultados experimentais. Foram considerados parâmetros de entrada nas análises de sensibilidade dos materiais aço e concreto, entre eles a expansão térmica dos materiais e a interação entre o tubo de aço preenchido com concreto. As Figura 2.1 e Figura 2.2 comparam os resultados numéricos com os experimentais e mostram exemplos de como ficaram as curvas de temperatura e deslocamento axial em função do tempo.

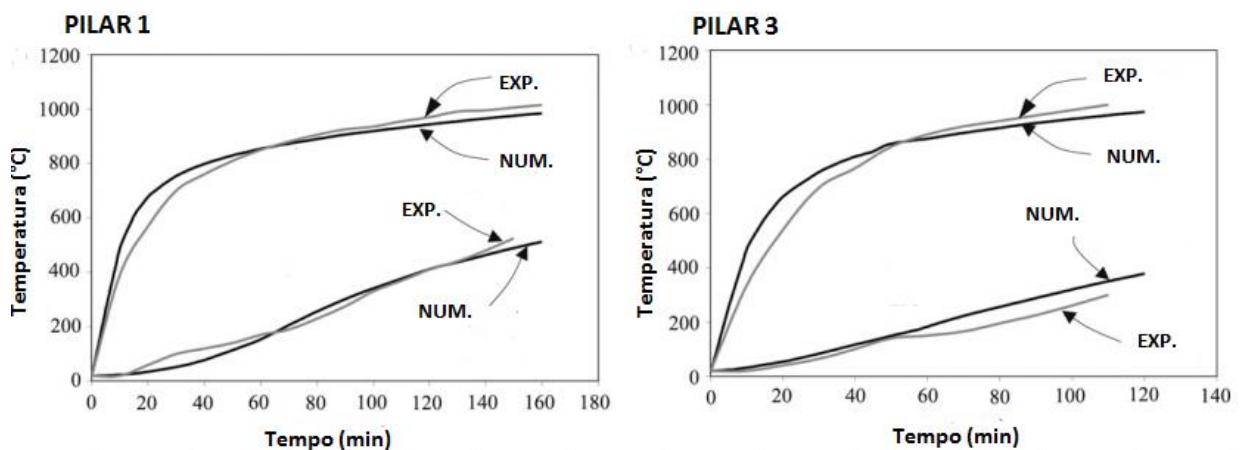


Figura 2.1 - Comparação Numérica e Experimental de Tempo-Temperatura de Dois Plares Mistos Tubulares em Função do Tempo (Adaptado de Hong et al, 2009)

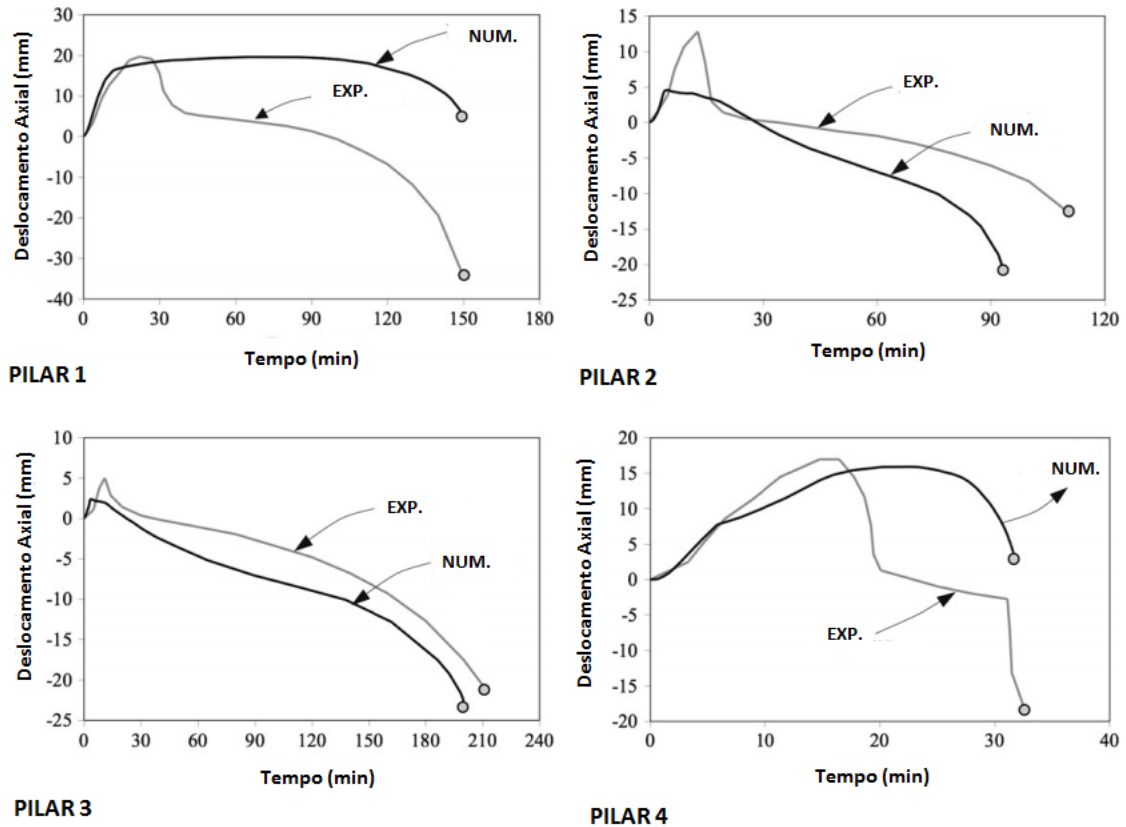


Figura 2.2 - Comparação Numérica e Experimental de Deslocamento Axial de Quatro Pilares Mistos Tubulares em Função do Tempo (Adaptado de Hong et al, 2009)

Os resultados via análise numérica, conseguiram prever com razoável precisão o comportamento térmico e estrutural dos pilares mistos tubulares de aço preenchidos com concreto em situação de incêndio.

2.2.2 Rodrigues *et al* (2011)

Rodrigues *et al* (2011) realizaram um estudo sobre o comportamento dos conectores de cisalhamento Perfobond presentes em vigas em situação de incêndio. O ensaio *push out* foi utilizado nos testes experimentais, tanto em temperatura ambiente como em situação de incêndio para avaliar curvas de força-deslocamento, modos de falha, carga máxima e capacidade de deslizamento. Os objetivos foram investigar a influência do número de furos no conector, a presença de armadura transversal, a interação de dois conectores adjacentes e avaliar a capacidade de carga máxima deles em situação de incêndio num intervalo que durasse até 90 minutos. A Figura 2.3 ilustra as diferentes geometrias dos conectores Perfobond, sendo que todos eles têm espessura de 15 mm e todos os furos apresentam diâmetro de 30 mm.

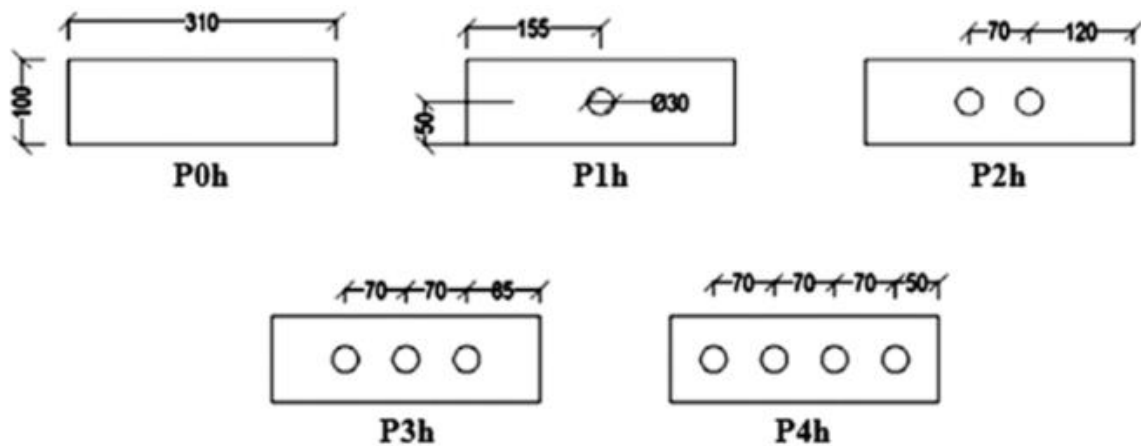


Figura 2.3 - Geometria dos Conectores Perfobond (Rodrigues et al, 2011)

Os autores constataram que quanto maior o número de furos no conector, maior o diâmetro da armadura transversal e a utilização de dois conectores estando um do lado do outro, melhor é o desempenho da capacidade de carga dos conectores à temperatura ambiente, mas não tendo o mesmo benefício em situação de incêndio. A presença de barras de aço que passam através dos furos dos conectores um do lado do outro contribuiu positivamente para a resistência das ligações à temperatura ambiente, ao contrário do observado em situação de incêndio, que quanto maior a quantidade de aço na conexão maior foi à perda da capacidade resistente. As ligações feitas com dois conectores apresentaram o pior comportamento em temperatura elevada, sendo que a melhor situação foi o Perfobond com um único furo e sem nenhuma barra de aço que passa por ele.

2.2.3 Espinos (2012)

Espinos analisou numericamente, por meio do programa Abaqus, o comportamento de pilares mistos tubulares preenchidos com concreto submetidos a carregamento axial em situação de incêndio. Para validação do modelo numérico, foram utilizados dados experimentais disponíveis na literatura de Chabot e Lie (1992) e também testes próprios. Os pilares usados nos testes experimentais tinham o comprimento de 3810 mm, porém, somente a parte central de 3084 mm foi exposta diretamente ao incêndio sendo ela aquecida de maneira uniforme. Nos modelos numéricos foi considerada imperfeição inicial de $L/1000$. Os modelos criados consistiam de três partes: núcleo de concreto, tubo de aço e placa de carregamento.

Por meio do programa Abaqus criaram duas etapas diferentes na modelagem: primeiramente uma de ação térmica para calcular o campo de temperatura, sendo que foi assumido um fluxo da fonte de incêndio até a superfície exposta do tubo por meio dos mecanismos de convecção e radiação. Posteriormente, foram importados os valores obtidos na primeira etapa e foi introduzido o carregamento para fazer a análise de tensão-deformação para conhecer o comportamento estrutural dos pilares.

Para realizar a transferência de calor, escolheram o elemento sólido com oito nós e temperatura nodal de um grau de liberdade (DC3D8) para ser usado na malha de aço e de concreto. A placa de carregamento foi considerada adiabática e usada como corpo rígido. Para a análise estrutural, o elemento sólido com oito nós de integração reduzida (C3D8R) foi o utilizado.

Na análise térmica foram usadas as propriedades apresentadas no EN 1992-1-2:2004 para o concreto e as que estão no EN 1993-1-2:2005 para o aço. Na interface entre o tubo de aço e o núcleo de concreto foi assumido o coeficiente de condutância térmica (h_j) igual a 200 W/m²K.

Na análise estrutural, testaram diferentes propriedades mecânicas dos materiais em situação de incêndio. Para o concreto testou as propriedades presentes em Lie (1984), Anderberg e Thelandersson (1976), Li e Purkiss (2005), Scheineder (1986) e no EN 1994-1-2:2005. Para o aço foram testadas as propriedades de Lie (1984), Yin (2006) e no EN 1994-1-2:2005. Sendo que considerado os melhores resultados usando Lie (1984) para o concreto e EN 1994-1-2:2005 para o aço. A Figura 2.4 a seguir ilustra como funcionou a aplicação de carga, o que acontece no pilar durante o ensaio e como é a curva de deslocamento axial ao longo do tempo para um exemplo de um pilar misto tubular.

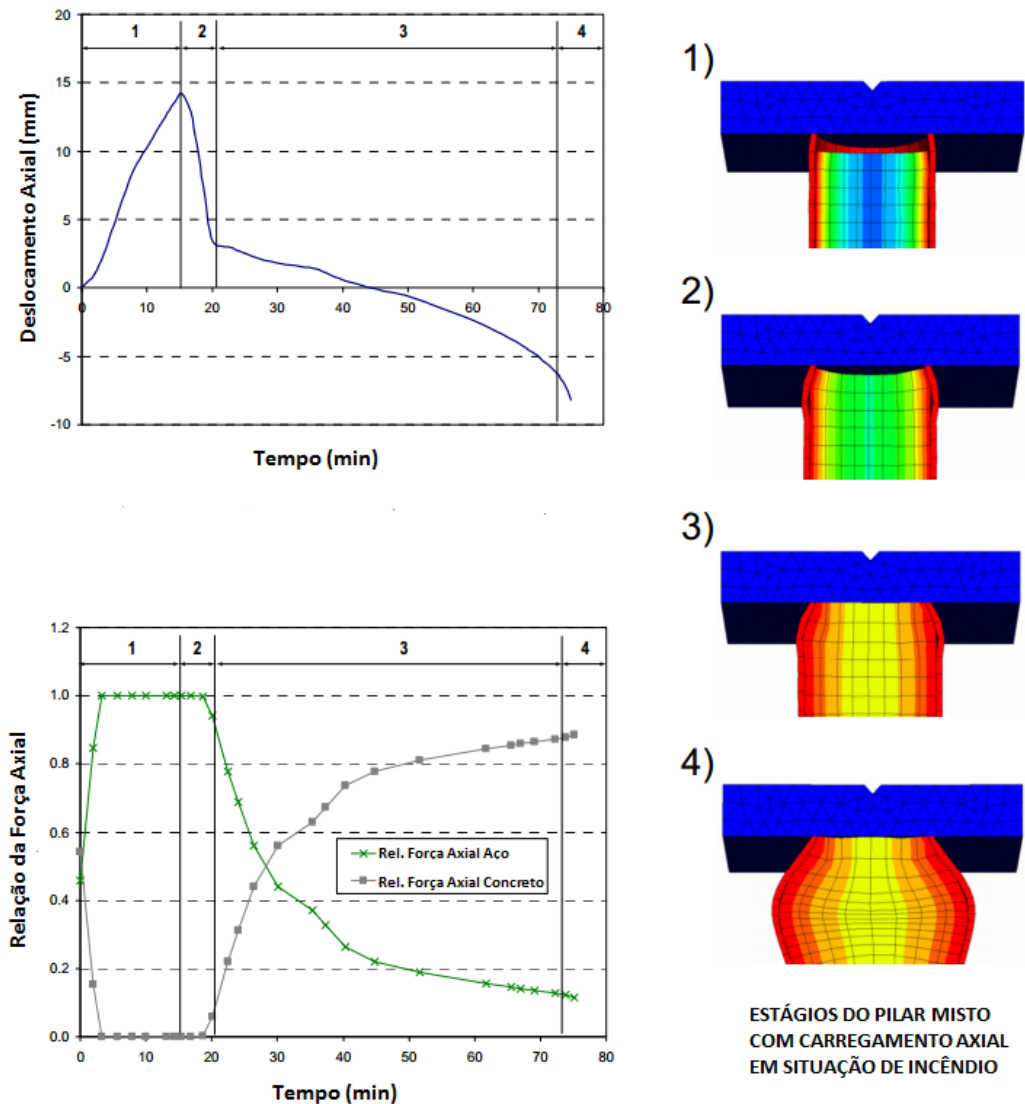


Figura 2.4 - Estágios do Pilar Misto Tubular Submetido a Carregamento Axial em situação de Incêndio
(Adaptado de Espinos, 2012)

Espinos (2012) comparou os deslocamentos axiais máximos encontrados numericamente com os experimentais. Em comparação com os dados de Chabot e Lie (1992), a razão entre os valores numéricos e os experimentais tiveram um erro médio de 1,07 com desvio padrão de 0,18. Além disso, em comparação com os testes experimentais próprios, as razões dos resultados numéricos e os experimentais tiveram um erro médio de 1,08 com desvio padrão de 0,14. As comparações mostram que os modelos numéricos apresentam uma boa concordância com os resultados experimentais, podendo simular com razoável precisão o comportamento dos pilares mistos tubulares em situação de incêndio.

2.2.4 Laím *et al* (2013)

Laím *et al* desenvolveram um modelo tridimensional de elementos finitos não-linear para analisar o comportamento de pilares mistos tubulares preenchidos com concreto submetidos a carregamento axial em situação de incêndio. Nos modelos numéricos foram consideradas restrições axiais e rotacionais no topo dos pilares. A validação do modelo proposto realizou-se comparando os resultados numéricos, obtidos por meio do programa Abaqus, com os testes experimentais disponíveis na literatura e também com testes próprios.

O elemento sólido de oito nós de integração reduzida e temperatura nodal de um grau de liberdade foi o escolhido para análise térmica e estrutural, sendo ele denominado de C3D8RT. O tamanho da malha de elemento finito usada foi de 15 mm para o concreto e 25 mm para o aço. A transferência de calor da fonte do incêndio até a superfície exposta do pilar realizou-se por dois mecanismos diferentes: convecção e radiação. Foram utilizados dois tipos distintos de seções transversais: as retangulares e as circulares.

Para alcançar os objetivos da pesquisa numérica, as simulações ocorreram com duas fases distintas: a primeira foi à aplicação de carga axial e a segunda a elevação da temperatura. Desta forma fizeram uma análise termo-estrutural acoplada para simular o desempenho dos pilares mistos tubulares em situação de incêndio até que o colapso fosse atingido. As Figura 2.5 Figura 2.6 mostram exemplos de como ficaram as variações de temperatura e forças aplicadas nos pilares ao longo do tempo, fazendo em ambos os casos a comparação dos resultados numéricos com os experimentais.

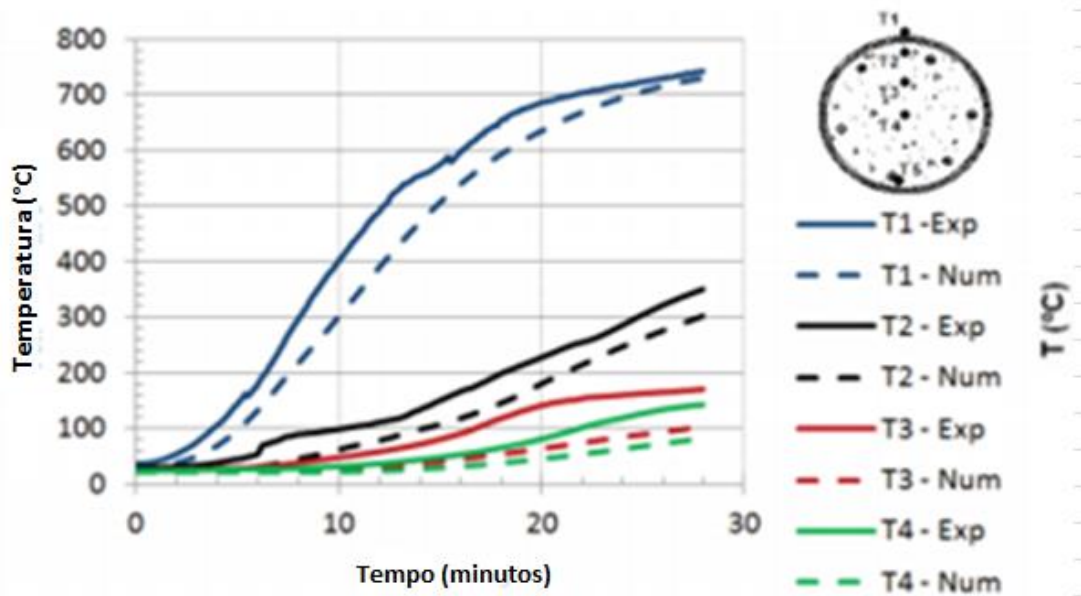


Figura 2.5 - Temperaturas na Seção Transversal de Um Pilar Misto Tubular (Adaptado de Laim et al, 2013)

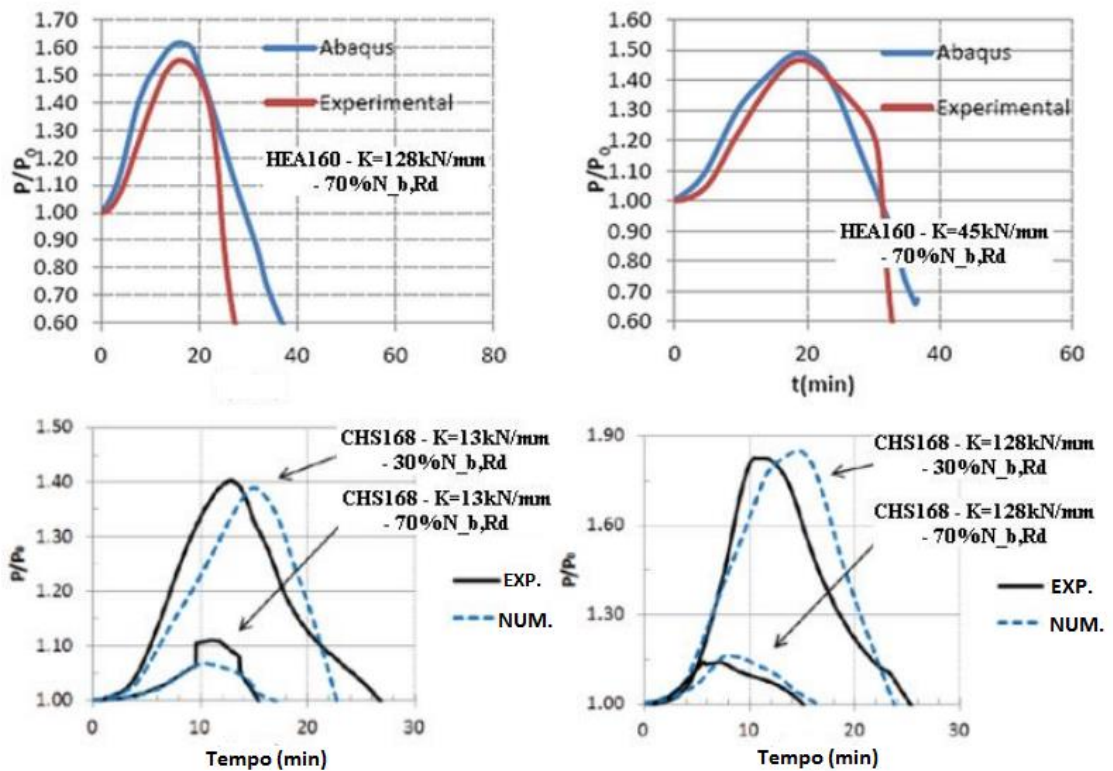


Figura 2.6 - Comparação da Evolução das Forças em Função do Tempo em Simulações Numéricas e Testes Experimentais (Adaptado de Laim et al, 2013)

Pelos gráficos pode-se perceber que foi obtida uma boa concordância dos resultados numéricos com os experimentais, tendo diferenças entorno de 10 a 20%. Apesar dos bons resultados numéricos obtidos, os autores tiveram grande dificuldade na modelagem do comportamento estrutural do concreto em situação de incêndio.

2.2.5 Pires *et al* (2013)

Pires *et al* realizaram um estudo numérico paramétrico sobre pilares mistos tubulares preenchidos com concreto em situação de incêndio, por meio do programa Abaqus, sendo validado mediante resultados de ensaios experimentais. Nos modelos numéricos foram consideradas restrições axiais e rotacionais no topo do tubo. Vários parâmetros foram considerados no estudo numérico, entre eles estão: nível de carregamento (10%, 20%, 30%, 50%, 70% e 90% do valor da capacidade resistente em temperatura ambiente), diâmetro da seção transversal, esbeltez do pilar, porcentagem de armadura e grau de preenchimento dos tubos com concreto (completamente cheio de concreto ou com um tubo dentro do tubo de aço fazendo que uma parte da seção transversal do tubo fique vazia). Nas simulações numéricas utilizaram a curva de incêndio padrão ISO 834 e imperfeições iniciais de $L/1000$.

Nas simulações numéricas realizaram primeiramente a análise térmica, posteriormente a análise estrutural com a importação dos resultados prescritos da primeira fase, assim sendo, as duas etapas aconteceram de forma desacoplada. O elemento sólido tridimensional com vinte nós e temperatura nodal de um grau de liberdade (DC3D20) foi usado no modelo térmico. Na análise estrutural, escolheu-se o elemento sólido tridimensional com vinte nós e integração reduzida (C3D20R).

A partir do estudo paramétrico, propuseram equações simplificadas para o dimensionamento dos pilares em situação de incêndio, permitindo prever com certo rigor os tempos críticos. Os autores compararam que em relação ao estudo paramétrico o método tabular é inseguro e o cálculo simplificado é conservador, sendo que estes dois métodos estão no EN 1994-1-2: 2005.

Os tempos críticos encontrados via análise numérica foram ligeiramente superiores aos dos dados experimentais, mas em 75% dos casos a diferença entre eles é menor que 5 minutos. As forças máximas de restrição tiveram diferenças de valores menores que 10% para 83,3% dos casos. Em ambas as situações, os valores numéricos apresentaram uma boa concordância com os experimentais. A Figura 2.7 a seguir mostra os tempos críticos calculados para pilares mistos tubulares preenchidos com concreto sem armaduras, em função do nível de carregamento para diferentes diâmetros de seções transversais.

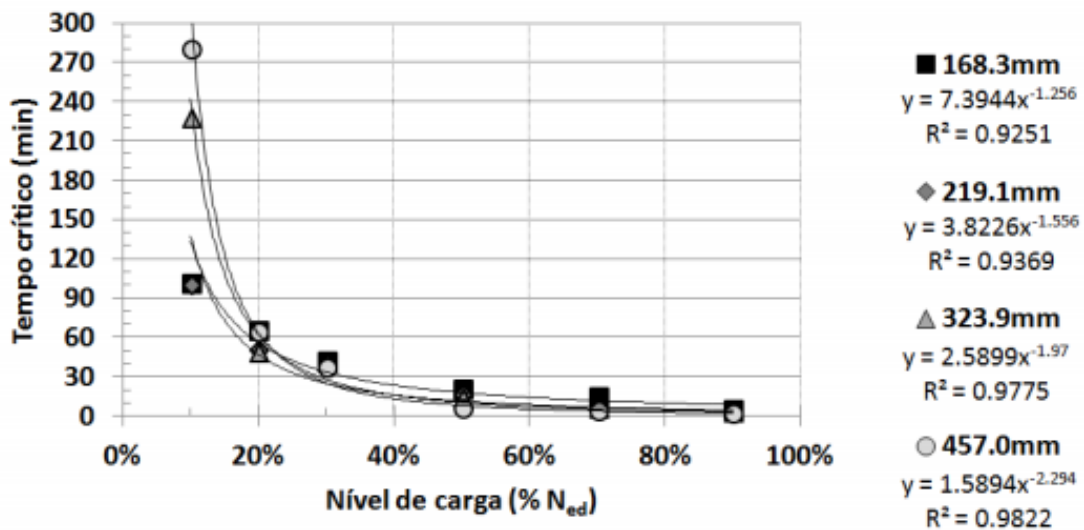


Figura 2.7 - Tempos Críticos em Função do Nível de Carregamento com uma Porcentagem de Armadura de 0% (Pires et al, 2013)

Os resultados presentes no gráfico mostram a grande influência do nível de carregamento nos tempos críticos dos pilares, sendo que quanto maior o nível de carregamento menor é o tempo crítico. O estudo paramétrico também mostrou que para níveis de carregamento entre 10 e 20% quanto maior era o diâmetro da seção transversal maior foi o tempo crítico calculado. Entretanto, independentemente do diâmetro, os pilares mistos tubulares apresentam tempos baixos e próximos entre si para níveis de carregamento acima do correspondente a 50% da temperatura ambiente.

2.2.6 Wang *et al* (2013)

Wang *et al* investigaram o comportamento de pilares mistos tubulares preenchidos com concreto submetidos a carga axial constante em situação de incêndio. Por meio do programa Abaqus, desenvolveram um modelo de elementos finitos tridimensional para realizar a transferência de calor e análise de tensão não-linear. Os resultados obtidos via análise numérica foram verificados com dados experimentais, e conclui-se que o modelo numérico pode prever com certa precisão a resistência do pilar em temperaturas elevadas.

Os pilares usados nos testes experimentais tinham o comprimento de 3810 mm, porém, somente a parte central de 3084 mm foi exposta diretamente ao incêndio sendo ela aquecida de maneira uniforme. Foi considerado imperfeições iniciais de $L/1000$. Para realizar as simulações numéricas no programa Abaqus, escolheram o elemento DC3D8 para a análise térmica e C3D8 para a análise estrutural, dessa forma essas duas etapas aconteceram de forma desacoplada.

Na análise térmica foram usadas as propriedades presentes no EN 1992-1-2:2004 para o concreto e as que estão no EN 1993-1-2:2005 para o aço. As temperaturas obtidas do modelo numérico foram comparadas com as registradas experimentalmente na superfície externa do tubo e em vários pontos do núcleo de concreto, conforme ilustra a Figura 2.8 a seguir.

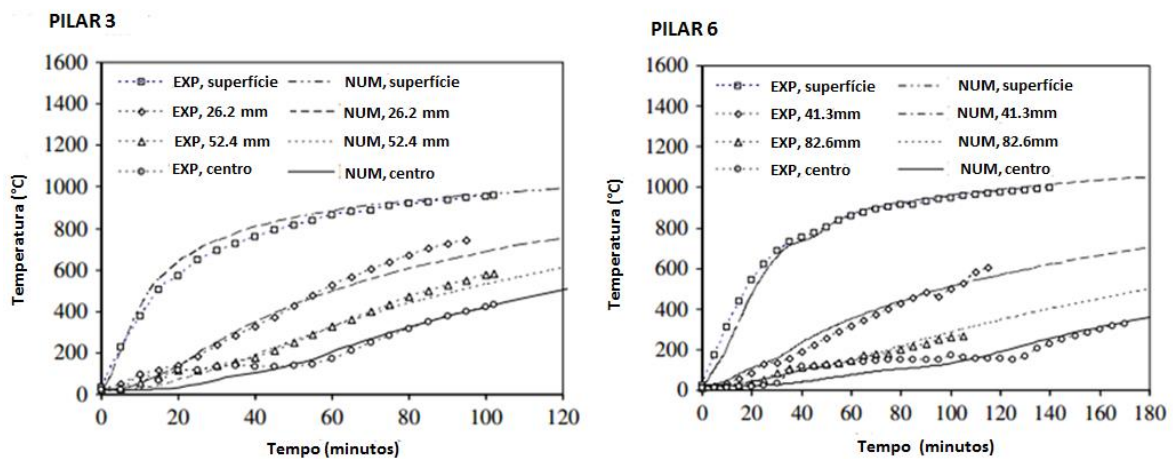


Figura 2.8 - Comparação Numérica e Experimental de Tempo-Temperatura de dois Pilares Mistos Tubulares em Função do Tempo (Adaptado de Wang et al, 2013)

Os resultados obtidos mostraram uma razoável aproximação entre os valores numéricos e experimentais, especialmente na superfície externa dos tubos de aço. Nas fases iniciais de exposição ao incêndio, em pontos mais profundos do núcleo de concreto, as leituras de temperatura experimentais foram superiores em relação às numéricas, devido presença da umidade. Numa fase posterior, quando a quantidade de umidade no concreto é quase nula, as temperaturas previstas pela análise numérica nos pontos mais internos tiveram uma boa concordância com os resultados experimentais.

Na análise estrutural testaram diferentes propriedades mecânicas dos materiais em situação de incêndio. Para ambos os materiais usou as propriedades presentes em Lie e Irwin (1995) e no EN 1994-1-2:2005, além de testar as propriedades de Poh (2001) para o aço. Tanto para o modelo do concreto como para o do aço, as propriedades presentes no EN 1994-1-2:2005 se mostraram as mais conservadoras. Nessa etapa foram comparados os tempos resistentes e os deslocamentos axiais dos pilares mistos tubulares do modelo numérico em comparação com os valores experimentais. A Figura 2.9 mostram exemplos.

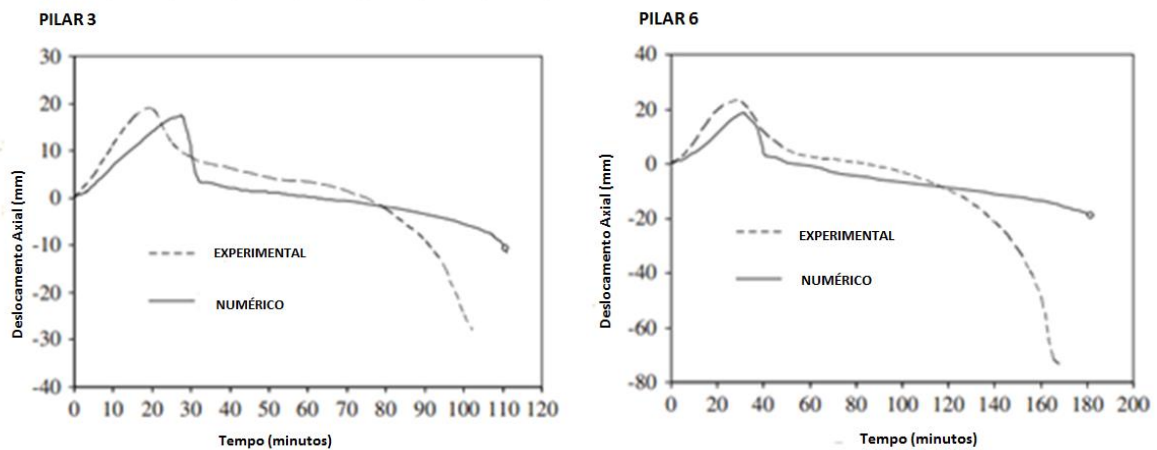


Figura 2.9 - Comparação Numérica e Experimental de Deslocamento Axial de Dois Pilares em Função do Tempo (Adaptado de Hong et al, 2009)

Apesar de existirem diferenças entre os resultados numéricos e experimentais, foram boas as concordâncias das curvas quando comparadas. Dessa forma, conseguiram prever com uma razoável precisão o comportamento mecânico dos pilares mistos tubulares em situação de incêndio.

Wang *et al* também realizaram um extenso estudo paramétrico. Neste estudo foram analisados diferentes parâmetros, entre eles: resistências ao escoamento do aço, resistência à compressão do concreto, níveis de carregamento, seções transversais (diâmetro e espessura do tubo), tipos de agregados do concreto (silicoso e calcário) e umidade presente no concreto.

2.2.7 Aguiar (2015)

Aguiar (2015) realizou um estudo teórico experimental do conector Crestbond utilizado como dispositivo de transferência de carga em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto. Ensaios experimentais de transferência de carga foram realizados para analisar o comportamento estrutural. Por meio do programa Abaqus foi desenvolvido um modelo numérico para tentar reproduzir os resultados de ensaios experimentais.

As propriedades mecânicas do Crestbond foram determinadas pelo registro do deslizamento relativo entre o tubo de aço e o núcleo de concreto, por meio de transdutores de deslocamento à medida que se elevava a força aplicada no tubo de aço. Em todos os casos, o final de cada ensaio se caracterizou por deslizamento excessivo e não por algum modo de colapso estrutural. Três diferentes seções transversais foram avaliadas, denominadas de séries: B, P e U. As

Figuras 2.10, 2.11 e 2.12 mostram a seção transversal de cada protótipo ensaiado, um gráfico com os valores resultantes de força e deslizamento obtidos para os três ensaios realizados e como ficaram os modelos numéricos.

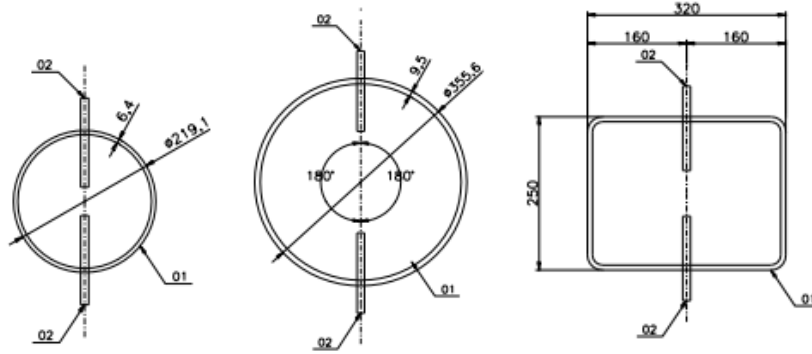


Figura 2.10 - Protótipos B, P e U Respectivamente (Aguiar, 2015)

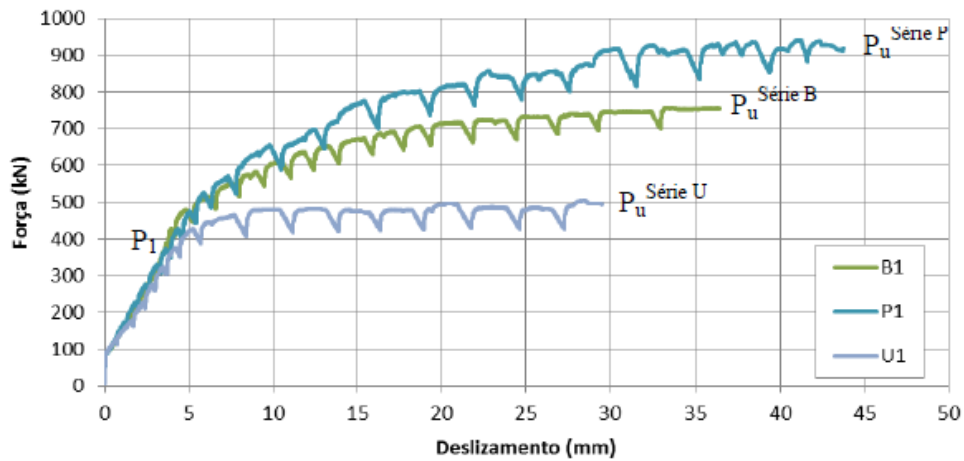


Figura 2.11 - Sobreposição das Curvas Versus Deslizamento das Séries B, P e U (Aguiar, 2015)

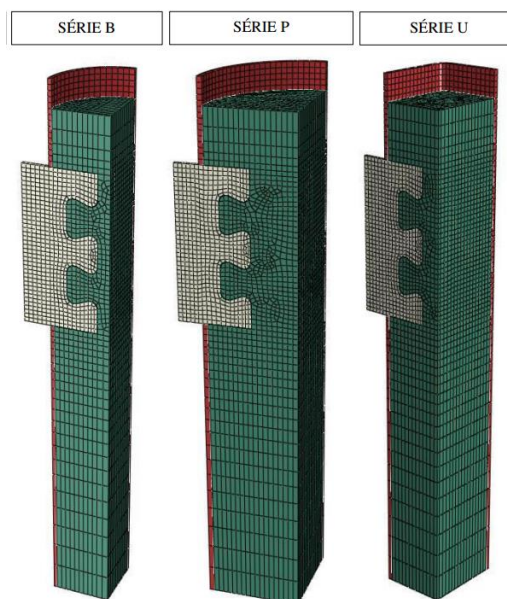


Figura 2.12 - Modelos Numéricos das Séries B, P e U (Aguiar, 2015)

Pelo gráfico é possível analisar duas fases distintas em ambos os ensaios: a primeira é linear, na qual se extraiu a rigidez (k) pela inclinação da reta. No final da etapa preliminar foi extraído o valor denominado $P1$. Nos três casos estudados os valores de $P1$ e k ficaram bem próximos, mostrando que a forma e as dimensões das seções transversais dos pilares não influenciaram de forma significativa. A segunda fase se caracterizou pelos protótipos atingirem o regime pós-linear e cada um descrever uma trajetória diferente após o término linear, até atingir um valor denominado Pu . A série U apresentou menor capacidade resistente do que as demais (neste caso com Pu próximo a $P1$), segundo Aguiar (2015) isso ocorreu pelo fato das seções retangulares não proporcionarem confinamento ao concreto. Nas séries B e P, os conectores Crestbond conseguiram resistir a cargas até 90% maiores que a correspondente ao fim do regime linear ($P1$).

O elemento linear sólido de oito nós, denominado C3D8, foi o escolhido para modelar o aço e o concreto. As forças atingidas numericamente ficaram parecidas com as obtidas experimentalmente, com diferença máxima de 7%, que comprovou que os modelos numéricos proporcionaram uma boa estimativa para encontrar a capacidade de carga do conector Crestbond em pilares mistos tubulares.

2.3 Observações do Capítulo

A partir da revisão bibliográfica foi possível conhecer e reunir diferentes trabalhos com resultados úteis para o entendimento dos principais aspectos para realização de análises numéricas com o Crestbond e a Chapa Passante em pilares mistos com o Abaqus. Não foram encontrados na literatura trabalhos sobre conectores de cisalhamento utilizados como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto em situação de incêndio. Por este motivo foi buscado e estudado trabalhos de pilares mistos tubulares, sem conectores de cisalhamento, em temperatura elevada que tratassem de análises experimentais e numéricas. A revisão bibliográfica serviu para entender quais são os principais itens e os seus valores adotados para realização de simulações numéricas, com destaque para os seguintes: como é o desenvolvimento do incêndio e o tempo de duração, sendo geralmente usados os valores presentes em curvas de incêndio como a ISO 834 e a ASTM E-119; imperfeições iniciais, sendo mais comum o valor de $L/1000$; os mecanismos de transferência de calor nos elementos estruturais que são a convecção, radiação e condução; a interação entre

os componentes estruturais durante a exposição ao incêndio, entre eles o valor de atrito e a condutância na interface entre o aço e o concreto; as propriedades térmicas e mecânicas do concreto e do aço em situação de incêndio, sendo as mais utilizadas as que estão presentes no EN 1992-1-2:2004, EN 1993-1-2:2005, 1994-1-2:2005 e em formulações de outros autores como o de Lie (1984); entre outros itens. Além destes parâmetros, o programa Abaqus mostrou ser uma importante ferramenta nas simulações numéricas, sendo utilizado na maioria das referências. Na maioria dos trabalhos, as simulações feitas pelo programa Abaqus foram realizadas em duas etapas sequenciais: primeiramente a realização da etapa térmica, usando o elemento finito DC3D8; posteriormente, com a importação das temperaturas prescritas da primeira etapa, foi realizada a análise estrutural, com o uso do elemento C3D8R. A partir dos trabalhos estudados conclui-se ser possível realizar simulações numéricas em situação de incêndio com razoável precisão, porém é uma análise complexa em que o processo envolve muitas variáveis.

3

MODELO NUMÉRICO DE PILAR MISTO TUBULAR PREENCHIDO COM CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

3.1 Considerações Iniciais

O objetivo deste capítulo é mostrar aspectos fundamentais e comuns de modelagens numéricas com o uso do programa Abaqus 6.14, para poder simular pilares mistos tubulares de aço preenchidos com concreto em situação de Incêndio. Assim sendo, os itens a seguir se prestam a descrever e explicar aspectos de natureza teórica dos modelos numéricos que tentam reproduzir resultados experimentais disponíveis na literatura. Por não ter sido encontrada nenhuma referência sobre conectores de cisalhamento usados como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos tubulares em situação de incêndio, primeiramente, o modelo numérico apresentado foi desenvolvido sem a presença de conectores. Entretanto, no capítulo seguinte é tratado o desenvolvimento de modelos numéricos de pilares mistos com a presença de conectores de cisalhamento em temperatura elevada.

3.2 Calibração de um Modelo

A calibração numérica foi realizada através da metodologia empregada por Espinos (2012), que criou modelos que simulam a aplicação de força axial de compressão em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto em situação de incêndio. As simulações foram feitas no programa Abaqus 6.14, através de duas etapas sequenciais: primeiramente a de transferência de calor e posteriormente, com a importação das temperaturas prescritas, a análise estrutural, desta forma elas são realizadas de forma desacoplada, ou seja, não acontecendo ao mesmo tempo.

3.3 Transferência de calor

No programa Abaqus, primeiramente foi realizada a análise de transferência de calor. Para poder realizar esta etapa foi necessário definir a densidade, o calor específico, a condutividade térmica, e a curva de incêndio que são os principais parâmetros que influenciam na elevação de temperatura dos materiais. A maioria das propriedades térmicas do aço e concreto são dependentes da temperatura, sendo que foram adotados os valores presentes no EN 1992-1-2:2004, EN 1993-1-2:2005 e EN 1994-1-2:2005 para estes materiais. Entretanto a norma ABNT NBR 14323:2013 fornece propriedades semelhantes ou iguais as das normas europeias.

3.3.1 Propriedades Térmicas do Aço

O EN 1993-1-2:2005 apresenta a densidade do aço independente da temperatura, sendo proposto o valor de 7850 kg/m³. Entretanto, o calor específico do aço não se apresenta constante com a variação da temperatura, apresentando um valor de pico bem mais elevado no intervalo de 730 a 740 °C. As equações 3.1 a 3.4 e a Figura 3.1 mostram como é o calor específico do aço, em J/Kg°C, conforme a variação da temperatura.

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3, \text{ para } 20^\circ \leq \theta_a < 600^\circ \quad (3.1)$$

$$c_a = 666 + 13002 / (738 - \theta_a), \text{ para } 600^\circ \leq \theta_a < 735^\circ \quad (3.2)$$

$$c_a = 545 + 17820 / (\theta_a - 731), \text{ para } 750^\circ \leq \theta_a < 900^\circ \quad (3.3)$$

$$c_a = 650, \text{ para } 900^\circ \leq \theta_a < 1200^\circ \quad (3.4)$$

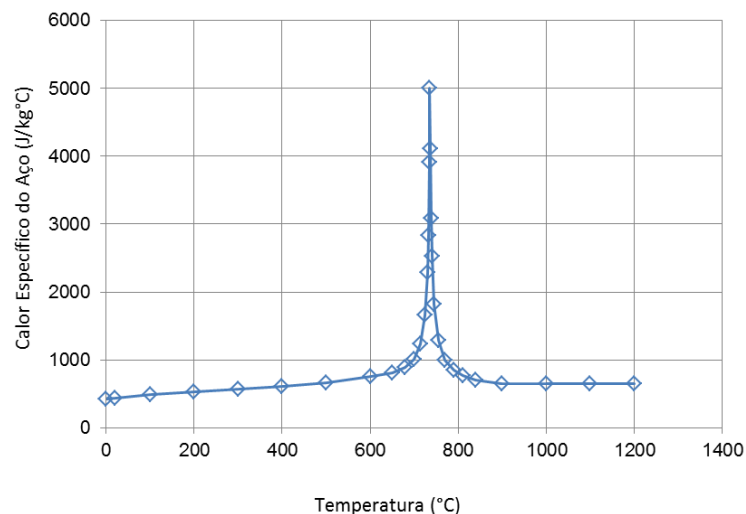


Figura 3.1 - Calor Específico do Aço (EN 1993.1.2:2005)

No intervalo de 0 a 800°C a condutividade térmica do aço diminui com o aumento de temperatura. Após atingir temperatura superior ou igual a 800°C, o aço apresenta valor de condutividade térmica constante. As Equações 3.5 e 3.6 e a Figura 3.2 mostram os valores da condutividade térmica do aço, em W/m°C, em função da temperatura.

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a, \text{ para } 20^\circ \leq \theta_a < 800^\circ \quad (3.5)$$

$$\lambda_a = 27,3 \text{ para } \theta_a \geq 800^\circ \quad (3.6)$$

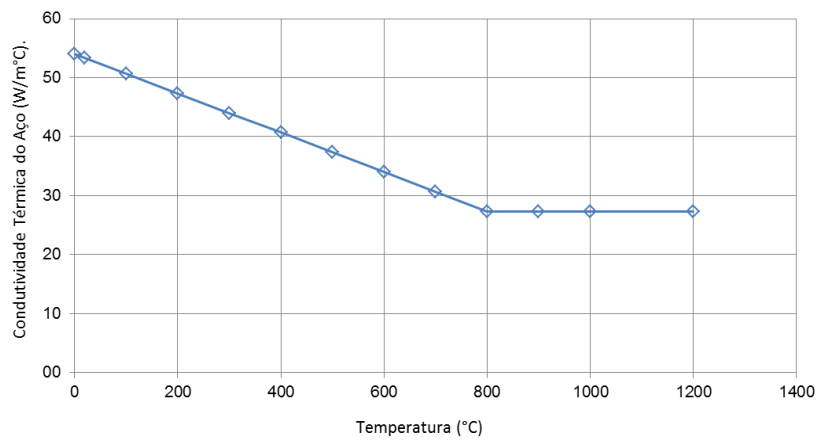


Figura 3.2 - Condutividade Térmica do Aço (EN 1993.1.2:2005)

3.3.2 Propriedades Térmicas do Concreto

A densidade do concreto em situação de incêndio depende principalmente da constituição dos materiais agregados, do teor de umidade e da magnitude da temperatura. Para a maioria dos concretos, o valor da densidade diminui gradualmente com a elevação da temperatura. Foi usado o modelo empírico apresentado na norma EN 1993-1-2:2004, que descreve a variação da densidade do concreto em função da temperatura, sendo mostrado através das equações 3.7 a 3.10 e a Figura 3.3. Foi considerada a densidade inicial do concreto de 2400 kg/m³.

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ), \text{ para } 20^\circ \leq \theta_a \leq 115^\circ \quad (3.7)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ) \left(1 - \frac{0,02(\theta - 115)}{85}\right), \text{ para } 115^\circ < \theta_a \leq 200^\circ \quad (3.8)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ) \left(0,98 - \frac{0,03(\theta - 200)}{200}\right), \text{ para } 200^\circ < \theta_a \leq 400^\circ \quad (3.9)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ) \left(0,95 - \frac{0,07(\theta - 400)}{800}\right), \text{ para } 400^\circ < \theta_a \leq 1200^\circ \quad (3.10)$$

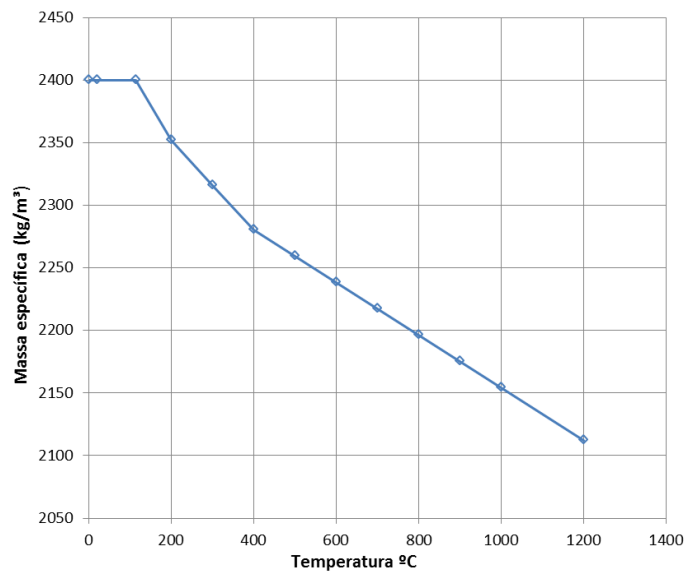


Figura 3.3 - Massa Específica do Concreto (EN 1992.1.2:2004)

A migração da água no interior do concreto afeta o processo de transferência de calor. O calor específico do concreto com agregados silicosos ou calcários pode ser modelado com um pico constante, situado entre 100°C e 115°C, conforme o EN 1992-1-2-2004 sugere. Os valores mais usuais para o teor de água são: 3% em peso com um valor de pico 2020 J/kgK e 10% teor de umidade com valor de pico de 5600 J/kgK. A Figura 3.4 mostra como é a variação do calor específico do concreto em função da temperatura.

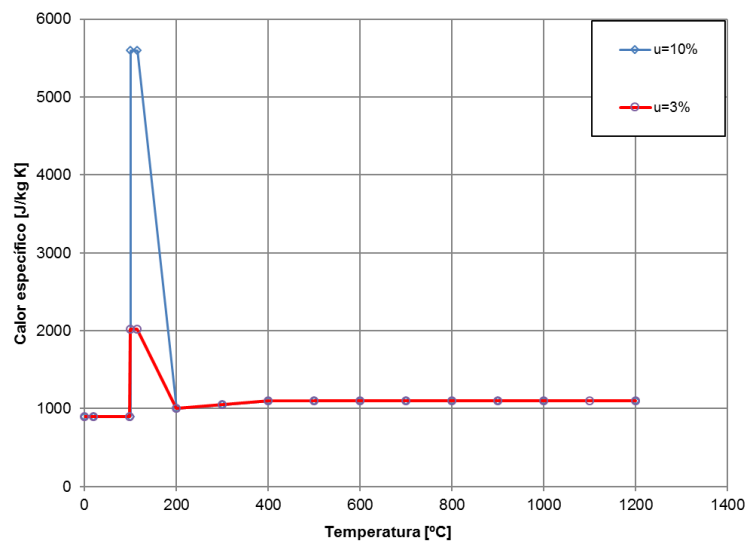


Figura 3.4 - Calor Específico do Concreto (EN 1992.1.2:2004)

O EN 1994-1-2:2005 define que no intervalo de 20 a 1200°C, a condutividade térmica do concreto, definida em W/m°C, diminui com o aumento de temperatura, sendo ela definida pelas Equações 3.11 e 3.12.

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0,0107 \left(\frac{\theta_c}{100} \right)^2 \quad (3.11)$$

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0,0057 \left(\frac{\theta_c}{100} \right)^2 \quad (3.12)$$

Essas equações definem, respectivamente, um limite superior e um inferior para a condutividade térmica do concreto. A norma EN 1994-1-2:2005 recomenda que o limite superior seja utilizado para as estruturas mistas de aço e concreto, sendo, portanto, a curva escolhida neste trabalho. A Figura 3.5 mostra como são essas duas curvas que definem a condutividade térmica do concreto em função da temperatura.

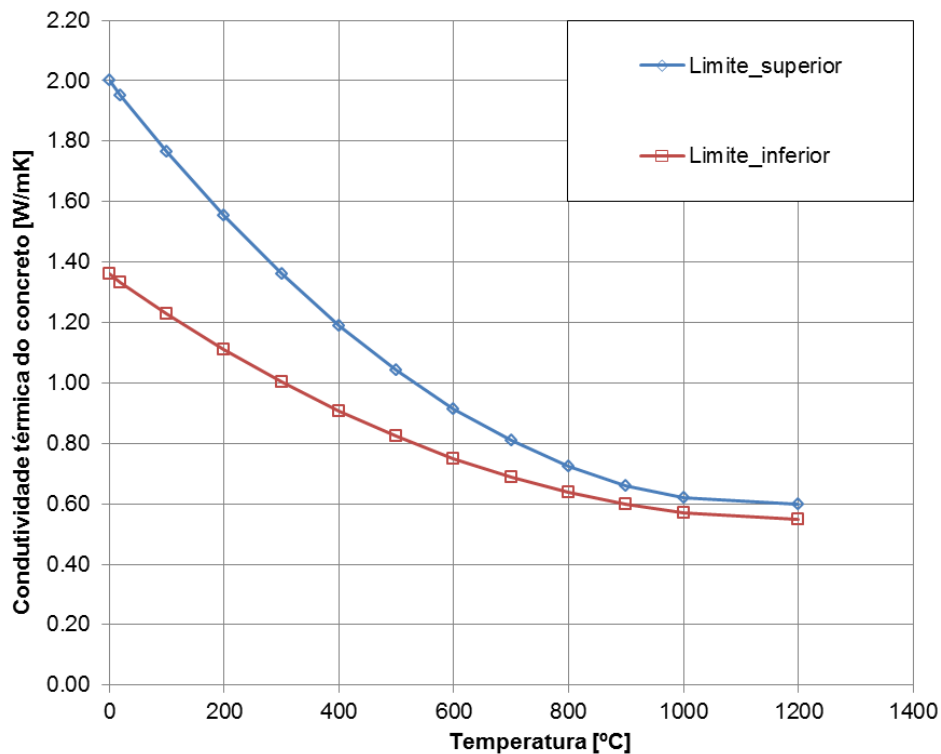


Figura 3.5 - Condutividade Térmica do Concreto (EN 1994.1.2:2005)

3.3.3 Curva Padrão de Incêndio

Espinos (2012) usou as curvas ISO 834 e a ASTM E-119, que estão entre as mais utilizadas na literatura. A Figura 3.6 mostra como são essas curvas.

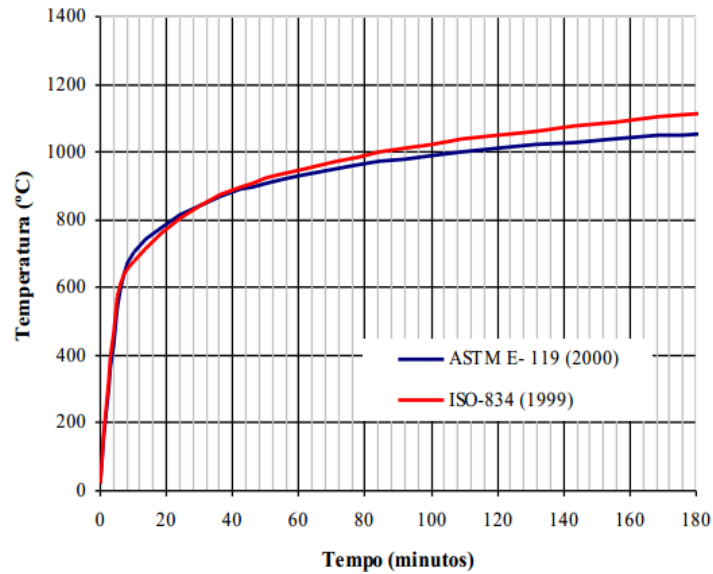


Figura 3.6 - Comparação de Curvas de Incêndio (Junior, 2012)

Neste trabalho foi escolhida a curva fornecida pela ABNT NBR 14432:2001, que tem a mesma formulação da ISO 834. A curva-padrão de incêndio fornecido pela norma brasileira apresenta valores de temperatura bem próximos da ASTM E-119 nos 60 primeiros minutos, após isso ela apresenta temperaturas mais elevadas do que os valores fornecidos pela outra curva. A Equação 3.13 e a mostram como a curva escolhida descreve a elevação da temperatura em função do tempo.

$$\theta = 345 \log(8t+1), \quad (3.13)$$

onde,

θ : Temperatura em °C;

t: Tempo em segundos.

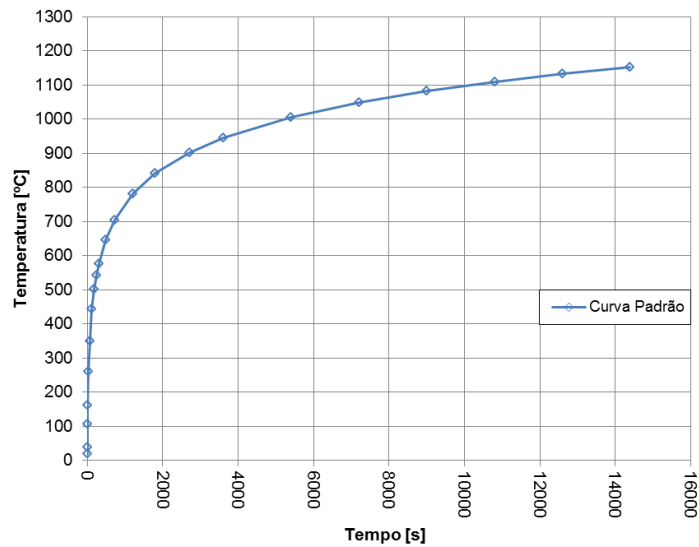


Figura 3.7 - Curva-Padrão de Incêndio da ABNT NBR 14432:2001.

3.3.4 Transferência de Calor

Por meio da radiação e convecção, é realizada a transferência de calor da fonte do incêndio até a superfície externa exposta do pilar misto tubular. Para realizar essa etapa no programa Abaqus, é mostrado a seguir quais são as variáveis que são usadas e os respectivos valores adotados.

- Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície exposta: $h = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Constante de Stephan-Boltzmann: $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
- Emissividade da superfície exposta: $\varepsilon_m = 0,7$
- Emissividade do fogo: $\varepsilon_f = 1,0$
- Temperatura inicial: $\theta_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Valor absoluto da temperatura: $\theta_{\text{abs}} = -273 \text{ }^\circ\text{C}$

A condução térmica é o mecanismo de transferência de calor que ocorre internamente nos materiais e na interface quando diferentes materiais estão em contato entre si. Este mecanismo de transferência de calor é o processo de transferência de energia através de um meio material,

sem transporte de matéria. A energia térmica se propaga de partícula para partícula do meio. O fluxo de calor sempre ocorre a partir de uma região de maior temperatura para uma região de menor temperatura. Internamente nos materiais, a mudança de temperatura depende do calor específico e da condutividade térmica, apresentados neste capítulo para o aço e o concreto. Na interface entre os materiais pode-se considerar duas maneiras diferentes de transferência de calor: uma considerando a condução perfeita de calor; e a outra usando o coeficiente condutância de térmica de (h_j) igual a $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ na interface aço-concreto, conforme é adotado por Espinos (2012).

3.3.5 Elemento Finito

Por se tratar apenas de transferência de calor em pilares mistos tubulares, nesta parte da calibração numérica, foi escolhido no programa Abaqus o elemento sólido de oito nós e temperatura nodal de um grau de liberdade denominado DC3D8, conforme mostra a Figura 3. Este tipo de elemento finito é utilizado na malha para análise térmica do tubo de aço e do núcleo de concreto. As Figuras 3.8 e 3.9 mostram um exemplo ilustrativo de como fica a malha de elementos finitos em um pilar misto tubular preenchido com concreto.

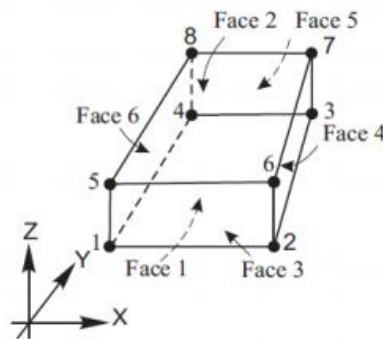


Figura 3.8 - Elemento Finito DC3D8 (Modificado de ABAQUS MANUAL 6.9)

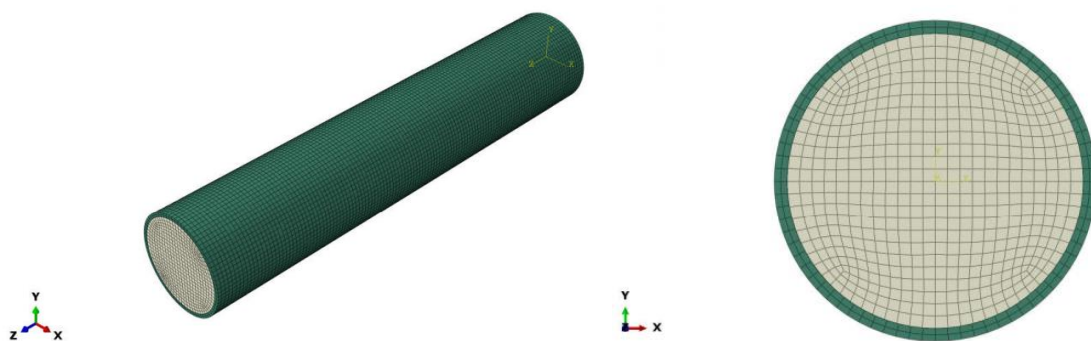


Figura 3.9 - Pilar Misto Tubular Preenchido com Concreto no Abaqus

3.3.6 Validação do Modelo Numérico

O modelo foi calibrado comparando os resultados numéricos com dados experimentais disponíveis na literatura. A validação foi realizada comparando-se a evolução da temperatura nas simulações numéricas, ao longo do tempo de exposição ao fogo, com os valores obtidos em ensaios.

O pilar número 3 de Wang (2013) foi o escolhido para mostrar os resultados da calibração numérica e ele tem a seguinte geometria: diâmetro externo de 219,1 mm e a espessura do tubo de 4,78 mm. A escolha dessa seção transversal baseou-se no fato de que o autor analisou quatro pontos na seção transversal, conforme mostra a Figura 3.10, o que foi possível avaliar diferentes pontos do núcleo de concreto ao longo do tempo de exposição ao incêndio. Para verificar como ocorre a transferência de calor na interface entre o tubo de aço e o núcleo de concreto foi assumido duas condições diferentes: a condução perfeita de calor e o coeficiente de condutância térmica (h_j) igual a 200 W/m²K. A umidade considerada do concreto foi de 3%. Para a definição do tamanho da malha de elementos finitos utilizada, foi feito o refinamento até que proporcionasse valores que tornassem o modelo numérico calibrado com testes experimentais disponíveis na literatura. Após a simulação com diferentes tamanhos, chegou-se a conclusão que o valor de 10 mm atende de forma satisfatória a simulação numérica de transferência de calor para esse caso. As Figuras 3.11 e 3.12 fazem a comparação entre as temperaturas medidas experimentalmente e as obtidas numericamente no Abaqus.

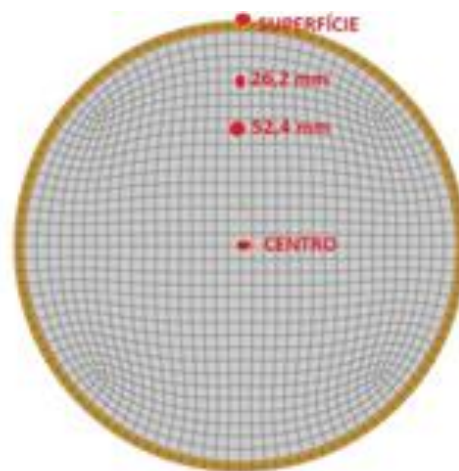


Figura 3.10 - Malha na Seção Transversal do Modelo Numérico

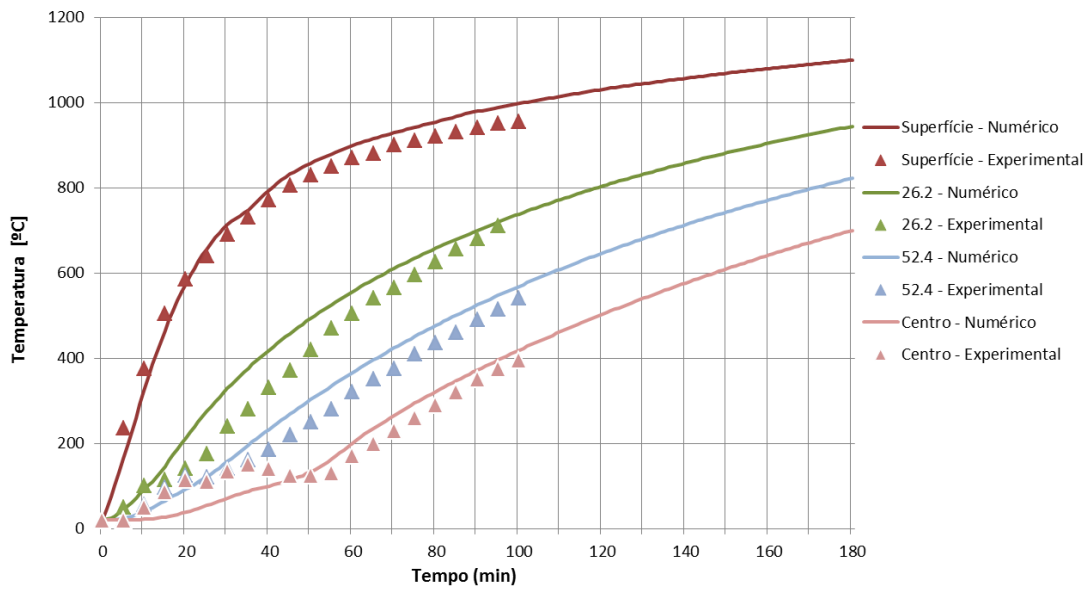


Figura 3.11 - Transferência de Calor com a Condução Perfeita de Calor na Interface Aço-Concreto

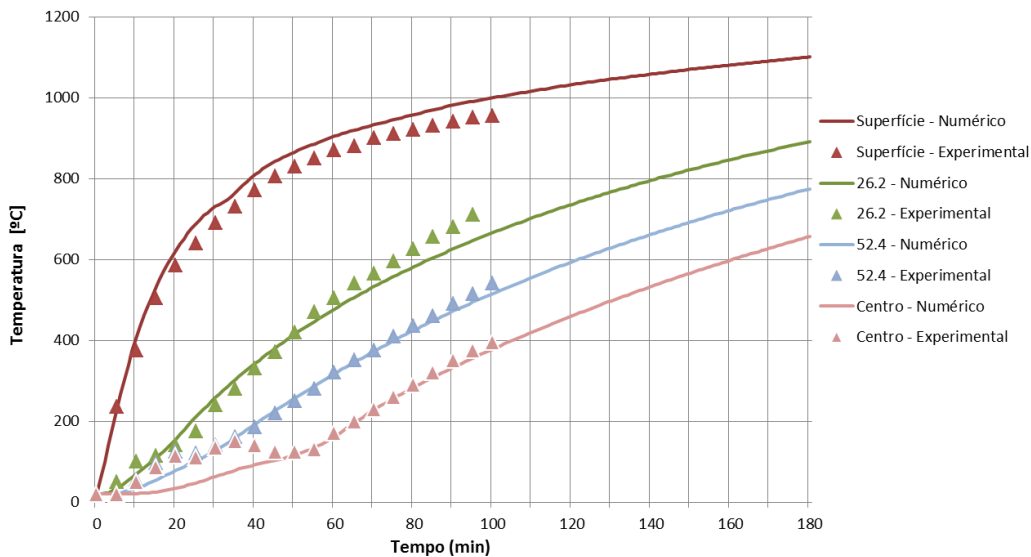


Figura 3.12 - Transferência de Calor por condução com o coeficiente condutância térmica (h_j) igual a 200 W/m^2K na Interface Aço-Concreto

Nota-se que usando o coeficiente de condutância térmica de 200 W/m^2K na interface aço concreto, os resultados numéricos ficaram mais próximos dos valores experimentais do que os obtidos com uso da condução perfeita de calor. Por esse motivo vai ser adotado neste trabalho o coeficiente de condutância térmica de 200 W/m^2K na interface aço e concreto. Além disso, pelos gráficos é possível concluir que a elevação da temperatura no modelo numérico segue, na maior parte da exposição ao incêndio, com uma boa precisão os resultados experimentais. A principal exceção é no intervalo de 100 a 200 $^{\circ}C$ nos pontos mais internos do núcleo de concreto. Isso se deve à evaporação da água e transferência de massa que ocorre no concreto e que é simulado de maneira aproximada com a modificação do calor específico.

3.4 Análise Estrutural

Após a realização da análise de transferência de calor no programa Abaqus, realizou-se a análise estrutural com a importação dos resultados numéricos obtidos na primeira etapa. O coeficiente de expansão térmica, o módulo de elasticidade e as relações de tensão-deformação são propriedades dos materiais que podem variar ao longo do tempo de exposição ao incêndio e sendo eles importantes parâmetros que influenciam na capacidade resistente do pilar misto. Nesta etapa é utilizada as propriedades mecânicas apresentadas no 1993-1-2:2005 para o aço. Para o concreto são usadas as que estão no 1992-1-2:2004 e a formulação de Lie (1984).

3.4.1 Propriedades Mecânicas do Aço e Modelo Constitutivo no Abaqus

O EN 1993-1-2:2005 sugere para o aço um coeficiente simplificado de expansão térmica independente da temperatura, com o valor de $\alpha_a = 14 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Porém, o módulo de elasticidade e as relações tensão-deformação são dependentes da temperatura, sendo que essas propriedades são definidas através dos seguintes fatores de redução: resistência ao escoamento ($k_{y,\theta}$); limite proporcional relativo ao valor à temperatura ambiente ($k_{p,\theta}$); módulo de elasticidade ($k_{E,\theta}$). Todos esses fatores têm valores dependentes da temperatura, conforme mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Fatores de redução do aço

Temperatura do aço θ_a - ($^\circ\text{C}$)	Fatores de Redução da Temperatura do Aço (θ_a) relativo aos valores de f_y e os de E_a em relação a 20°C		
	Fator de redução para o limite de escoamento - $k_{y,\theta}$	Fator de redução do limite de proporcionalidade do aço do perfil em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente - $k_{p,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade - $k_{E,\theta}$
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	0,038	0,068
1000	0,040	0,025	0,045
1100	0,020	0,013	0,023
1200	0,000	0,000	0,000

Para valores intermediários da temperatura do aço pode ser feita interpolação linear.

As relações que descrevem os fatores de redução são mostradas nas Equações 3.14, 3.15 e 3.16 a seguir:

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (3.14)$$

onde,

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

f_y : é a resistência ao escoamento do aço a 20°C;

$$k_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{f_y} \quad (3.15)$$

onde,

$f_{p,\theta}$: é a resistência correspondente ao limite de proporcionalidade do aço na temperatura θ_a ;

f_y : é a resistência ao escoamento do aço a 20°C;

$$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a} \quad (3.16)$$

onde,

$E_{a,\theta}$: módulo de elasticidade do aço a uma temperatura θ_a ;

E_a : módulo de elasticidade do aço a 20°C.

Através das relações dos fatores de redução, a norma EN 1993-1-2:2005 estabelece, conforme mostra a Tabela 3.2, como descrever as curvas de tensão-deformação do aço por temperatura.

Tabela 3.2 - Relação dos parâmetros do modelo matemático do diagrama tensão-deformação presente no EN1992-1-2:2004

Domínio de extensões	Tensão σ	Módulo tangente		
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$		
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + (b/a) \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}}$		
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0		
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} \left[1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}) \right]$	-		
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00	-		
Parâmetros	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$	$\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$	$\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$	$\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$
Funções	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c / E_{a,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$			

Através dessas relações, a Figura 3.13 mostra as curvas de tensão-deformação do aço para diferentes temperaturas. Foi usado o valor da resistência ao escoamento de aço (f_y) de 345 MPa e o valor do módulo de elasticidade (E_s) de 200 GPa, porque são os valores usados no modelo numérico do próximo capítulo. O valor do coeficiente de Poisson (ν) usado é 0,3.

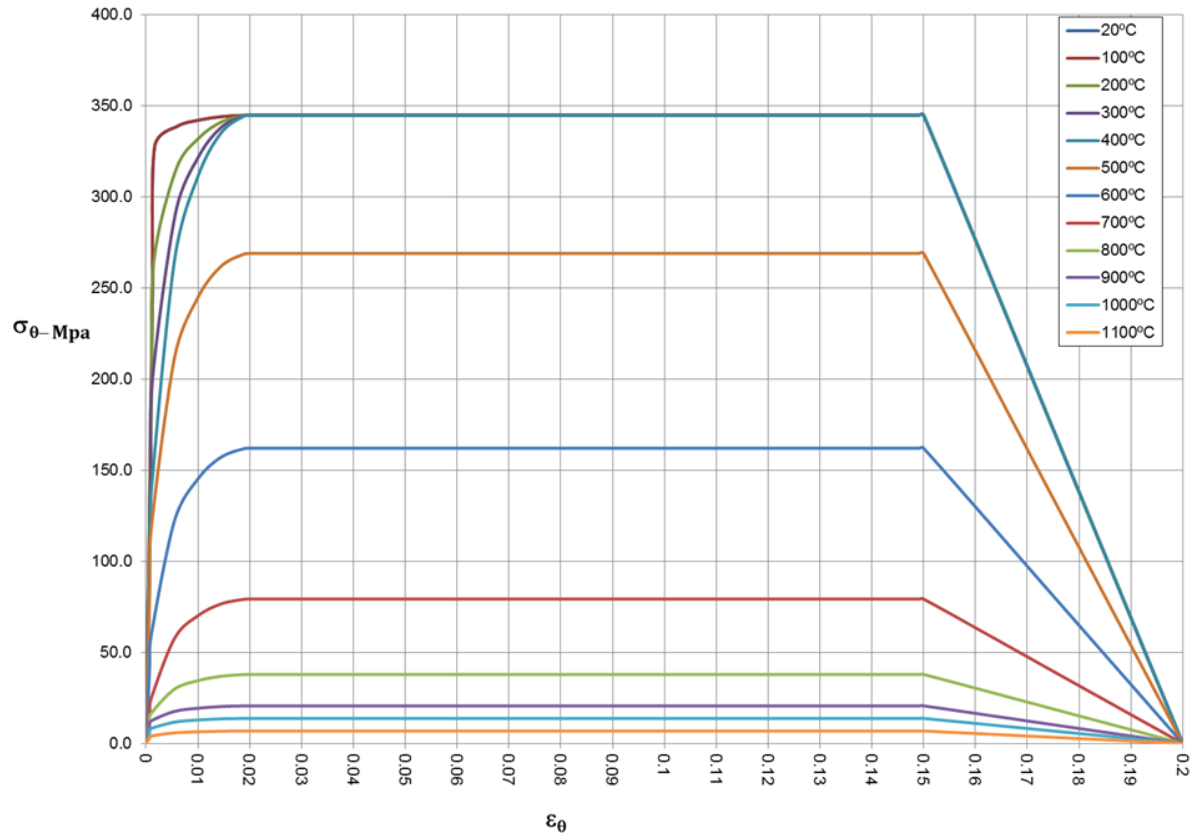


Figura 3.13 - Curvas de Tensão-Deformação para o Aço em Diferentes Temperaturas Pela Formulação Presente no EN 1993-1-2:2005

Para representar o comportamento do aço, foi utilizado o modelo constitutivo elastoplástico clássico de Von Mises. Para configurar esse modelo é necessário apenas fornecer a relação tensão-deformação do material, ou seja, usando as deformações elásticas e plásticas de forma separada.

3.4.2 Propriedades Mecânicas do Concreto e Modelo Constitutivo no Abaqus

O valor simplificado do coeficiente de expansão térmica do concreto sugerido pelo EN 1992-1-2:2004, que é $\alpha_a = 18 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, não foi o adotado. Foi utilizado o valor $\alpha_c = 6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ que é o valor sugerido por Varma (2009) e o adotado nos modelos numéricos de Espinos (2012).

Na análise estrutural foram estudadas duas formulações diferentes para o concreto: a que está presente na norma EN 1992-1-2:2004 e a proposta por Lie (1984), conforme é sugerido por Espinos (2012). Em ambos os casos as relações tensão-deformação do concreto são propriedades dependentes da temperatura. O valor do coeficiente de Poisson (ν) usado é 0,2.

A norma EN 1992-1-2:2004 prevê a seguinte formulação de tensão-deformação do concreto em função da temperatura conforme mostra as Equações 3.17 e 3.18 e a Figura 3.14.

$$\text{Para } \varepsilon_{c,\theta} \leq \varepsilon_{c1,\theta}, \sigma_{c,\theta} = \frac{3 \cdot \varepsilon_{c,\theta} \cdot f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \cdot \left[2 + \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right]} \quad (3.17)$$

$$\varepsilon_{c1,\theta} \leq \varepsilon_{c,\theta} \leq \varepsilon_{cu1,\theta} \text{ pode utilizar modelo linear ou não linear} \quad (3.18)$$

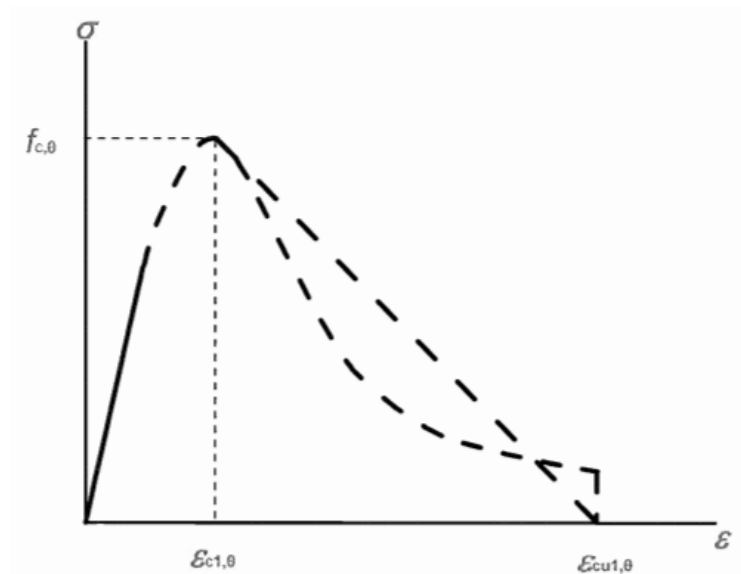


Figura 3.14 - Curva Característica de Tensão-Deformação para o Concreto em Situação de Incêndio (EN 1992-1-2:2004)

A Tabela 3.3 mostra os valores de $f_{c,\theta}/f_{ck}$, $\varepsilon_{c1,\theta}$ e $\varepsilon_{cu1,\theta}$ do concreto silicioso que estão presentes na norma EN 1992-1-2:2004 e que são os adotados neste trabalho.

Tabela 3.3 - Parâmetros de Tensão-Deformação do concreto em função da Temperatura (EN 1992-1-2:2004)

Temperatura do Concreto - θ	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\varepsilon_{c1\theta}$	$\varepsilon_{cu\theta}$
20	1.00	0.00250	0.02000
100	1.00	0.00400	0.02250
200	0.95	0.00550	0.02500
300	0.85	0.00700	0.02750
400	0.75	0.01000	0.03000
500	0.60	0.01500	0.03250
600	0.45	0.02500	0.03500
700	0.30	0.02500	0.03750
800	0.15	0.02500	0.04000
900	0.08	0.02500	0.04250
1000	0.04	0.02500	0.04500
1100	0.01	0.02500	0.04750
1200	0.00	-	-

A Figura 3.15 a seguir mostra as diferentes curvas de tensão-deformação em função da temperatura para um concreto com f_c de 40 MPa (valor usado no modelo numérico do próximo capítulo).

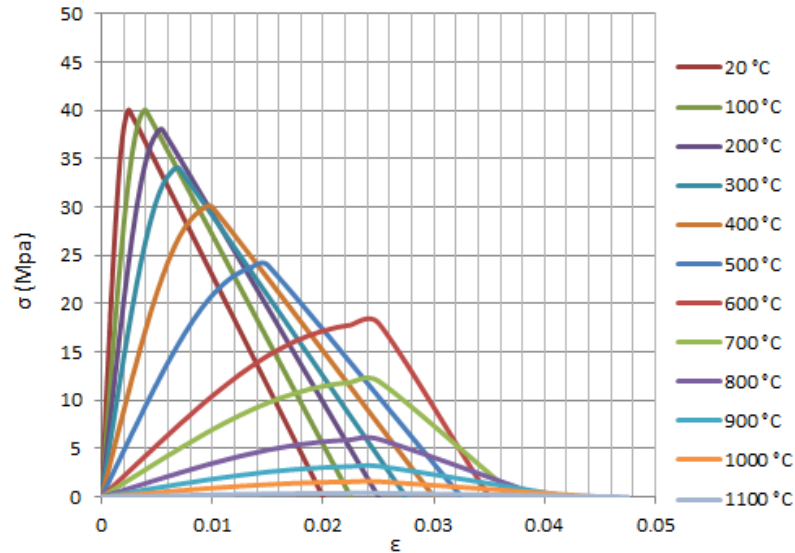


Figura 3.15 - Curvas de Tensão-Deformação para o Concreto em Diferentes Temperaturas pela formulação presente no EN 1992-1-2:2004

A outra formulação avaliada neste trabalho para o concreto é a de Lie (1984). Ela prevê as seguintes relações, conforme mostras as Equações 3.19 a 3.24, de tensão-deformação para o concreto em função da temperatura.

$$\text{Para } \varepsilon_c \leq \varepsilon_{m\acute{a}x} : f_c = f_{c'} \cdot \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_{m\acute{a}x} - \varepsilon_c}{\varepsilon_{m\acute{a}x}} \right) \right] \quad (3.19)$$

$$\text{Para } \varepsilon_c \geq \varepsilon_{m\acute{a}x} : f_c = f_{c'} \cdot \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{m\acute{a}x}}{3 \cdot \varepsilon_{m\acute{a}x}} \right) \right] \quad (3.20)$$

onde,

$$- \varepsilon_{m\acute{a}x} = 0,0025 + (6,0 \cdot \theta + 0,04 \cdot \theta^2) \cdot 10^{-6} \quad (3.21)$$

$$- f_c = f_{c'}, \text{ para } 0^\circ C \leq \theta_c \leq 450^\circ C \quad (3.22)$$

$$- f_c = f_{c'} \cdot \left[2,011 - 2,353 \cdot \left(\frac{\theta - 20}{1000} \right) \right], \text{ para } 450^\circ C < \theta_c \leq 874^\circ C \quad (3.23)$$

$$- f_{c'} = 0, \text{ para } \theta_c > 874^\circ C \quad (3.24)$$

A Figura 3.16 a seguir mostra as curvas de tensão-deformação para as diferentes temperaturas pelo modelo de Lie (1984). O valor do f_{ck} mostrado é de 40 MPa.

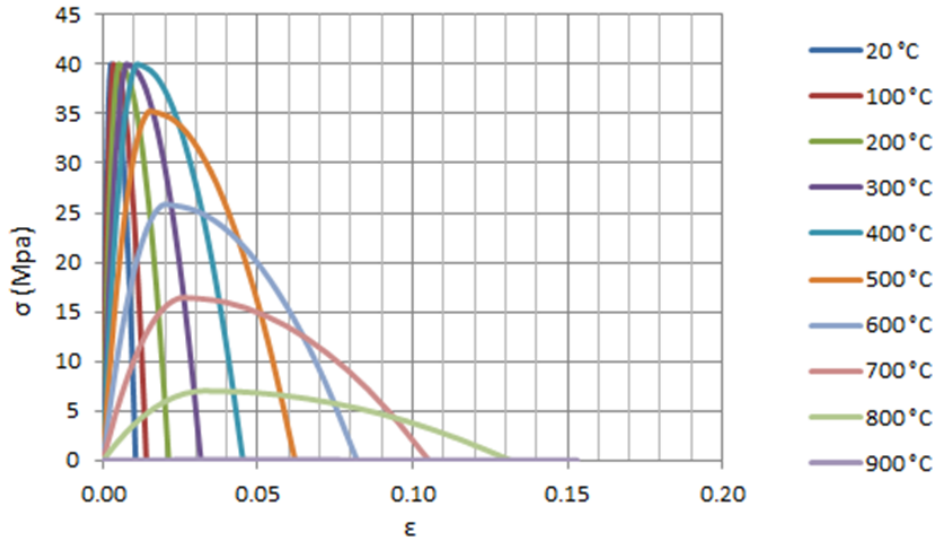


Figura 3.16 - Curvas de Tensão-Deformação para o Concreto em Diferentes Temperaturas pela formulação presente em Lie (1984)

A Figura 3.17 compara as curvas de tensão-deformação para diferentes temperaturas usando as formulações presentes no EN 1992-1-2:2004 e de Lie (1984).

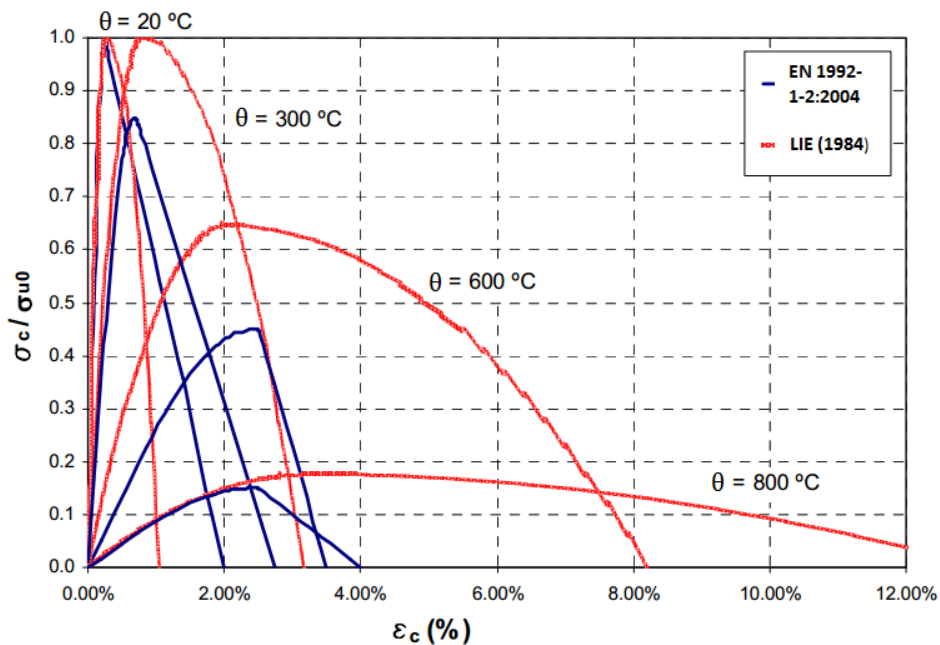


Figura 3.17 - Comparação de Curvas de Tensão-Deformação para o Concreto em Diferentes Temperaturas Presente no EN 1992-1-2:2004 e no Modelo de Lie (1984) (Adaptado de Espinos, 2012)

O modelo de Lie (1984), quando comparado com o do EN 1992-1-2:2004, atinge deformações maiores à medida que a temperatura aumenta. Isto é devido ao fato de que o modelo de Lie (1984) explica a deformação plástica do concreto em situação de incêndio prevendo um comportamento mais dúctil do que o EN 1992-1-2:2004. A resistência à compressão no modelo de Lie reduz-se com o aumento de temperatura a um ritmo mais lento, permanecendo igual ao valor da temperatura ambiente até 400 °C, quando começa a diminuir.

Utilizou-se o modelo constitutivo *Concrete Damage Plasticity* para o concreto. Esse modelo permite simular a perda de rigidez do concreto após se atingir o ponto de sua resistência máxima. Além disso, ele tem o propósito de considerar comportamentos característicos de materiais frágeis como concreto, permitindo simular, entre outras, as seguintes características do concreto:

- Resistência à tração em torno de 10 vezes menor que à compressão;
- Dano irreversível associado a fissuras em baixas tensões de confinamento;
- Colapso da microestrutura porosa do concreto por compressão quando sob suficiente confinamento;
- Critério de escoamento em estado triaxial de tensões associado à pressão hidrostática.

No programa Abaqus é necessário fornecer parâmetros para configurar o modelo constitutivo de compressão do concreto. Tentou-se utilizar os mesmos parâmetros usados por Espinos (2012), porém nem todos os valores foram fornecidos. Por esse motivo, buscou-se na literatura outros valores, mas não foi possível encontrar todos os valores em único trabalho em situação de incêndio. Dessa forma, também foi baseado nos valores usados por Prates (2015). Diferentes valores foram testados com o intuito de avaliar a influência no modelo numérico, sendo que os valores definidos para calibração são:

- Parâmetro para definição da superfície de escoamento (K): 0,8;
- Parâmetro que estabelece a razão entre as tensões de escoamento em estados biaxial e estado uniaxial (σ_{B0}/σ_{C0}): 1,16.
- Ângulo de dilatância (ψ): 36° ;
- Parâmetro de viscosidade (μ): 0,1

Tração no Concreto

A resistência à tração do concreto costuma ser ignorada, o que mostra ser uma razoável suposição. Mas no EN 1992-1-2:2004 considera a resistência à tração. Em situação de incêndio, a resistência à tração característica do concreto ($f_{ck,t}$) é reduzido por um coeficiente $k_{c,t}$, que é fornecido pelas Equações 3.25, 3.26 e 3.27. A Figura 3.18 ilustra a a variação do Coeficiente $k_{c,t}$ em função da temperatura.

$$k_{c,t} = 1, \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 100^\circ\text{C} \quad (3.25)$$

$$k_{c,t} = 1 - (\theta_c - 100)/500, \text{ para } 100^\circ\text{C} < \theta_c \leq 600^\circ\text{C} \quad (3.26)$$

$$\text{Sendo, } f_{ck,t}(\theta_c) = k_{c,t}(\theta_c)f_{ck,t} \quad (3.27)$$

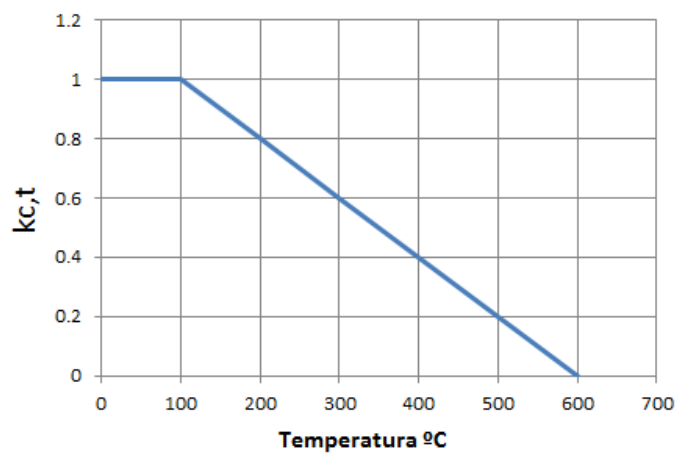


Figura 3.18 - Coeficiente $k_{c,t}$ em Função da Temperatura (EN 1992-1-2:2004)

O comportamento à tração uniaxial em domínio plástico pode ser definido no Abaqus através de uma relação tensão-deformação como é ilustrado na Figura 3.19.

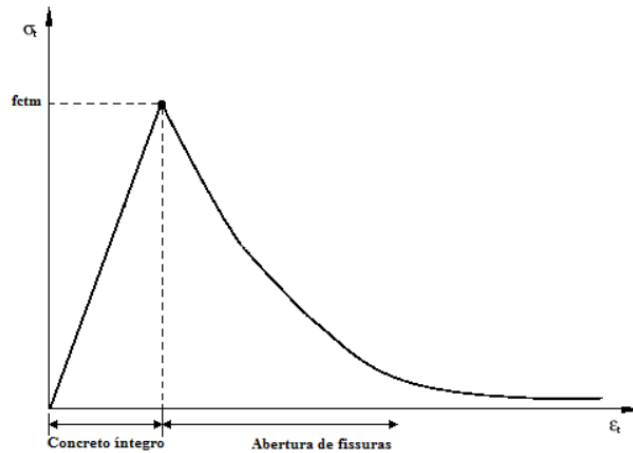


Figura 3.19 - Curva Representativa do Concreto Tracionado no Modelo Numérico (Aguiar, 2015)

Entretanto, segundo SIMULIA (2010), esse método muitas vezes gera resultados sensíveis à malha. Por esse motivo o Abaqus disponibiliza uma opção adicional, o critério de energia de fratura. Adotando esse critério, o comportamento frágil do concreto passa a ser caracterizado por meio da relação tensão-deformação, sendo o deslocamento a própria abertura da fissura depois de ultrapassada a tensão f_{ctm} . Segundo a documentação do Abaqus, os pares dessa curva tensão-deslocamento pós-pico podem ser satisfatoriamente definidos conforme a Tabela 3.4. (PRATES 2015).

Tabela 3.4 - Pares Ordenados Para a Definição do Comportamento Pós-Crítico do Concreto à Tração

σ_t (Mpa)	u (mm)
f_{ctm}	0.00
$0,60f_{ctm}$	0.05
$0,30f_{ctm}$	0.15
$0,05f_{ctm}$	0.50

O valor da resistência à tração (f_{ctm}), segundo a ABNT NBR 6118:2014 é expressa pelas Equações 3.28 e 3.29:

$$f_{ctm} = 0,3f_{ck}^{2/3} \quad (3.28)$$

onde,

$$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ (MPa)} \quad (3.29)$$

Com o uso do valor de resistência a tração (f_{ctm}) juntamente com coeficiente $k_{c,t}$, que depende da temperatura, é definido os gráficos de tensão-deslocamento para o concreto em situação de incêndio, conforme mostrado na Figura 3.20. O valor do f_{cm} usado é de 40 MPa.

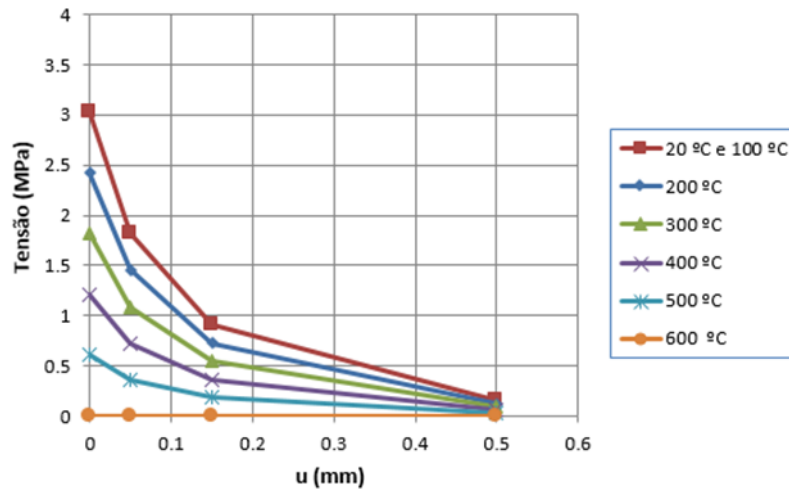


Figura 3.20 - Curvas de Tensão-Deslocamento de Tração no Concreto em Situação de Incêndio

3.4.3 Elemento Finito

Por se tratar de análise estrutural em pilares mistos tubulares nesta parte da calibração numérica, foi escolhido no programa Abaqus o elemento sólido de oito nós e integração reduzida, denominado C3D8R, conforme mostra a Figura 3.21. Esse tipo de elemento finito é utilizado na malha térmica do tubo de aço e do núcleo de concreto.

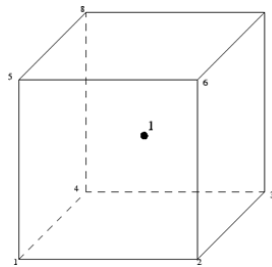


Figura 3.21 - Elemento Finito C3D8R

3.4.4 Condições de Contorno e Carregamento

O modelo numérico estudado por Espinos (2012) é constituído por um tubo de aço circular preenchido com concreto e por uma placa de carregamento no topo do pilar. A Figura 3.22 mostra como é o modelo numérico.



Figura 3.22 - Pilar Tubular Misto com Placa de Carregamento (Adaptado de Espinos, 2012)

O topo do pilar, que está conectado com uma placa de carregamento, foi deixado livre para deslocar verticalmente. A base do pilar foi impedida de deslocar verticalmente e horizontalmente. A placa de carregamento foi considerada um corpo rígido, com a única função de transferir carga tanto para o tubo de aço como para o núcleo de concreto. Foi aplicada uma carga concentrada axial de compressão na placa de carregamento, exatamente na direção do ponto central da seção transversal do pilar.

3.4.5 Contato

Uma vez criadas as partes constituintes do modelo numérico, é necessário definir como será a interação entre elas. O contato entre o tubo de aço e o núcleo de concreto é feito por contato normal e atrito tangencial entre as superfícies. Segundo Espinos (2012) o valor entre 0,3 e 0,8 para o atrito tangencial não interfere nos resultados numéricos. Foi escolhido o valor de 0,55 por ser a média entre os dois valores. A placa de carregamento e o tubo de aço são partes que estão unidas e não se separam, por este motivo considerou-se duas partes soldadas, usando a *constraint Tie* no Abaqus.

3.4.6 Validação do Modelo Numérico

Para validação da análise estrutural, realizou-se a calibração de modelos numéricos que simulam ensaios experimentais que estão disponíveis na literatura. Foram escolhidos três modelos numéricos reproduzidos por Espinos (2012), que utilizou dados experimentais realizados por Chabot e Lie (1992). No modelo numérico do concreto avaliou as diferenças de resultados numéricos obtidos usando as formulações presentes no EN 1992-1-2:2004 e em Lie (1984).

Para a realização da calibração numérica foram escolhidos os pilares denominados C-05, C-13 e C-17 estudados por Espinos (2012). A altura de cada pilar é de 3810 mm, porém somente a parte central de 3048 mm foi exposta diretamente ao incêndio. Nos modelos numéricos foi considerado o valor $L/1000$ para as imperfeições iniciais. Nestes três casos o concreto é constituído por agregados silicosos, sendo considerado o valor de 3% para a umidade. A Tabela 3.5 a seguir mostra as propriedades geométricas, as resistências dos materiais e o carregamento dos resultados experimentais dos pilares que foram avaliados.

Tabela 3.5 - Propriedades geométricas, dos materiais e o carregamento dos pilares escolhidos de Espinos (2012)

Pilar N°	D (mm)	Esp. (mm)	f_y (Mpa)	f_c (Mpa)	e (mm)	C (kN)	% da Carga Resistente
C-05	168,3	4,78	350	32,7	0	150	16
C-13	219,1	4,78	350	32,3	0	384	27
C-17	219,1	8,18	350	31,7	0	525	26

As Figuras 3.23, 3.24 e 3.25 mostram os valores de deslocamento axial ao longo do tempo para os três pilares escolhidos para a calibração numérica. Nelas são comparados os valores experimentais com os numéricos do presente trabalho e os encontrados por Espinos (2012). A Figura 3.26 faz a comparação de como ficou a deformação do resultado experimental do pilar C-17 e o obtido numericamente nesta dissertação. Foi usado o tamanho máximo de 20 mm para a malha de elementos finitos. Nas legendas onde está escrito EN 1992-1-2:2004 ou Lie (1984) faz referência qual é a propriedade mecânica do concreto que é usada em cada curva obtida numericamente.

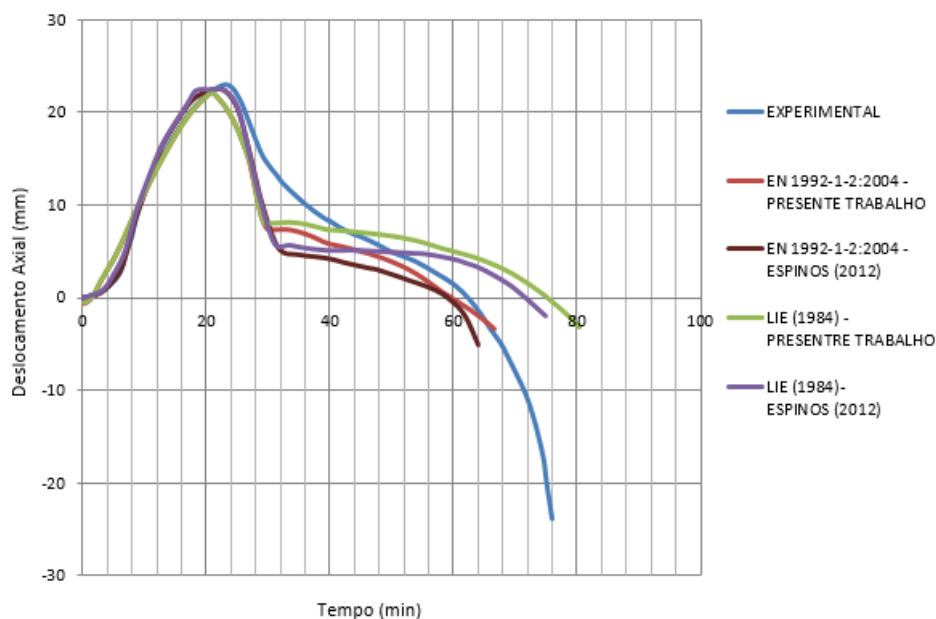


Figura 3.23 - Curva Deslocamento Axial ao Longo do Tempo do Pilar C-05

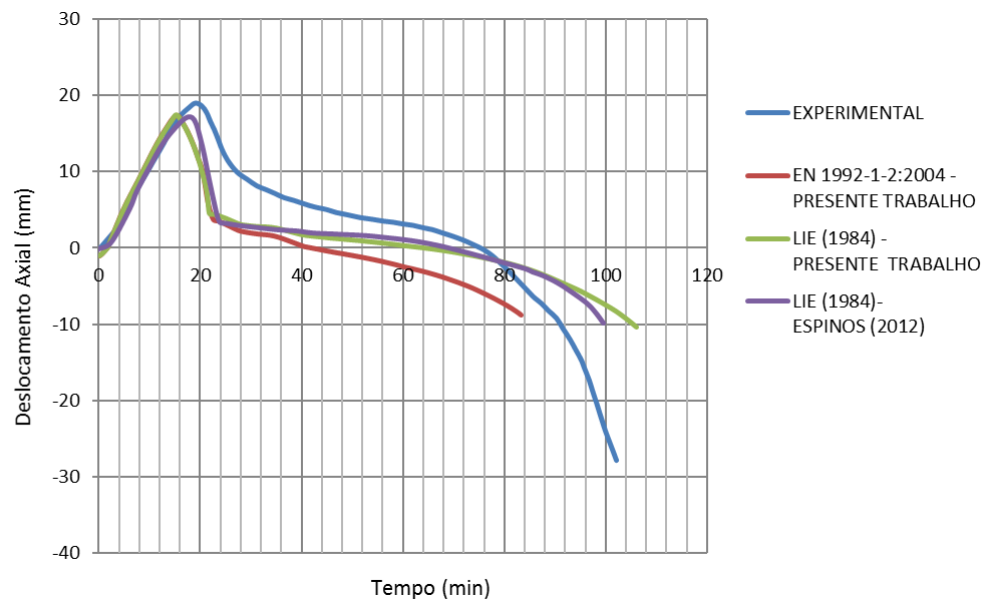


Figura 3.24 - Curva Deslocamento Axial ao Longo do Tempo do Pilar C-13

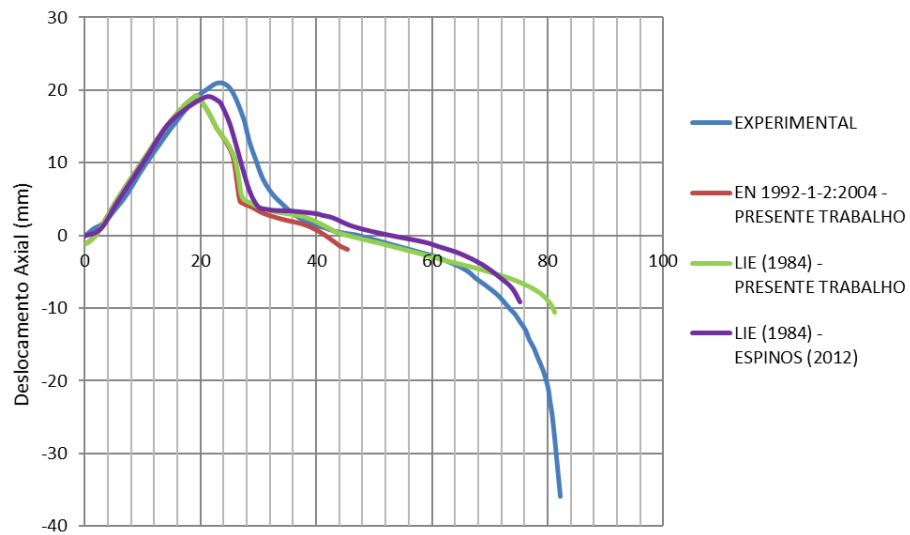


Figura 3.25 - Curva Deslocamento Axial ao Longo do Tempo do Pilar C-17

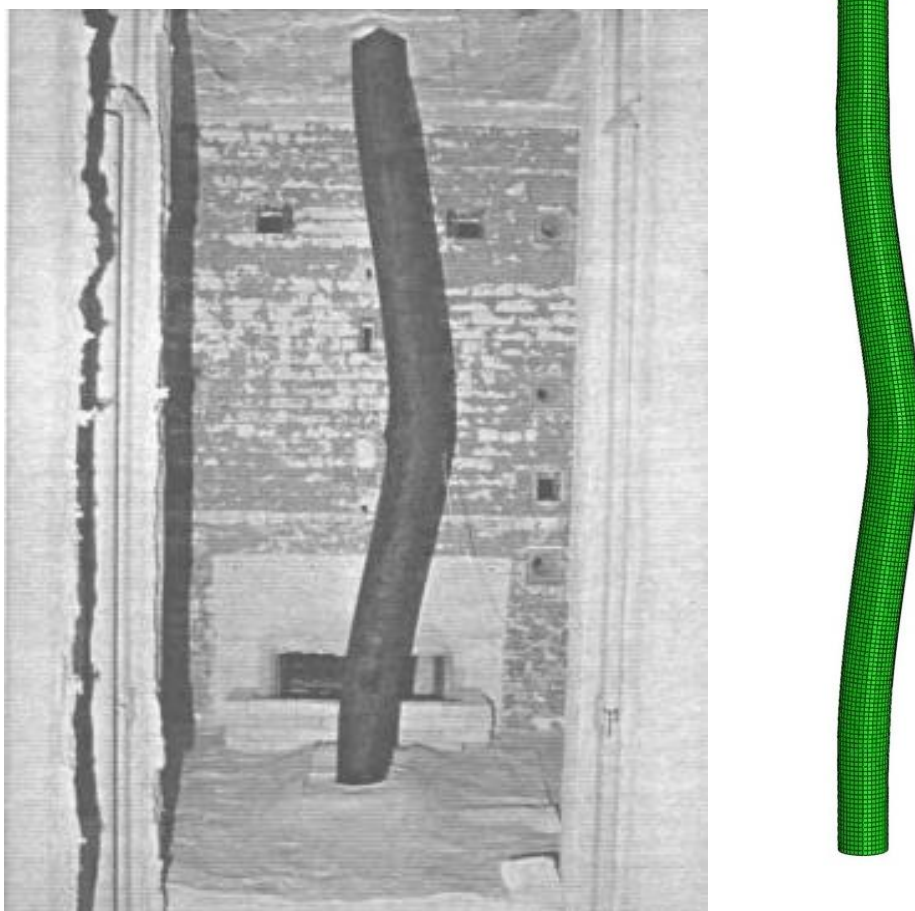


Figura 3.26: Comparação da Deformada do Resultado Experimental do Pilar C-17 de Chabot e Lie (1992) e o Numérico Obtido no Presente Trabalho

Em ambos os casos avaliados, as curvas do presente trabalho ficaram com comportamento próximo das que Espinos (2012) encontrou. Isso mostra que o modelo numérico ficou com uma calibração aproximada da encontrada na literatura. Além disso, a deformada do modelo numérico ficou parecida com o resultado experimental. Foi possível perceber as diferenças dos valores usando as propriedades mecânicas do concreto de Lie (1984) e do EN 1992-1-2:2004. A formulação presente na norma europeia resulta em valores mais conservadores, podendo ter resultados inferiores aos experimentais (como o caso C-13 e C-17), sendo que o modelo de Lie (1984) conseguiu aproximar melhor nos casos avaliados. Os resultados obtidos mostram que é possível prescrever um modelo com razoável precisão em relação aos dados experimentais, apesar da alta complexidade das simulações numéricas e da definição das propriedades térmicas e mecânicas dos materiais, principalmente do concreto em situação de incêndio.

3.5 Observações do Capítulo

O objetivo deste capítulo de reproduzir um modelo numérico que representasse a transferência de calor e aplicação de força axial de compressão em pilares mistos tubulares em situação de incêndio foi alcançado. Através do entendimento das propriedades térmicas e mecânicas do aço e do concreto e de como fazer as simulações numéricas no programa Abaqus, foi possível realizar o próximo passo desta dissertação que é a colocação de conectores de cisalhamento no modelo numérico. O próximo capítulo trata-se do estudo do Crestbond e da Chapa Passante como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos tubulares, sendo para isso necessário fazer algumas adaptações em relação a modelagem numérica que foi apresentada neste capítulo.

4

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO NUMÉRICO DE PILAR MISTO TUBULAR PREENCHIDO COM CONCRETO COM A PRESENÇA DE CONECTOR DE CISALHAMENTO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

4.1 Considerações Iniciais

O objetivo deste capítulo é propor um modelo numérico que simula as análises térmicas e estruturais do Conector Crestbond e da Chapa Passante em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto em situação de incêndio. A calibração de modelos de pilares mistos tubulares sem o uso de conector de cisalhamento serviu para poder entender como funciona a análise numérica e a partir dela foi possível fazer adaptações de como fazer simulações de pilares com o Crestbond e com a Chapa Passante. Diferente de como foi realizada a calibração, neste caso a carga é aplicada diretamente nos conectores com a intenção de simular o carregamento de uma viga conectada a eles. O valor da carga encontrada neste capítulo é referente ao valor resistente em temperatura ambiente, porém são usados diferentes níveis de carga em situação de incêndio.

4.2 Propriedades dos Materiais

As propriedades térmicas e mecânicas do aço e do concreto são as mesmas utilizadas no capítulo anterior. Para o aço foi adotado o valor para o f_y de 345 MPa, conforme é ilustrado pelas diferentes curvas de tensão-deformação em função da temperatura na Figura 3.13 do capítulo anterior. Para o concreto foi considerado ter 3% de umidade e a curva do limite superior de condutividade térmica do EN 1994-1-2:2005 foi a adotada. Além disso, o valor do f_c de 40 MPa foi o escolhido, sendo que foram usados os modelos do EN 1992-1-2:2004 e de Lie (1984)

para descrever a tensão-deformação do concreto em situação de incêndio, conforme são mostradas nas Figuras 3.15 e 3.16 do capítulo anterior.

4.3 Transferência de Calor

A transferência de calor da fonte do incêndio até a superfície externa do tubo de aço é realizada por convecção e radiação. Considerou-se que a parte externa do conector de cisalhamento está protegida e dessa forma, o conector troca calor apenas por condução com o tubo de aço e o núcleo de concreto. A curva padrão de incêndio ABNT NBR 14432:2001 foi a adotada, conforme mostra a Figura 3.7 do capítulo anterior. Internamente ocorre a condução térmica, que na interface aço-concreto considerou o coeficiente de condutância térmica de $200 \text{ W/m}^2\text{K}$, conforme sugere Espinos (2012), e a condução perfeita de calor entre o tubo e o conector de cisalhamento por ser uma região soldada e ter somente o aço como material. Os demais parâmetros relacionados à transferência de calor são os mesmos adotados no capítulo anterior presentes no subitem 3.3.4.

4.4 Etapas no Abaqus e Tipo de Elemento Finito

As simulações numéricas com a presença de conector de cisalhamento ocorreram da mesma forma como foi feita na calibração numérica no capítulo anterior, sendo realizadas as etapas de transferência de calor e estrutural de forma desacoplada. A primeira etapa é a transferência de calor usando o elemento sólido de oito nós e temperatura nodal de um grau de liberdade denominado DC3D8. Depois dessa etapa foi aplicada carga no conector de cisalhamento, sendo realizada a análise estrutural com a importação dos resultados numéricos obtidos na análise térmica, usando para isso o elemento sólido de oito nós e integração reduzida, denominado C3D8R.

4.5 Geometria

Com a intenção de estudar diferentes tamanhos de seção transversal escolheu-se para os tubos de aço os diâmetros externos de 200, 400 e 600 mm, todos com a espessura de 8 mm. A altura dos pilares foi mantida a mesma para todos os casos, sendo definido o valor de 3,00 m que é um valor muito comum para um pilar real situado entre dois pavimentos. A Chapa Passante e o Crestbond ficaram a 15 cm do topo do tubo.

A geometria do Crestbond é a mesma usada no trabalho de Prates (2015) e ele mantém a geometria independente da seção transversal na qual ele esteja inserido. Entretanto, a Chapa Passante foi modelada tendo a mesma altura (292,2 mm) e espessura (12,5 mm) do Crestbond, porém com o comprimento variando em função do diâmetro do tubo. Em todos os casos esses dois conectores de cisalhamento ficaram com 5 cm do comprimento do lado externo dos pilares. O motivo disso é porque eles servem como Single Plate e estão conectados a uma viga e recebem carregamento proveniente dela e transferem esforços para o tubo de aço e para o núcleo de concreto. As Figuras 4.1 e 4.2 a seguir mostram a disposição dos conectores nos pilares, com as medidas em milímetros.

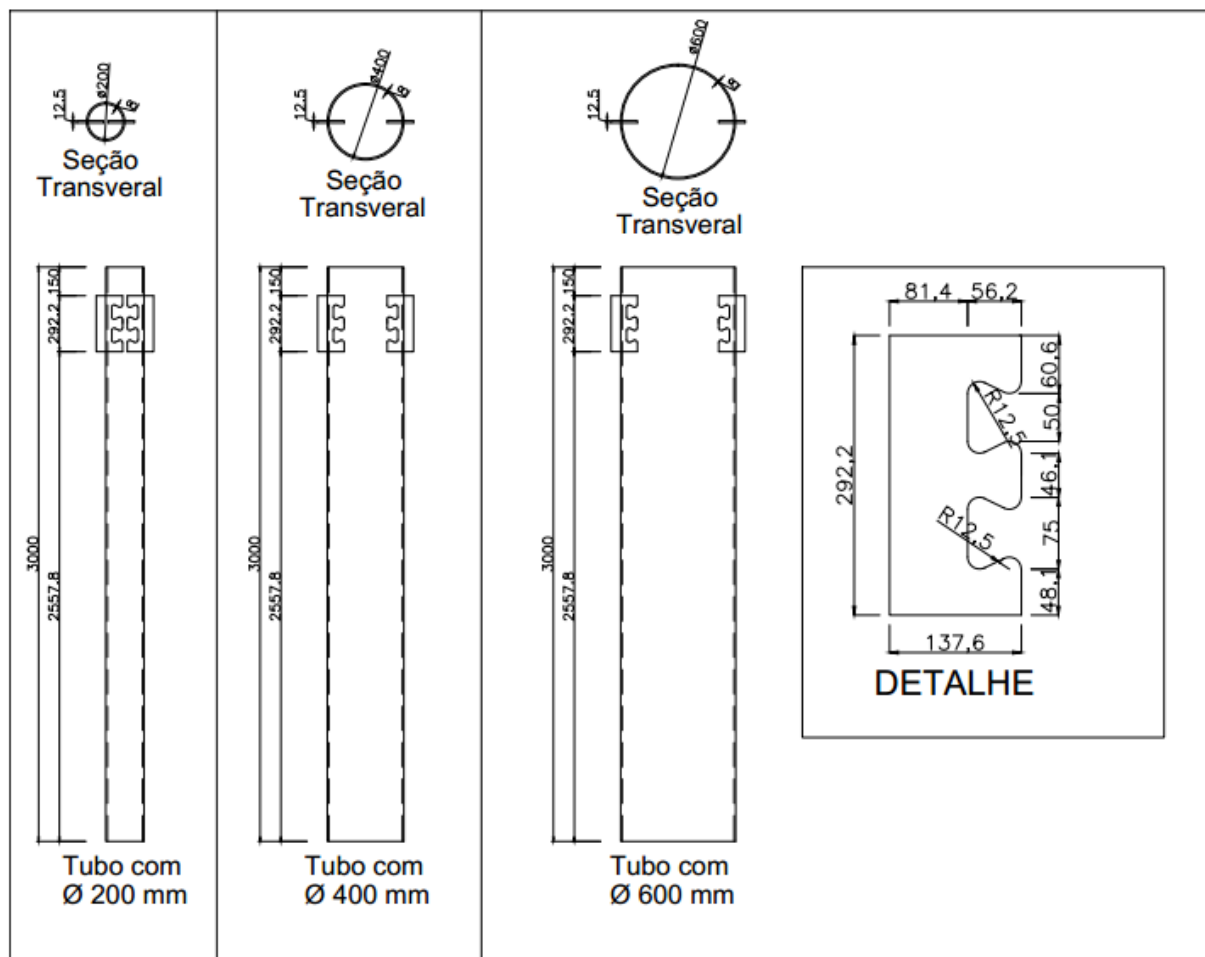


Figura 4.1 - Detalhamento dos Pilares com o Crestbond

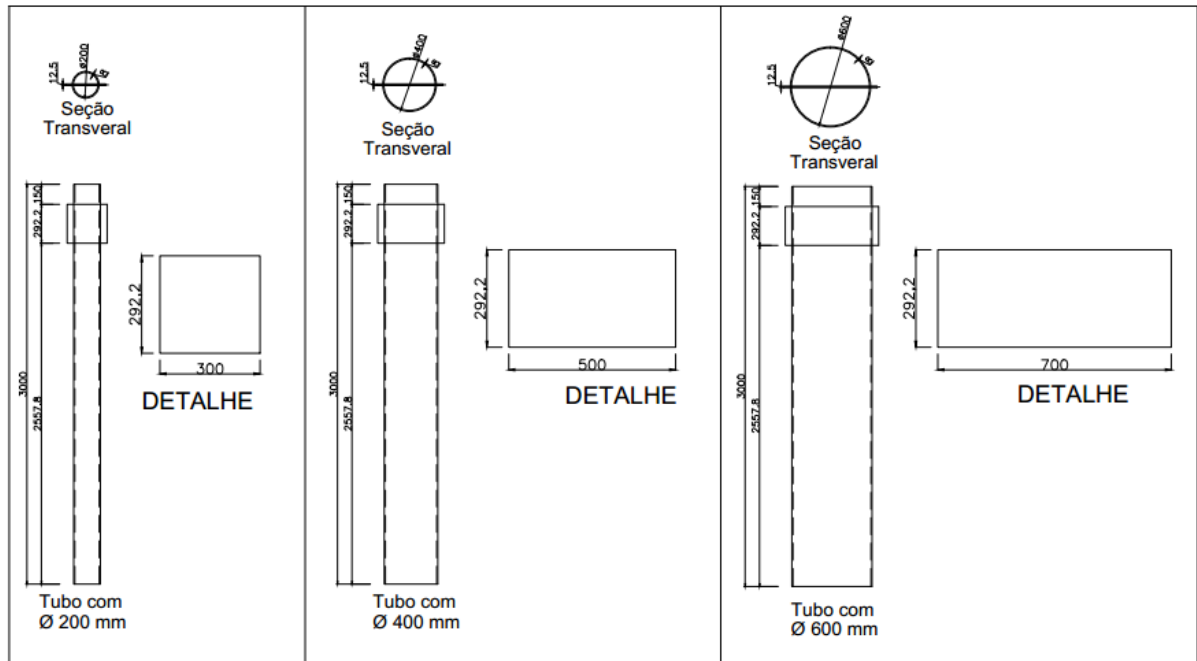


Figura 4.2 - Detalhamento dos Pilares com a Chapa Passante

4.6 Comparação de Temperaturas nos Conectores

Neste trabalho os dois conectores de cisalhamento possuem a mesma espessura e altura, o que diferencia o Crestbond é que ele tem aberturas e mantém a geometria, ao contrário da Chapa Passante, que tem o comprimento variado em função da seção transversal do tubo. As diferenças de geometria e massa influenciam a distribuição de temperaturas nos conectores em situação de incêndio.

Nas simulações numéricas, a temperatura nas faces externas do Crestbond e da Chapa Passante que recebem carga é praticamente a mesma em todos os pontos. Por isso somente vai ser mostrado nos gráficos o ponto central dessa face. O motivo de escolher esses pontos para analisar e comparar a variação de temperatura se deve ao fato que são eles que recebem diretamente o carregamento.

4.6.1 Diâmetro de 200 mm

As Figuras 4.3 e 4.4 a seguir mostram quais são os pontos avaliados para comparação de temperatura no Crestbond e na Chapa Passante para o diâmetro de 200 mm no intervalo de 90 minutos.



Figura 4.3 - Pontos de Medição de Temperatura no Crestbond e na Chapa Passante em Pilares de Diâmetro de 200mm

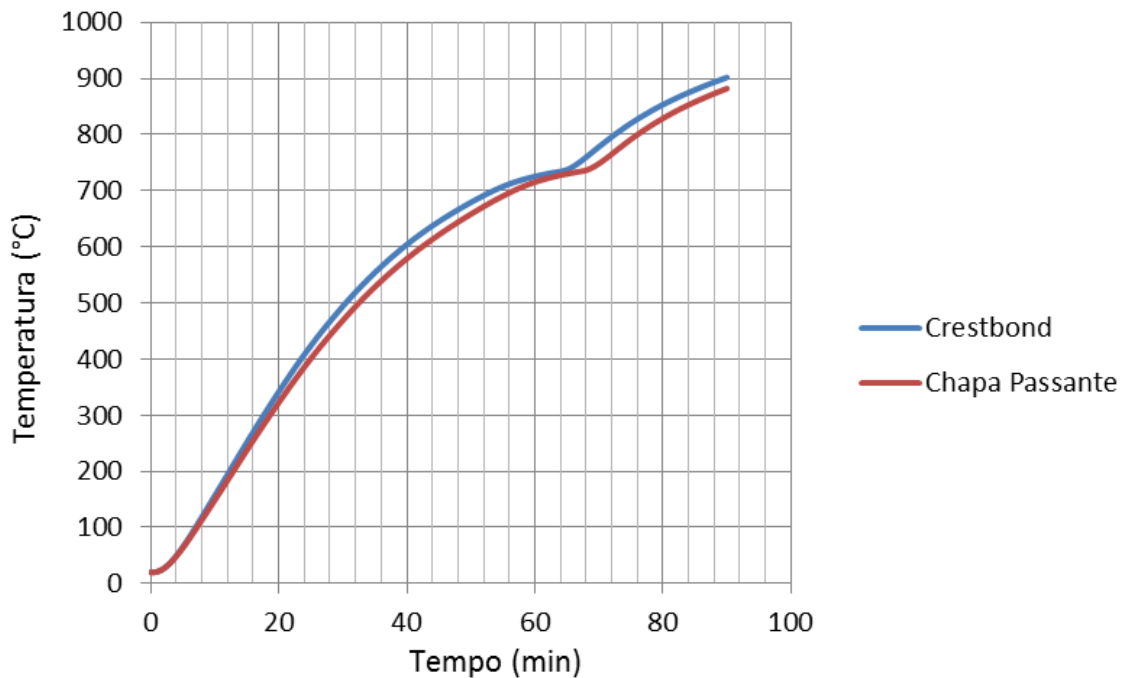


Figura 4.4 - Gráfico da Variação da Temperatura no Crestbond e na Chapa Passante em Pilares de Diâmetro de 200mm ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio

Em alguns instantes, no diâmetro de 200 mm, a temperatura do Crestbond chegou a ser 25 °C e até 5% maior do que a da Chapa Passante. As diferenças de valores não foram grandes, isso se deve pelo fato do volume da Chapa Passante não ser muito maior do que o Crestbond para esse caso, ao contrário do que é para os diâmetros de 400 e 600 mm.

4.6.2 Diâmetro de 400 mm

As Figuras 4.5 e 4.6 a seguir mostram quais são os pontos avaliados para comparação de temperatura no Crestbond e na Chapa Passante para o diâmetro de 400 mm no intervalo de 90 minutos.

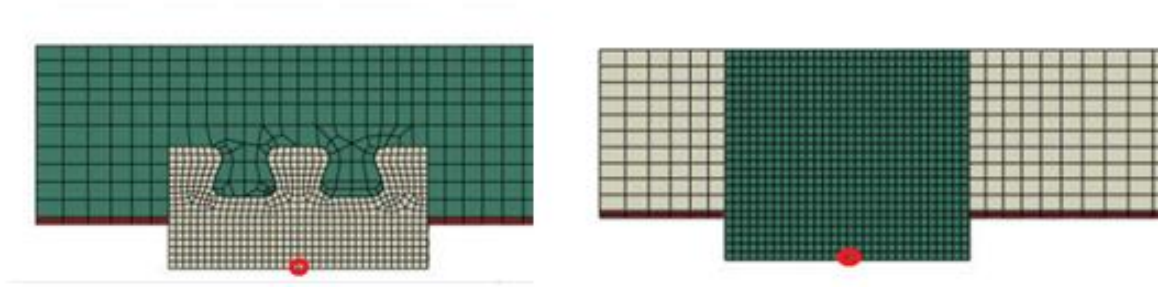


Figura 4.5 - Pontos de Medição de Temperatura no Crestbond e na Chapa Passante em Pilares de Diâmetro de 400mm

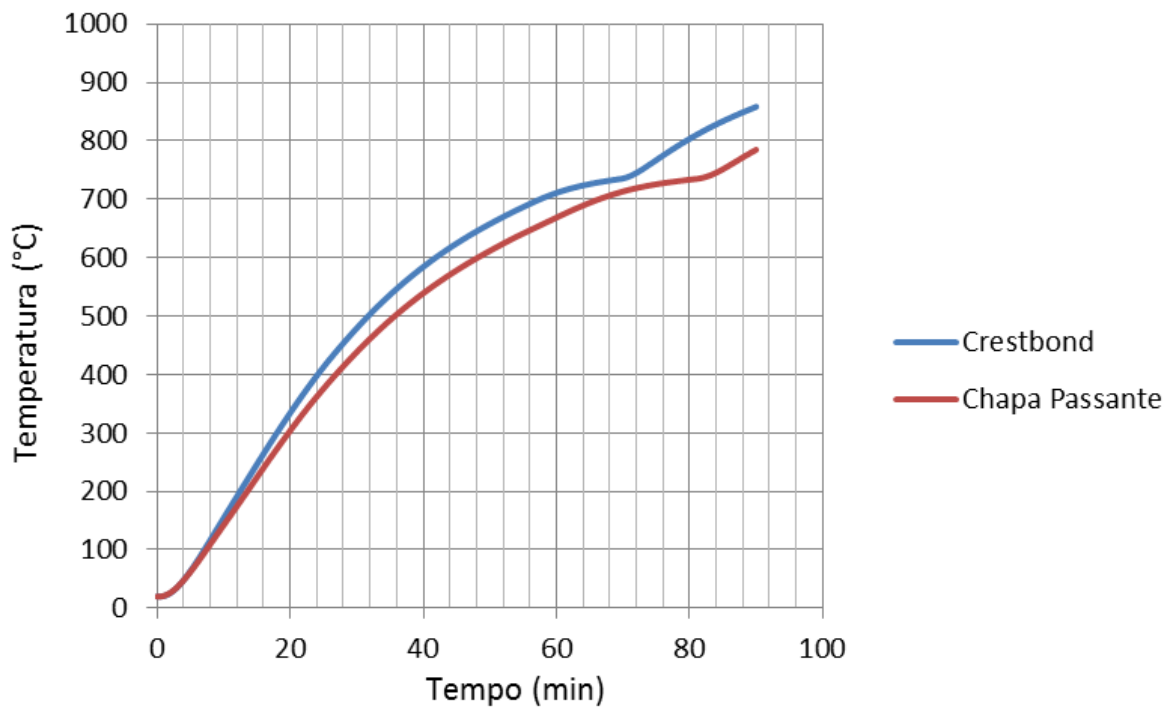


Figura 4.6 - Gráfico da variação da Temperatura no Crestbond e na Chapa Passante em Pilares de Diâmetro de 400mm ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio

Em alguns instantes, no diâmetro de 400 mm, a temperatura do Crestbond chegou a ser 80 °C e até 10% maior do que a da Chapa Passante após passar os 20 primeiros minutos. Isso aconteceu devido ao fato de que a Chapa Passante tem uma massa maior do que o Crestbond e isso fez com que o calor se distribuísse em um volume maior.

4.6.3 Diâmetro de 600 mm

As Figuras 4.7 e 4.8 a seguir mostram quais são os pontos avaliados e faz comparação de temperatura no Crestbond e na Chapa Passante para o diâmetro de 600 mm no intervalo de 90 minutos.

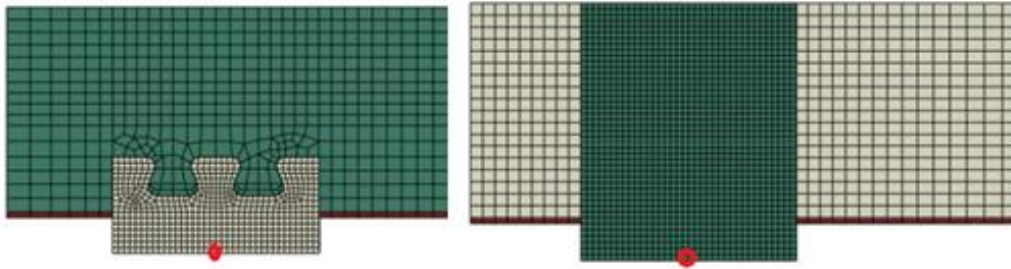


Figura 4.7 - Pontos de Medição de Temperatura no Crestbond e na Chapa Passante em pilares de Diâmetro de 600mm

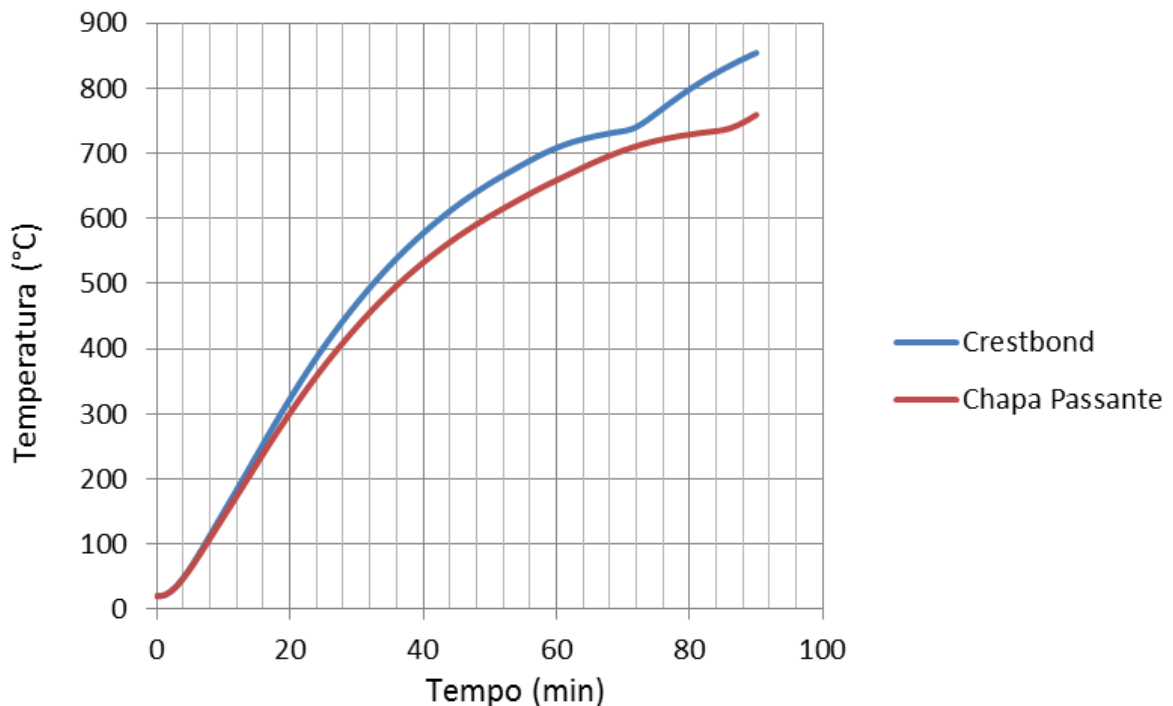


Figura 4.8 - Gráfico da variação da Temperatura no Crestbond e na Chapa Passante em Pilares de Diâmetro de 600mm ao longo do tempo de Exposição ao Incêndio

Em alguns instantes, no diâmetro de 600 mm, a temperatura do Crestbond chegou a ser 98 °C e até 12% maior do que a da Chapa Passante após os 20 primeiros minutos. Isso aconteceu devido ao fato de que a Chapa Passante tem uma massa maior do que o Crestbond e isso fez com que o calor se distribuísse em um volume maior.

4.6.4 Conclusões sobre Temperatura no Crestbond e na Chapa Passante

Nos três diâmetros estudados, percebe-se que quanto maior o diâmetro do tubo, maior é a diferença entre as temperaturas alcançadas nos conectores. A Chapa Passante atingiu uma menor temperatura por ter um maior volume do que o Crestbond em todos os casos. Entretanto, as diferenças de valores nos conectores não foram grandes, sendo que as diferenças máximas estão em torno de 98°C e até 12 % e aconteceram em apenas alguns instantes nos gráficos.

4.7 Condições de Contorno e Carregamento

O objetivo do trabalho é simular a transferência de carga do conector de cisalhamento (proveniente da ligação com uma viga) para o tubo de aço e o núcleo de concreto.

A estrutura completa (tubo de aço, núcleo de concreto e conector de cisalhamento) foi modelada em apenas um quarto por questões de tempo de processamento e por causa disso foi impedida de transladar horizontalmente nas duas direções perpendiculares aos planos de simetria, onde foi cortada.

Na primeira etapa da análise estrutural (temperatura ambiente), a base do pilar foi impedida de transladar verticalmente e o topo foi deixado livre para transladar. No conector de cisalhamento foi impedida a rotação (simulando a ligação com uma viga) e, além disso, foi inserido uma *constraint* MPC, para simular uma ligação na extremidade do conector que estaria conectada a uma viga. Desta forma, tanto em temperatura ambiente como em situação de incêndio, em qualquer ponto que se fizer a medição dos deslocamentos u_2 e u_3 (que são os deslocamentos obtidos pelo Abaqus conforme mostra a Figura 4.9 com as respectivas direções) da face exterior do conector que recebe o carregamento, tem-se os mesmos valores em toda a extensão da face. A carga foi aplicada na parte externa dos conectores, conforme mostra a região de aplicação nas Figuras 4.9 e 4.10 em que aparece com a letra C e uma seta indicando o sentido da carga.

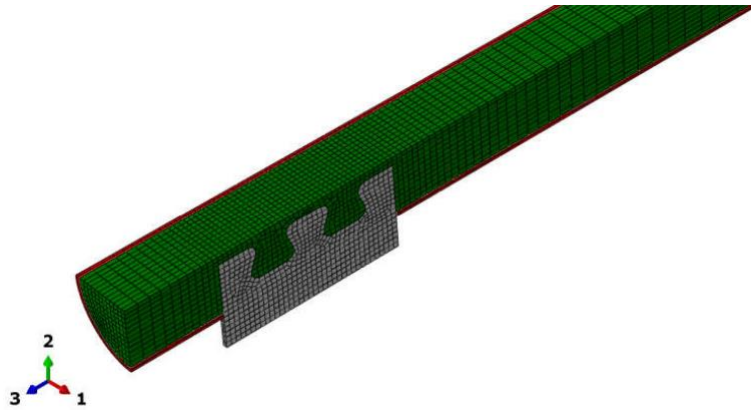


Figura 4.9 - Ilustração das direções 1,2 e 3 do pilar com Conector de Cisalhamento

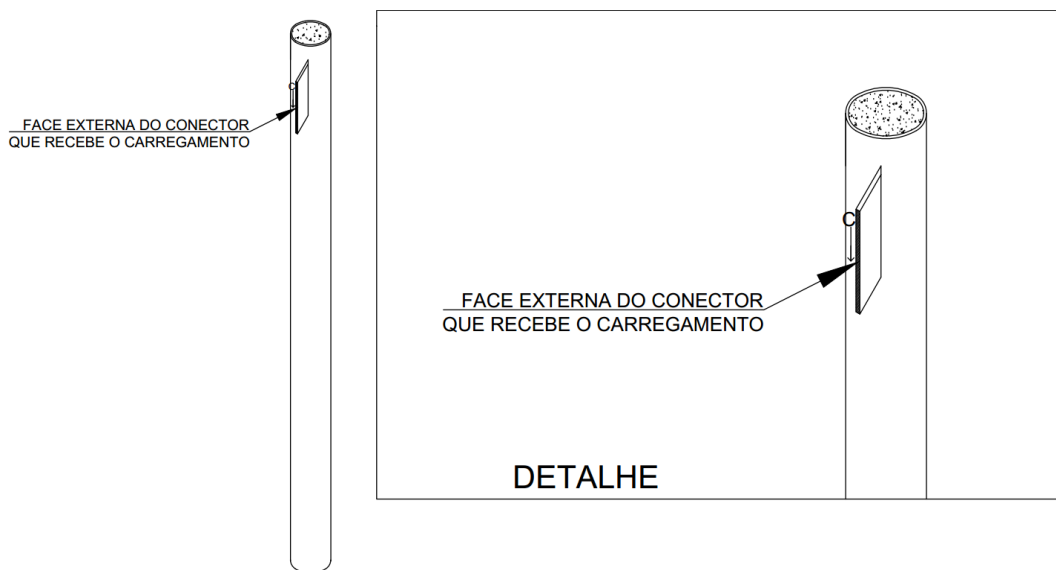


Figura 4.10 - Detalhamento do Carregamento no Conector de Cisalhamento

Inicialmente quando se realizou a segunda etapa da análise estrutural (situação de incêndio) manteve-se as mesmas condições de contorno feitas em temperatura ambiente, sendo que o topo da estrutura (que é o tubo de aço e o núcleo de concreto) tinha sido mantido livre para transladar verticalmente. Porém, devido ao fenômeno da expansão térmica, o concreto teve elevadas fissurações no qual o programa parou de convergir rapidamente, ocasionando resultados numéricos não satisfatórios. Por este motivo, foi decidido impedir a transladação vertical do topo do pilar no qual o programa conseguiu ter uma boa convergência e os resultados numéricos obtidos proporcionaram uma melhor análise estrutural dos conectores de cisalhamento usados como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos em temperatura elevada.

4.8 Contato

A interação entre as partes constituintes do modelo numérico foram feitas igual à da calibração numérica. O contato do o núcleo de concreto com tubo e também com o conector de cisalhamento (Crestbond ou Chapa Passante), é feito por contato normal e por atrito tangencial entre superfícies com o valor adotado de 0,55. O contato entre o conector de cisalhamento e o tubo que são ambos constituídos de aço, é unido por solda, sendo usado para isso a *constraint Tie* no Abaqus.

4.9 Malha

Nos conectores de cisalhamento, que são as partes do modelo numérico que recebem o carregamento, e nas regiões próximas a eles, foi escolhida uma malha mais refinada com dimensões máximas de 8 mm. O tamanho longitudinal das malhas do concreto e do aço foi aumentado gradativamente à medida que se afastaram de regiões de concentração de esforços. O tamanho transversal máximo das malhas do concreto e do aço foi definido em função do diâmetro, porém foi adotado o valor máximo de 18 mm.

4.10 Cargas nos Conectores

Na calibração numérica do capítulo anterior usou-se apenas o modelo de propriedades mecânicas presente no EN 1993-1-2:2005 para o aço. Para o concreto, além de usar o modelo presente no EN 1992-1-2:2004, também foi usada a formulação de Lie (1984), conforme sugere Espinos (2012). Neste trabalho são testados os dois modelos de concreto para poder fazer a comparação entre eles e decidir qual fornece os melhores resultados.

Para poder encontrar as cargas usadas em situação de incêndio foi definida primeiramente qual a carga que a estrutura (conector de cisalhamento, tubo de aço e núcleo de concreto) falha em temperatura ambiente. Nas simulações numéricas foram aplicadas cargas nos conectores de cisalhamento até encontrar o valor máximo que eles suportam. Após encontrar o valor de carga, dividiu-se o resultado pelo coeficiente de ponderação de resistência do aço, γ_a de valor 1,10, definindo assim o valor resistente. Nas análises estruturais em situação de incêndio serão adotados os valores de 70, 50 e 30% da carga resistente em temperatura ambiente.

Em temperatura ambiente, tanto o Crestbond como a Chapa Passante tiveram a mesma carga resistente, independente do diâmetro do tubo. O valor máximo da carga que o Abaqus conseguiu atingir usando o modelo do EN 1992-1-2:2004 para o concreto foi de 148 kN. A Figura 4.11 mostra a tensão máxima que foi atingida, sendo que não aconteceu escoamento no conector de cisalhamento e os valores das tensões ficaram bem abaixo do valor da resistência ao escoamento do aço (f_y) que é de 345 MPa.

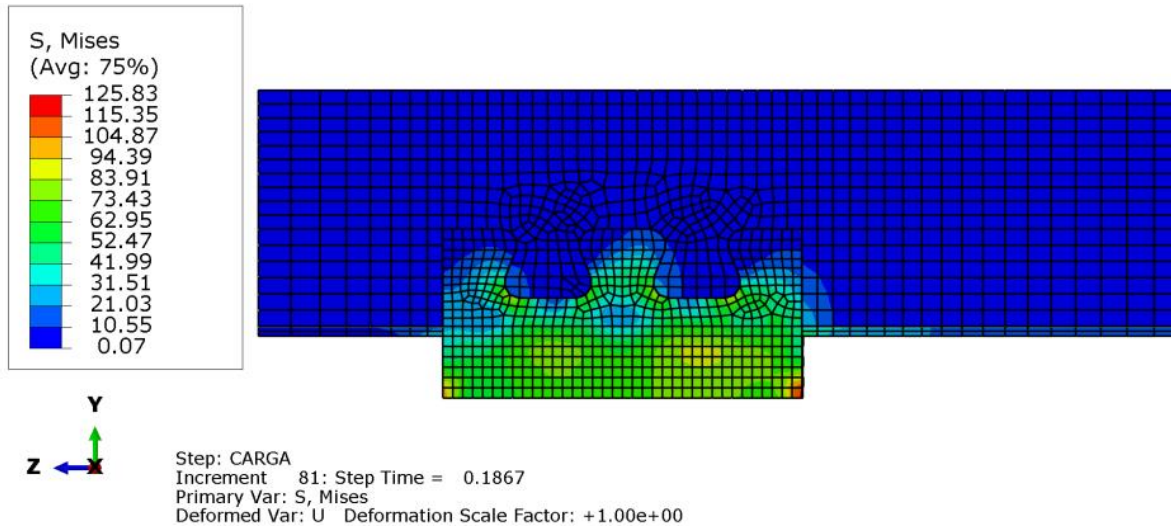


Figura 4.11 - Tensão final de Von Mises com o modelo de concreto EN 1992-1-2:2004

Com o uso do modelo de Lie (1984) para o concreto, os resultados obtidos foram bem diferentes quando comparado com os do EN 1992-1-2:2004. As Figuras 4.12 e 4.13 mostram a falha nos modelos numéricos com o uso do Crestbond e da Chapa Passante. O valor máximo da carga que o Abaqus atingiu foi 744 kN, em torno de cinco vezes maior do que a da norma europeia. A carga provocou falha por escoamento nos conectores de cisalhamento, fazendo com que a tensão alcançasse o valor da resistência ao escoamento do aço (f_y) que é de 345 MPa. Aguiar (2015) obteve os valores experimentais de carga máxima para o Crestbond de 760 kN para a série B de diâmetro 219,1mm e 940 kN para a série P de diâmetro 355,6 mm aplicando carga de compressão axial nos tubos. As razões dos valores das séries B e P sobre o valor encontrado neste trabalho (744 kN) é de 1,02 e 1,26 respectivamente. Estes resultados mostram que o modelo de Lie (1984) para o concreto proporcionou valores conservadores porém com uma boa aproximação numérica em relação aos resultados experimentais.

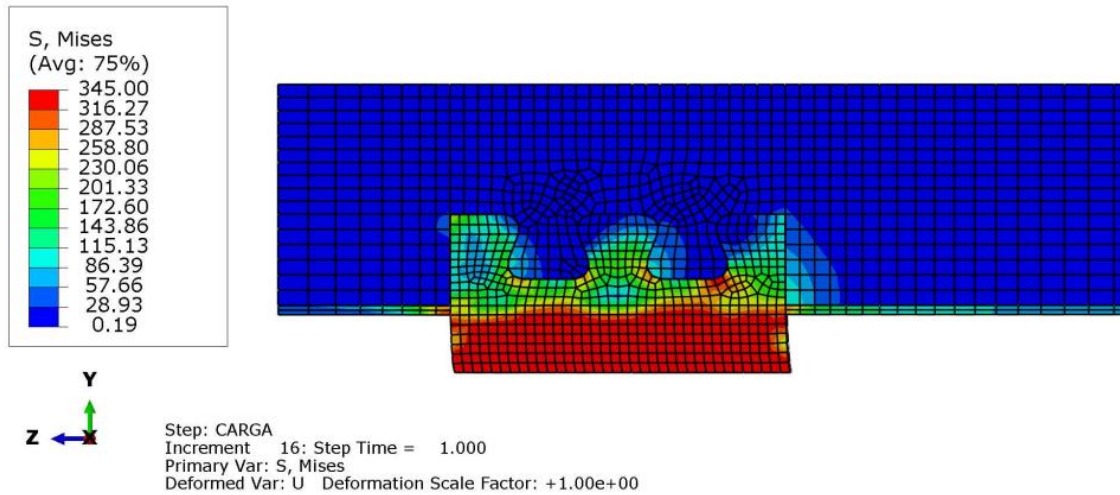


Figura 4.12 - Tensão Final de Von Mises com o modelo de concreto de Lie (1984) do Pilar com o Crestbond

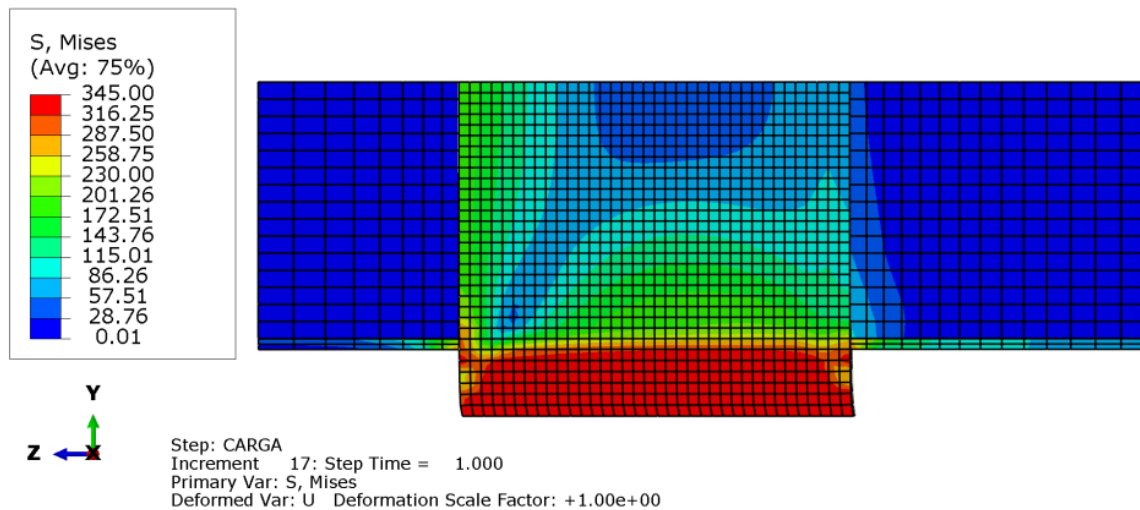


Figura 4.13 - Tensão Final de Von Mises com o modelo de concreto de Lie (1984) do Pilar com o Crestbond

Pelo fato de ocorrer escoamento no conector de cisalhamento e também por ter obtido um valor de carga em torno de cinco vezes maior, vai ser usado somente o modelo do concreto de Lie (1984) nas análises estruturais em situação de incêndio. O modelo do EN 1992-1-2:2004 para o concreto mostrou-se muito conservador para o procedimento usado neste trabalho, o que era esperado conforme é sugerido por Espinos (2012).

O valor da carga que fez a estrutura falhar foi de 744 kN, portanto o valor da carga resistente é obtido pela divisão do coeficiente γ_a , conforme mostrado pela Equação 4.1:

$$Carga Resistente = 744/\gamma_a = 744/1,10 = 676,4 \text{ kN} \quad (4.1)$$

Com a carga resistente obtida, foi calculado os valores de 70%, 50% e 30% que são os usados em situação de incêndio, conforme as Equações 4.2, 4.3 e 4.4.

$$70\% \text{ de Carga Resistente} = 676,4 \times 70\% = 473,5 \text{ kN} \quad (4.2)$$

$$50\% \text{ de Carga Resistente} = 676,4 \times 50\% = 338,2 \text{ kN} \quad (4.3)$$

$$30\% \text{ de Carga Resistente} = 676,4 \times 30\% = 202,9 \text{ kN} \quad (4.4)$$

Esses valores são usados nos dois próximos capítulos que mostram com detalhes os resultados obtidos da análise estrutural em situação de incêndio dos pilares mistos tubulares com o Crestbond e com a Chapa Passante.

4.11 Observações do Capítulo

O objetivo deste capítulo de reproduzir um modelo numérico de pilares misto tubulares com o uso de Crestbond e de Chapa Passante em situação de incêndio foi alcançado. Através do entendimento da calibração numérica do capítulo anterior foi possível criar um modelo com o uso de conector de cisalhamento para fazer as simulações numéricas no programa Abaqus. Este capítulo já mostrou uma prévia e faz comparação de como é a evolução da temperatura no Crestbond e na Chapa Passante. Os dois próximos capítulos mostram com mais detalhes os resultados obtidos na análise estrutural em situação de incêndio dos modelos criados. Por não ter resultados experimentais e para efeito de comparação de resultados, principalmente por questões de convergência numérica, o capítulo 5 mostra resultados considerando o efeito de expansão térmica e o capítulo 6 não a considera.

5

RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL COM EXPANSÃO TÉRMICA

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são mostradas as análises estruturais dos conectores de cisalhamentos usados como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos tubulares em situação de incêndio considerando o efeito da expansão térmica dos materiais. Por considerar este fenômeno, ocorreu no núcleo de concreto esforços de tração provocados pelo aumento de temperatura e também houve separação em relação ao do tubo de aço durante a exposição ao incêndio, sendo que os conectores de cisalhamento foram os responsáveis por manter o tubo conectado com o concreto. As simulações numéricas avaliaram a capacidade resistente da estrutura em relação à temperatura em que os materiais estão submetidos e, além disso, a influência da expansão térmica. As forças de tração provocadas por efeitos térmicos no concreto fizeram com que os tempos resistentes diminuíssem, quando comparado com as simulações realizadas sem expansão térmica (no capítulo seguinte são mostrados os resultados obtidos sem expansão).

5.2 Principais Parâmetros Avaliados

Neste capítulo analisa-se de forma comparativa o comportamento do Crestbond e da Chapa Passante em pilares mistos tubulares em situação de incêndio. Os próximos subitens mostram os resultados obtidos de forma separada em função do diâmetro do tubo e do nível de carga aplicada. Em todos os casos são apresentados os tempos resistentes de cada pilar, sendo considerado os valores máximos de tempo que o programa Abaqus conseguiu convergir. As figuras apresentadas mostram, no momento da falha estrutural, como ficaram a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração do concreto e a deformada dos pilares mistos com a presença do Crestbond e da Chapa Passante. Foi feito um gráfico mostrando a evolução do deslocamento do ponto central (o mesmo ponto onde foi avaliada a evolução da

temperatura no Capítulo 4) da face externa dos conectores de cisalhamento que recebe o carregamento ao longo do tempo de exposição ao incêndio. Além disso, são comentados os resultados obtidos nas simulações numéricas e os motivos que fizeram ocorrer o colapso estrutural.

5.3 Diâmetro de 200 mm

5.3.1 70% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 8 minutos

As Figuras 5.1 a 5.5 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 200 mm com nível de carga de 70%.

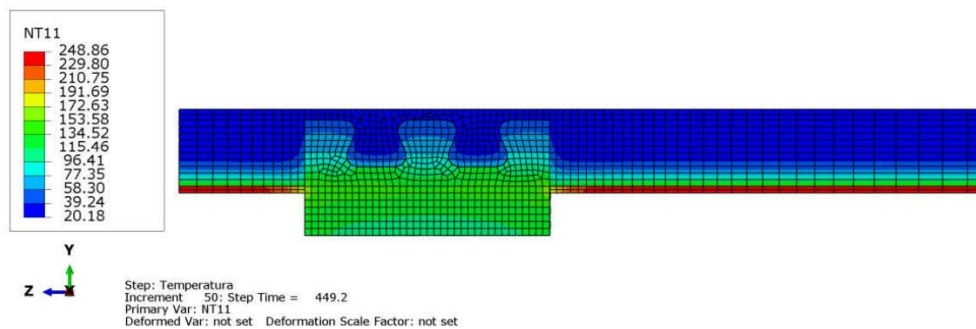


Figura 5.1 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

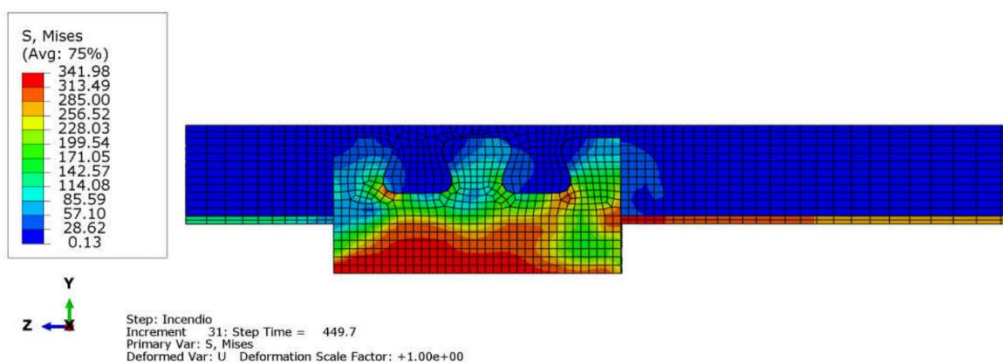


Figura 5.2 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

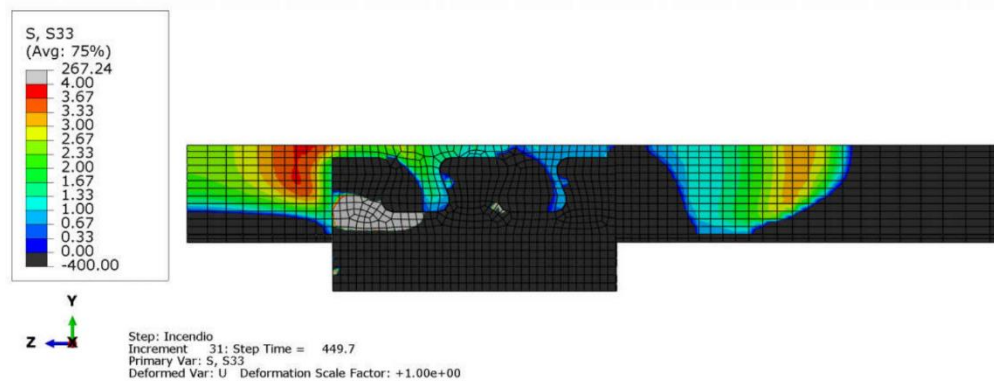


Figura 5.3 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

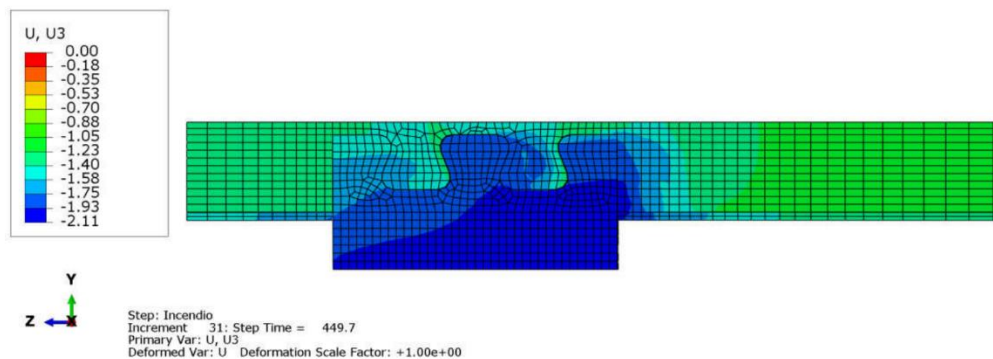


Figura 5.4 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

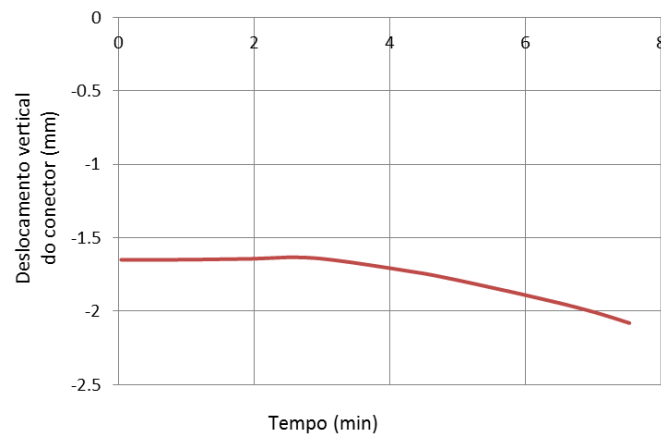


Figura 5.5 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 153°C e 172°C. Isto fez com que não houvesse redução do f_y (0%) na parte externa do conector, sendo que a carga aplicada foi diminuída em 30% (70% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão (% redução do f_y / % diminuição da carga aplicada) destes dois valores percentuais é de 0,00. Foi escolhido o ponto central da

parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 2,11mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 1,65mm). A tensão final de Von Mises no conector alcançou 341 MPa. A falha estrutural ocorreu no concreto devido ao efeito de tração provocado por efeitos térmicos e as deformações provocadas pela elevada carga aplicada no Crestbond que foi transferida para o concreto. A combinação destes dois esforços fez com que acontecesse uma elevada fissuração no concreto e por isso o tempo resistente do pilar foi muito baixo. A Figura 5.6 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são enfatizados os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de tração devido a falha ocorrer no concreto.

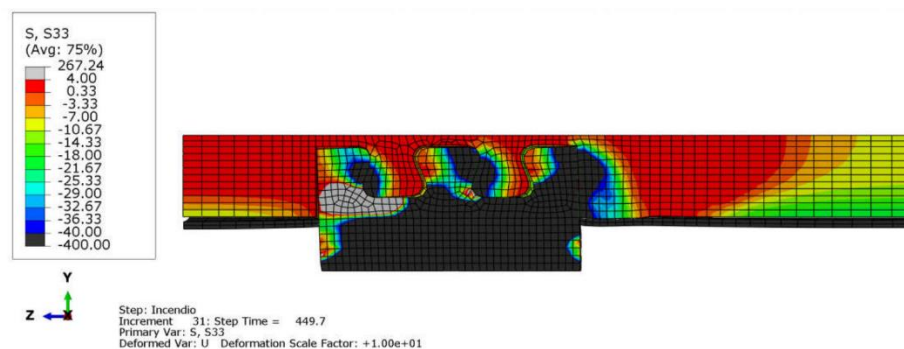


Figura 5.6 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

Chapa Passante

Tempo Resistente: 7 minutos

As Figuras 5.7 a 5.11 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 200 mm com nível de carga de 70%.

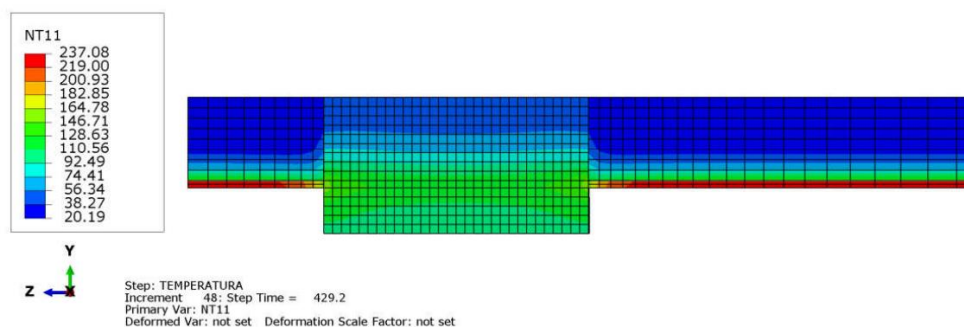


Figura 5.7 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de diâmetro de 200 mm com 70% de carga (Resultado com Expansão Térmica)

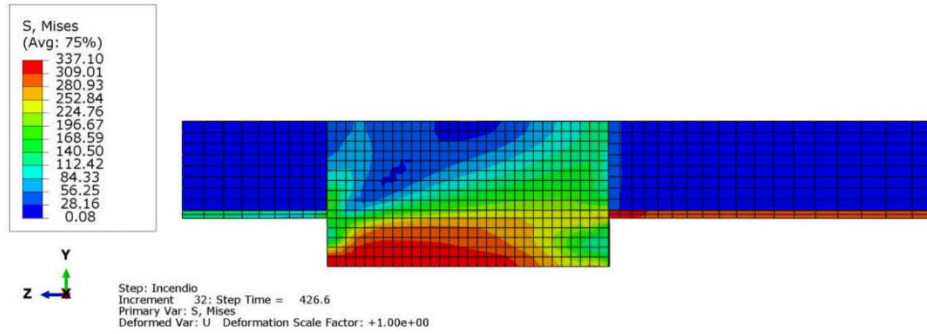


Figura 5.8 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

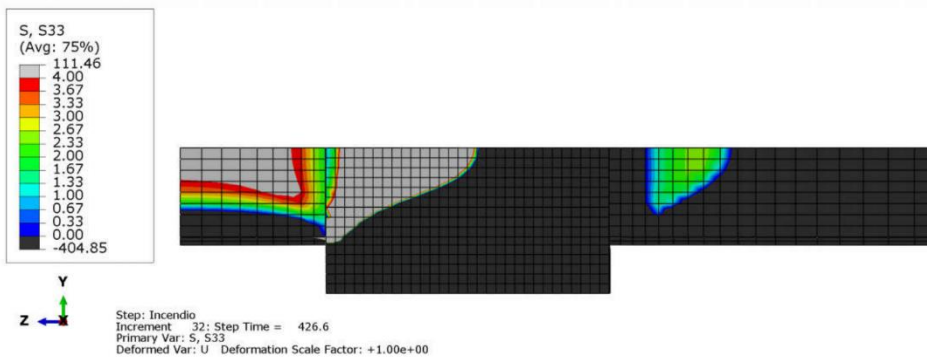


Figura 5.9 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

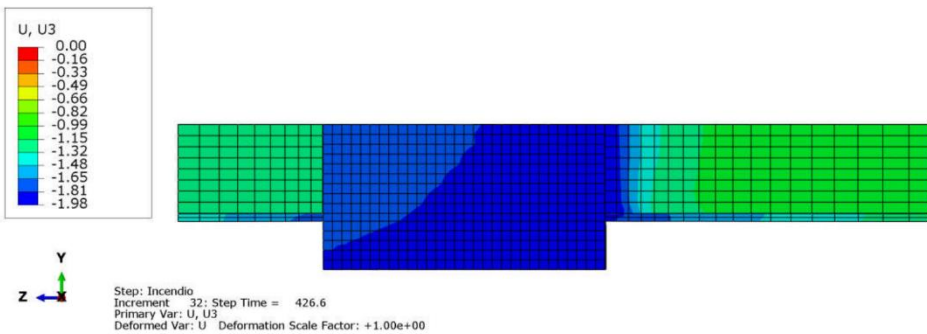


Figura 5.10 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

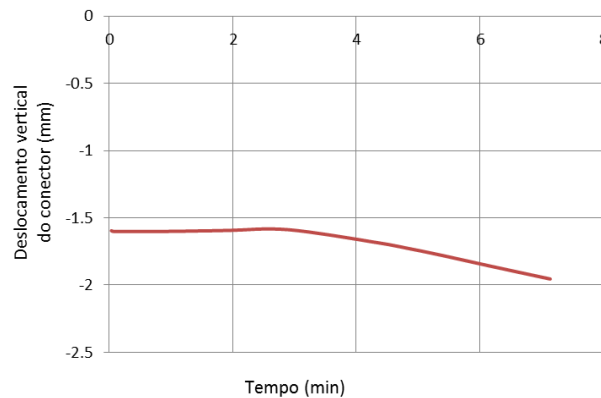


Figura 5.11 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 146°C e 164°C. Isto fez com que não houvesse redução do f_y (0%) na parte externa do conector, sendo que a carga aplicada foi diminuída em 30% (70% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão (% redução do f_y / % diminuição da carga aplicada) destes dois valores percentuais é de 0,00. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 1,98 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 1,66 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 337 MPa. A falha estrutural ocorreu no Concreto, devido ao efeito de tração provocado por efeitos térmicos e as deformações provocadas pela elevada carga aplicada na Chapa Passante que foi transferida para o concreto. A combinação destes dois esforços fez com que acontecesse uma elevada fissuração no concreto e por isso o tempo resistente do pilar foi muito baixo. A Figura 5.12 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são enfatizados os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de tração devido a falha ocorrer no concreto.

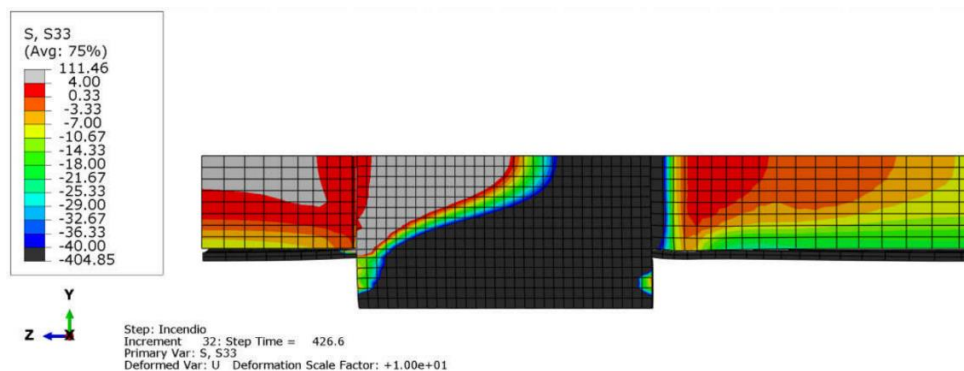


Figura 5.12 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de carga (Resultado com Expansão Térmica)

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 0,88. Em ambos os casos as falhas aconteceram no núcleo de concreto. No momento da falha, a tensão final máxima de Von Mises no Crestbond foi de 341 MPa, a da Chapa Passante foi de 337 MPa, sendo a razão (Tensão no Crestbond/Tensão na Chapa Passante) entre elas de 1,01.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos, sendo que a falha não ocorreu nos conectores. Em ambos os casos o programa apresentou dificuldades na convergência, sendo que os esforços de tração provocados por efeitos térmicos juntamente

com elevada carga aplicada fizeram com que os tempos resistentes fossem baixo. O comportamento do Crestbond e da Chapa Passante foram semelhantes neste caso, sendo que a diferença de tempo resistente (1 minuto) foi insignificante para definir qual dos dois se saiu melhor neste caso.

5.3.2 50% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 15 minutos

As Figuras 5.13 a 5.17 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 200 mm e nível de carga de 50%.

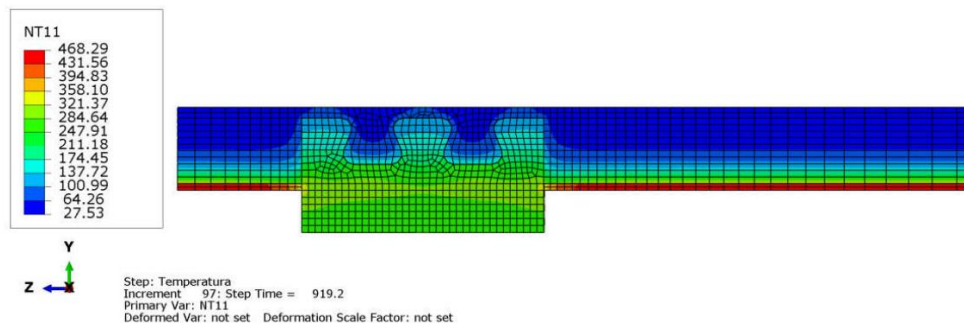


Figura 5.13 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

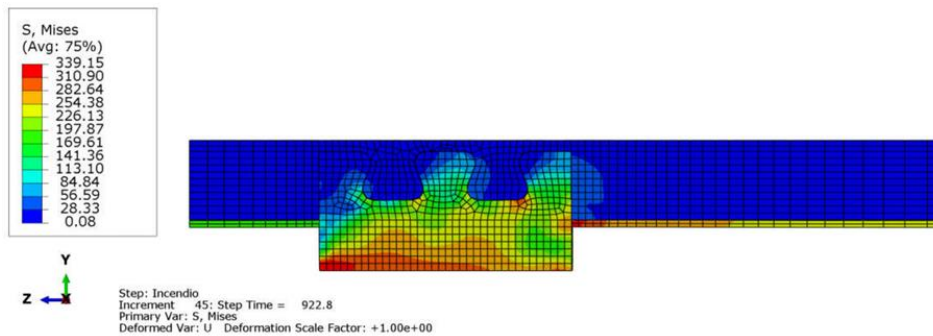


Figura 5.14 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de carga (Resultado com Expansão Térmica)

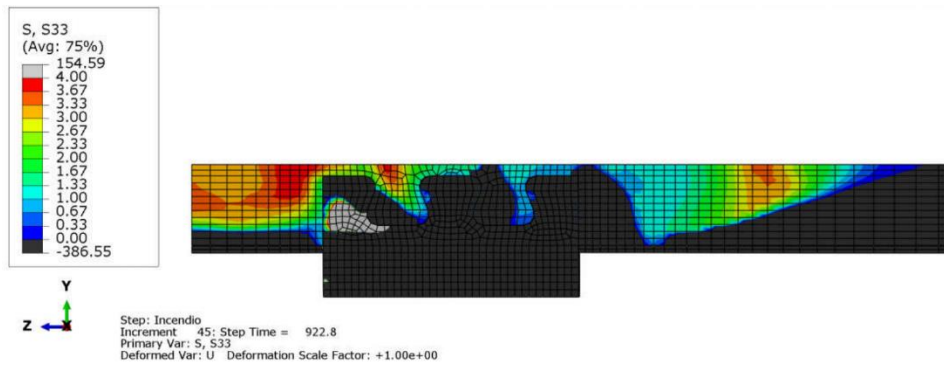


Figura 5.15 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

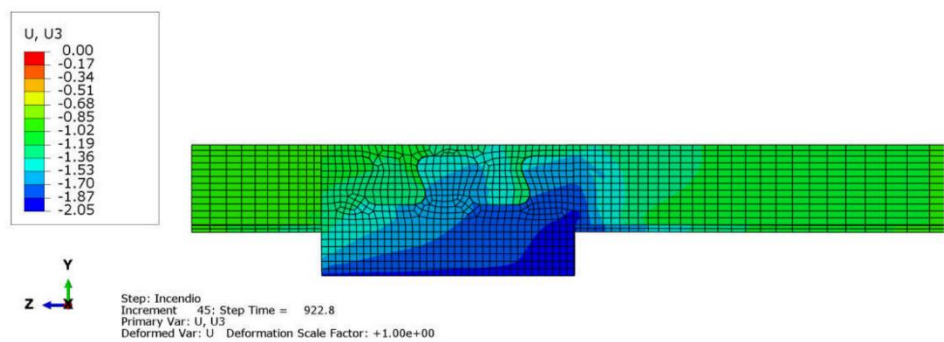


Figura 5.16 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

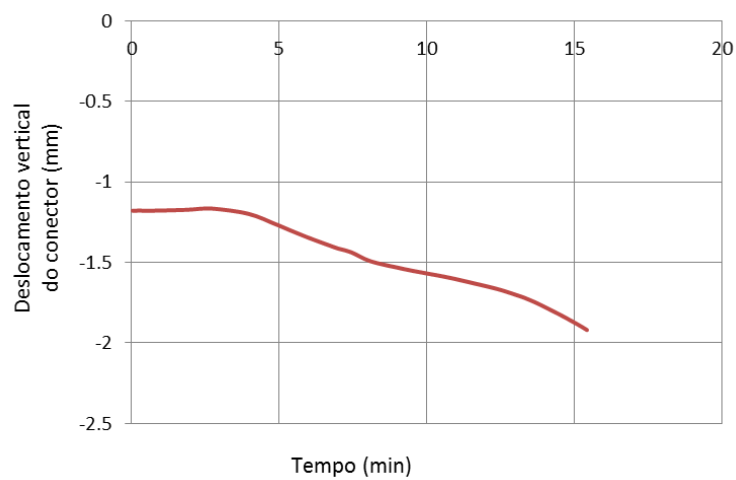


Figura 5.17 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 284°C e 325°C. Isto fez com que não houvesse redução do f_y (0%) na parte externa do conector, sendo que a carga aplicada foi diminuída em 50% (50% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,00. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento

para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 1,91 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 1,18mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 340 MPa. A falha estrutural ocorreu no Concreto, devido ao efeito de tração provocado por efeitos térmicos e as deformações provocadas pela carga aplicada no Crestbond que foi transmitida para o concreto. A combinação destes dois esforços fez com que acontecesse uma elevada fissuração no concreto e por isso o tempo resistente do pilar foi baixo. A Figura 5.18 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são enfatizados os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de Tração devido a falha ocorrer no concreto.

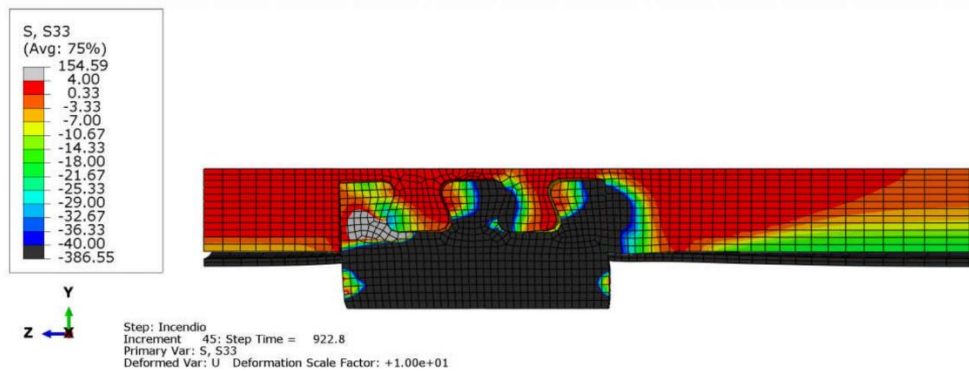


Figura 5.18 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

Chapa Passante

Tempo Resistente: 23 minutos

As Figuras 5.19 a 5.23 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 200 mm com nível de carga de 50%.

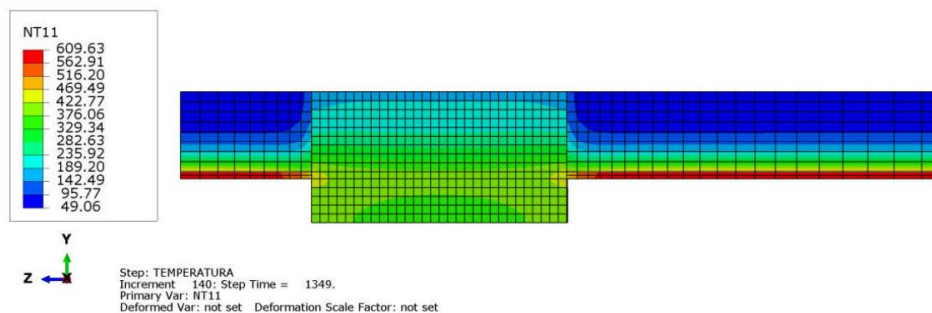


Figura 5.19 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

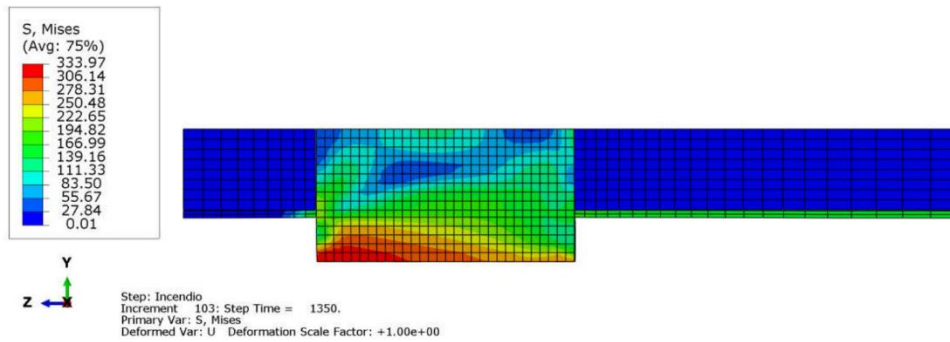


Figura 5.20 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

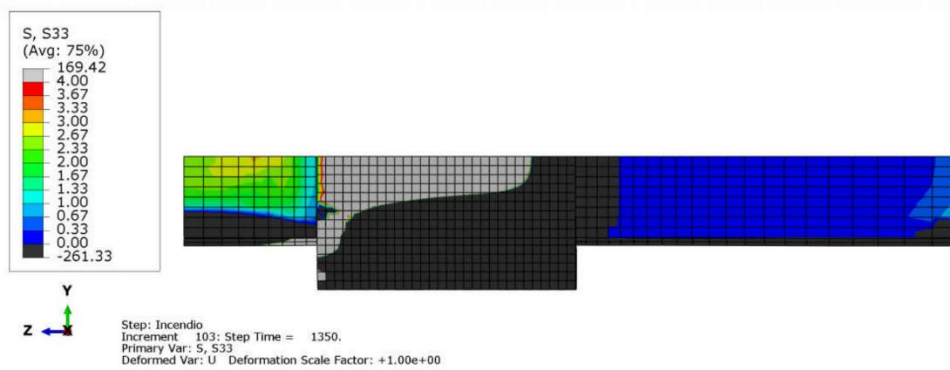


Figura 5.21 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

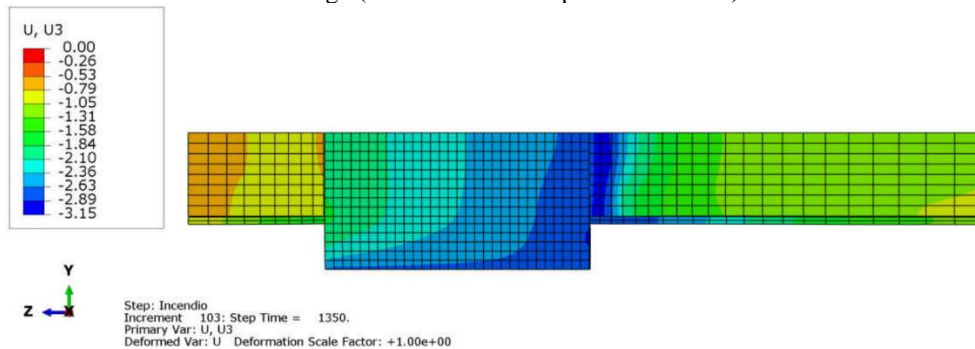


Figura 5.22 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

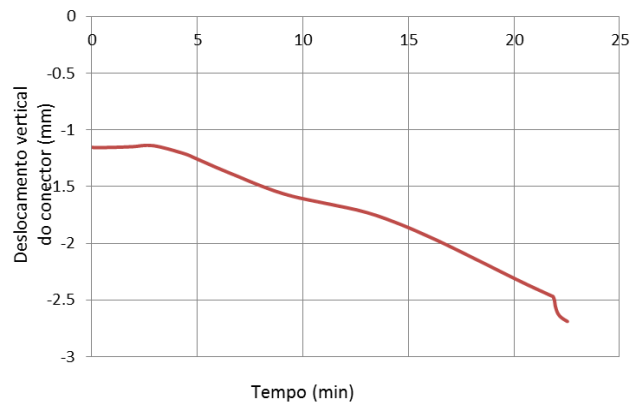


Figura 5.23 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 376°C e 422°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 343 MPa (redução menor que 1%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 50% (50% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,02. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 2,70 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 1,15 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 334 Mpa. A falha estrutural ocorreu no Concreto, devido ao efeito de tração provocado por efeitos térmicos e as deformações provocadas pela carga aplicada na Chapa Passante que foi transmitida para o concreto. A combinação destes dois esforços fez com que acontecesse uma elevada fissuração no concreto e por isso o tempo resistente do pilar foi baixo. A Figura 5.24 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são enfatizados os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de Tração devido a falha ocorrer no concreto.

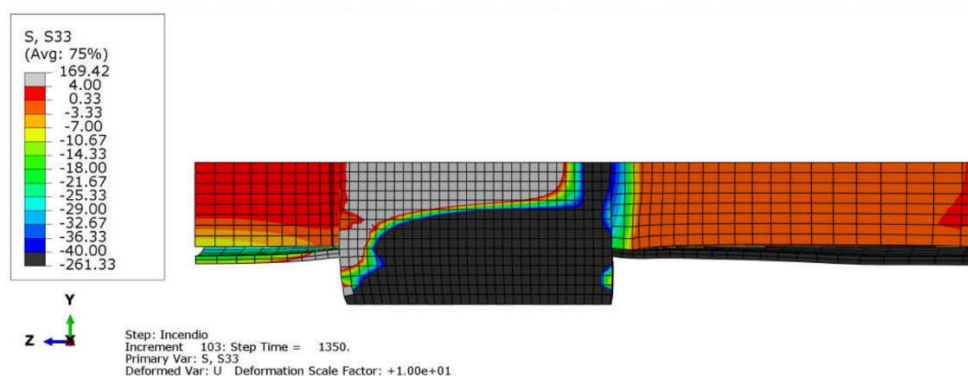


Figura 5.24 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 1,53. Em ambos os casos as falhas aconteceram no núcleo de concreto. No momento da falha, a tensão final máximas de Von Mises no Crestbond foi de 340 MPa, a da Chapa Passante foi de 334 MPa, sendo a razão entre elas de 1,02. A Chapa Passante apresentou temperatura final maior do que a do Crestbond por ter resistido um maior tempo de exposição ao incêndio.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos até os

15 minutos (momento da falha com o Crestbond) sendo que a falha não ocorreu nos conectores. Em ambos os casos o programa apresentou dificuldades na convergência, sendo que os esforços de tração provocados por efeitos térmicos juntamente com a carga aplicada fizeram com que os tempos resistentes não fossem altos. A Chapa Passante teve comportamento melhor do que o do Crestbond por ter tido o tempo resistente maior (53%).

5.3.3 30% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 43 minutos

As Figuras 5.25 a 5.29 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 200 mm e nível de carga de 30%.

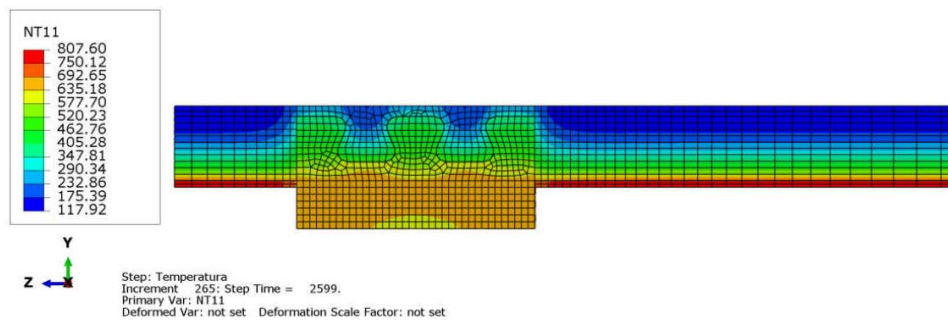


Figura 5.25 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

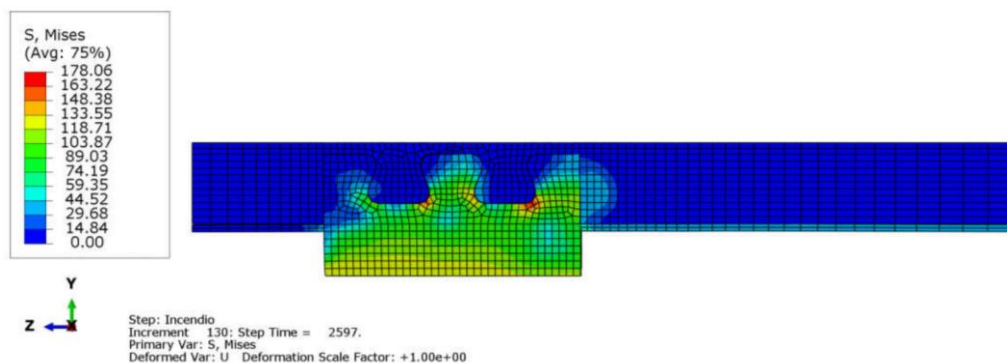


Figura 5.26 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

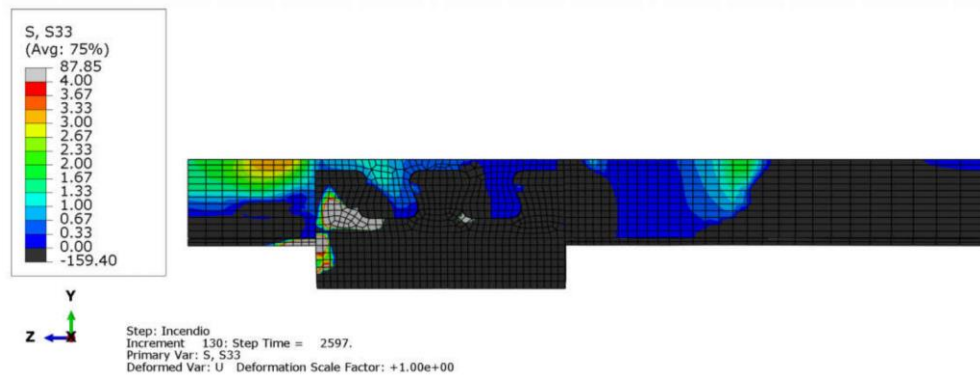


Figura 5.27 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

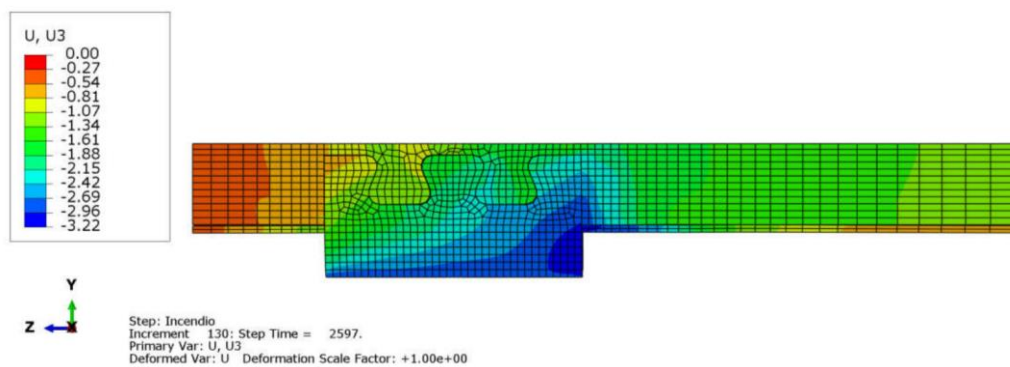


Figura 5.28 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

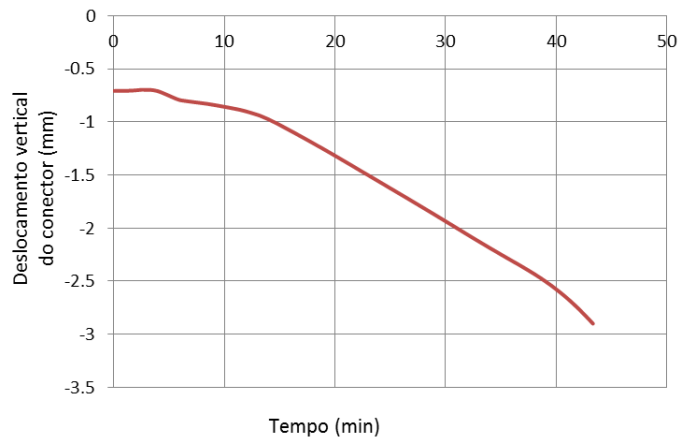


Figura 5.29 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 625°C e 692°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 114 MPa (redução de 67%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 70% (30% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,96. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que

recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 2,90 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,71 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 133 MPa. A falha estrutural ocorreu no Concreto, devido ao efeito de tração provocado por efeitos térmicos e as deformações provocadas pela carga aplicada no Crestbond que foi transmitida para o concreto. As tensões de tração no concreto ao longo do tempo foram redistribuídas na estrutura, por este motivo em conjunto com a baixa carga aplicada no pilar fez com que o tempo resistente fosse muito maior do que os níveis de carga de 50% (7 minutos) e o de 70% (15 minutos). A Figura 5.30 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são enfatizados os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de Tração devido a falha ocorrer no concreto.

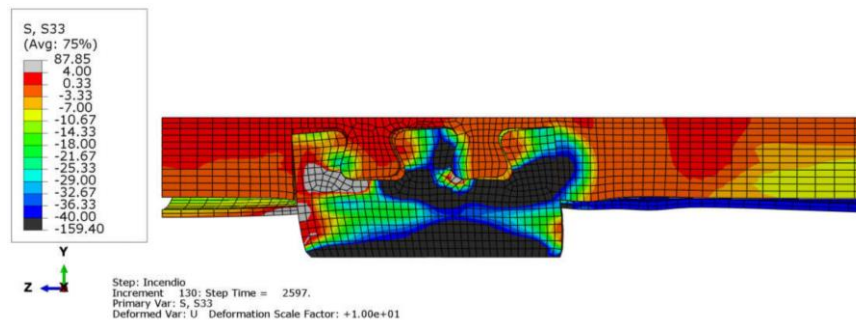


Figura 5.30 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

Chapa Passante

Tempo Resistente: 30 minutos

As Figuras 5.31 a 5.35 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 200 mm com nível de carga de 30%.

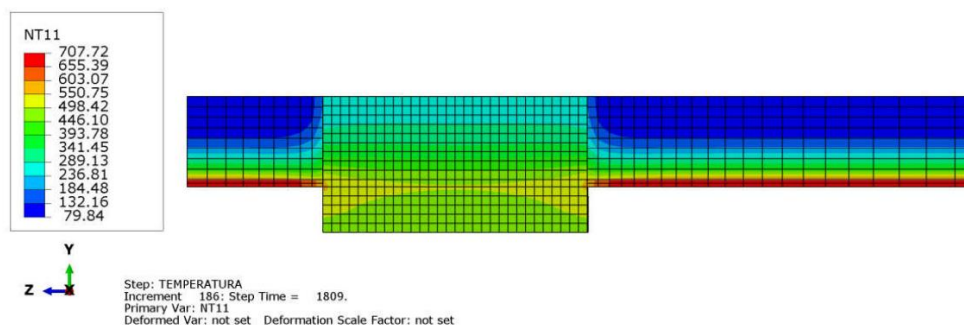


Figura 5.31 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

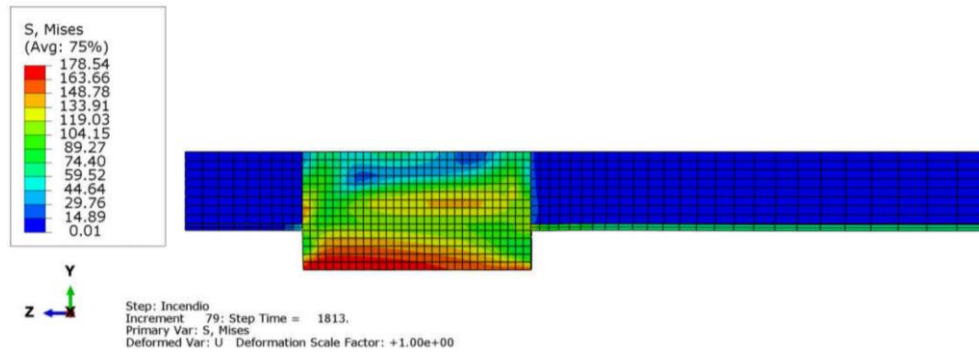


Figura 5.32 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

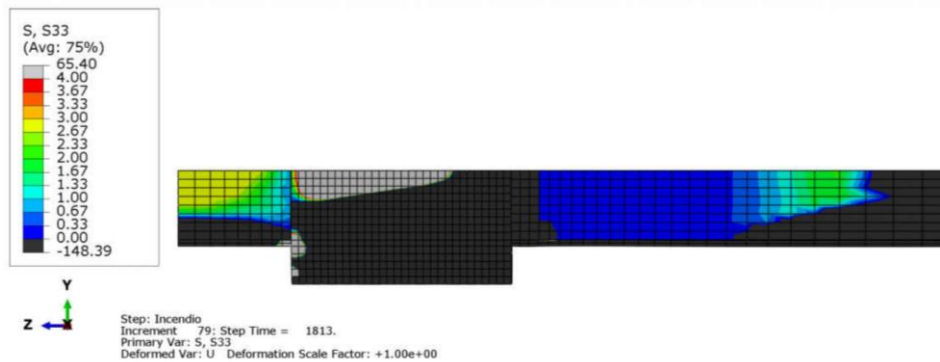


Figura 5.33 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

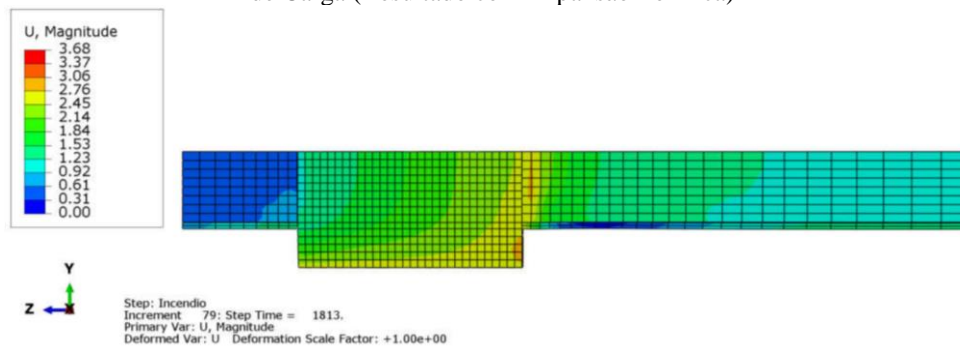


Figura 5.34 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

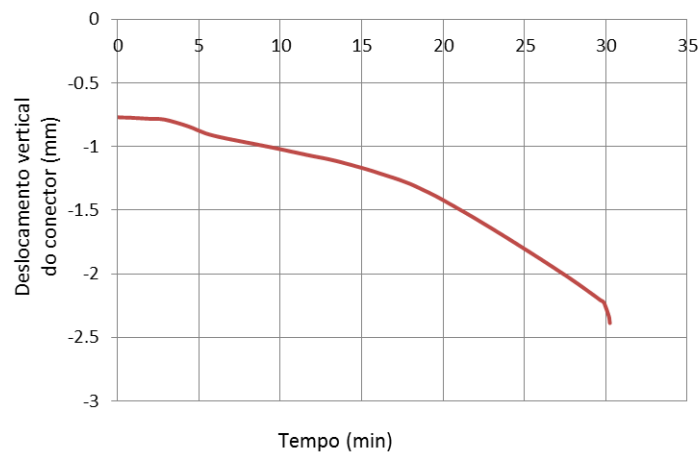


Figura 5.35 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 446°C e 520°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 279 MPa (redução de 19%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 70% (30% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,27. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 2,39 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,73 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 178 MPa. A falha estrutural ocorreu no Concreto, devido ao efeito de tração provocado por efeitos térmicos e as deformações provocadas pela carga aplicada na Chapa Passante que foi transmitida ao concreto. A combinação destes dois esforços fez com que acontecesse fissuração no concreto e por isso o tempo resistente da estrutura não foi alto. A Figura 5.36 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são enfatizados os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de Tração devido a falha ocorrer no concreto.

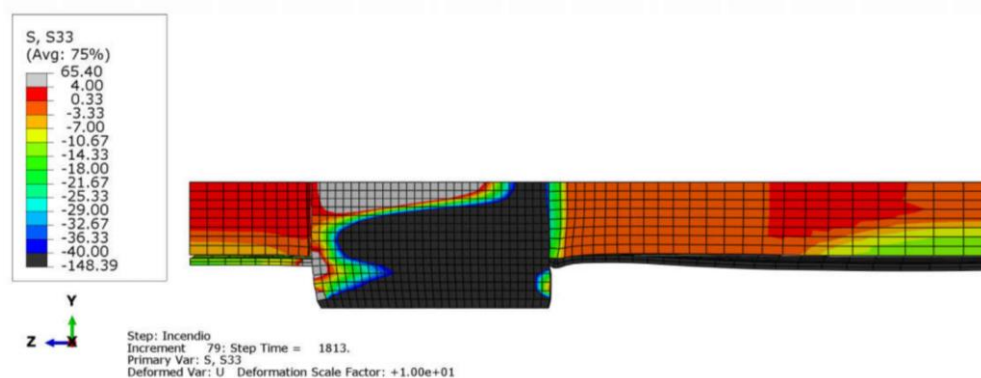


Figura 5.36 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 0,70. Em ambos os casos as falhas aconteceram no núcleo de concreto. No momento da falha, a tensão final máxima de Von Mises no Crestbond foi de 133 MPa, a da Chapa Passante foi de 178 MPa, sendo a razão entre elas de 0,75. O Crestbond apresentou temperatura final maior do que a Chapa Passante, fazendo com que ele tivesse f_y menor.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos até os 30 minutos (momento da falha com a Chapa Passante). O programa apresentou maiores problemas de convergência com a Chapa Passante devido efeito da expansão térmica, sendo que com o Crestbond, o Abaqus não apresentou os mesmos problemas. A Chapa Passante teve comportamento pior do que o do Crestbond por ter tido o tempo resistente menor (30%) e a falha ter ocorrido no concreto.

5.4 Diâmetro de 400 mm

5.4.1 70% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 25 minutos

As Figuras 5.37 a 5.41 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 400 mm com nível de carga de 70%.

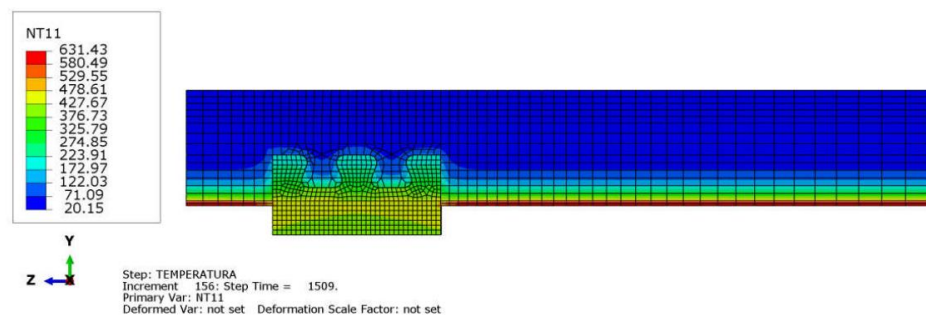


Figura 5.37 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

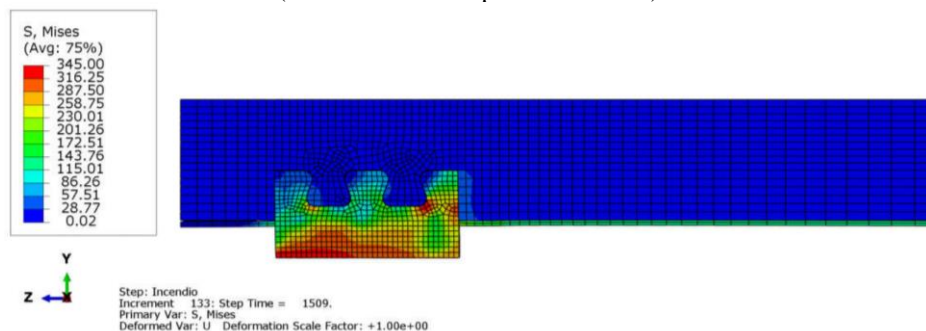


Figura 5.38 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

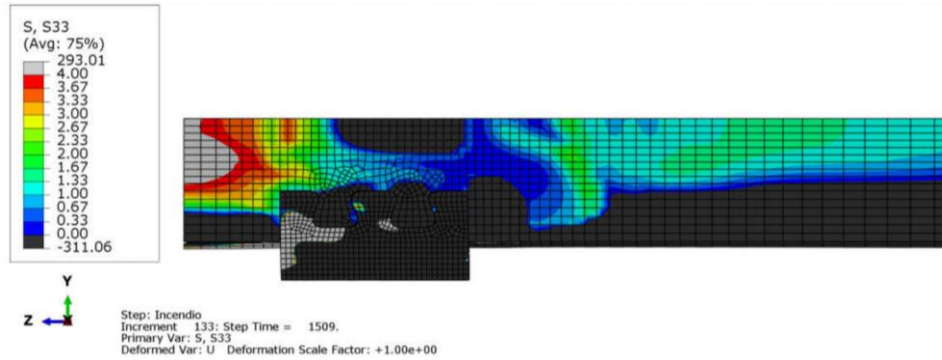


Figura 5.39 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

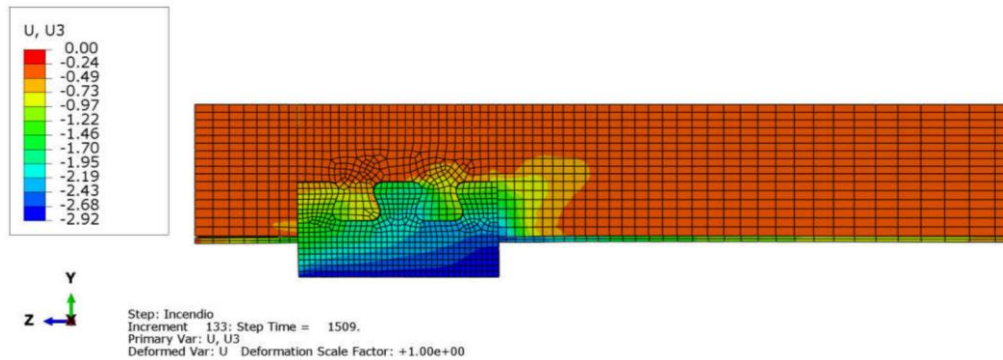


Figura 5.40 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

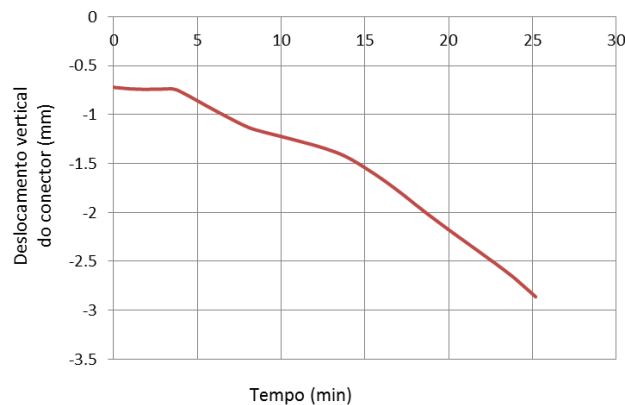


Figura 5.41 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 376°C e 478°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 314 MPa (redução de 9%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 30% (70% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,30. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 2,86mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,79 mm). A tensão final máxima de Von Mises

no conector alcançou 336 MPa. A falha estrutural ocorreu no Concreto, devido ao efeito de tração provocado por efeitos térmicos e as deformações provocadas por uma elevada carga aplicada no Crestbond que foi transmitida ao concreto. A combinação destes dois esforços fez com que acontecesse elevada fissuração no concreto e por isso tempo resistente do pilar não foi alto. A Figura 5.42 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são enfatizados os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de Tração devido a falha ocorrer no concreto.

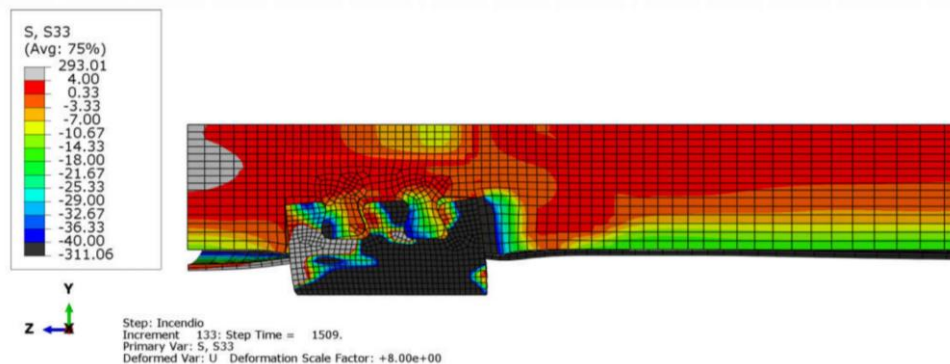


Figura 5.42 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores obtidos com o Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 400 mm sobre o de 200 mm é de 3,13. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 400 mm (0,79 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,65 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos, sendo que nestes dois casos a falha aconteceu no núcleo de concreto. Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 400 mm mostraram serem melhores do que os obtidos no de 200 mm, por ter tido tempo resistente muito maior (213%).

Chapa Passante

Tempo Resistente: 18 minutos

As Figuras 5.43 a 5.47 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 400 mm com nível de carga de 70%.

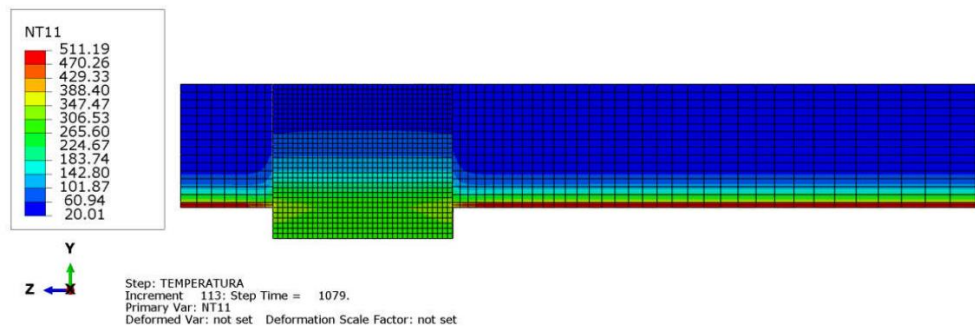


Figura 5.43 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

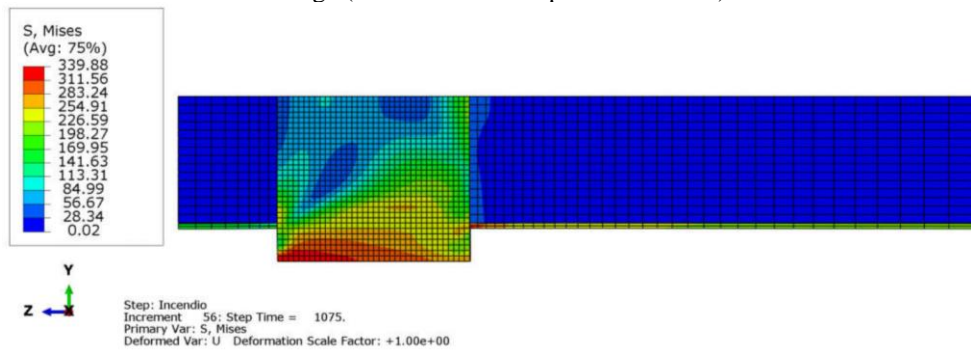


Figura 5.44 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

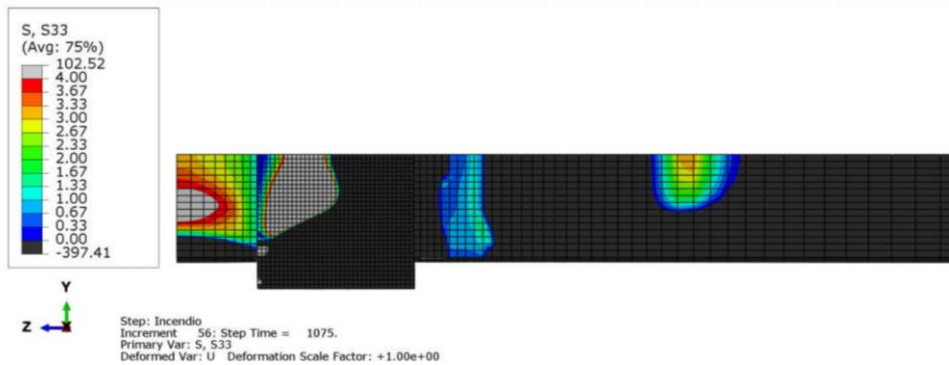


Figura 5.45 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

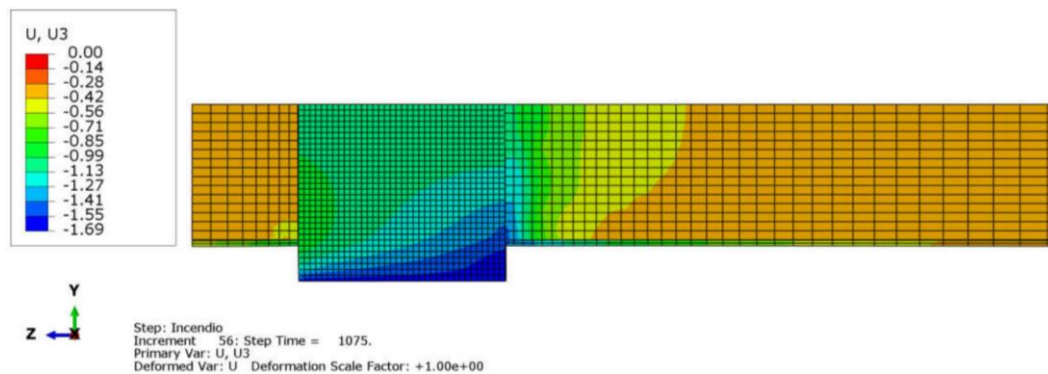


Figura 5.46 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

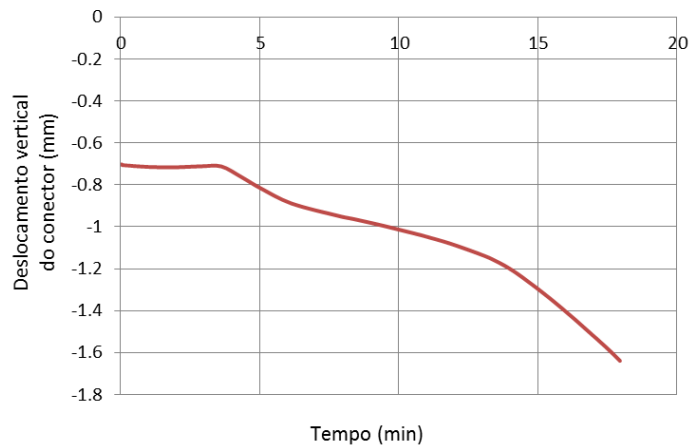


Figura 5.47 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 306°C e 347°C. Isto fez com a parte externa do conector não tivesse redução de f_y (0%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 30% (70% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,00. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 1,64 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,70 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 340 MPa. A falha estrutural ocorreu no Concreto, devido ao efeito de tração provocado por efeitos térmicos e as deformações provocadas por uma elevada carga aplicada no Crestbond que foi transmitida ao concreto. A combinação destes dois esforços fez com que acontecesse elevada fissuração no concreto e por isso o tempo resistente do pilar não foi alto. A Figura 5.48 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são enfatizados os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de Tração devido a falha ocorrer no concreto.

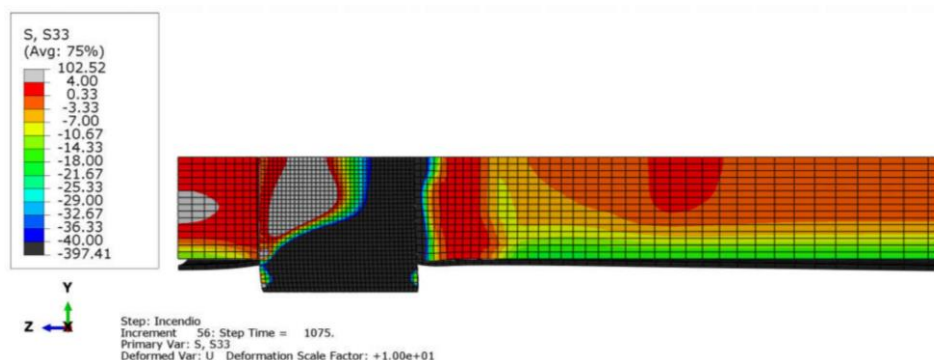


Figura 5.48 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores obtidos com a Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 400 mm sobre o de 200 mm é de 2,57. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 400 mm (0,70 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,66 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos, sendo que nestes dois casos a falha aconteceu no núcleo de concreto. Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 400 mm mostraram serem melhores do que os obtidos no de 200 mm, por ter tido tempo resistente muito maior (157%).

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 0,72. Em ambos os casos as falhas aconteceram no núcleo de concreto. No momento da falha, a tensão final máxima de Von Mises no Crestbond foi de 336 MPa, a da Chapa Passante foi de 340 MPa, sendo a razão entre elas de 0,99. O Crestbond apresentou temperatura final maior do que a da Chapa Passante por ter resistido um a um maior tempo de exposição ao incêndio.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos até os 18 minutos (momento da falha com a Chapa Passante). Em ambos os casos o programa apresentou dificuldades na convergência, sendo que os esforços de tração provocados por efeitos térmicos juntamente com elevada carga aplicada fizeram com que os tempos resistentes fossem baixo. A Chapa Passante teve comportamento um pouco pior do que o do Crestbond por ter tido o tempo resistente menor (28%).

5.4.2 50% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 34 minutos

As Figuras 5.49 a 5.53 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 400 mm com nível de carga de 50%.

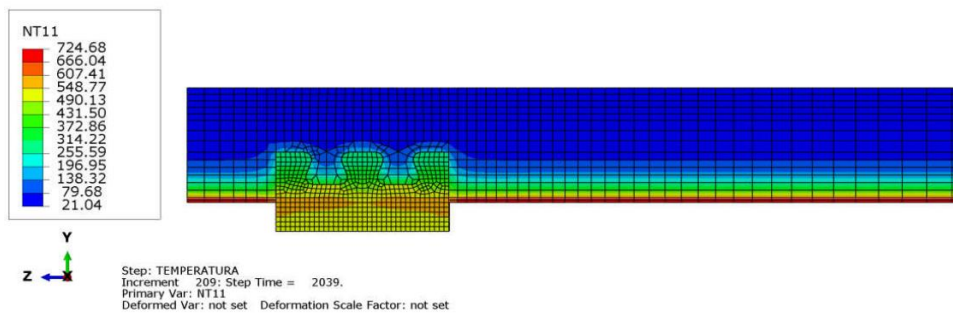


Figura 5.49 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

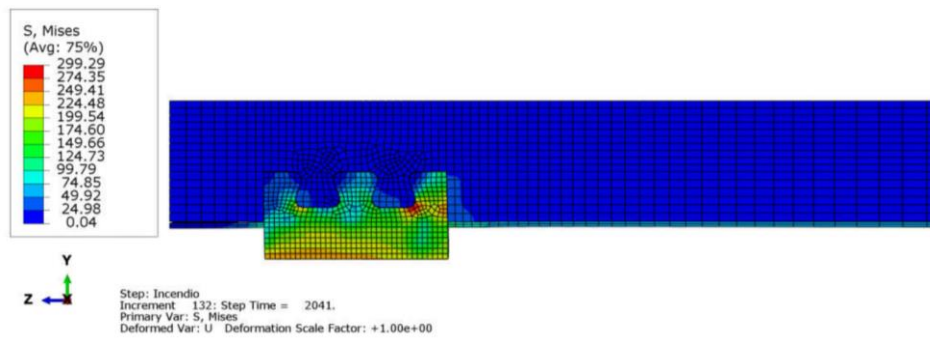


Figura 5.50 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

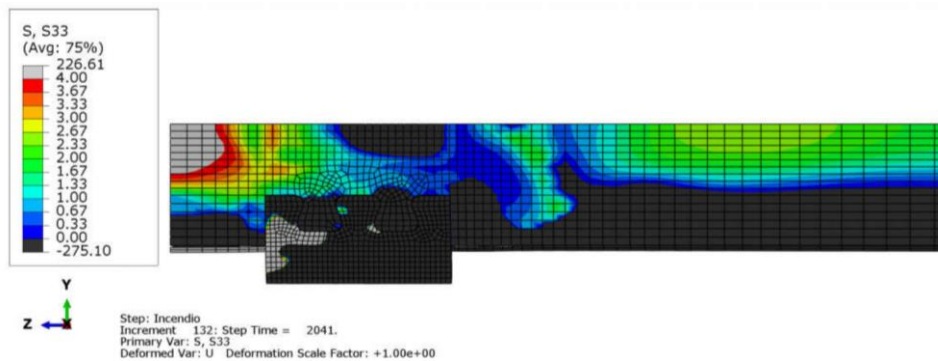


Figura 5.51 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

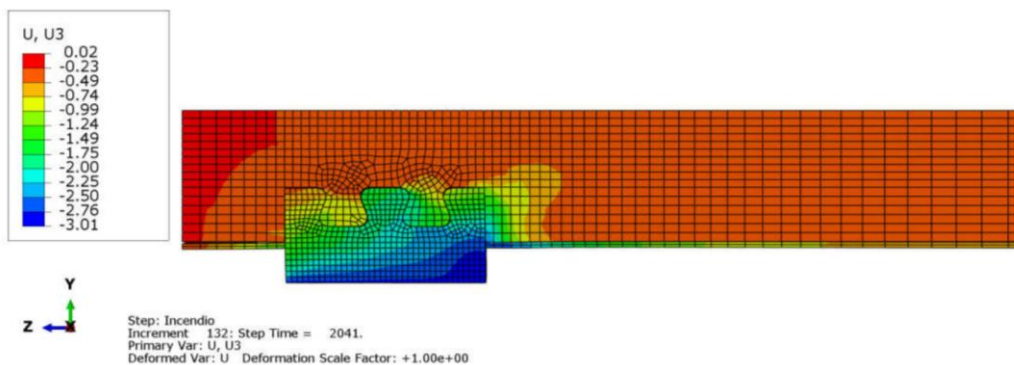


Figura 5.52 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

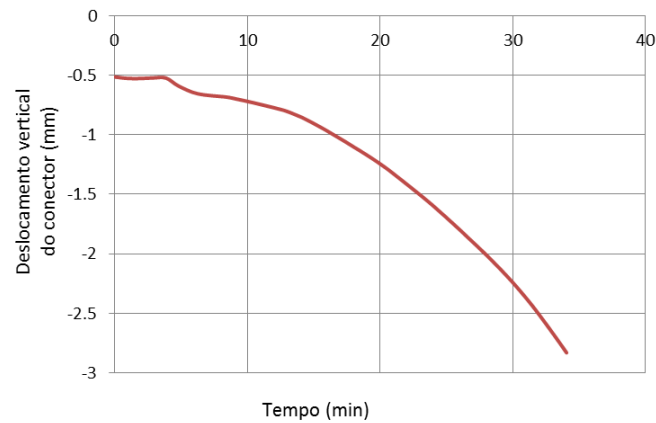


Figura 5.53 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 490°C e 570°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 225 MPa (redução de 35%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 50% (50% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,70. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 2,83 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,51 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 250 MPa. A falha estrutural ocorreu no Concreto, devido ao efeito de tração provocado por efeitos térmicos e as deformações provocadas pela carga aplicada no Crestbond que foi transmitido ao concreto. A Figura 5.54 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são enfatizados os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de Tração devido a falha ocorrer no concreto.

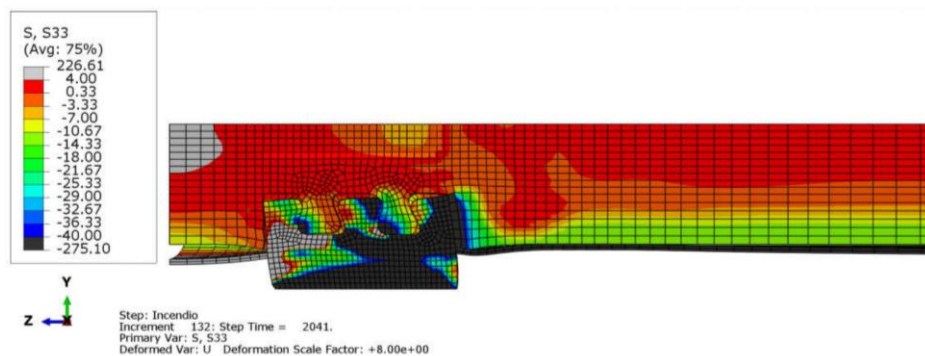


Figura 5.54 - Deformada (tensões longitudinais) no Pilar com o Crestbond de diâmetro de 400 mm com 50% de carga (Resultado com Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores do pilar com o Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 400 mm sobre o de 200 mm é de 2,27. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 400 mm (0,51 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,18 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos, sendo que nestes dois casos a falha aconteceu no núcleo de concreto. Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 400 mm mostraram serem melhores do que os obtidos no de 200 mm, por ter tido tempo resistente muito maior (127%).

Chapa Passante

Tempo Resistente: 28 minutos

As Figura 5.55 Figura 5.59 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 400 mm com nível de carga de 50%.

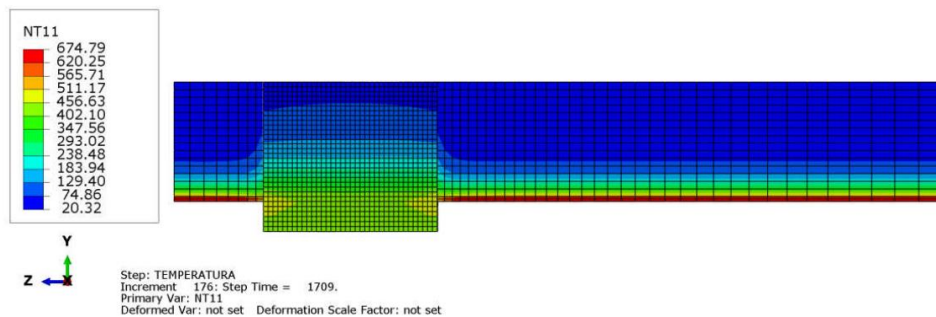


Figura 5.55 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

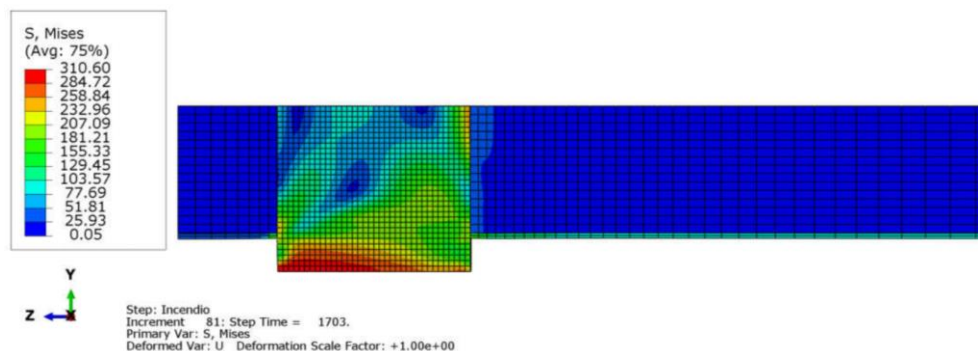


Figura 5.56 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

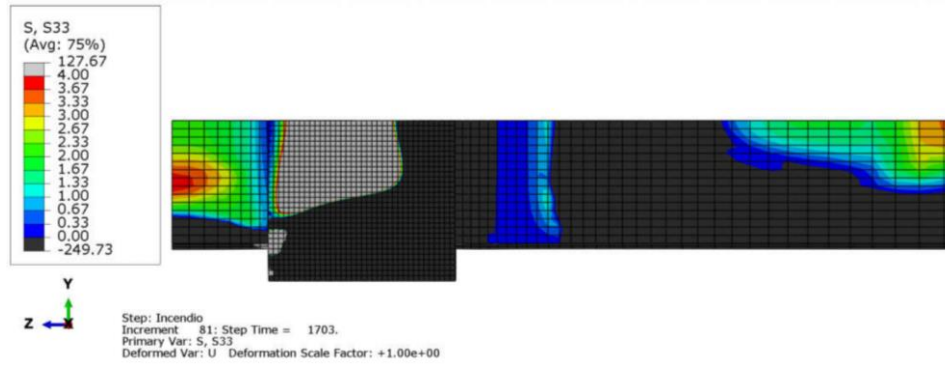


Figura 5.57 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

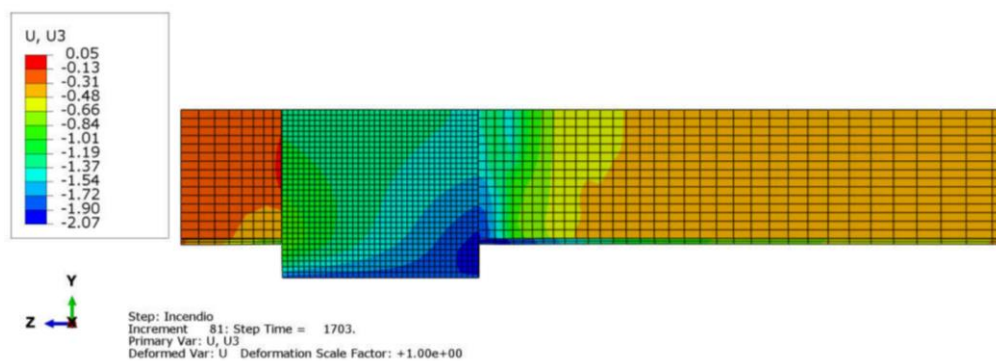


Figura 5.58 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

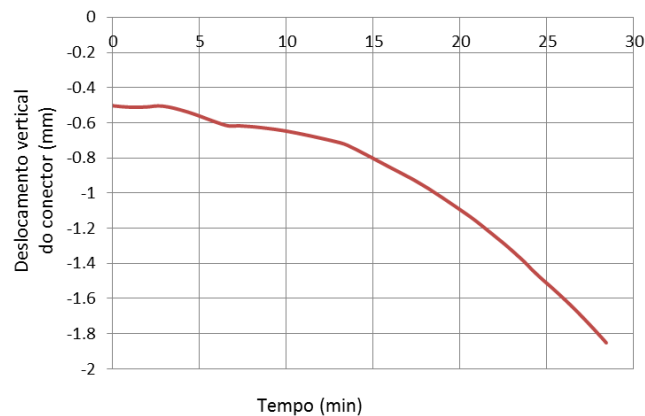


Figura 5.59 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 402°C e 460°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 321 MPa (redução de 7%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 50% (50% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,14. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de

1,86 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,50 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 310 MPa. A falha estrutural ocorreu no Concreto, devido ao efeito de tração provocado por efeitos térmicos e as deformações provocadas pela carga aplicada na Chapa Passante que foi transmitida ao concreto. A combinação destes dois esforços fez com que acontecesse elevada fissuração no concreto e por isso o tempo resistente do pilar não foi alto. A Figura 5.60 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são enfatizados os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de Tração devido a falha ocorrer no concreto.

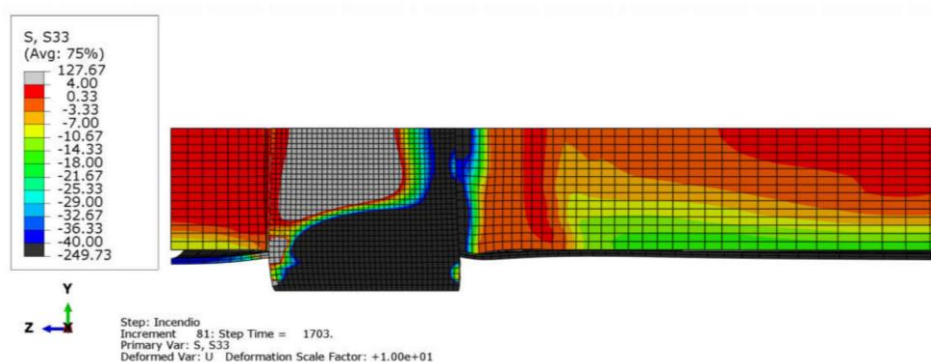


Figura 5.60 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores obtidos com a Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 400 mm sobre o de 200 mm é de 1,22. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 400 mm (0,50 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,15 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos, sendo que nestes dois casos a falha aconteceu no núcleo de concreto. Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 400 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 200 mm, por ter tido tempo resistente maior (22%).

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 0,82. Em ambos os casos as falhas aconteceram no núcleo de concreto. No momento da falha, as tensões finais máximas de Von Mises no Crestbond foi de 250 MPa, as da Chapa Passante foi de 310 MPa, sendo a razão entre elas de 0,81. O Crestbond apresentou temperatura final maior do que a da Chapa Passante por ter resistido um a um maior tempo de exposição ao incêndio.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos até os 28 minutos (momento da falha com a Chapa Passante). Em ambos os casos o programa apresentou dificuldades na convergência devido ao fenômeno da expansão térmica. A Chapa Passante teve comportamento um pouco pior do que o do Crestbond por ter tido o tempo resistente menor (18%).

5.4.3 30% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 43 minutos

As Figuras 5.61 a 5.65 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 400 mm com nível de carga de 30%.

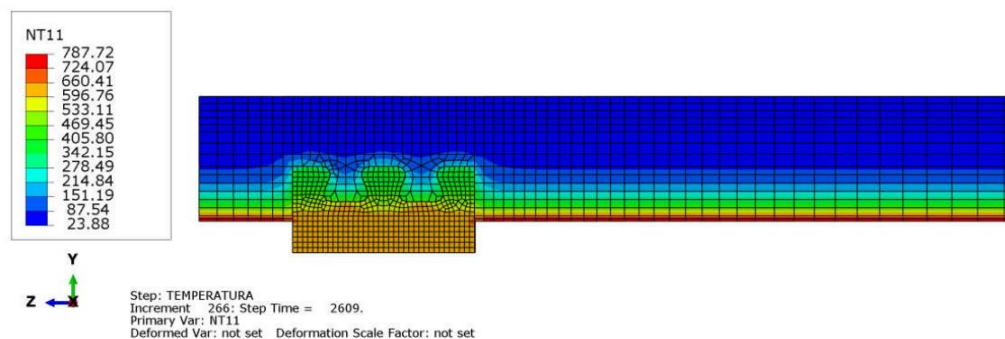


Figura 5.61 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

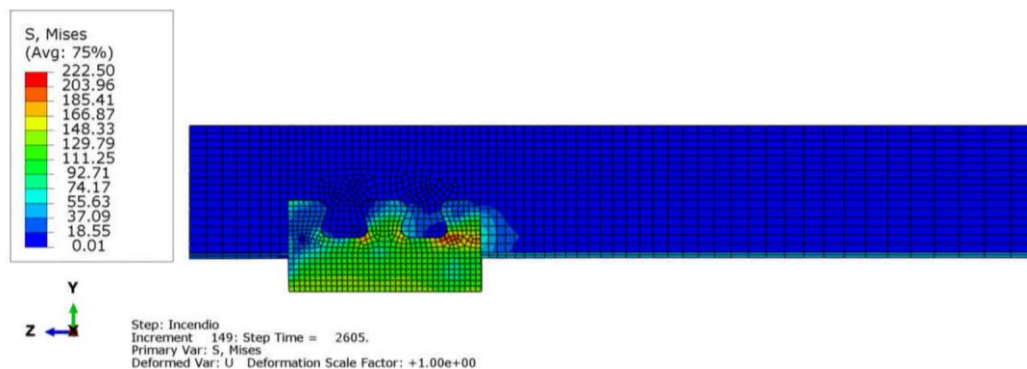


Figura 5.62 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

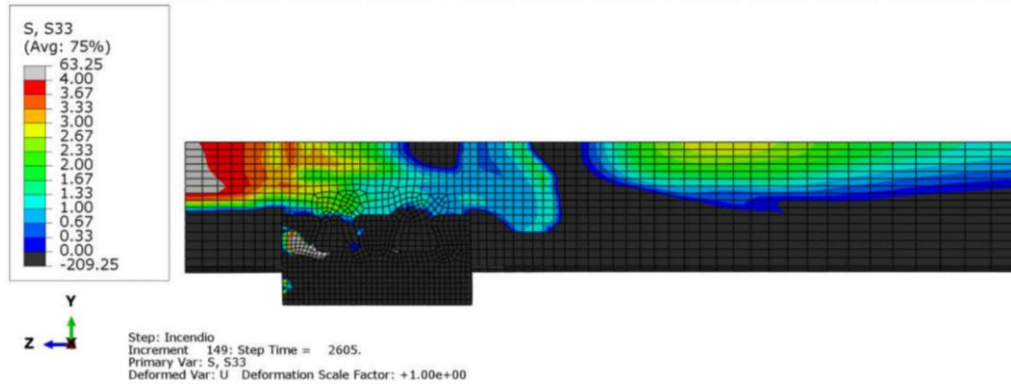


Figura 5.63 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

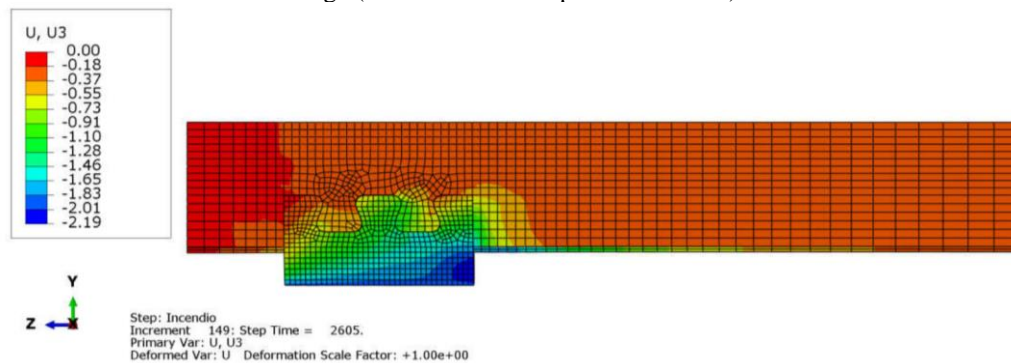


Figura 5.64 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

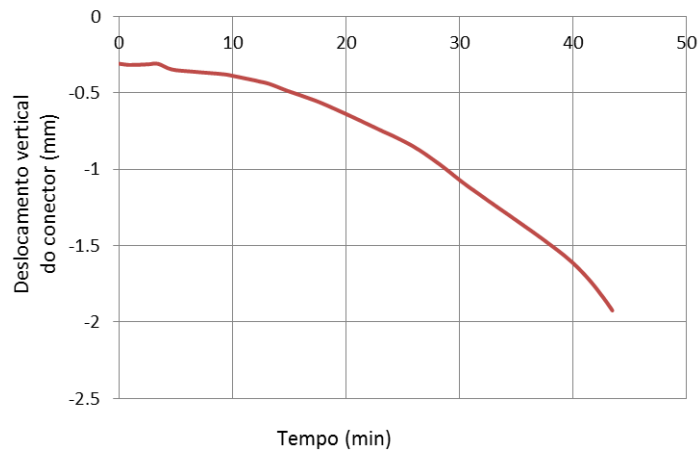


Figura 5.65 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 596°C e 660°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 140 MPa (redução de 59%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 70% (30% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,84. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 1,92 mm em

situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,31 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 148 MPa. A falha estrutural ocorreu no Concreto, devido ao efeito de tração provocado por efeitos térmicos e as deformações provocadas pela carga aplicada no Crestbond que foi transmitida ao concreto. A Figura 5.66 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são enfatizados os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de Tração devido a falha ocorrer no concreto.

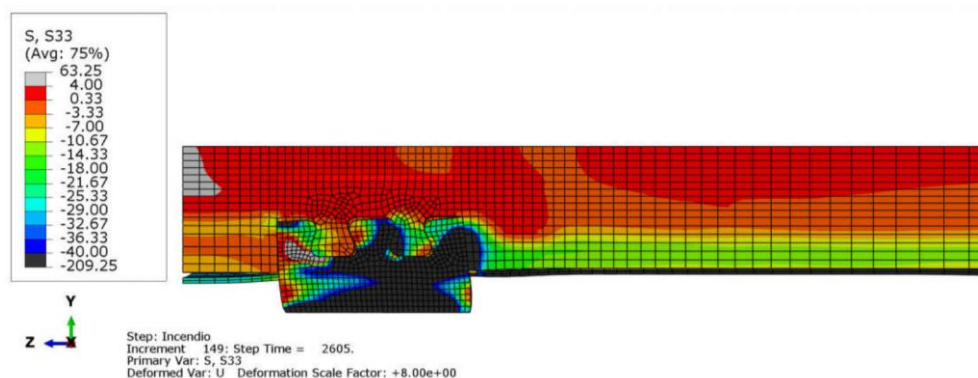


Figura 5.66 - Deformada (Tensões Longitudinais) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores obtidos com o Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 400 mm sobre o de 200 mm é de 1,00. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 400 mm (0,31 mm) foi menor do que o de 200 mm (0,71 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos, sendo que nestes dois casos a falha aconteceu no núcleo de concreto. Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 400 mm mostraram serem praticamente iguais aos obtidos no diâmetro de 200 mm.

Chapa Passante

Tempo Resistente: 59 minutos

As Figuras 5.67 a 5.71 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 400 mm com nível de carga de 30%.

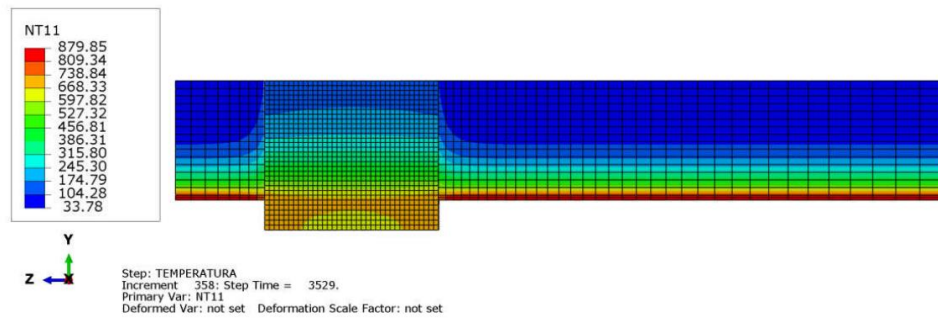


Figura 5.67 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

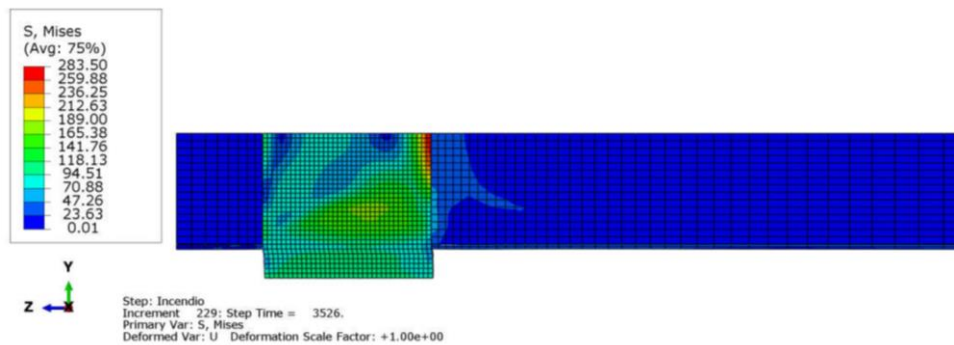


Figura 5.68 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

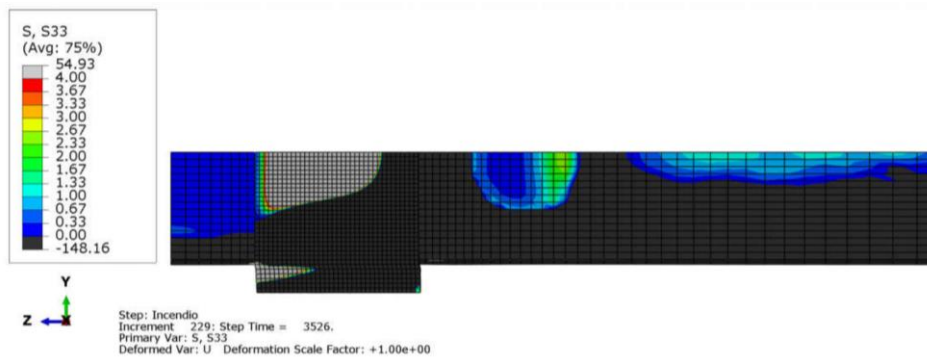


Figura 5.69 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

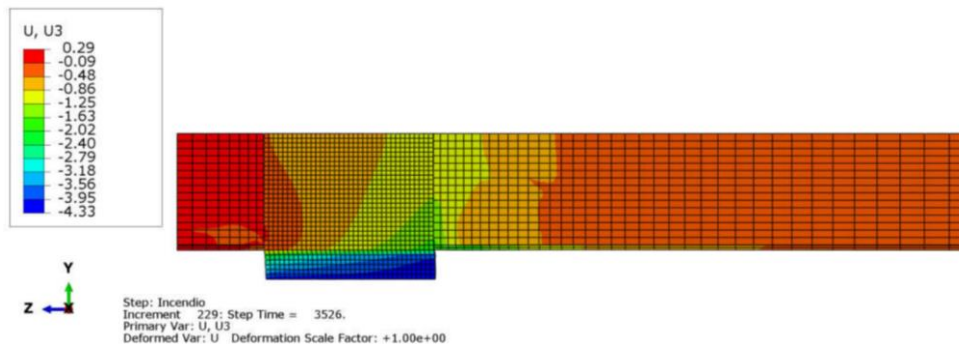


Figura 5.70 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

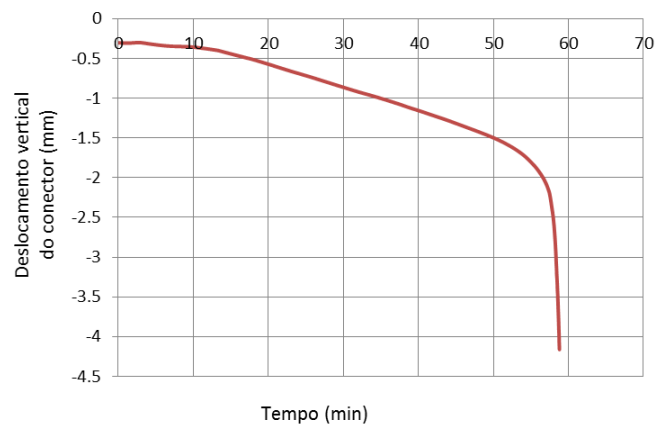


Figura 5.71 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 625°C e 738°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 104 MPa (redução de 70%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 70% (30% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,00. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 4,16 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,30 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 189 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. Ao longo do tempo houve redistribuição de tensões de tração no concreto devido a efeitos térmicos e em conjunto com a baixa carga transferida pela Chapa Passante, fez com que o concreto não falhasse. A Figura 5.72 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores dos deslocamentos.

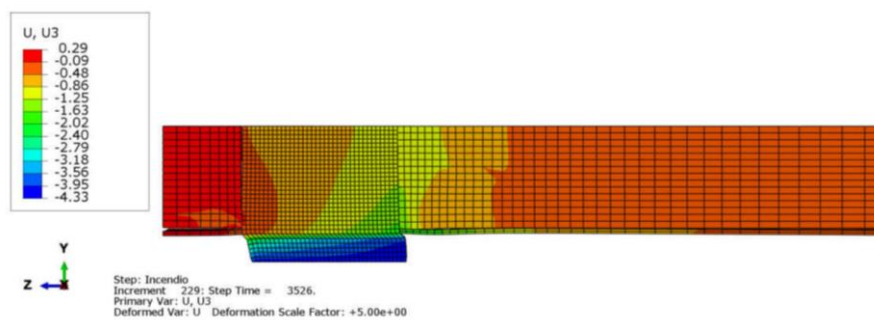


Figura 5.72 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores obtidos com a Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 400 mm sobre o de 200 mm é de 1,97. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 400 mm (0,30 mm) foi menor do que o de 200 mm (0,73 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento diferentes, sendo que no diâmetro de 400 mm a falha ocorreu no conector e no diâmetro de 200 mm foi no concreto. Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 400 mm mostraram serem melhores do que os obtidos no de 200 mm, por ter tido tempo resistente muito maior (97%).

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 1,37. Com o Crestbond a falha ocorreu no concreto, entretanto, com a Chapa Passante foi no próprio conector. No momento da falha, a tensão final máxima de Von Mises no Crestbond foi de 148 MPa, a da Chapa Passante foi de 189 MPa, sendo a razão entre elas de 0,78. A Chapa Passante apresentou temperatura final maior do que a do Crestbond por ter resistido um a um maior tempo de exposição ao incêndio.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos até os 43 minutos (momento da falha com o Crestbond). O programa apresentou maiores problemas de convergência com o Crestbond devido ao efeito da expansão térmica. Com a Chapa Passante Abaqus não apresentou os mesmos problemas sendo que neste caso a falha ocorreu no próprio conector. A Chapa Passante teve comportamento melhor do que o do Crestbond por ter tido o tempo resistente maior (37%).

5.5 Diâmetro de 600 mm

5.5.1 70% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 27 minutos

As Figuras 5.73 a 5.77 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 600 mm com nível de carga de 70%.

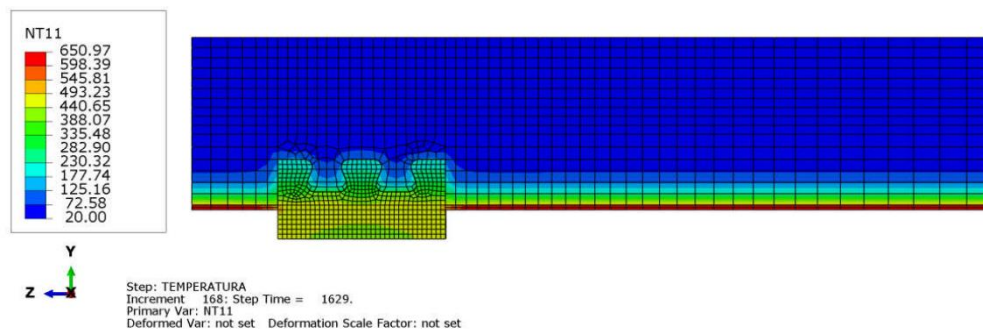


Figura 5.73 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

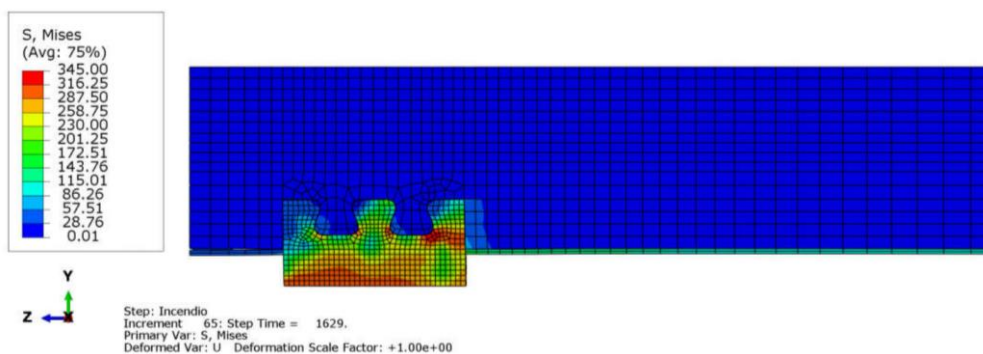


Figura 5.74 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

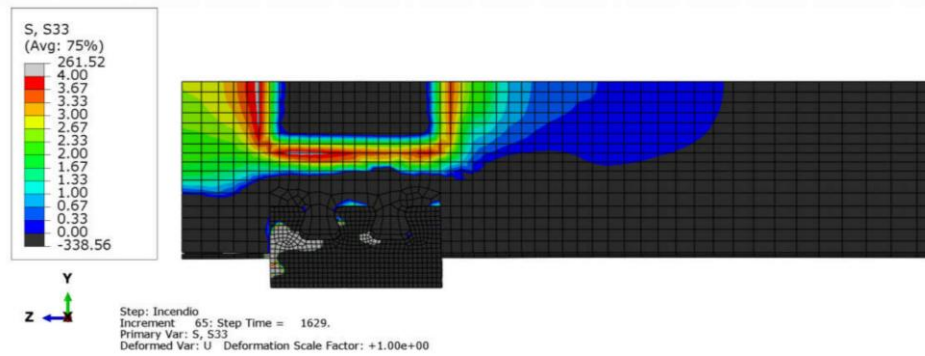


Figura 5.75 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

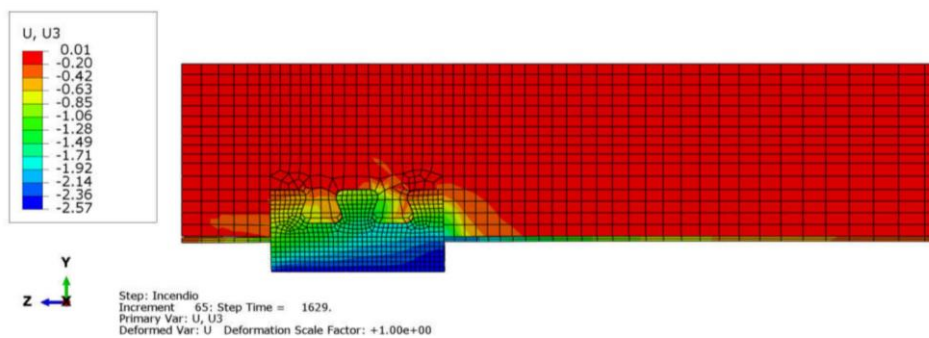


Figura 5.76 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

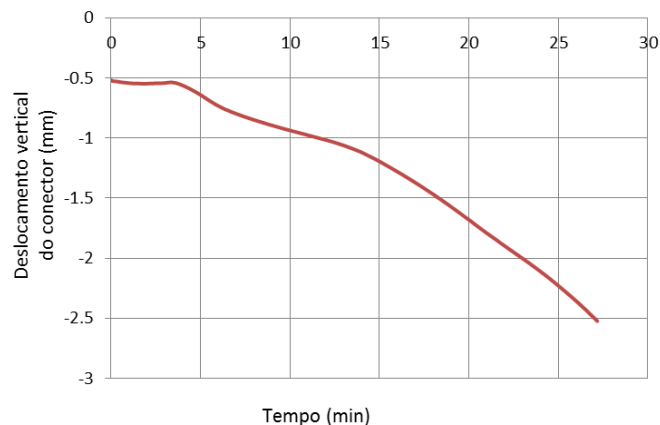


Figura 5.77 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 430°C e 493°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 294 MPa (redução de 14%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 30% (70% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,47. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 2,52 mm em

situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,52 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 316 MPa. A falha estrutural ocorreu no Concreto, devido ao efeito de tração provocado por efeitos térmicos e as deformações provocadas por uma elevada carga aplicada no Crestbond que foi transmitida ao concreto. A combinação destes dois esforços fez com que acontecesse elevada fissuração no concreto e por isso tempo resistente do pilar não foi alto. A Figura 5.78 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são enfatizados os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de Tração devido a falha ocorrer no concreto.

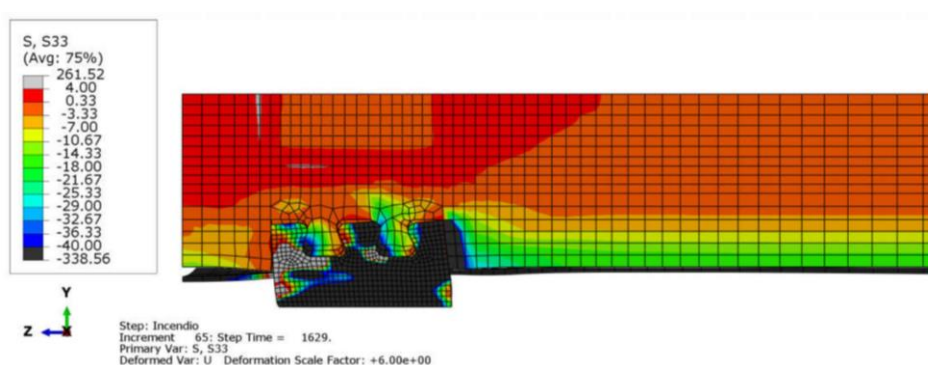


Figura 5.78 - Deformada (Tensões longitudinais) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 200 mm é de 3,38. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,52 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,65 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos, sendo que nestes dois casos a falha aconteceu no núcleo de concreto. Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram serem melhores do que os obtidos no de 200 mm, por ter tido tempo resistente muito maior (238%).

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 400 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 400 mm é de 1,08. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,52 mm) foi menor do que o de 400 mm (0,79 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos, sendo que nestes dois casos a falha aconteceu no núcleo de concreto. Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 400 mm por ter tido tempo resistente apenas ligeiramente maior (8%).

Chapa Passante

Tempo Resistente: 31 minutos

As Figuras 5.79 a 5.83 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 600 mm com nível de carga de 70%.

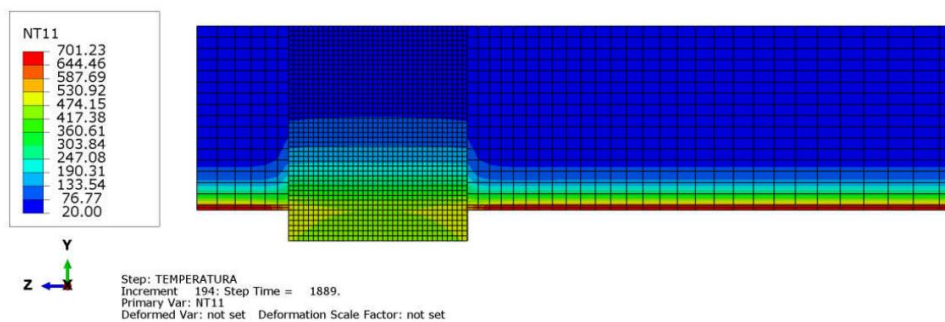


Figura 5.79 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

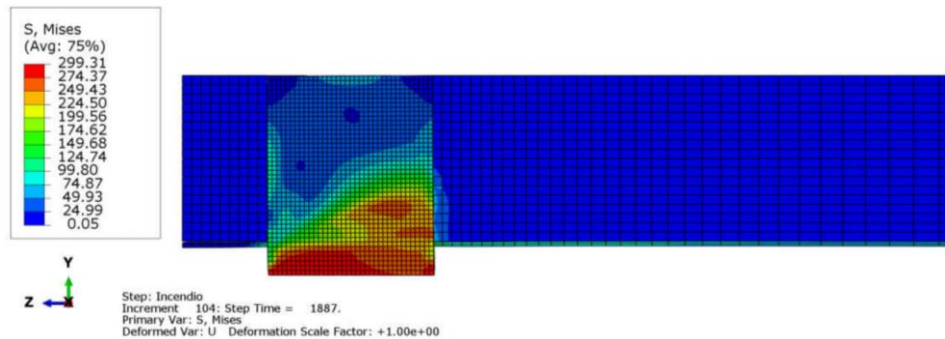


Figura 5.80 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

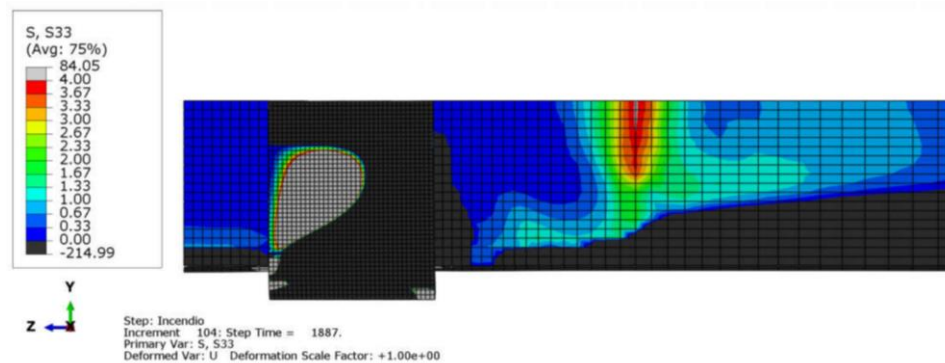


Figura 5.81 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

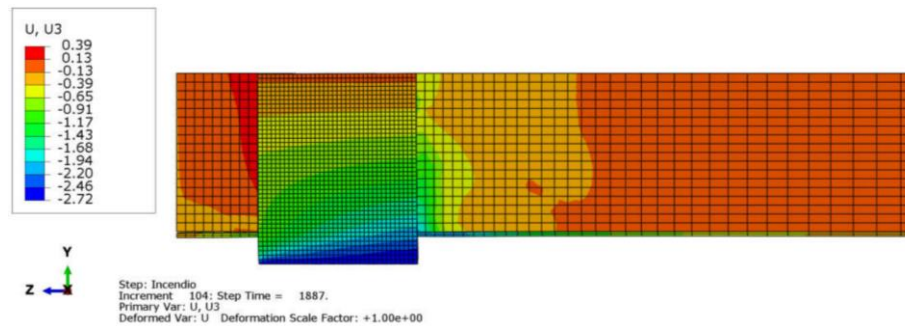


Figura 5.82 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

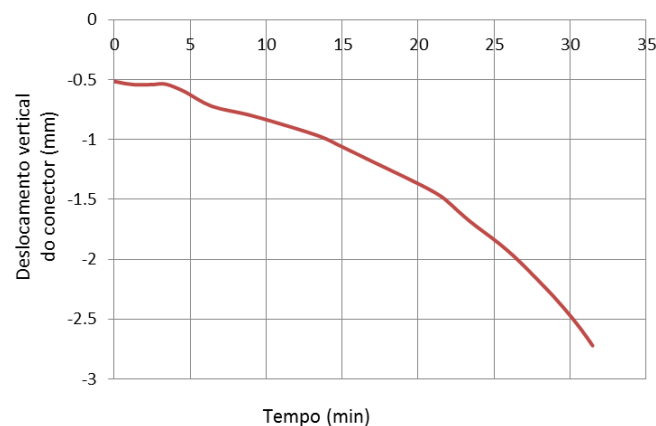


Figura 5.83 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 417°C e 530°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 287 MPa (redução de 17%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 30% (70% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,57. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 2,72 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,51 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 299 MPa. A falha estrutural ocorreu no Concreto, devido ao efeito de tração provocado por efeitos térmicos e as deformações provocadas por uma elevada carga aplicada na Chapa Passante que foi transmitida ao concreto. A combinação destes dois esforços fez com que acontecesse elevada fissuração no concreto e por isso tempo resistente do pilar não foi alto. A Figura 5.84 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são enfatizados os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de Tração devido a falha ocorrer no concreto.

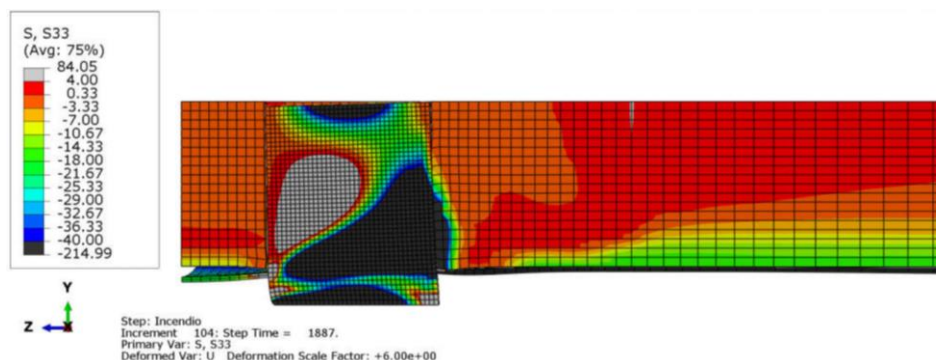


Figura 5.84 - Deformada (Tensões longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores da Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 200 mm é de 4,43. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,51 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,66 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos, sendo que nestes dois casos a falha aconteceu no núcleo de concreto. Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram serem melhores do que os obtidos no de 200 mm, por ter tido tempo resistente muito maior (343%).

Obs.: Em comparação com os valores da Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 400 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 400 mm é de 1,72. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,51 mm) foi menor do que o de 400 mm (0,70 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos, sendo que nestes dois casos a falha aconteceu no núcleo de concreto. Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser melhores do que os obtidos no de 400 mm por ter tido tempo resistente maior (72%).

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 1,15. Em ambos os casos as falhas aconteceram no núcleo de concreto. No momento da falha, a tensão final máxima de Von Mises no Crestbond foi de 316 MPa, a da Chapa Passante foi de 299 MPa, sendo a razão entre elas de 1,06. O Crestbond apresentou temperatura final menor do que a da Chapa Passante, fazendo com que ele tivesse f_y maior, porém falhou com um tempo inferior.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos, sendo que a falha não ocorreu nos conectores. Em ambos os casos o programa apresentou dificuldades na convergência, sendo que os esforços de tração provocados por efeitos térmicos juntamente com a elevada carga aplicada fizeram com que os tempos resistentes não fossem altos. A Chapa Passante teve comportamento um pouco melhor do que o do Crestbond por ter tido o tempo resistente ligeiramente maior (15%).

5.5.2 50% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 40 minutos

As Figuras 5.85 a 5.89 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 600 mm com nível de carga de 50%.

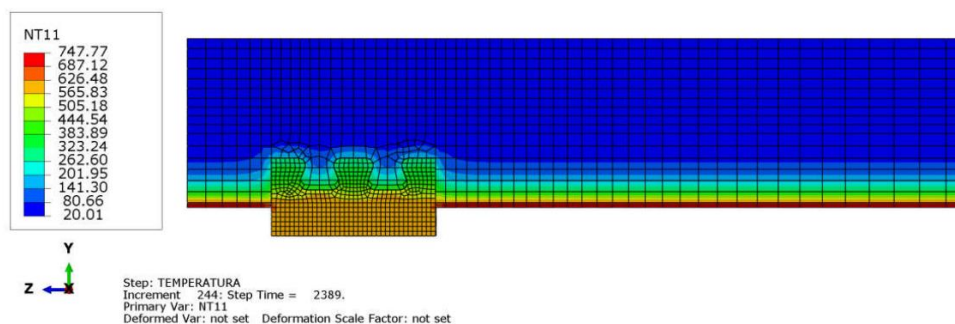


Figura 5.85 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

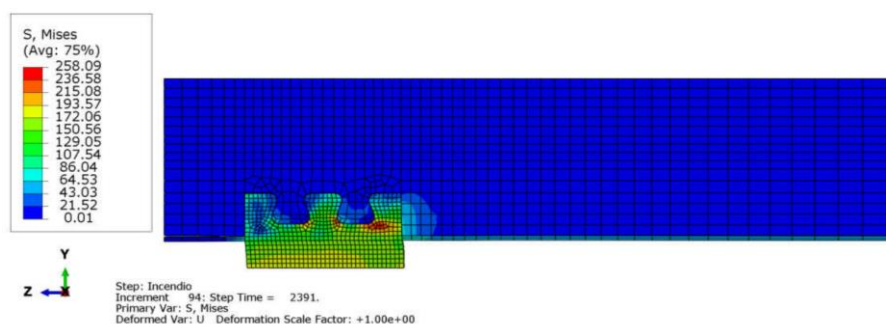


Figura 5.86 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

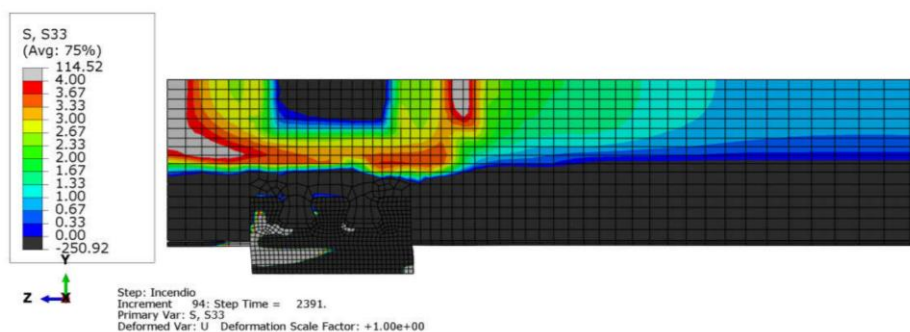


Figura 5.87 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

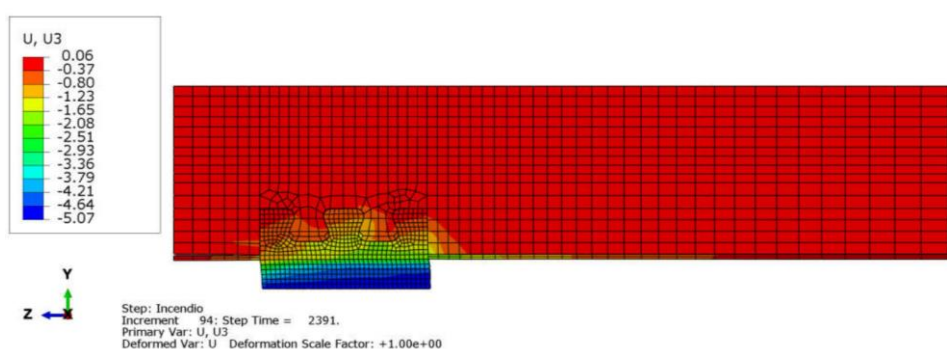


Figura 5.88 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

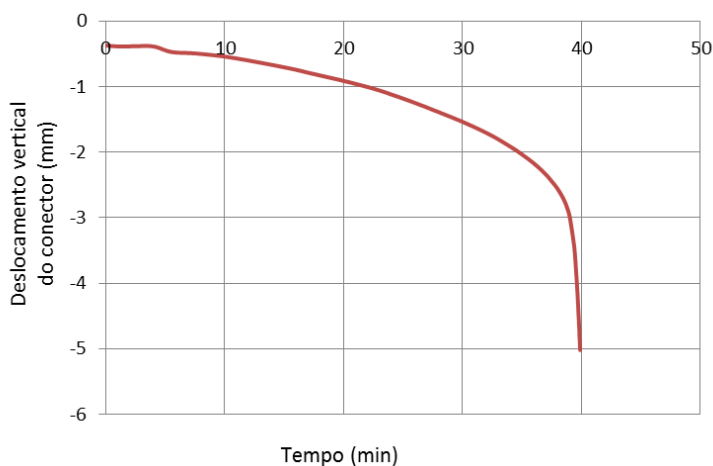


Figura 5.89 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 565°C e 626°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 169 MPa (redução de 49%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 50% (50% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,98. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que

recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 5,02 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,37 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 193 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa do Crestbond que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. Ao longo do tempo houve redistribuição de tensões de tração no concreto devido aos efeitos térmicos e em conjunto com a moderada carga transferida pelo Crestbond, fez com que o concreto não falhasse. A combinação destes dois esforços fez com que acontecesse uma moderada fissuração no concreto e por isso o tempo resistente da estrutura não foi baixo. A Figura 5.90 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela é mostrado os valores de deslocamento.

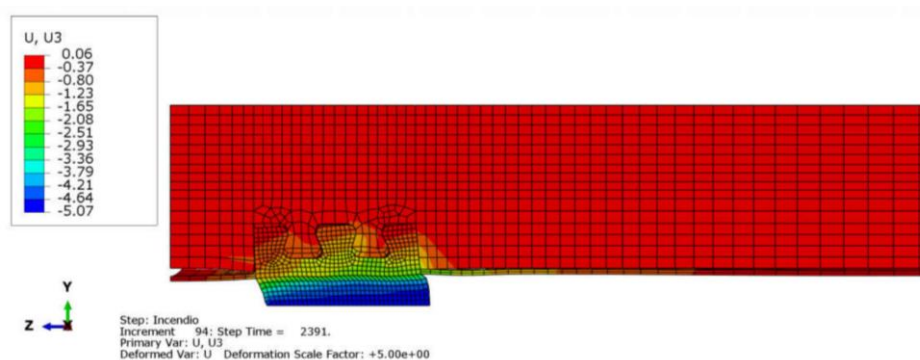


Figura 5.90 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 200 mm é de 2,67. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,37 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,18 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento diferentes, sendo que no diâmetro de 600 mm a falha foi no conector e no diâmetro de 200 mm foi no concreto. Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram serem melhores do que os obtidos no de 200 mm, por ter tido tempo resistente muito maior (167%).

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 400 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 400 mm é de 1,18. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,37 mm) foi menor do que o de 400 mm (0,51 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento diferentes, sendo que no diâmetro de 600

mm a falha foi no conector e no diâmetro de 400 mm foi no concreto. Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 400 mm por ter tido tempo resistente apenas ligeiramente maior (18%).

Chapa Passante

Tempo Resistente: 43 minutos

As Figuras 5.91 a 5.95 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 600 mm com nível de carga de 50%.

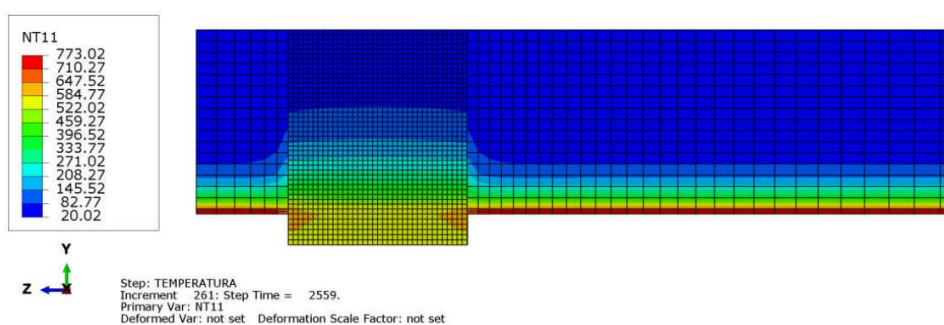


Figura 5.91 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

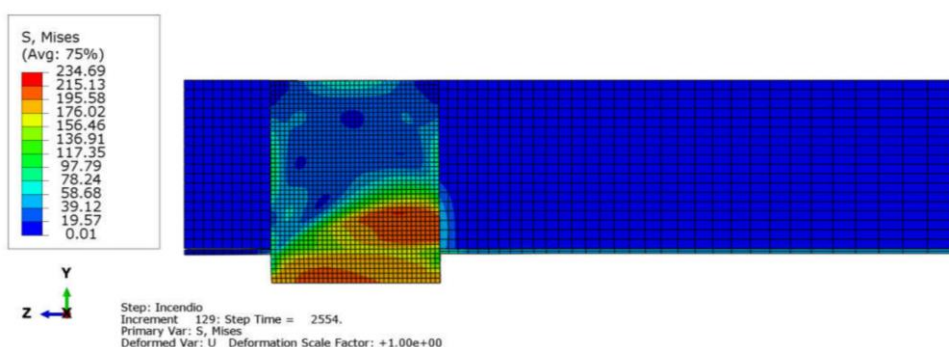


Figura 5.92 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

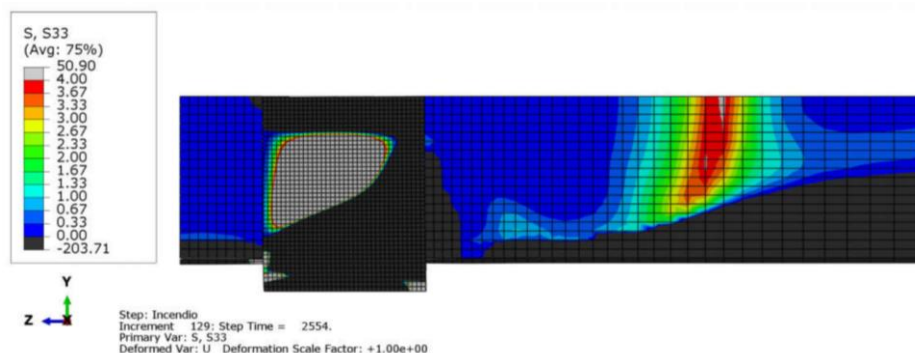


Figura 5.93 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

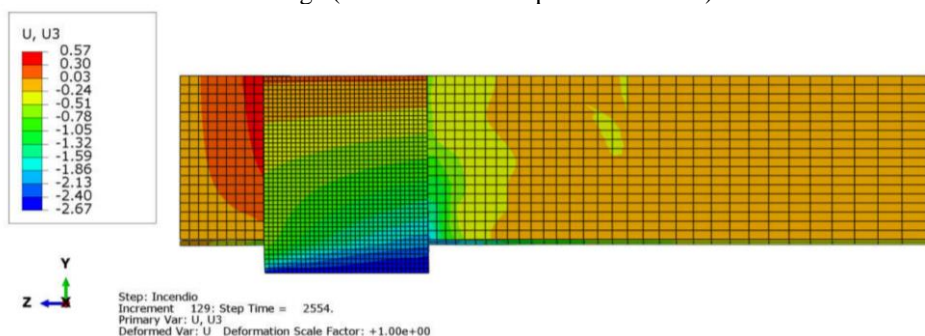


Figura 5.94 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

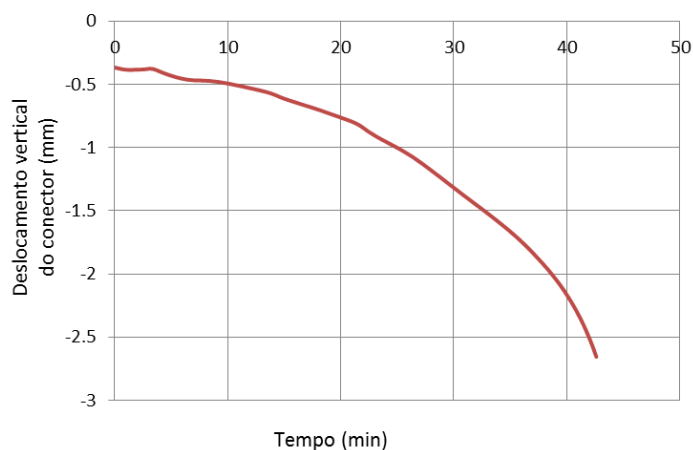


Figura 5.95 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 520°C e 620°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 185 MPa (redução de 46%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 50% (50% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,92. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 2,67 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,37 mm). A tensão final

máxima de Von Mises no conector alcançou 215 MPa. A falha estrutural ocorreu no concreto por ter atingido um deslocamento maior que 0,5 mm (sentido de tração), devido ao efeito de flexão da Chapa Passante. A Figura 5.96 e Figura 5.97 mostram com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, em uma é mostrado os valores dos deslocamentos e outra é enfatizado os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de Tração devido a falha ocorrer no concreto.

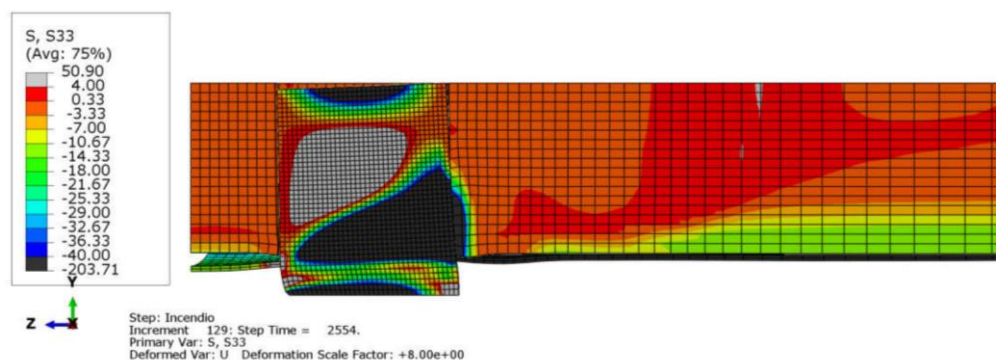


Figura 5.96 - Deformada (tensões longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de diâmetro de 600 mm com 50% de carga (Resultado com Expansão Térmica)

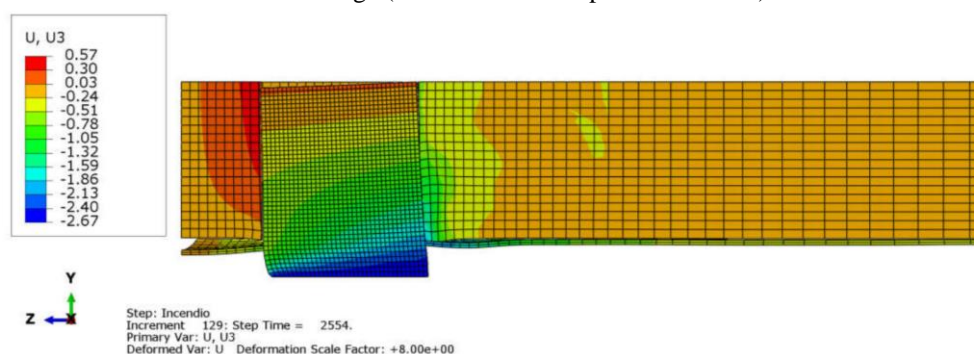


Figura 5.97 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores da Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 200 mm é de 1,87. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,37 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,15 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos, sendo que nestes dois casos a falha aconteceu no núcleo de concreto. Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram serem melhores do que os obtidos no de 200 mm, por ter tido tempo resistente maior (87%). Isto aconteceu pelo fato do diâmetro de 600mm ser maior do que o de 200 mm, o que fez com que a temperatura interna do concreto aumentasse de maneira mais lenta, fazendo com que aos esforços de tração provocados por efeitos térmicos demorasse mais tempo para causar maiores danos ao pilar.

Obs.: Em comparação com os valores da Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 400 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 400 mm é de 1,54. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,37 mm) foi menor do que o de 400 mm (0,50 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos, sendo que nestes dois casos a falha aconteceu no núcleo de concreto. Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser melhores do que os obtidos no de 400 mm por ter tido tempo resistente maior (54%). Isto aconteceu pelo fato do diâmetro de 600mm ser maior do que o de 200 mm, o que fez com que a temperatura interna do concreto aumentasse de maneira mais lenta, fazendo com que aos esforços de tração provocados por efeitos térmicos demorasse mais tempo para causar maiores danos ao pilar.

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 1,08. Com a Chapa Passante a falha ocorreu no concreto, entretanto, com o Crestbond foi no próprio conector. No momento da falha, a tensão fina máxima de Von Mises no Crestbond foi de 193 MPa, a da Chapa Passante foi de 215 MPa, sendo a razão entre elas de 0,90. O Crestbond apresentou temperatura final mais elevada do que a Chapa Passante, fazendo com que ele tivesse f_y menor e falhou com um tempo inferior.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio a curva de deslocamento do Crestbond aumentou o deslocamento de forma significativa nos últimos minutos, mostrando que falha ocorreu no próprio conector. Com a Chapa Passante, a curva de deslocamento não apresentou o mesmo comportamento nos últimos minutos, sendo a falha ocorrida no concreto. A Chapa Passante teve comportamento um pouco melhor do que o do Crestbond por ter tido o tempo resistente ligeiramente maior (8%).

5.5.3 30% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 50 minutos

As Figuras 5.98 a 5.102 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 600 mm com nível de carga de 30%.

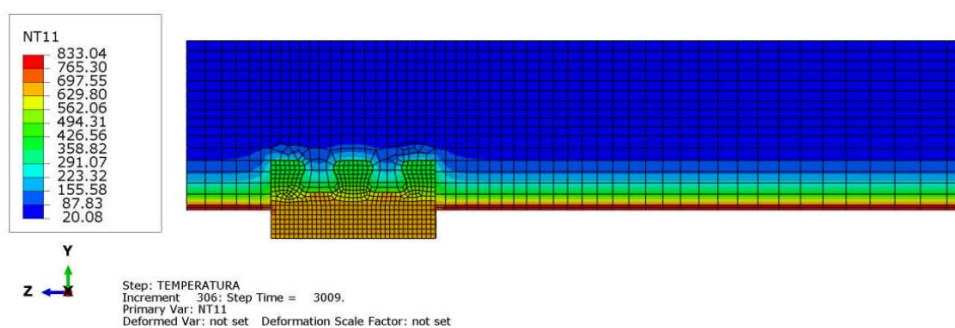


Figura 5.98 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

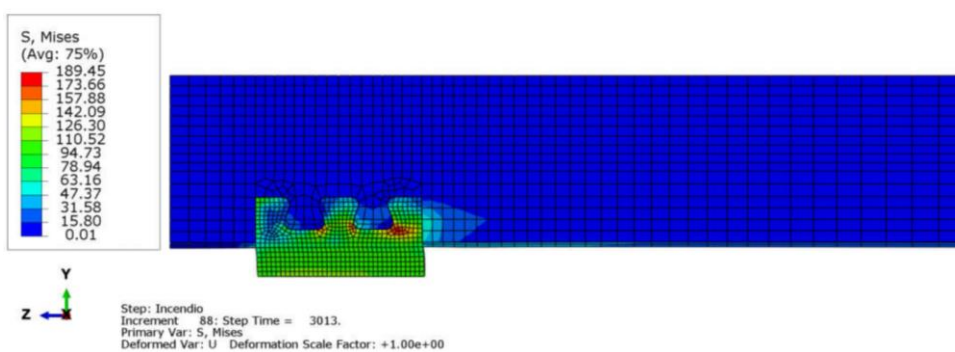


Figura 5.99 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

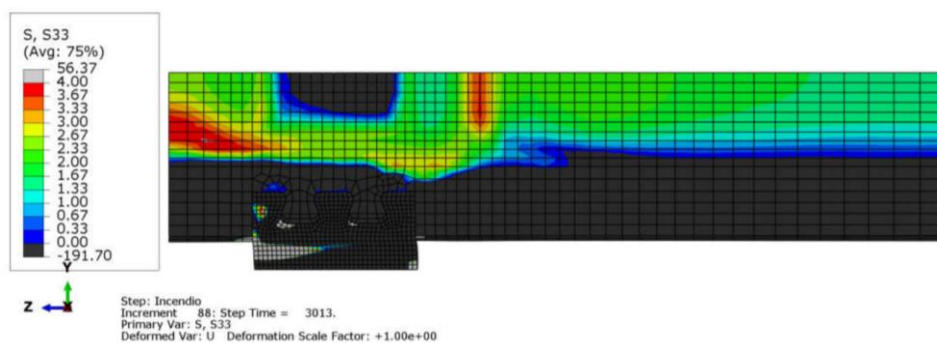


Figura 5.100 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

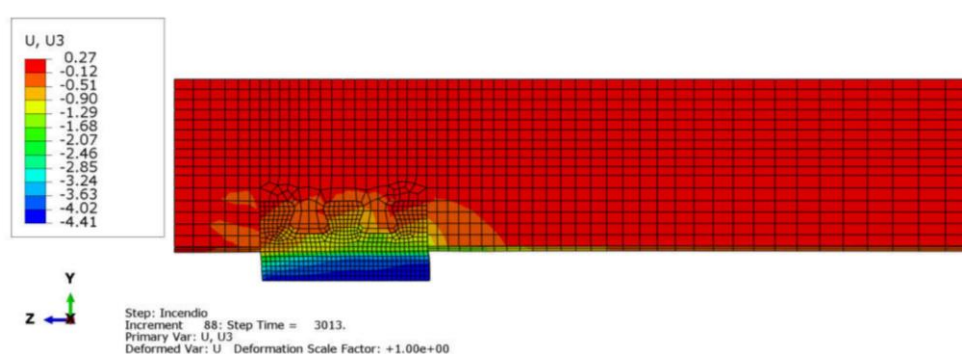


Figura 5.101 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

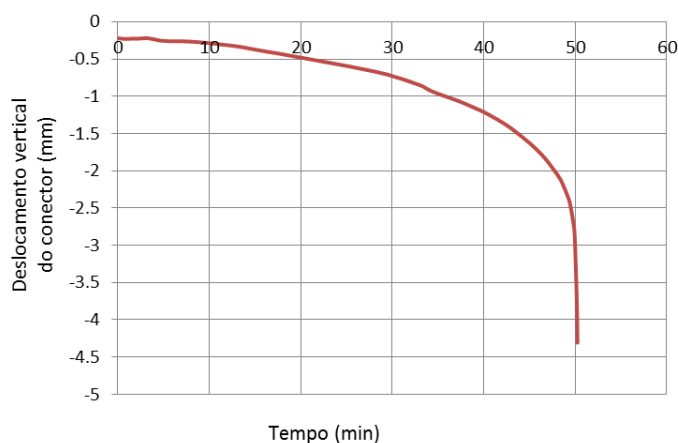


Figura 5.102 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 630°C e 698°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 109 MPa (redução de 68%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 70% (30% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,97. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 4,41 mm em

situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,22 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 126 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa do Crestbond que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. Ao longo do tempo houve redistribuição de tensões de tração no concreto devido a efeitos térmicos e em conjunto com a moderada carga transferida pelo Crestbond, fez com que o concreto não falhasse. A Figura 5.103 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados valores de deslocamento.

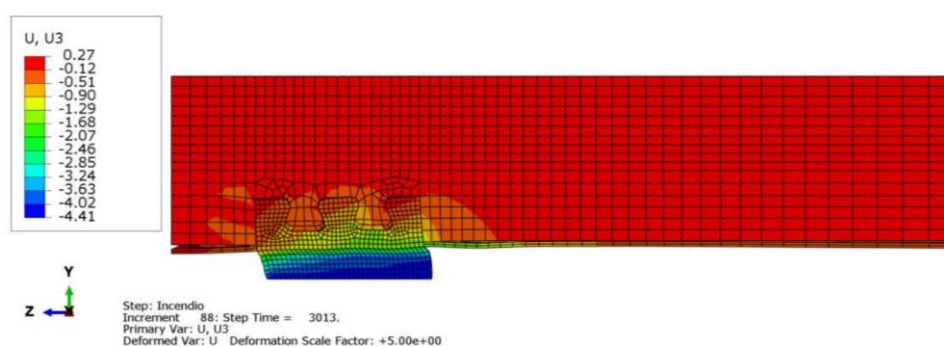


Figura 5.103 - Deformada (deslocamento) no Pilar com o Crestbond de diâmetro de 600 mm com 30% de carga (Resultado com Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 200 mm é de 1,16. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,22 mm) foi menor do que o de 200 mm (0,71 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento diferentes, sendo que no diâmetro de 600 mm a falha foi no conector e no diâmetro de 200 mm foi no concreto. Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 200 mm por ter tido tempo resistente ligeiramente maior (16%).

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 400 mm é de 1,16. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,22 mm) foi menor do que o de 400 mm (0,31 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento diferentes, sendo que no diâmetro de 600 mm a falha foi no conector e no diâmetro de 400 mm foi no concreto. Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 200 mm por ter tido tempo resistente ligeiramente maior (16%).

Chapa Passante

Tempo Resistente: 46 minutos

As Figuras 5.104 a 5.108 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 600 mm com nível de carga de 30%.

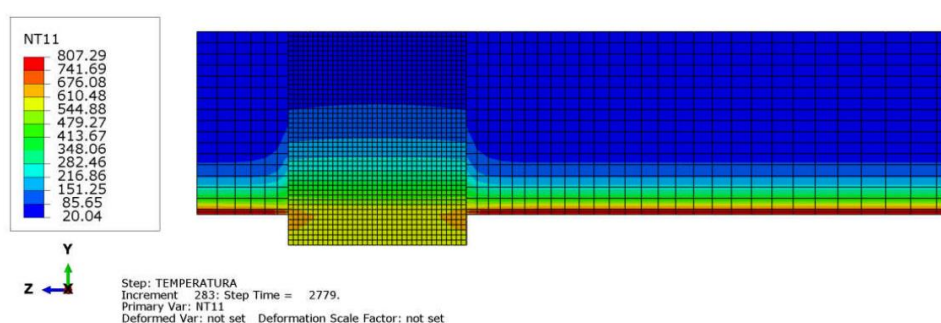


Figura 5.104 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de diâmetro de 600 mm com 30% de carga (Resultado com Expansão Térmica)

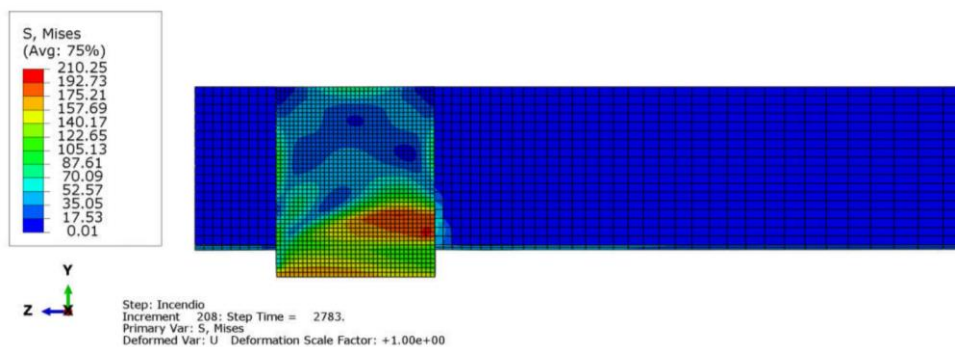


Figura 5.105 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

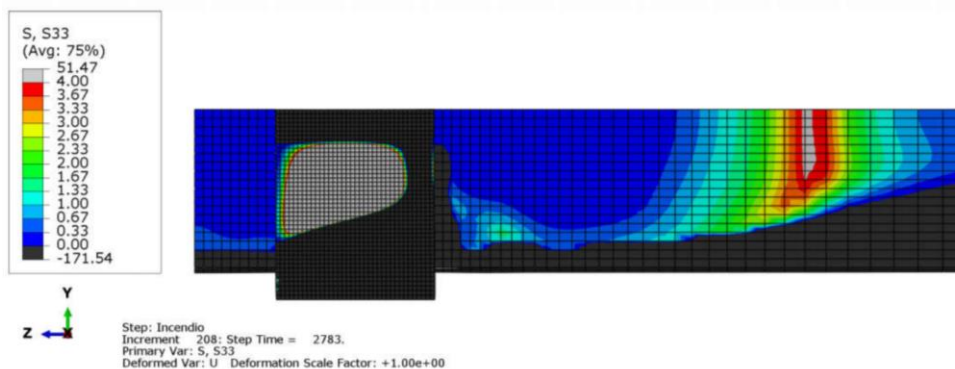


Figura 5.106 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

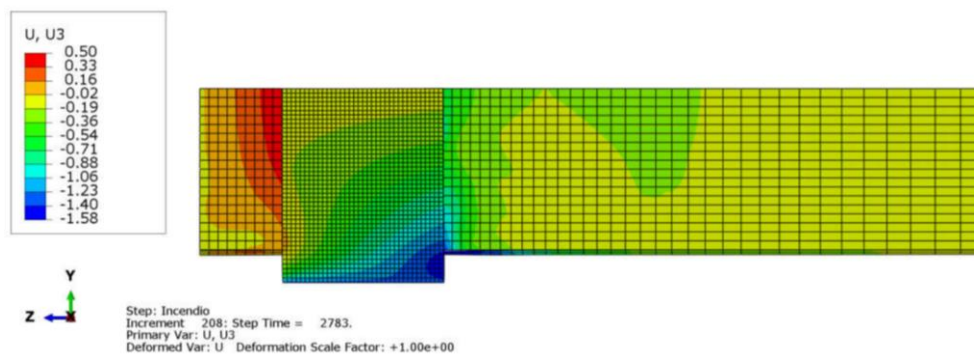


Figura 5.107 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

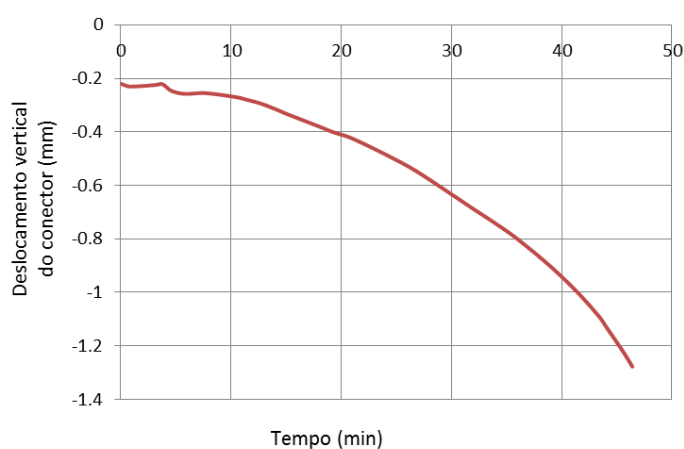


Figura 5.108 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 544°C e 630°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 180 MPa (redução de 48%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 70% (30% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,69. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 1,28 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,22 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 157 MPa. A falha estrutural ocorreu no concreto por ter atingido um deslocamento maior que 0,5 mm (sentido de tração), devido ao efeito de flexão da Chapa Passante. As Figuras 5.109 e 5.110 mostram com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, em uma é mostra os deslocamentos e em outra é enfatizado os valores entre 40 MPa de compressão a 4 MPa de Tração devido a falha ocorrer no concreto.

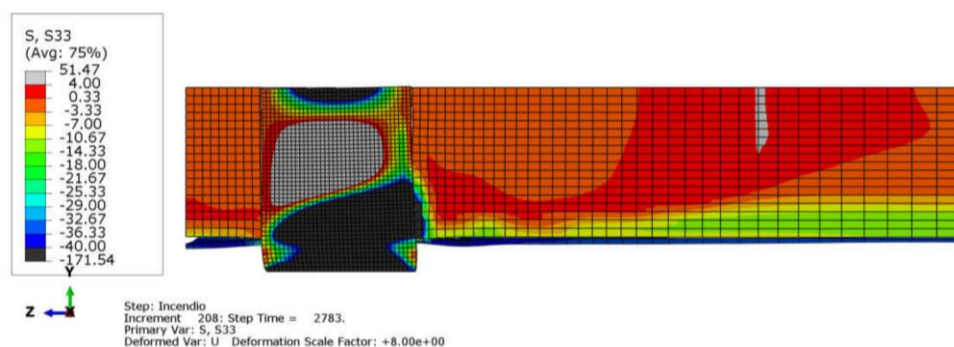


Figura 5.109 - Deformada (tensões longitudinais) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado com Expansão Térmica)

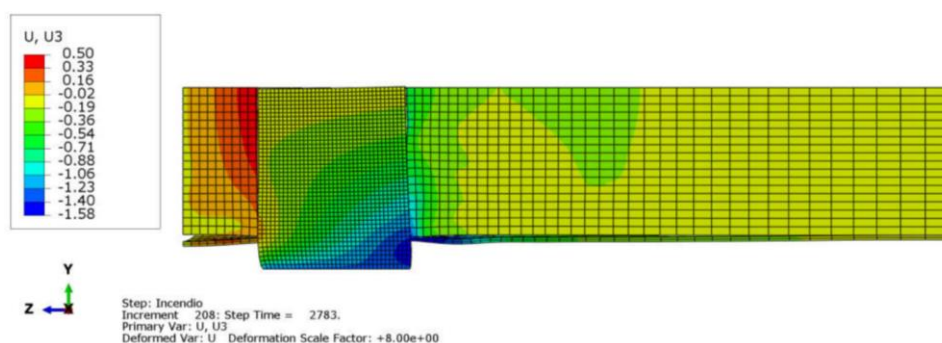


Figura 5.110 - Deformada (deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de diâmetro de 600 mm com 30% de carga (Resultado com Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores da Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 200 mm é de 1,53. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,22 mm) foi menor do que o de 200 mm (0,73 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos, sendo que nestes dois casos a falha aconteceu no núcleo de concreto. Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram serem melhores do que os obtidos no de 200 mm, por ter tido tempo resistente maior (57%).

Obs.: Em comparação com os valores da Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 400 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 400 mm é de 0,78. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,22 mm) foi menor do que o de 400 mm (0,30 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram diferentes, sendo que no diâmetro de 600 mm a falha aconteceu no concreto e no diâmetro de 400 mm foi no conector. Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser piores do que os obtidos no de 400 mm por ter tido tempo resistente menor (22%) e ter acontecido deslocamento maior que 0,5 (mm) sentido da tração no concreto.

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 0,92. Com a Chapa Passante a falha ocorreu no concreto, entretanto, com o Crestbond foi no próprio conector. No momento da falha, a tensão final máxima de Von Mises no Crestbond foi de 241 MPa, a da Chapa Passante foi de 213 MPa, sendo a razão entre elas de 1,13. O Crestbond apresentou temperatura final maior do que a Chapa Passante, fazendo com que ele tivesse f_y menor, porém falhou com um tempo superior devido ao deslocamento do concreto (no sentido de tração) fazer acontecer a falha do pilar que tem a Chapa Passante antes.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio a curva de deslocamento do Crestbond aumentou o deslocamento de forma significativa nos últimos minutos, mostrando que falha ocorreu no próprio conector. Com a Chapa Passante, a curva de deslocamento não apresentou o mesmo comportamento nos últimos minutos, sendo a falha ocorrida no concreto. A Chapa Passante teve comportamento um pouco pior do que o do Crestbond por ter tido o tempo resistente ligeiramente menor (8%)

5.6 Quadro Resumo

As tabelas 5.1 e 5.2 a seguir mostram um resumo comparativo dos tempos resistentes e dos deslocamentos finais entre o Crestbond e a Chapa Passante obtidos nas simulações numéricas com expansão térmica.

Tabela 5.1 - Comparação dos Tempos Resistentes entre o Crestbond e a Chapa Passante (Resultados Com Expansão Térmica)

Comparação dos Tempos Resistentes entre o Crestbond e a Chapa Passante							
Diâmetro (mm)	Nível de carga (%)	Crestbond (min)	Local da Falha do Pilar com o Crestbond	Chapa Passante (min)	Local da Falha do Pilar com a Chapa Passante	Diferença (min)	Razão (Chapa Passante/Crestbond)
200	70	8	Concreto	7	Concreto	-1	0,88
	50	15	Concreto	23	Concreto	8	1,53
	30	43	Concreto	30	Concreto	-13	0,70
400	70	25	Concreto	18	Concreto	-7	0,72
	50	34	Concreto	28	Concreto	-6	0,82
	30	43	Concreto	59	Chapa Passante	16	1,37
600	70	27	Concreto	31	Concreto	4	1,15
	50	40	Crestbond	43	Concreto	3	1,08
	30	50	Crestbond	46	Concreto	-4	0,92

Obs: Os valores negativos da diferença de tempo em minutos mostram que o Crestbond teve tempo resistente maior do que a da Chapa Passante

Tabela 5.2 - Comparação dos deslocamentos finais entre o Crestbond e a Chapa Passante (Resultados Com Expansão Térmica)

Comparação dos Deslocamentos Finais entre o Crestbond e a Chapa Passante em Situação de Incêndio				
Diâmetro (mm)	Nível de carga (%)	Crestbond (mm)	Chapa Passante (mm)	Diferença (mm)
200	70	2,11	1,98	0,13
	50	1,91	2,70	-0,79
	30	2,90	2,39	0,51
400	70	2,86	1,64	1,22
	50	2,83	1,86	0,97
	30	1,92	4,16	-2,24
600	70	2,52	2,72	-0,20
	50	5,02	2,67	2,35
	30	4,41	1,28	3,13

Obs: os valores negativos da diferença daos deslocamentos mostram que a Chapa Passante teve deslocamento maior do que o Crestbond

O programa Abaqus apresentou dificuldades na convergência das soluções devido aos efeitos da expansão térmica dos materiais. As tabelas mostram que as simulações numéricas não mantiveram um padrão de qual conector apresenta maior tempo resistente e também o deslocamento final maior.

5.7 Observações do Capítulo

Este capítulo mostrou os resultados do uso do Crestbond e da Chapa Passante como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto em situação de incêndio sendo considerado o efeito da expansão térmica. Os dados obtidos ao longo deste capítulo permitem fazer os seguintes comentários:

- A expansão térmica fez aparecer esforços de tração provocados por efeitos térmicos no pilar, sendo muito prejudicial principalmente para o concreto que tem resistência a tração muito baixa, sendo o local de falha estrutural em vários casos;
- O fenômeno da expansão térmica fez com que o programa tivesse problemas de convergência em vários casos;
- Quando comparado com o mesmo nível de carga com o uso do Crestbond, quanto maior o diâmetro, maior foi o tempo resistente;
- Quando comparado com o mesmo nível de carga com o uso da Chapa Passante, quanto maior o diâmetro, maior foi o tempo resistente. Porém, teve uma exceção que foi com o nível de carga de 30 % para os diâmetros de 400mm (59 minutos) e 600 mm (46 minutos). Neste caso o comprimento da Chapa Passante fez com que o deslocamento (no sentido de tração) do concreto

fosse maior que 0,5 mm, sendo resultado da flexão deste conector que fez ocasionar a falha estrutural;

- Em comparação com os valores obtidos pela Chapa Passante, no diâmetro de 200 mm, o Crestbond suportou um tempo praticamente igual para a carga de 30%, um menor tempo com 50 % de carga e um tempo maior com 70 % de carga;

- No diâmetro de 400 mm, o Crestbond suportou um tempo maior para cargas de 70 e 50 %, porém para 30 % de carga a Chapa Passante resistiu um tempo maior;

- No diâmetro de 600 mm, o Crestbond suportou um tempo menor para cargas de 70 e 50 %, porém para 30 % de carga foi a Chapa Passante resistiu um tempo menor;

- Em todos os casos com o nível de carga de 70%, a falha aconteceu no núcleo de concreto;

- Em todos os casos com tubo de diâmetro 200mm, a falha aconteceu no núcleo de concreto;

Com todos estes comentários a respeito das análises estruturais realizadas considerando o efeito da expansão térmica não é possível concluir qual conector é melhor. Isto se deve ao fato que não foi possível manter um padrão nas comparações dos tempos resistentes. Nas três seções transversais estudadas, teve níveis de carga que o Crestbond resistiu mais tempo em um determinado diâmetro, mas em outro foi a Chapa Passante que teve melhor desempenho estrutural. Além disso, em nenhum dos três diâmetros nem o Crestbond e nem a Chapa Passante conseguiram ter tempos resistentes maiores para todos os níveis de carga. Porém, em alguns casos o comportamento do Crestbond e da Chapa Passante foram semelhantes com diferenças de tempos resistentes pequenas.

Na comparação do Crestbond com a Chapa Passante é importante avaliar como cada conector influencia na transferência de carga para tubo de aço e para o núcleo de concreto e como fica a capacidade resistente do pilar em cada situação. O efeito da expansão térmica fez com que a análise se tornasse complexa, fazendo com que cada caso (tipo de conector juntamente com o diâmetro do tubo e/ou nível de carga aplicada) deva ser analisado de forma distinta.

6

RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL SEM EXPANSÃO TÉRMICA

6.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são mostradas as análises estruturais dos conectores de cisalhamentos usados como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos tubulares em situação de incêndio, porém desta vez não é avaliado o efeito da expansão térmica dos materiais. Por não considerar este fenômeno, não ocorreu no núcleo de concreto esforços de tração provocado pelo aumento de temperatura fazendo com que o programa não tivesse problemas de convergência como observado no capítulo anterior. Além disso, não houve separação do núcleo de concreto em relação ao do tubo de aço devido a efeitos térmicos. O confinamento do concreto pelo tubo de aço foi diminuído com o aumento de temperatura ao longo do tempo de exposição ao incêndio, como seria esperado devido ao efeito da expansão térmica. As simulações numéricas avaliaram apenas a capacidade resistente da estrutura em relação à temperatura em que os materiais estão submetidos. Em todos os casos analisados, a falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa do conector que recebe diretamente o carregamento. Isto fez com que as tensões no Crestbond e na Chapa Passante fossem elevadas levando ao colapso.

6.2 Principais Parâmetros Avaliados

Neste capítulo analisa-se comparativamente o Crestbond e a Chapa Passante com os mesmos parâmetros das simulações com expansão térmica e, além disso, são realizados comentários sobre os resultados obtidos e os motivos que fizeram ocorrer o colapso estrutural.

6.3 Diâmetro de 200 mm

6.3.1 70% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 31 minutos

As Figuras 6.1 a 6.5 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 200 mm com nível de carga de 70%.

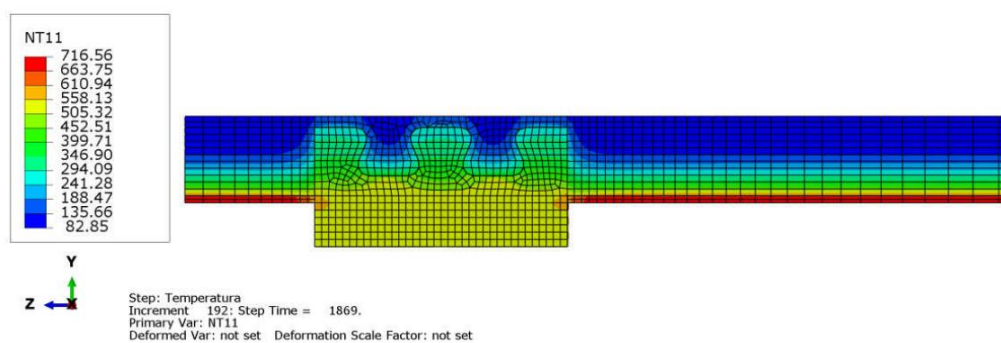


Figura 6.1 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

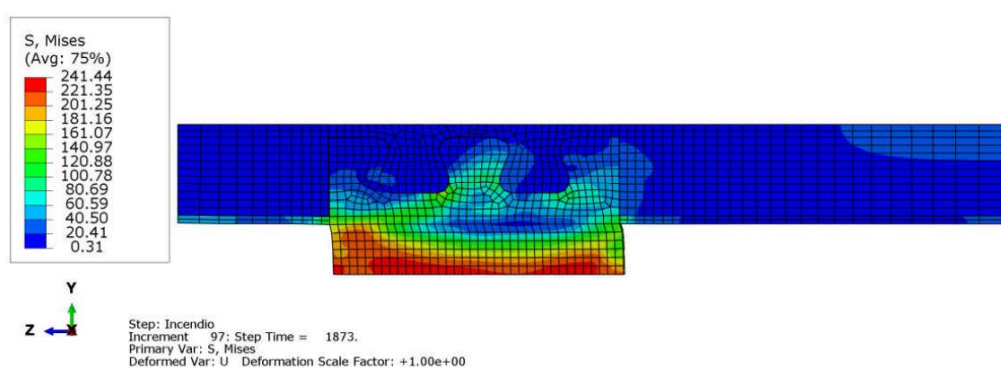


Figura 6.2 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

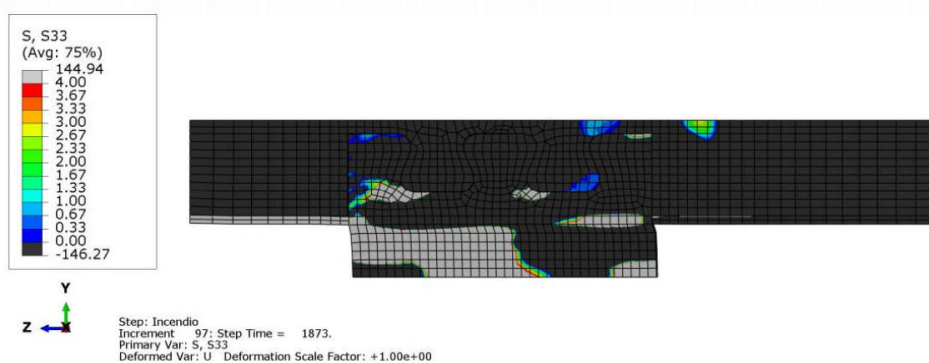


Figura 6.3 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

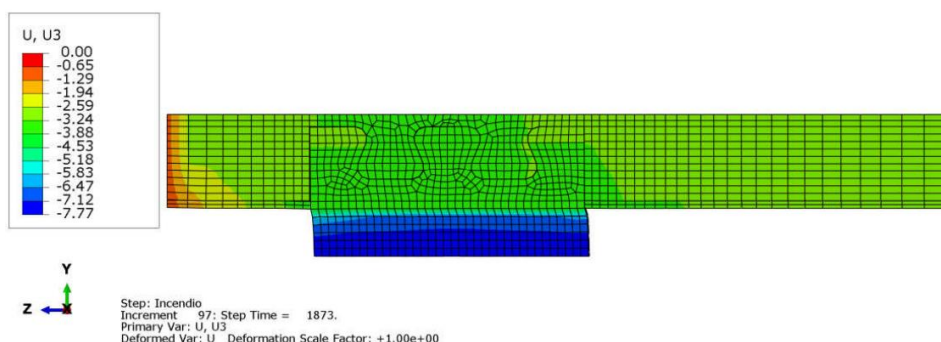


Figura 6.4 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

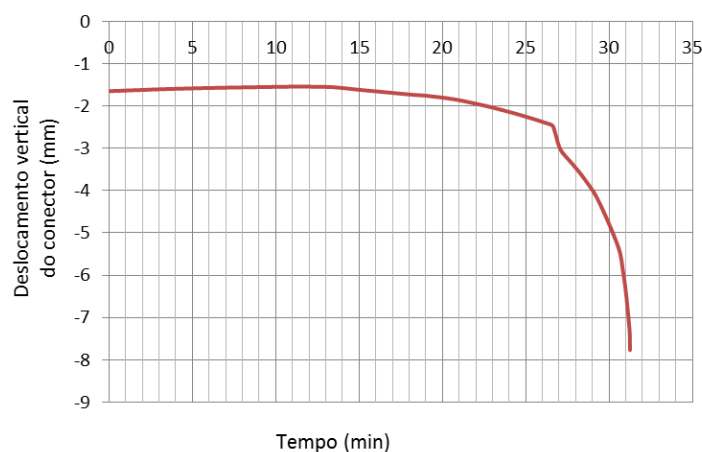


Figura 6.5 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 505°C e 558°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 242 MPa (redução de 30%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 30% (70% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão (% redução de f_y / % diminuição da carga aplicada) destes dois valores percentuais é de 1,00. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 7,77 mm em situação de incêndio (em temperatura

ambiente foi de 1,65mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 241 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa do Crestbond que recebeu o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.6 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

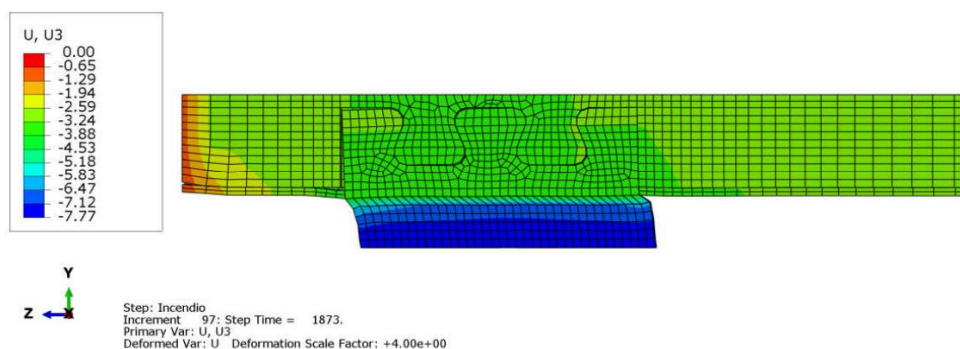


Figura 6.6 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Chapa Passante

Tempo Resistente: 31 minutos

As Figuras 6.7 a 6.11 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 200 mm com nível de carga de 70%.

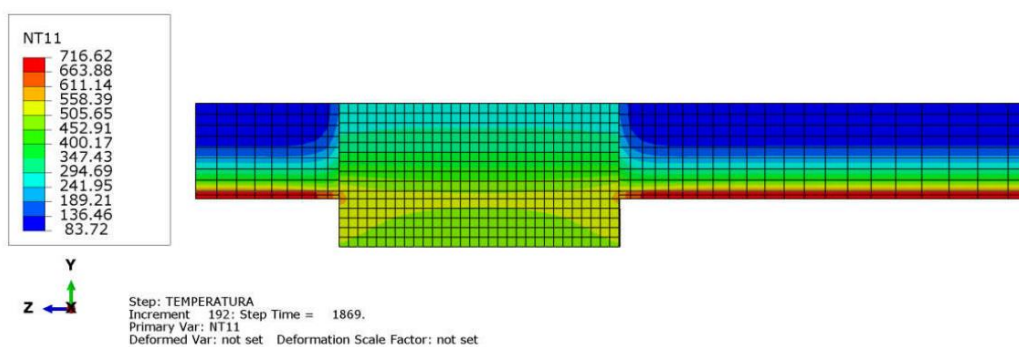


Figura 6.7 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

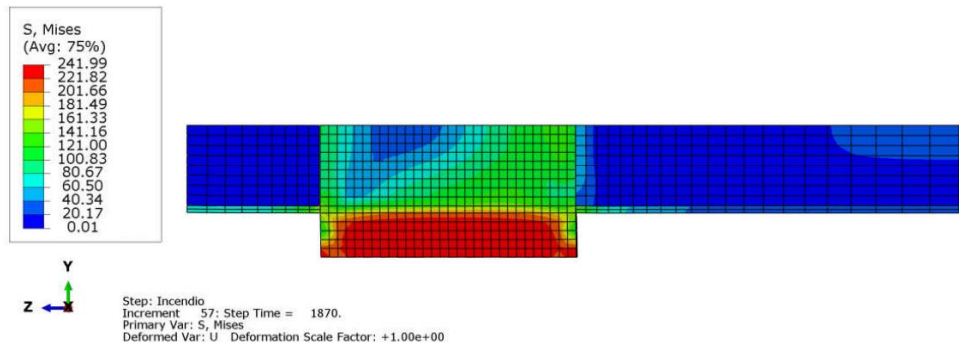


Figura 6.8 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

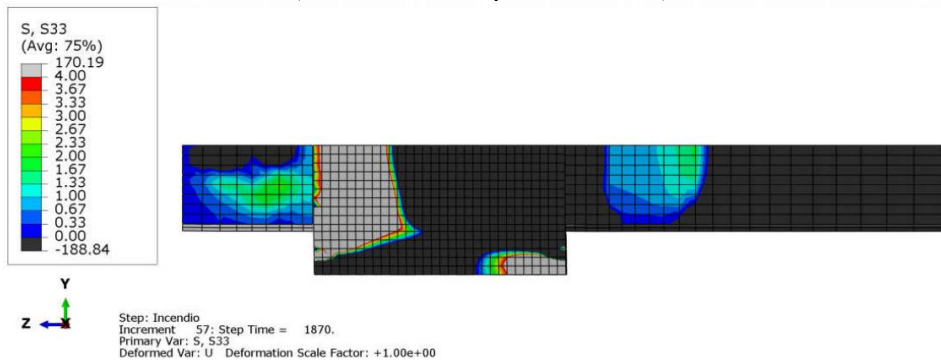


Figura 6.9 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

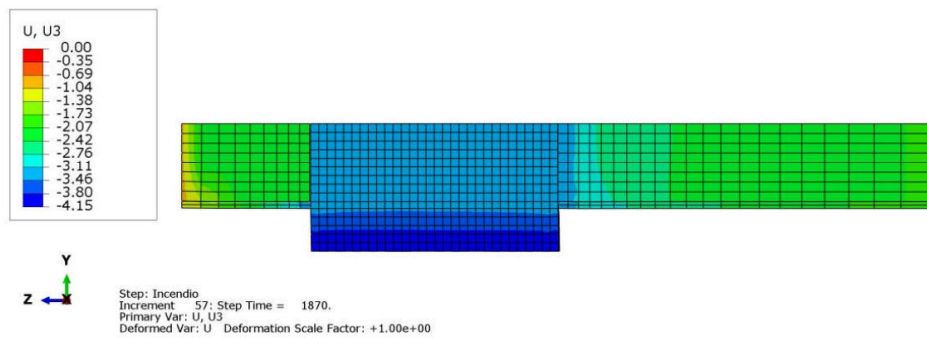


Figura 6.10 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

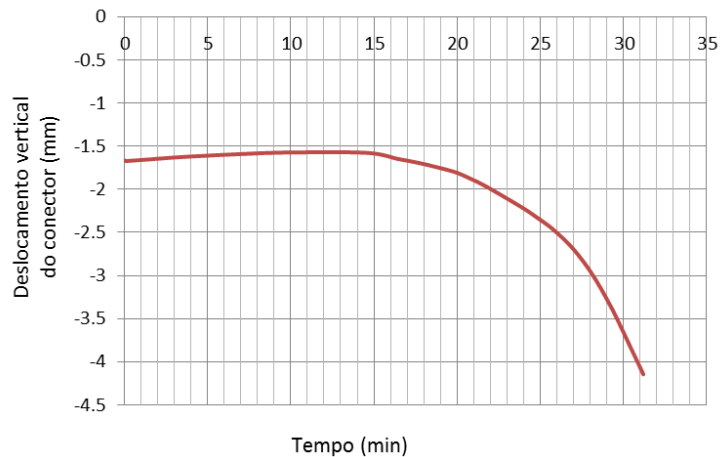


Figura 6.11 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 452°C e 558°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 261 MPa (redução de 24%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 30% (70% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,80. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 4,15 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 1,66 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 241 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa da Chapa Passante que recebeu o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.12 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

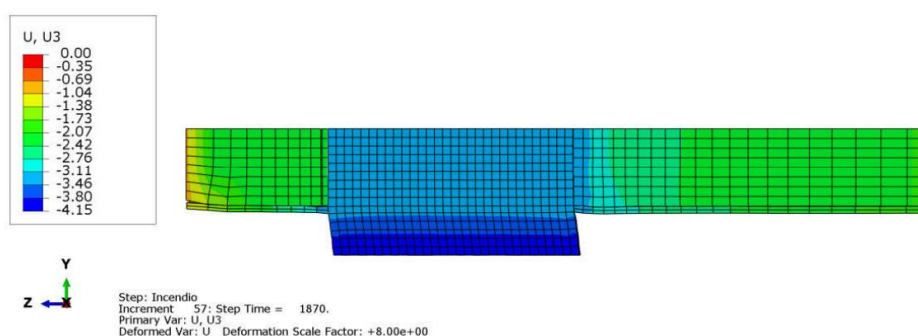


Figura 6.12 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Considerações

Os tempos resistentes nos dois casos foram iguais. Em ambos os casos as falhas aconteceram por cisalhamento na parte externa do conector. No momento da falha, as tensões finais máximas de Von Mises nos dois conectores foram iguais, sendo elas de 241 MPa, sendo que a razão (Tensão no Crestbond/Tensão na Chapa Passante) entre elas é de 1,00. No momento da falha o Crestbond apresentou temperatura maior do que a Chapa Passante, fazendo com que ele tivesse f_y menor.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do deslocamento do Crestbond (7,77 mm) tenha sido maior do o da Chapa Passante (4,15).

6.3.2 50% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 37 minutos

As Figuras 6.13 a 6.17 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 200 mm com nível de carga de 50%.

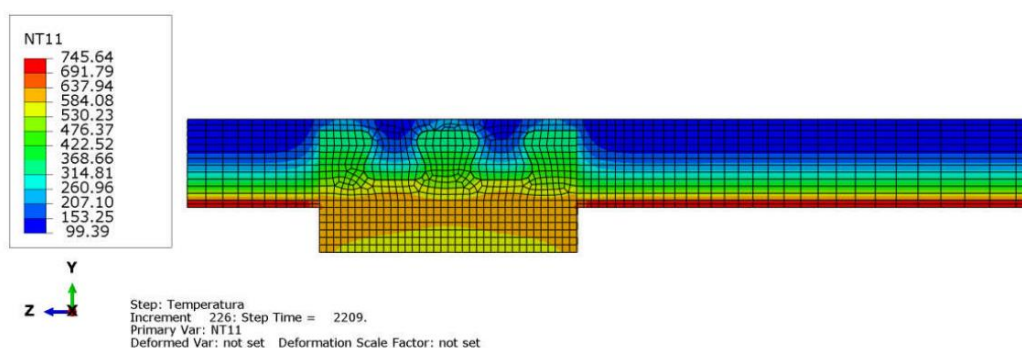


Figura 6.13 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

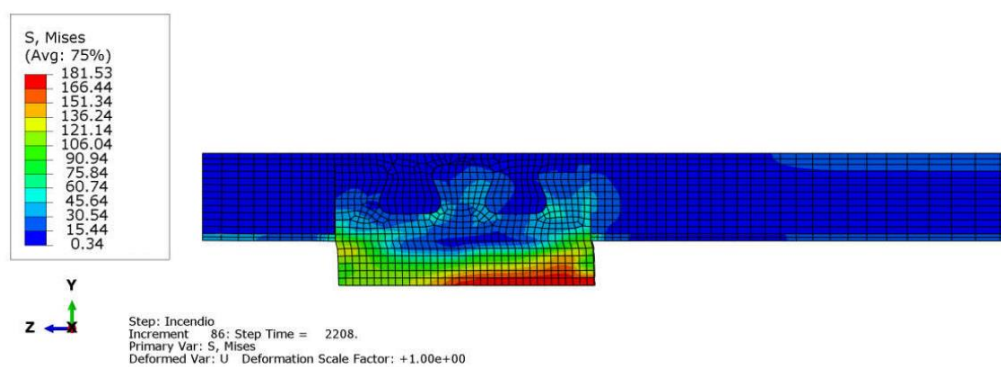


Figura 6.14 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

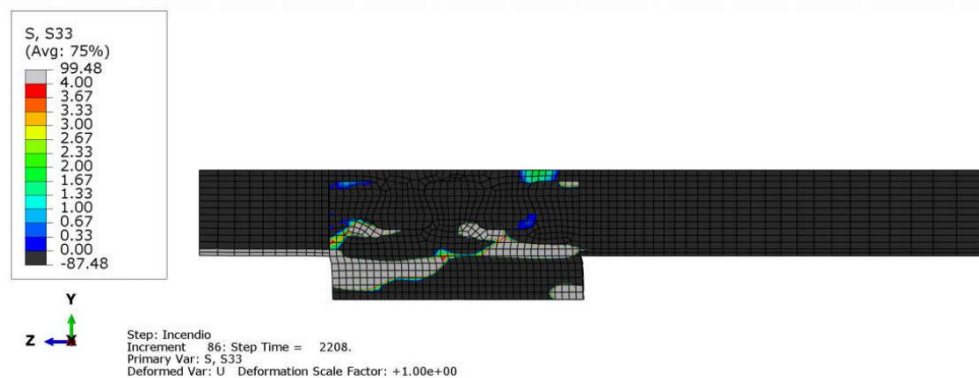


Figura 6.15 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

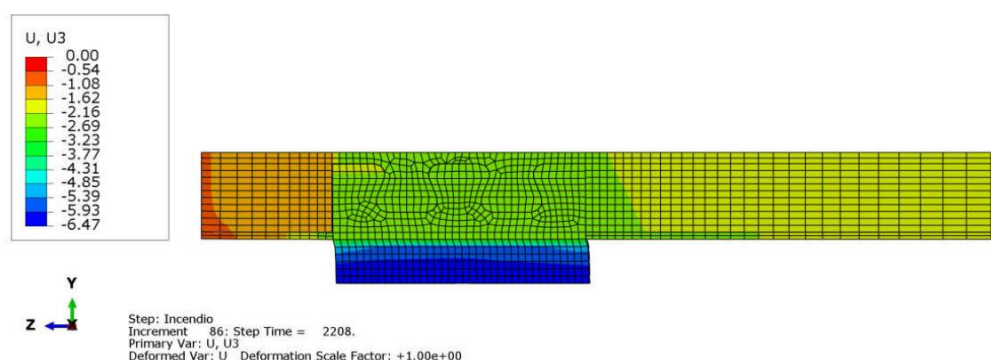


Figura 6.16 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

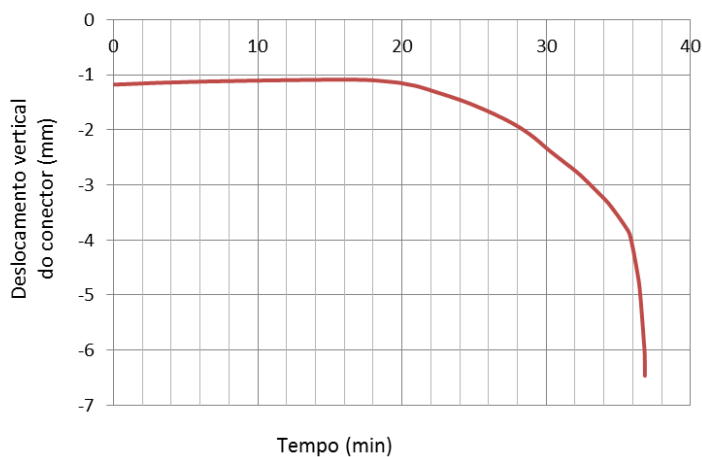


Figura 6.17 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 550°C e 637°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 172 MPa (redução de 50%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 50% (50% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,00. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que

recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 6,47 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 1,18mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 181 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa do Crestbond Passante que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.18 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

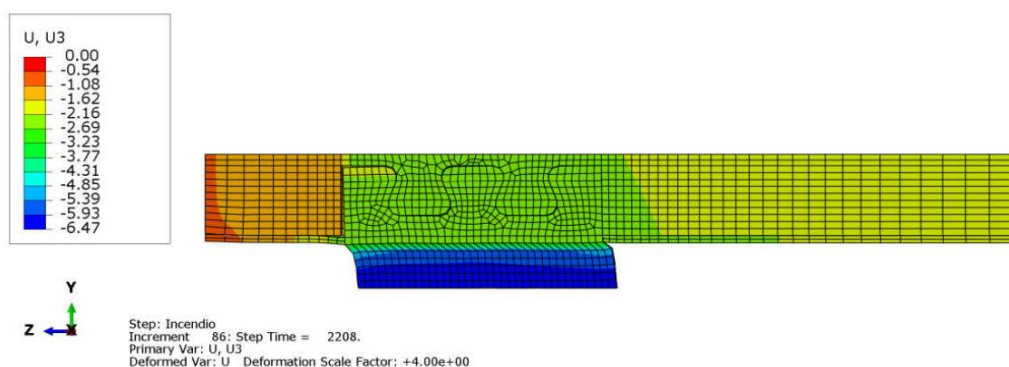


Figura 6.18 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Chapa Passante

Tempo Resistente: 41 minutos

As Figuras 6.19 a 6.23 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 200 mm com nível de carga de 50%.

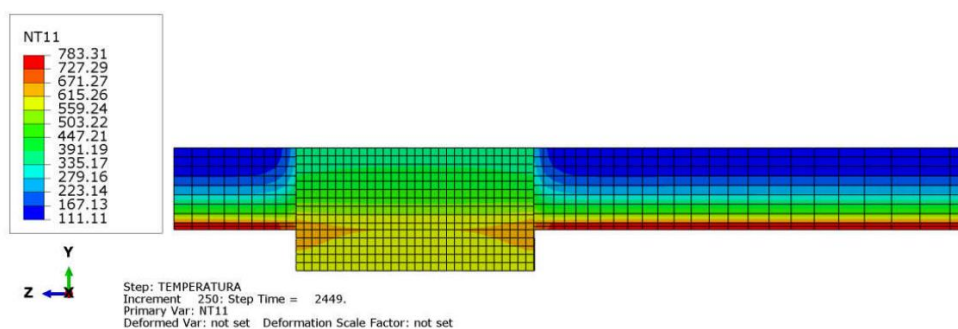


Figura 6.19 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

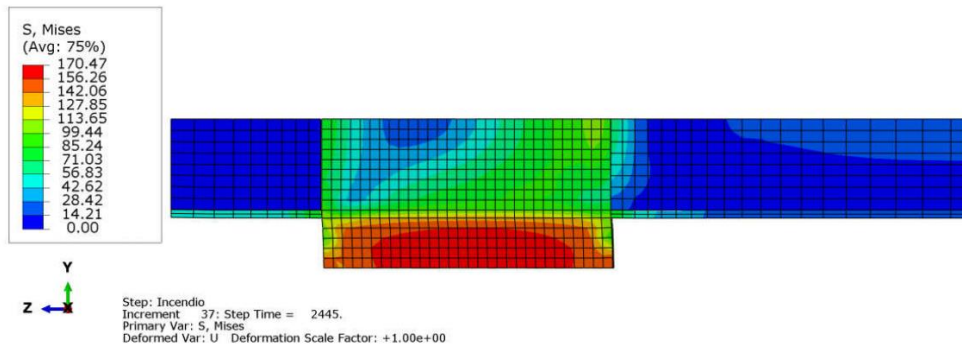


Figura 6.20 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

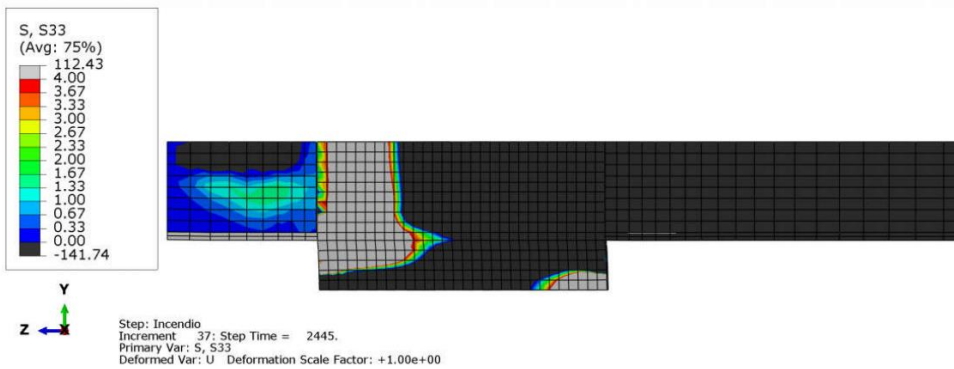


Figura 6.21 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

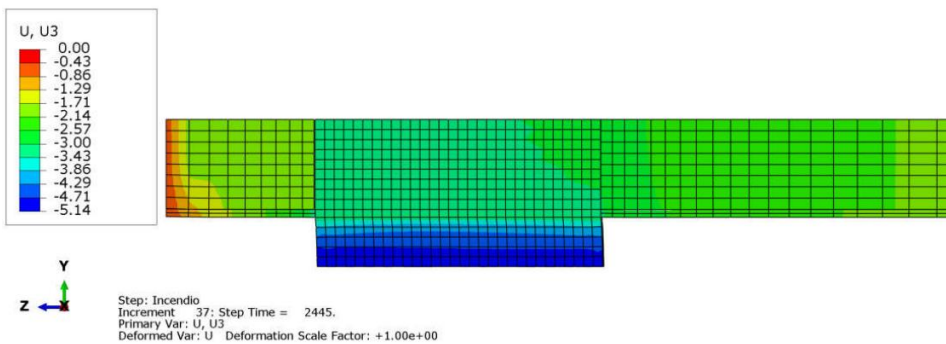


Figura 6.22 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

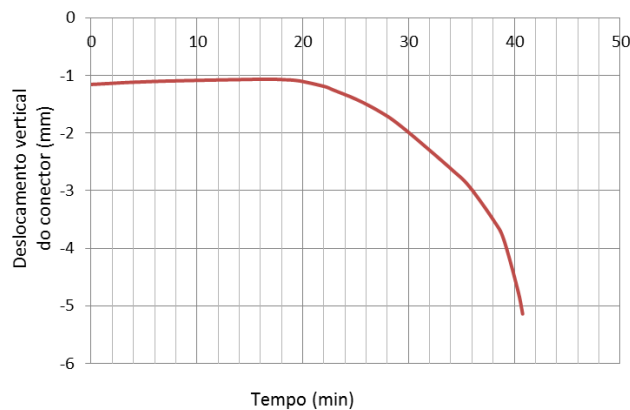


Figura 6.23 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 560°C e 630°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 173 MPa (redução de 50%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 50% (50% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,00. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 5,14 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 1,15 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 170 Mpa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.24 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

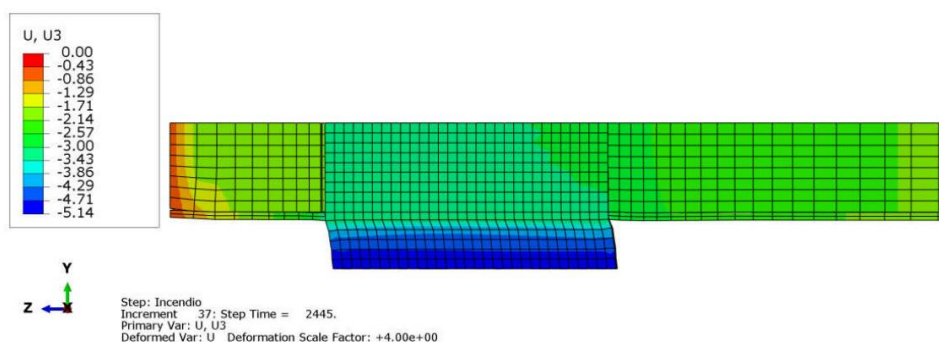


Figura 6.24 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de diâmetro de 200 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 1,14. Em ambos os casos as falhas aconteceram por cisalhamento na parte externa do conector. No momento da falha, a tensão final máxima de Von Mises no Crestbond foi de 181 MPa, as da Chapa Passante foi de 170 MPa, sendo a razão entre elas de 1,06.). O Crestbond apresentou temperatura maior do que a Chapa Passante, fazendo com que ele tivesse f_y menor.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do deslocamento do Crestbond (6,47 mm) tenha sido maior do que a da Chapa Passante (5,14). Portanto, a Chapa Passante teve comportamento um pouco melhor do que o Crestbond, por ter ficado menos deformada, mas apesar disso o tempo resistente ter sido apenas ligeiramente maior (14%).

6.3.3 30% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 47 minutos

As Figuras 6.25 a 6.29 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 200 mm com nível de carga de 30%.

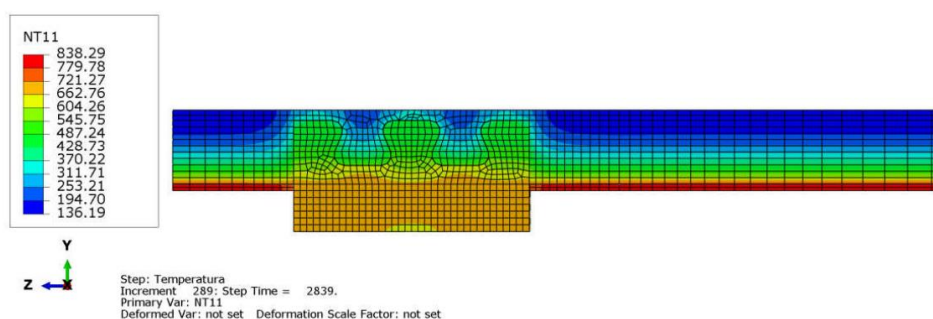


Figura 6.25 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

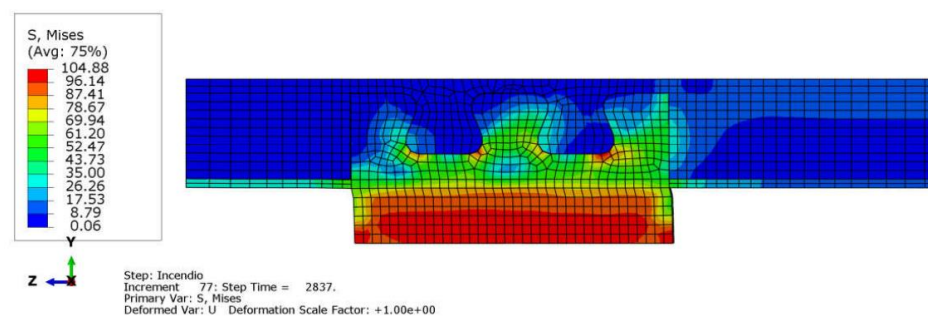


Figura 6.26 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

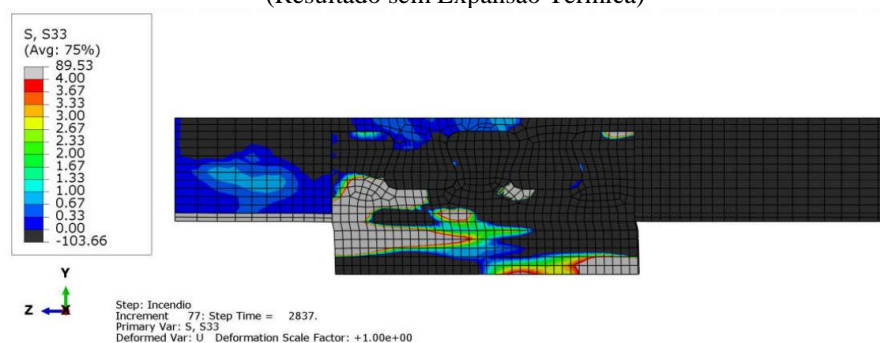


Figura 6.27 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

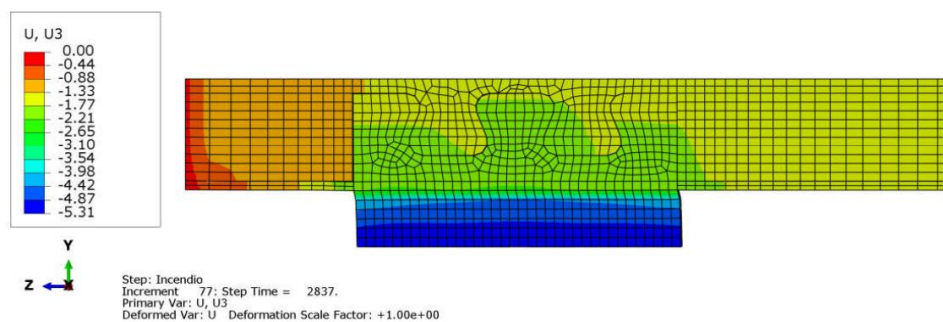


Figura 6.28 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

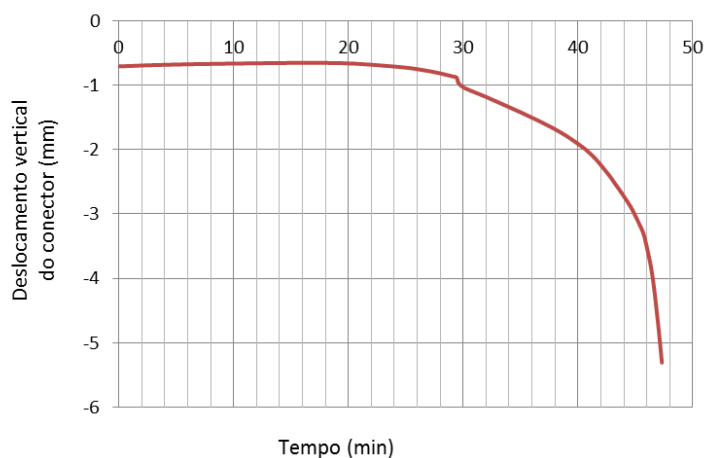


Figura 6.29 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 662°C e 722°C . Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 90 MPa (redução de 74%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 70% (30% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,06. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 5,31 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,71 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 105 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa do Crestbond que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.30 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

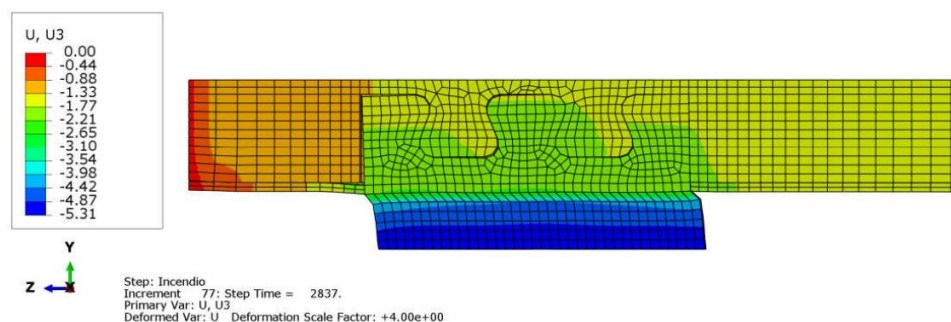


Figura 6.30 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Chapa Passante

Tempo Resistente: 50 minutos

As Figuras 6.31 a 6.35 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 200 mm com nível de carga de 30%.

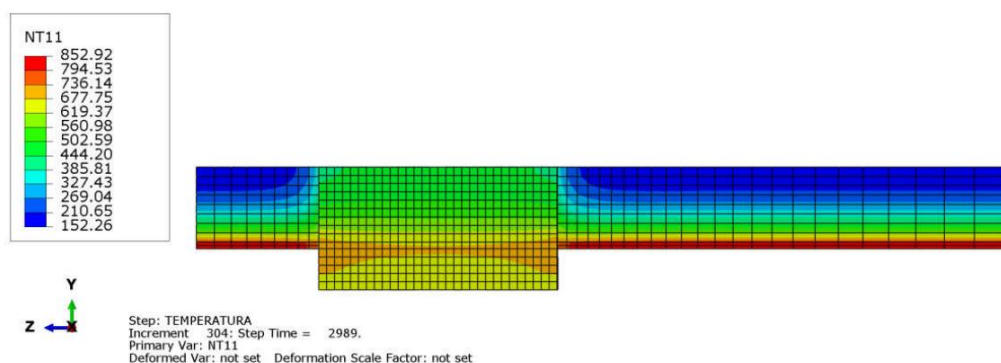


Figura 6.31 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

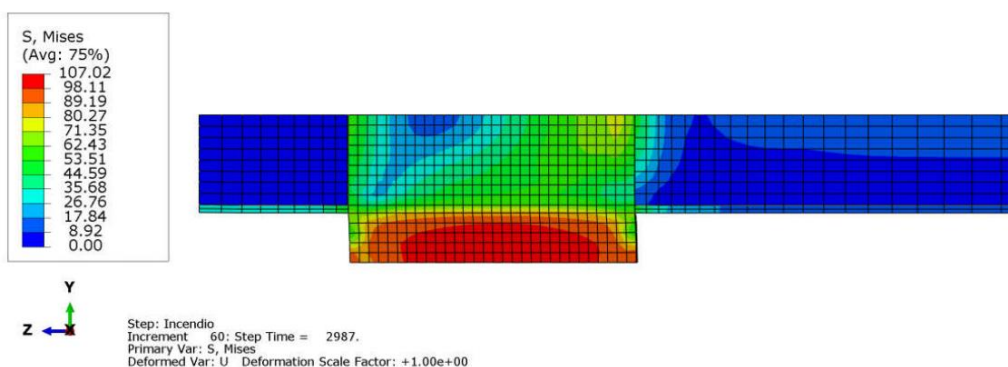


Figura 6.32 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

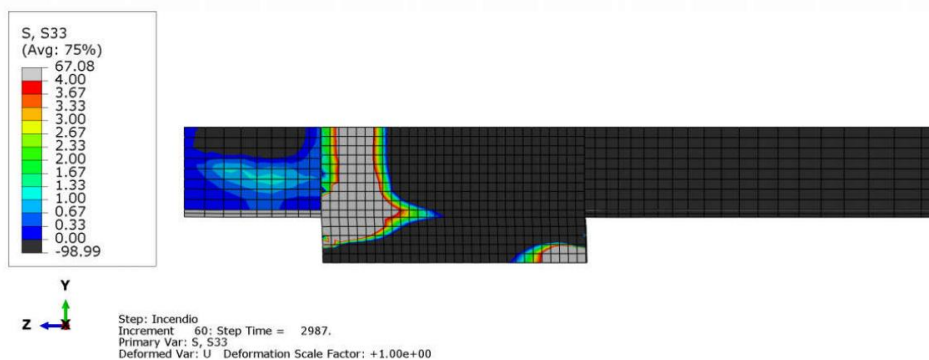


Figura 6.33 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

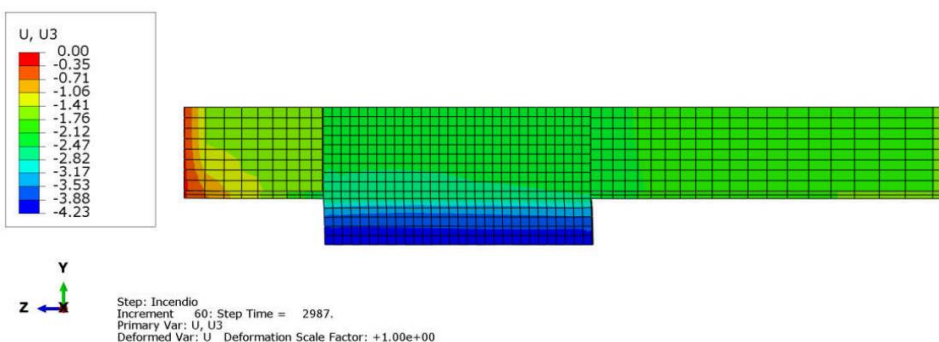


Figura 6.34 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

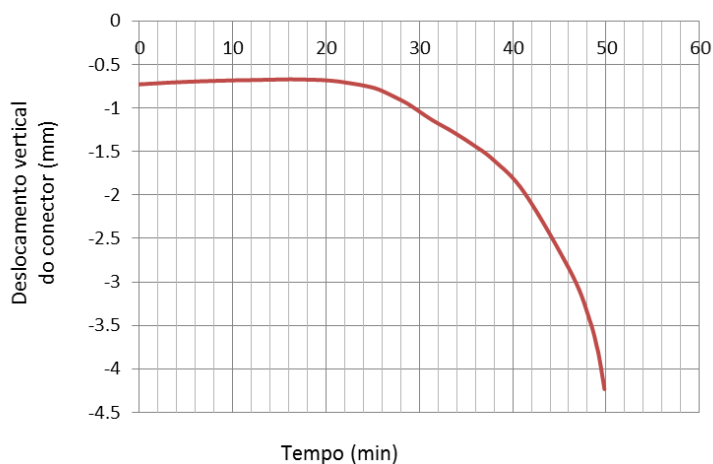


Figura 6.35 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 620°C e 715°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 109 MPa (redução de 68%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 70% (30% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 0,97. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de

4,23 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,73 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 107 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.36 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

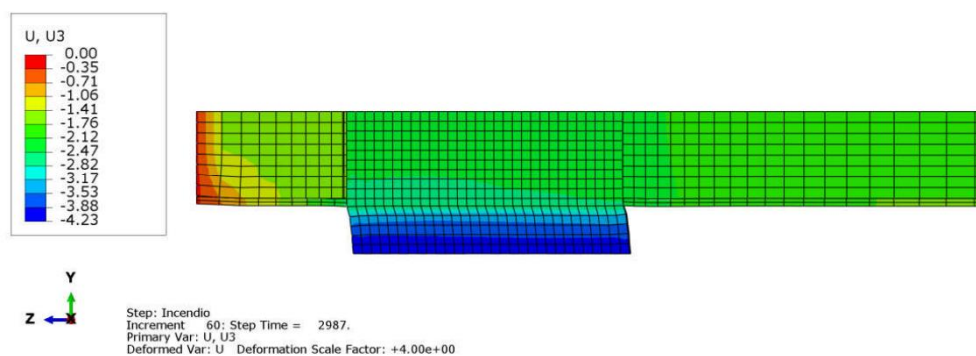


Figura 6.36 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 1,06. Em ambos os casos as falhas aconteceram por cisalhamento na parte externa do conector. No momento da falha, a tensão final máxima de Von Mises no Crestbond foi de 105 MPa, a da Chapa Passante foi de 107 MPa, sendo a razão entre elas de 0,98. O Crestbond apresentou temperatura maior do que a Chapa Passante, fazendo com que ele tivesse f_y menor.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do deslocamento do Crestbond (5,31 mm) tenha sido maior do que a da Chapa Passante (4,23). Portanto, a Chapa Passante teve comportamento um pouco melhor do que o Crestbond, por ter ficado menos deformada, mas apesar disso o tempo resistente ter sido apenas ligeiramente maior (6%).

6.4 Diâmetro de 400 mm

6.4.1 70% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 36 minutos

As Figuras 6.37 a 6.41 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 400 mm com nível de carga de 70%.

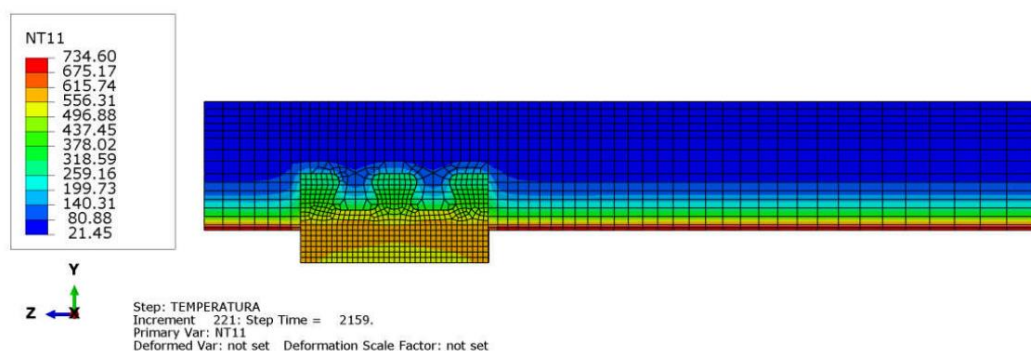


Figura 6.37 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

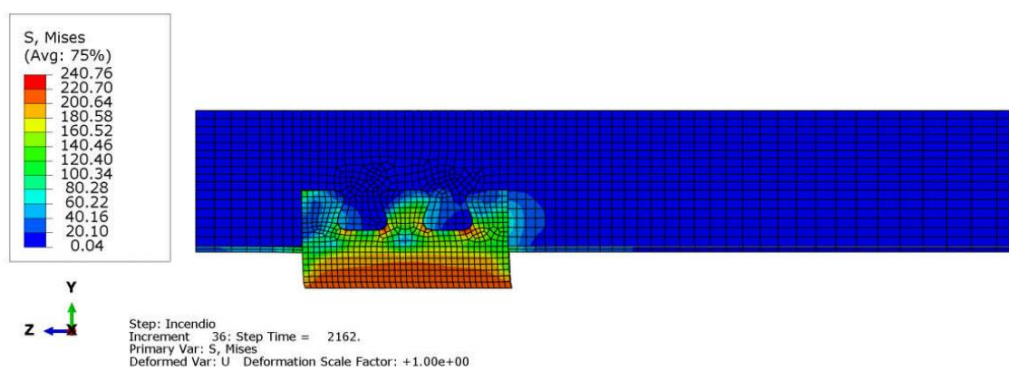


Figura 6.38 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

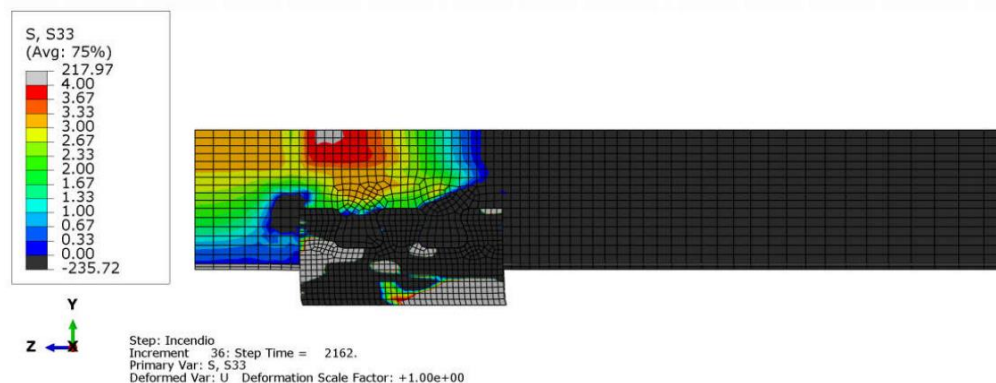


Figura 6.39 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

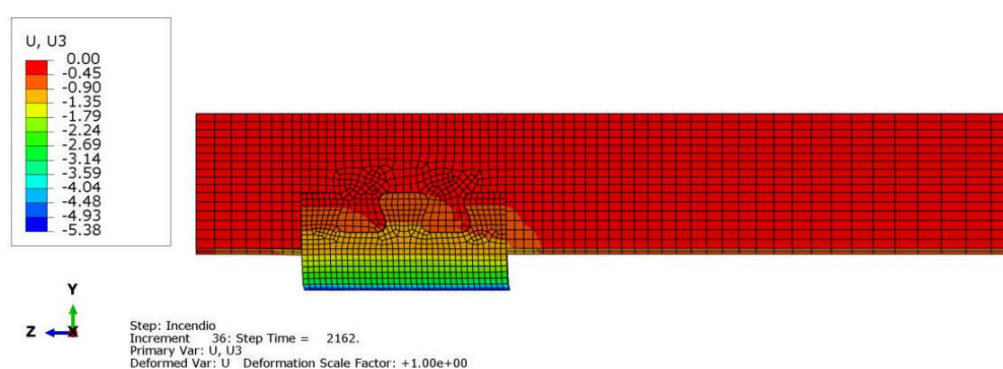


Figura 6.40 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

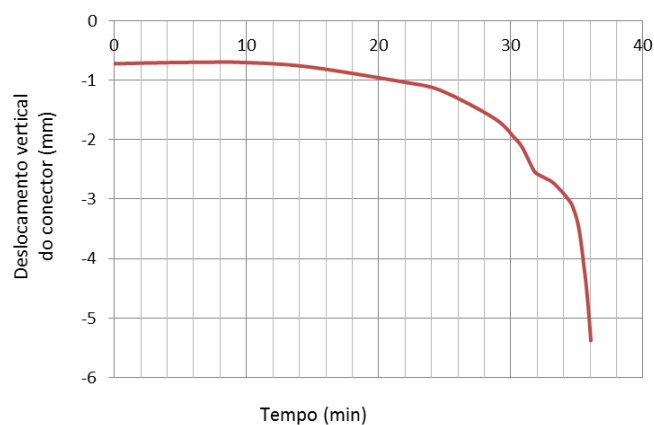


Figura 6.41 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 500°C e 615°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 209 MPa (redução de 39%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 70% (30% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,30. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 5,38mm em

situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,79 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 241 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa do Crestbond que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.42 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

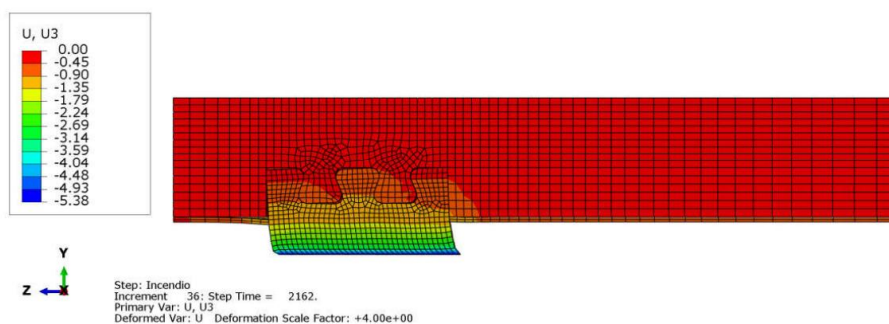


Figura 6.42 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores obtidos com o Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 400 mm sobre o de 200 mm é de 1,16. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 400 mm (0,79 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,65 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 200 mm (7,77 mm) tenha sido maior do que o de 400 mm (5,38 mm). Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 400 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 200 mm, pelo fato da parte externa do conector ter ficado menos deformada e o tempo resistente foi apenas ligeiramente maior (16%).

Chapa Passante

Tempo Resistente: 42 minutos

As Figuras 6.43 a 6.47 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 400 mm com nível de carga de 70%.

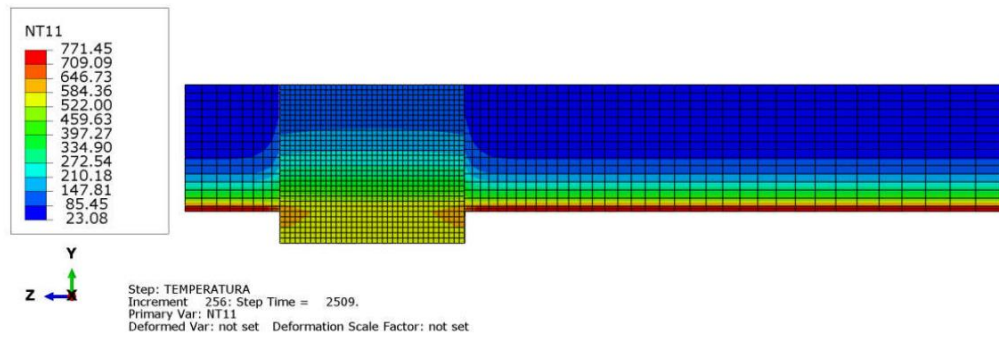


Figura 6.43 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

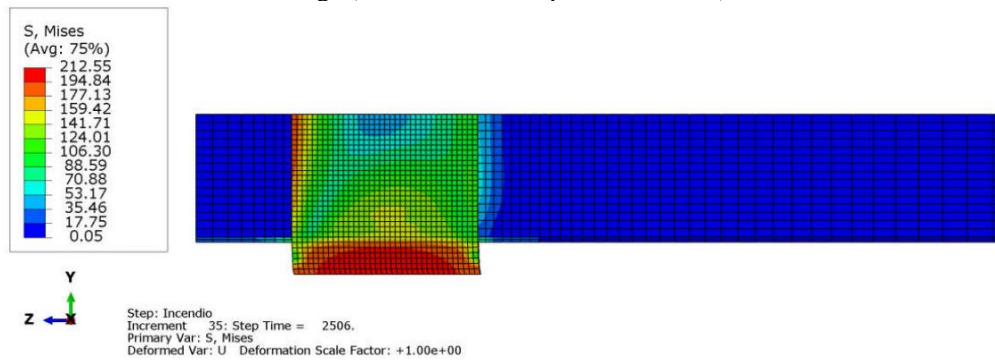


Figura 6.44 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

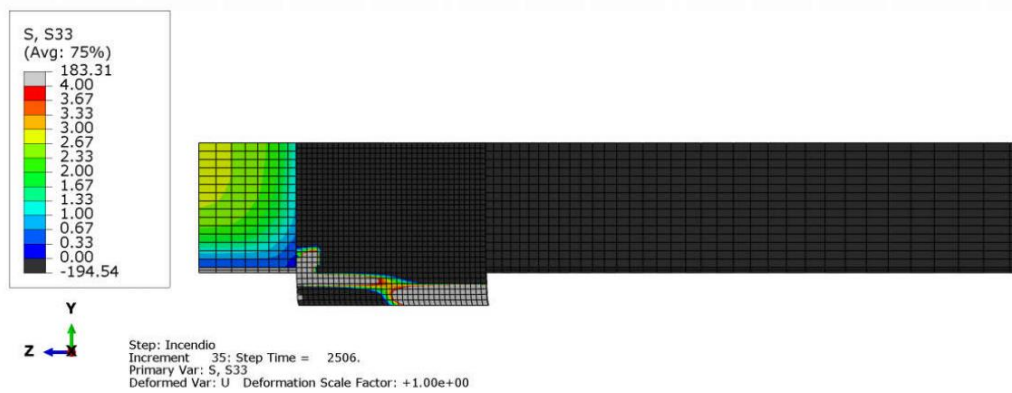


Figura 6.45 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 200 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

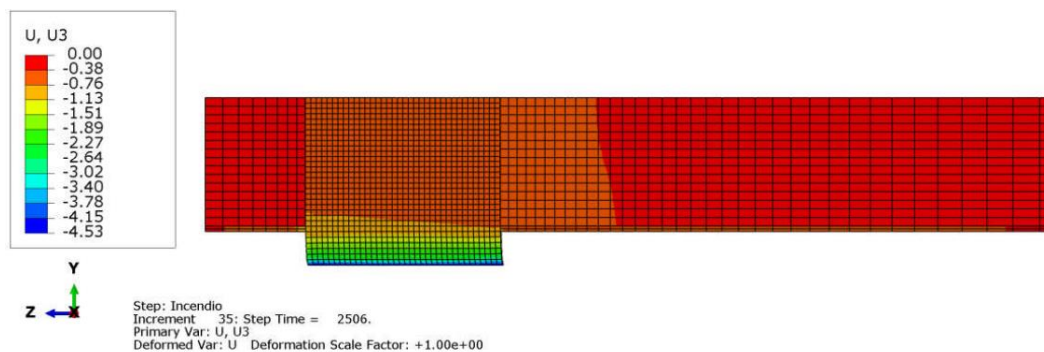


Figura 6.46 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

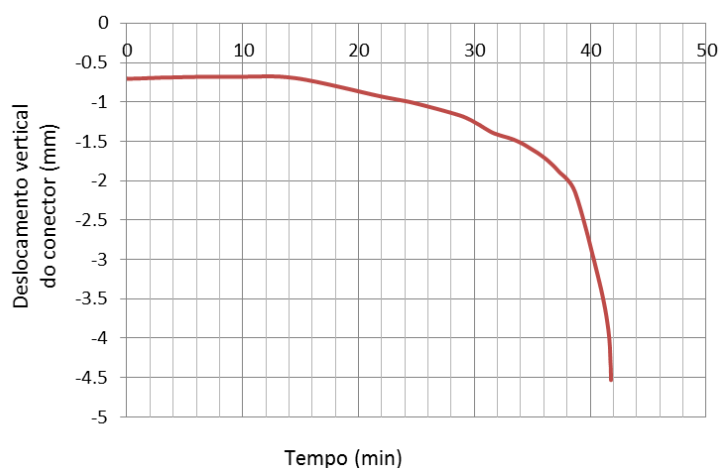


Figura 6.47 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 552°C e 584°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 212 MPa (redução de 39%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 30% (70% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,30. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 4,53 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,70 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 213 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.48 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

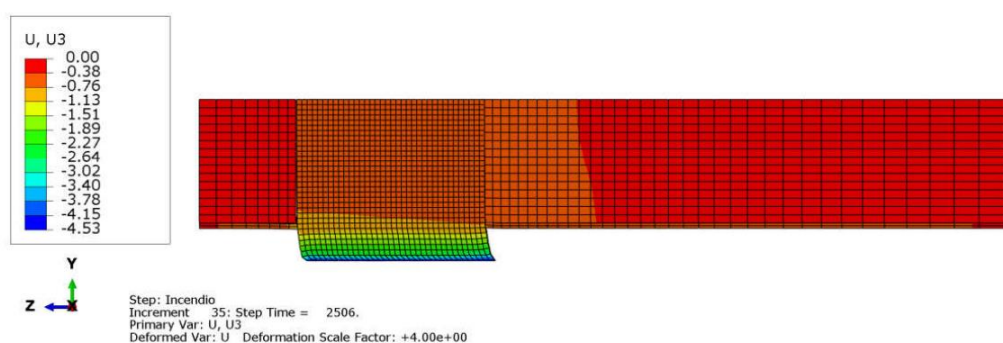


Figura 6.48 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de diâmetro de 400 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores da Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 400 mm sobre o de 200 mm é de 1,66. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 400 mm (0,70 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,65 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 200 mm (4,15 mm) tenha sido menor do que o de 400 mm (4,53 mm). Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 400 mm mostraram ser melhor do que os obtidos no de 200 mm, pelo fato da parte externa do conector ter ficado menos deformada, e além disso, o tempo resistente foi maior (35%).

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 1,17. Em ambos os casos as falhas aconteceram por cisalhamento na parte externa do conector. No momento da falha, a tensão final máxima de Von Mises no Crestbond foi de 241 MPa, a da Chapa Passante foi de 213 MPa, sendo a razão entre elas de 1,13. O Crestbond apresentou temperatura maior do que a Chapa Passante, fazendo com que ele tivesse f_y menor.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do deslocamento do Crestbond (5,38 mm) tenha sido maior do que a da Chapa Passante (4,53). Portanto, a Chapa Passante teve comportamento um pouco melhor do que o Crestbond, por ter ficado menos deformada, mas apesar disso o tempo resistente ter sido apenas ligeiramente maior (17%).

6.4.2 50% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 39 minutos

As Figuras 6.49 a 6.53 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento

longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 400 mm com nível de carga de 50%.

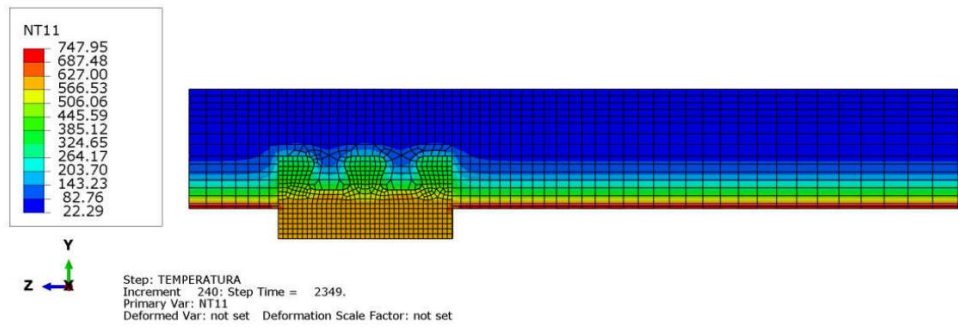


Figura 6.49 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

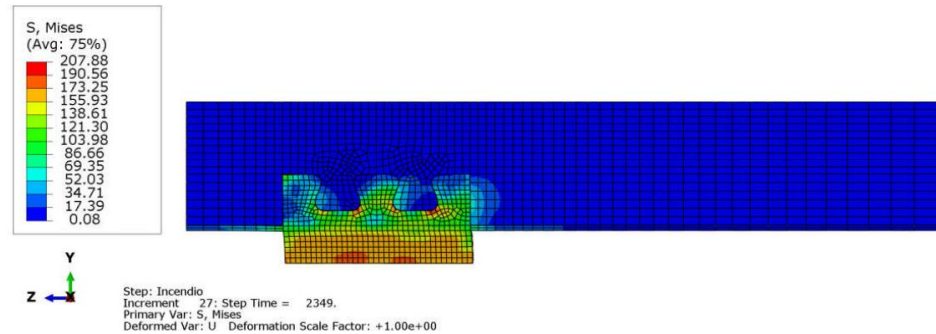


Figura 6.50 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

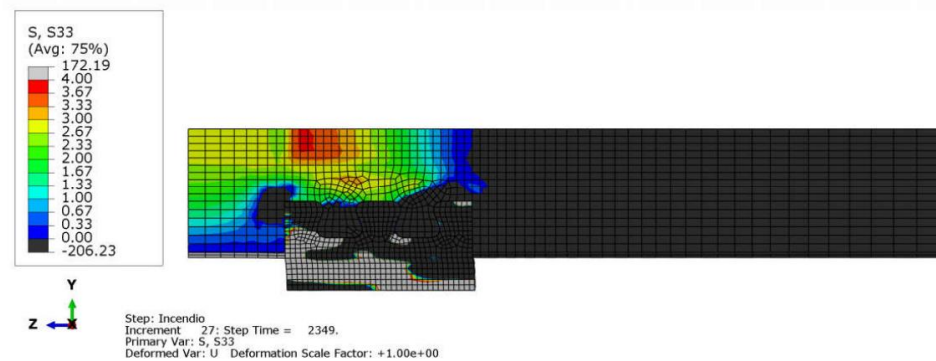


Figura 6.51 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

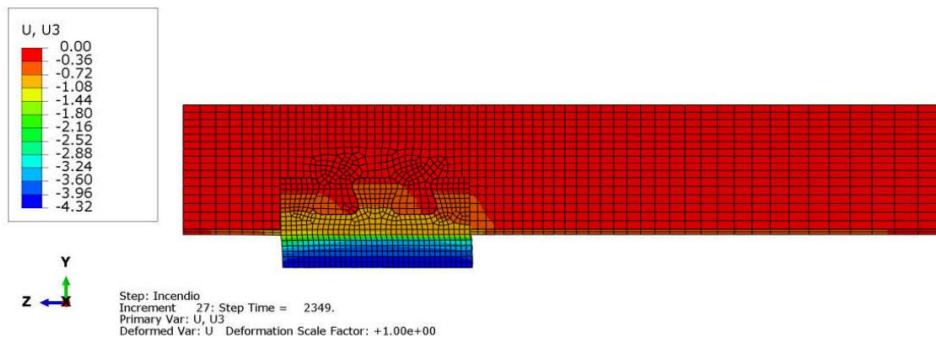


Figura 6.52 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

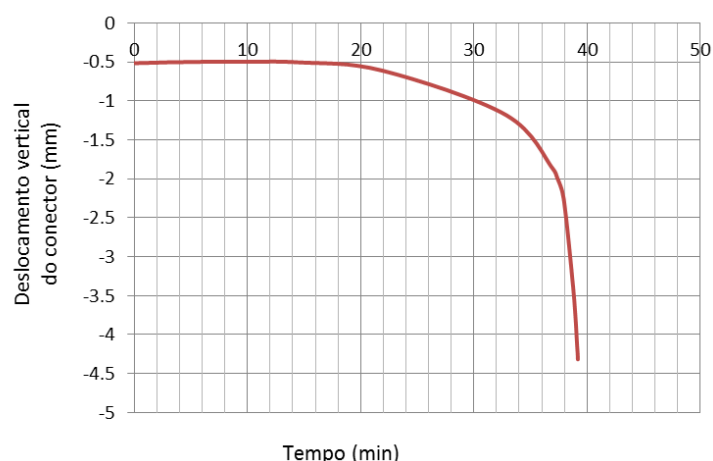


Figura 6.53 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 556°C e 627°C . Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 173 MPa (redução de 50%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 50% (50% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,00.. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 4,32 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,51 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 175 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa do Crestbond que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.54 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

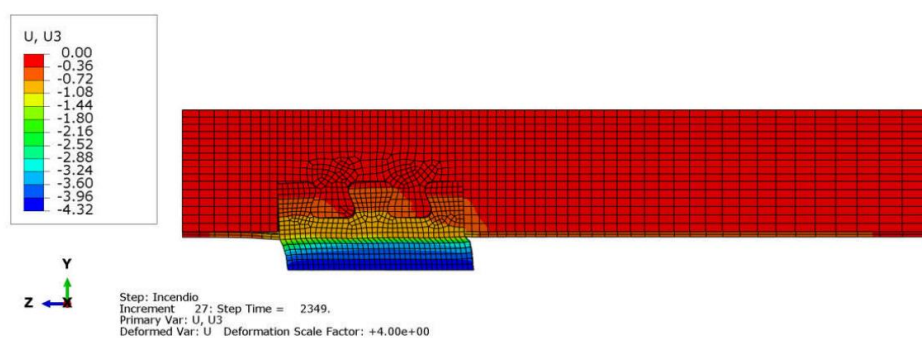


Figura 6.54 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 400 mm sobre o de 200 mm é de 1,05. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro

de 400 mm (0,51 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,18 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 200 mm (6,47 mm) tenha sido maior do que o de 400 mm (4,32 mm). Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 400 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 200 mm, pelo fato da parte externa do conector ter ficado menos deformada, porém o tempo resistente foi apenas ligeiramente maior (5%).

Chapa Passante

Tempo Resistente: 51 minutos

As Figuras 6.55 a 6.59 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 400 mm com nível de carga de 50%.

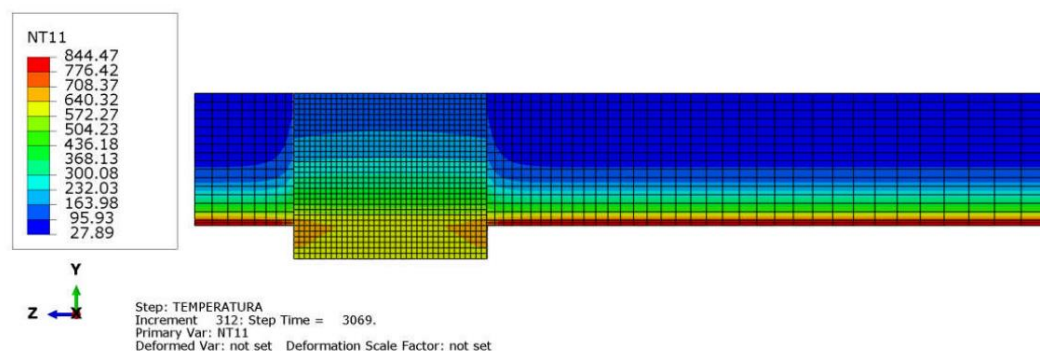


Figura 6.55 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

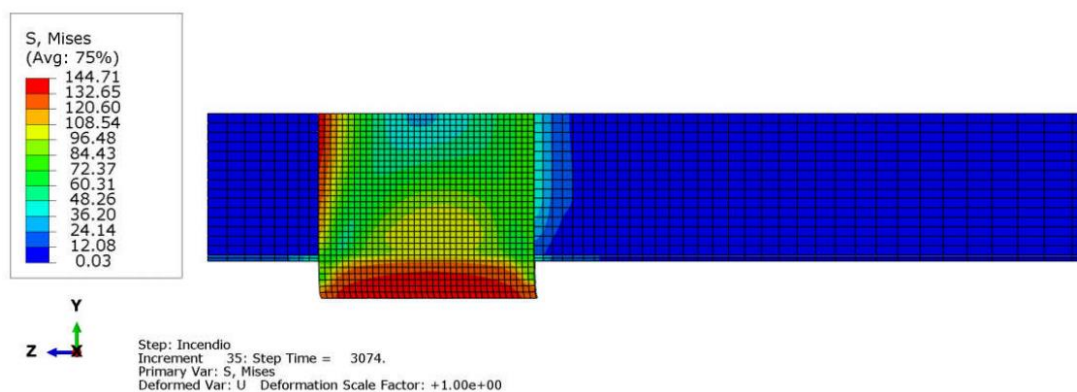


Figura 6.56 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

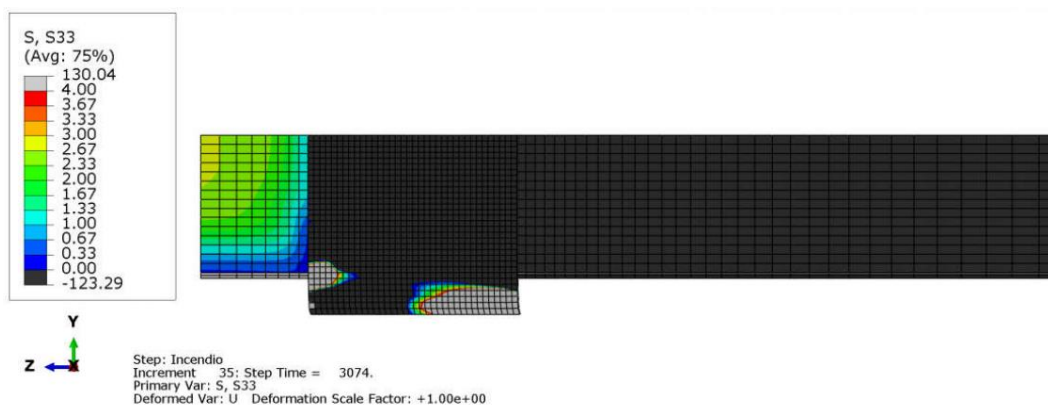


Figura 6.57 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

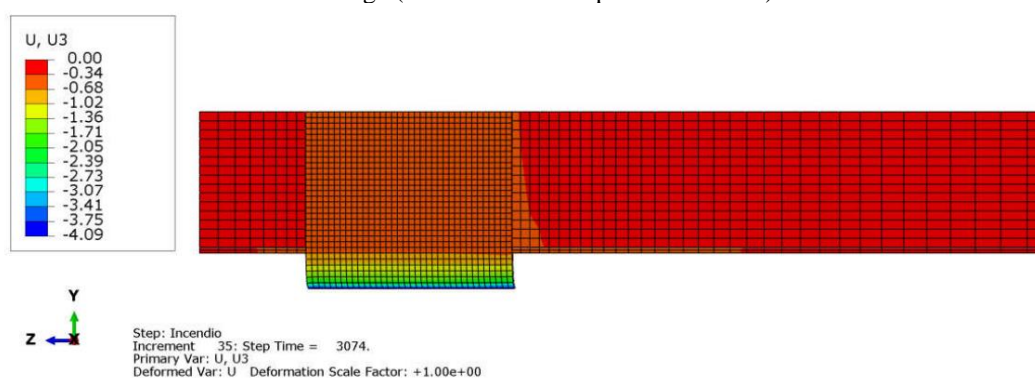


Figura 6.58 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

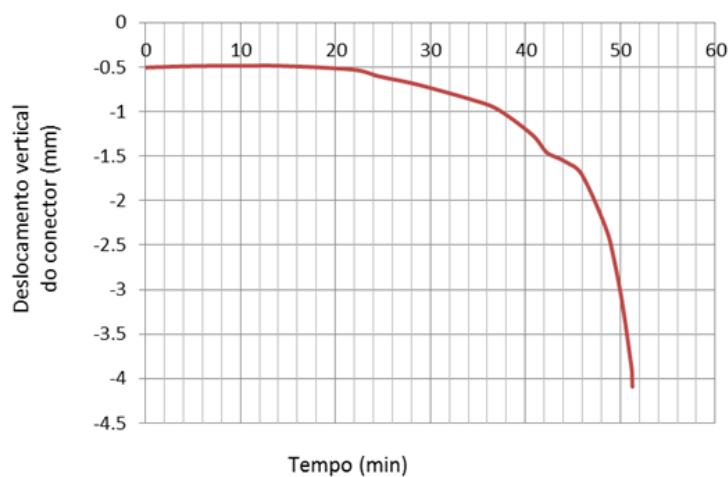


Figura 6.59 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 570°C e 640°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 161 MPa (redução de 53%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 50% (50% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,06. Foi escolhido o ponto central da parte externa do

conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 4,09 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,50 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 144 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.60 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

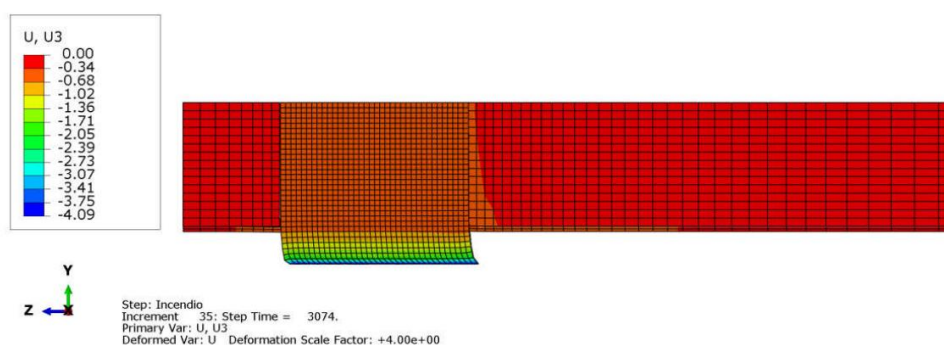


Figura 6.60 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores da Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 400 mm sobre o de 200 mm é de 1,21. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 400 mm (0,50 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,15 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 200 mm (5,14 mm) tenha sido maior do que o de 400 mm (4,17 mm). Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 400 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 200 mm, pelo fato da parte externa do conector ter ficado menos deformada e o tempo resistente foi maior (21%).

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 1,31. Em ambos os casos as falhas aconteceram por cisalhamento na parte externa do conector. No momento da falha, a tensão final máxima de Von Mises no Crestbond foi de 175 MPa, a da Chapa Passante foi de 144 MPa, sendo a razão entre elas de 1,22. O Crestbond apresentou temperatura final

menor do que a Chapa Passante, fazendo com que ele tivesse f_y maior, porém falhou com um tempo inferior.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do deslocamento do Crestbond (4,32 mm) tenha sido maior do que a da Chapa Passante (4,09). Portanto, a Chapa Passante teve comportamento um pouco melhor do que o Crestbond, por ter ficado menos deformada, mas apesar disso o tempo resistente maior (31%).

6.4.3 30% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 54 minutos

As Figuras 6.61 a 6.65 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 400 mm com nível de carga de 30%.

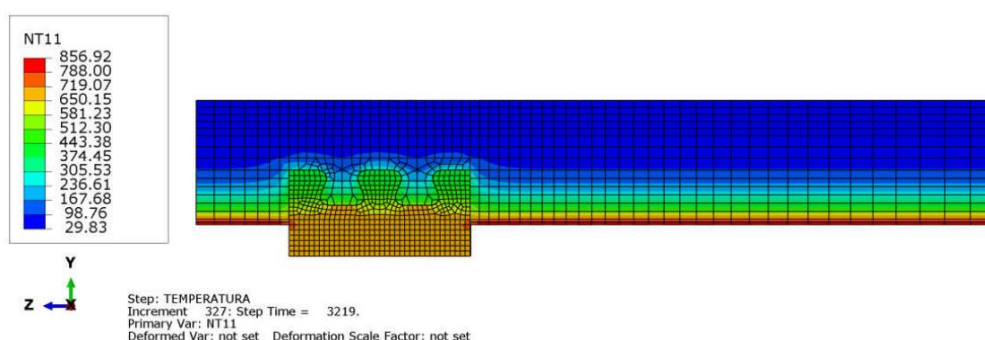


Figura 6.61 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

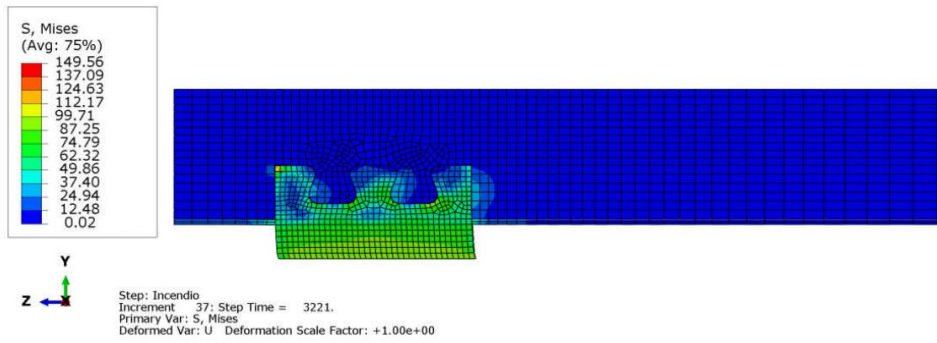


Figura 6.62 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

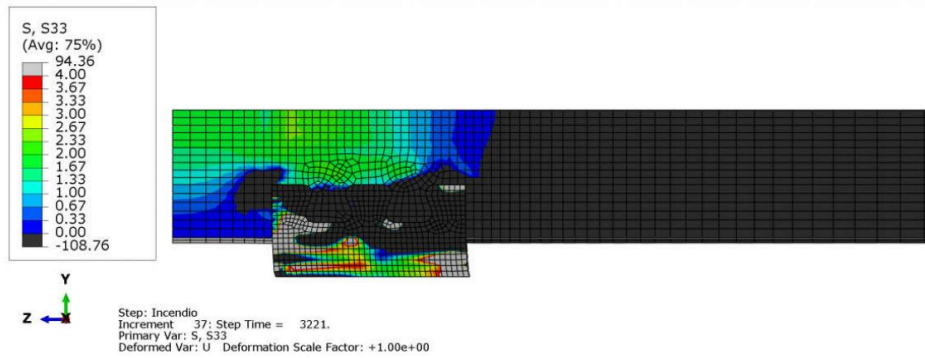


Figura 6.63 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

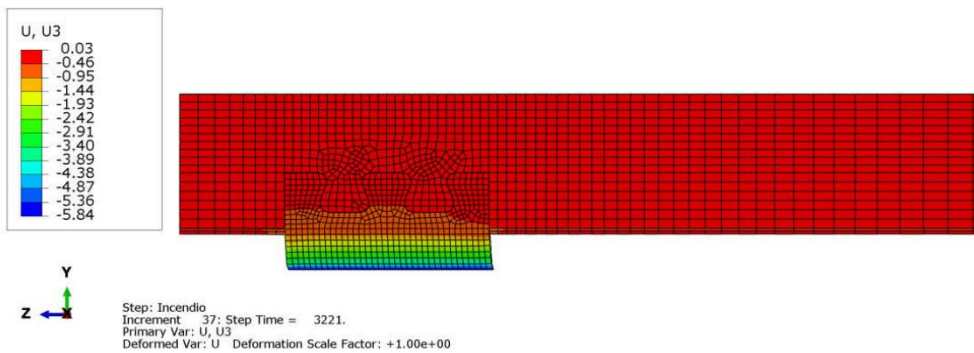


Figura 6.64 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

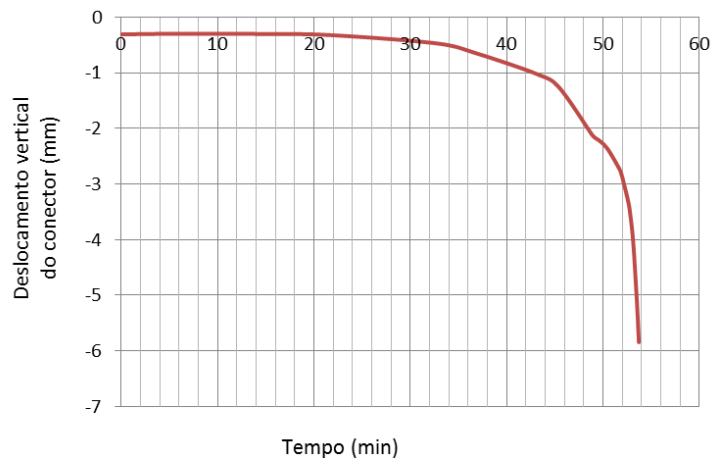


Figura 6.65 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 650°C e 720°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 97 MPa (redução de 72%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 70% (30% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,03. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 5,84 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,31 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 100 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa do Crestbond que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.66 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

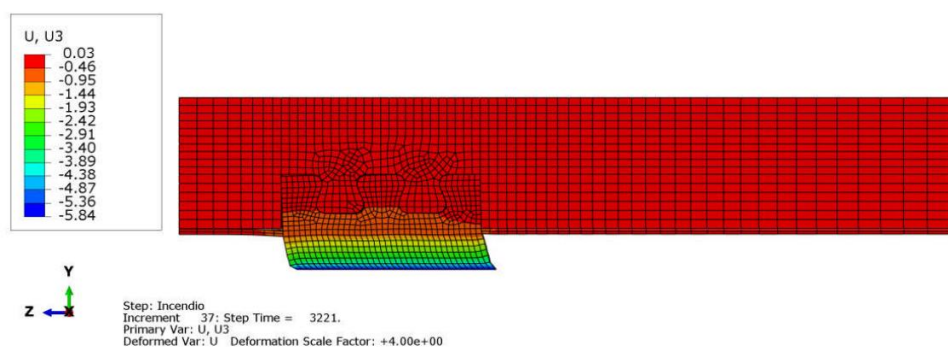


Figura 6.66 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 400 mm sobre o de 200 mm é de 1,15. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 400 mm (0,31 mm) foi menor do que o de 200 mm (0,71 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 200 mm (5,31 mm) tenha sido menor do que o de 400 mm (5,84 mm). Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 400 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 200, mm pelo fato da parte externa do conector ter ficado menos deformada considerando toda a parte externa do conector, e além disso, o tempo resistente foi apenas ligeiramente maior (15%).

Chapa Passante

Tempo Resistente: 63 minutos

As Figuras 6.67 a 6.71 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 400 mm com nível de carga de 30%.

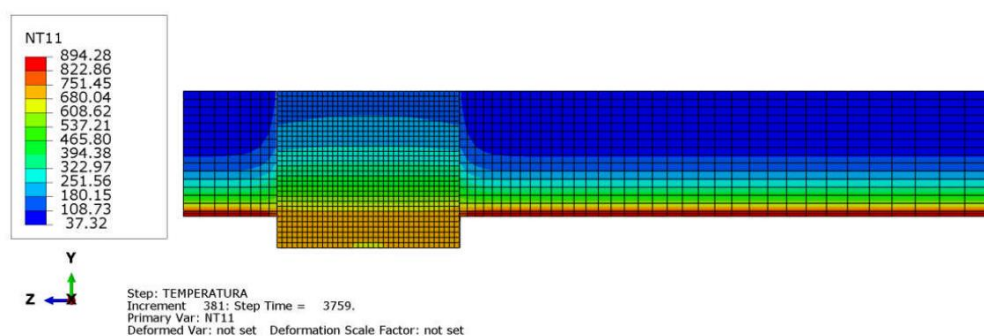


Figura 6.67 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

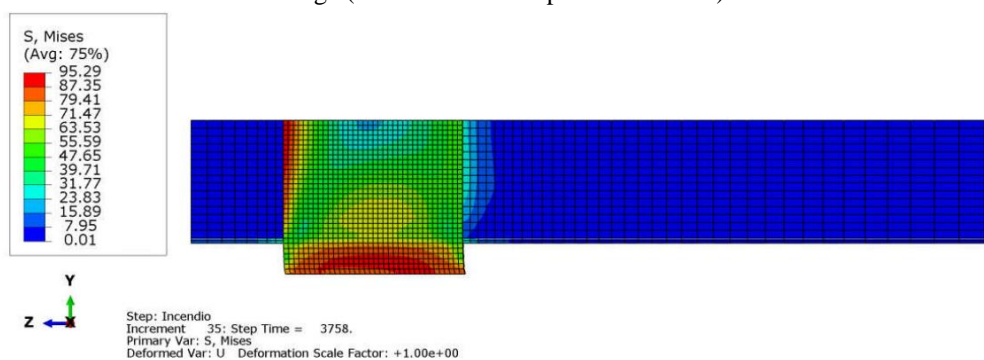


Figura 6.68 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

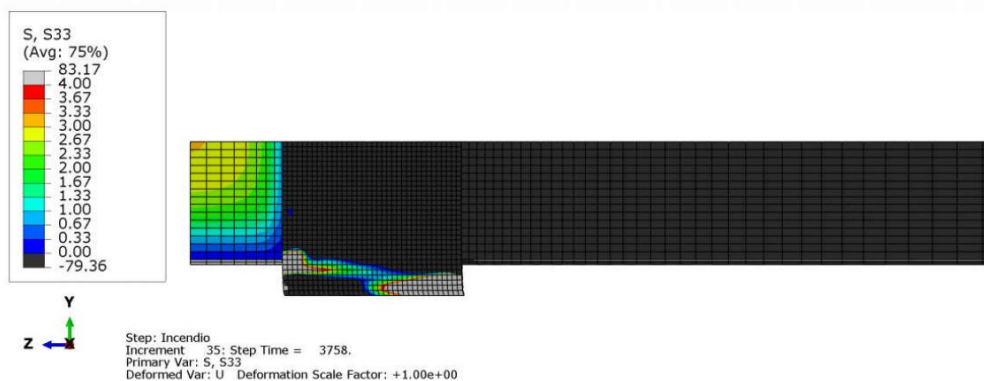


Figura 6.69 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

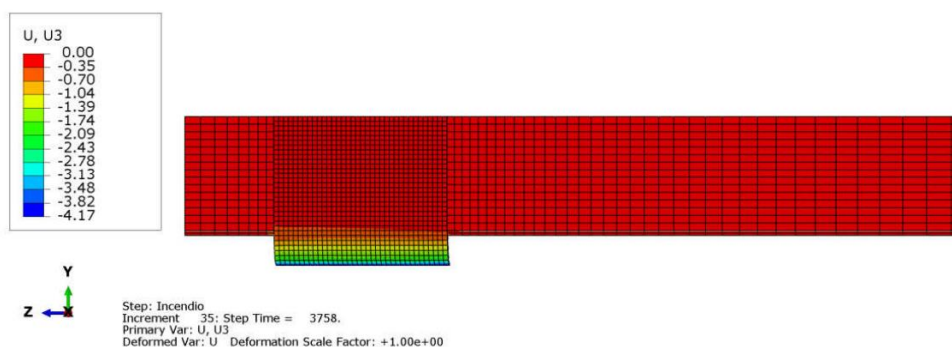


Figura 6.70 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

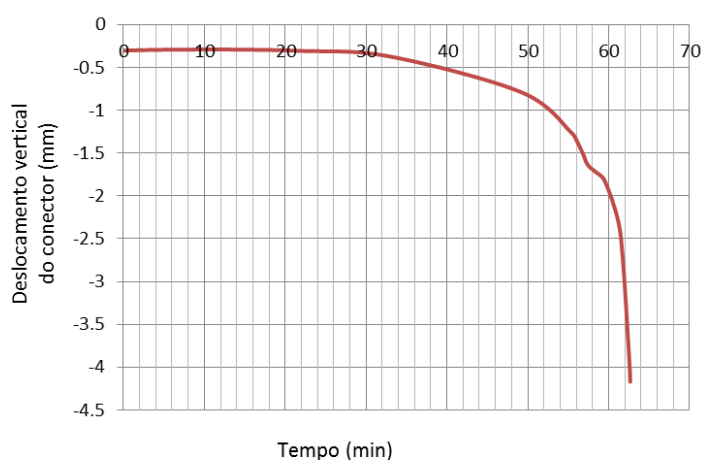


Figura 6.71 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 680°C e 750°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 90 MPa (redução de 74%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 70% (30% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,06. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 4,17 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,30 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 95 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.72 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

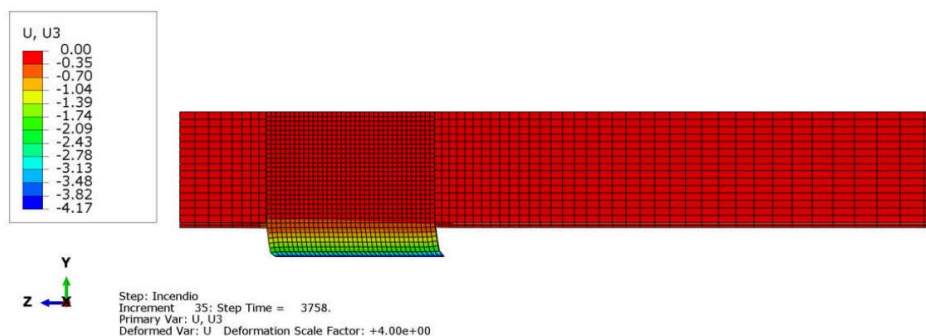


Figura 6.72 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de diâmetro de 400 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 400 mm sobre o de 200 mm é de 1,26. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 400 mm (0,30 mm) foi menor do que o de 200 mm (0,73 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 200 mm (4,23 mm) tenha sido maior do que o de 400 mm (4,17 mm). Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 400 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 200 mm, pelo fato da parte externa do conector ter ficado menos deformada e o tempo resistente foi maior (26%).

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 1,17. Em ambos os casos as falhas aconteceram por cisalhamento na parte externa do conector. No momento da falha, a tensão final máxima de Von Mises no Crestbond foi de 100 MPa, as da Chapa Passante foi de 95 MPa, sendo a razão entre elas de 1,05. O Crestbond apresentou temperatura final menor do que a Chapa Passante, fazendo com que ele tivesse f_y maior, porém falhou com um tempo inferior.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do deslocamento do Crestbond (5,84 mm) tenha sido maior do que a da Chapa Passante (4,17). Portanto, a Chapa Passante teve comportamento um pouco melhor do que o Crestbond, por ter ficado menos deformada, mas apesar disso o tempo resistente ter sido apenas ligeiramente maior (17%).

6.5 Diâmetro de 600 mm

6.5.1 70% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 38 minutos

As Figuras 6.73 a 6.77 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 600 mm com nível de carga de 70%.

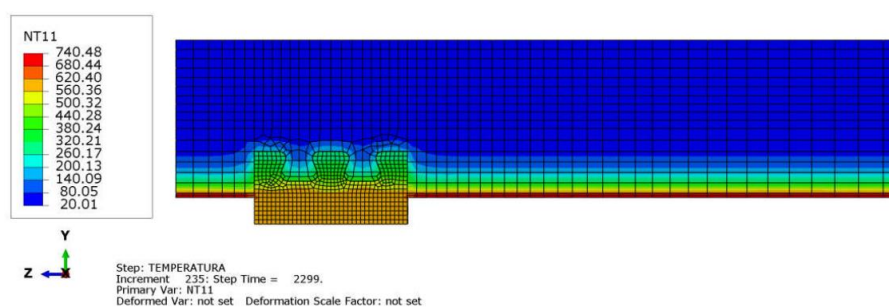


Figura 6.73 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

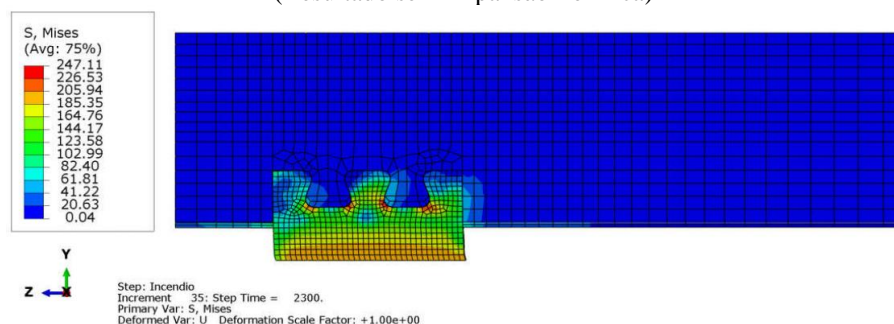


Figura 6.74 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

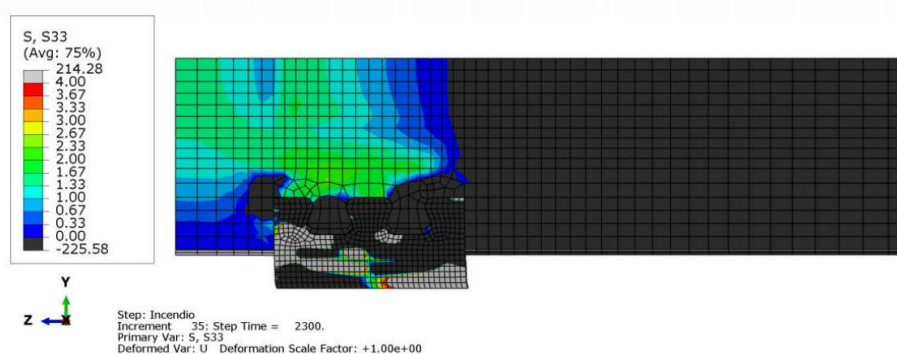


Figura 6.75 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

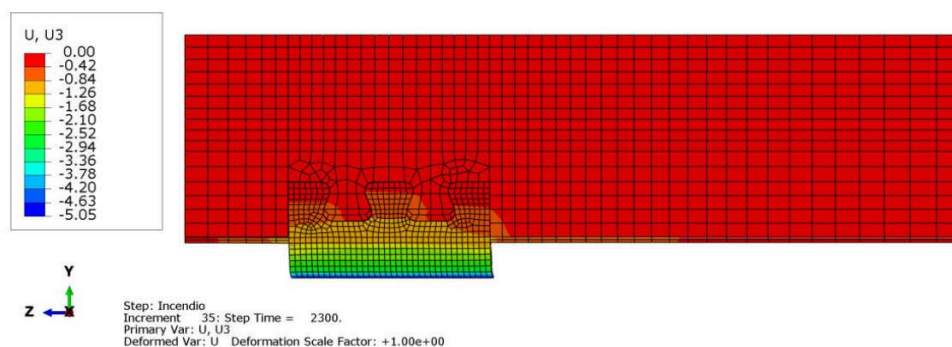


Figura 6.76 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

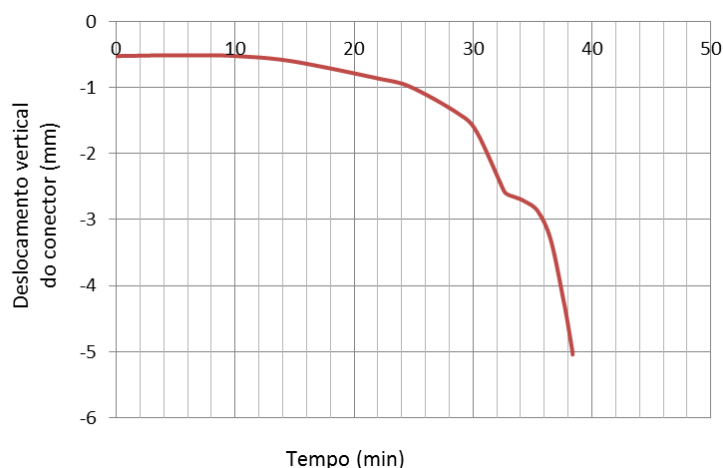


Figura 6.77 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 560°C e 620°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 176 MPa (redução de 49%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 30% (70% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,63. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 5,05 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,52 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 205 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa do Crestbond que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.78 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

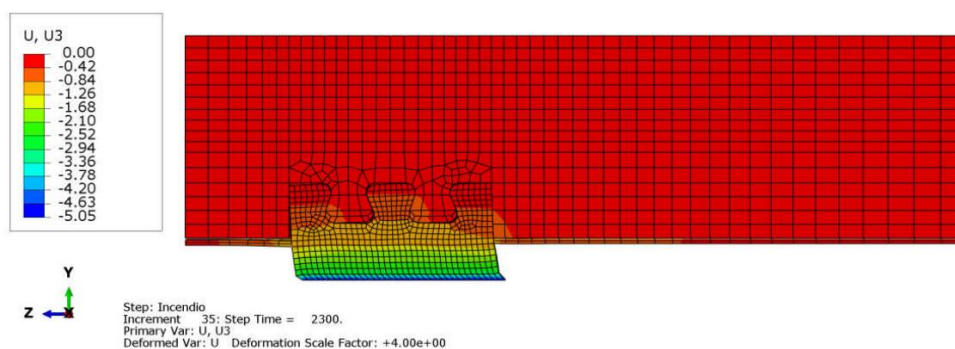


Figura 6.78 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 200 mm é de 1,23. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,52 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,65 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 200 mm (7,77 mm) tenha sido maior do que o de 600 mm (5,05 mm). Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 200 mm pelo fato da parte externa do conector ter ficado menos deformada e o tempo resistente foi maior (23%).

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 400 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 400 mm é de 1,06. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,52 mm) foi menor do que o de 400 mm (0,79 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 400 mm (5,38 mm) tenha sido maior do que o de 600 mm (5,05 mm). Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 400 mm, pelo fato da parte externa do conector ter ficado menos deformada, porém, o tempo resistente foi apenas ligeiramente maior (6%).

Chapa Passante

Tempo Resistente: 42 minutos

As Figuras 6.79 a 6.83 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 600 mm com nível de carga de 70%.

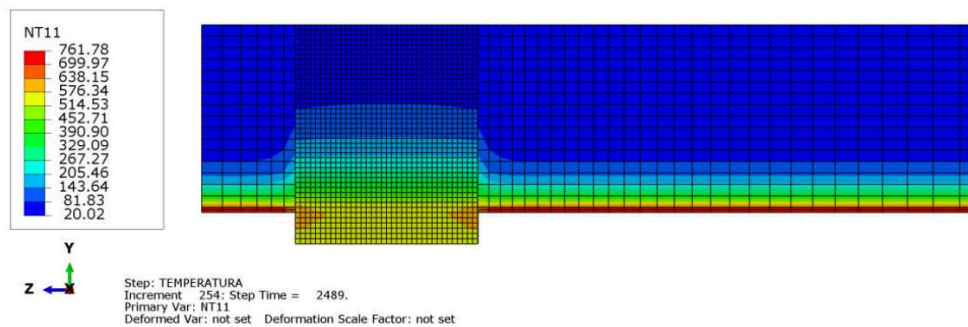


Figura 6.79 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

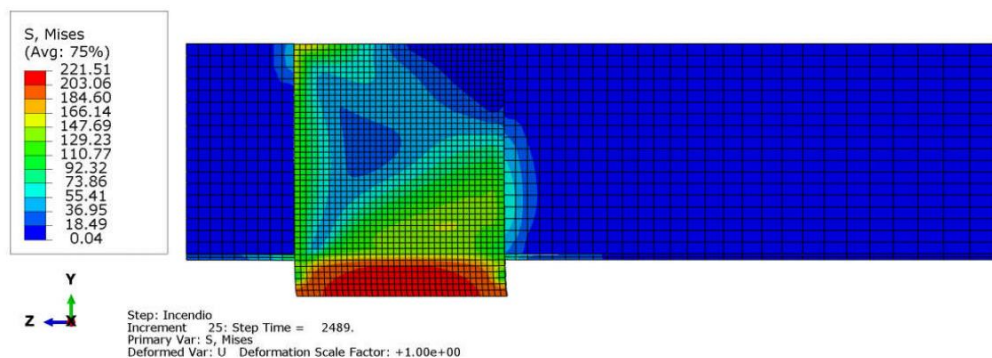


Figura 6.80 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

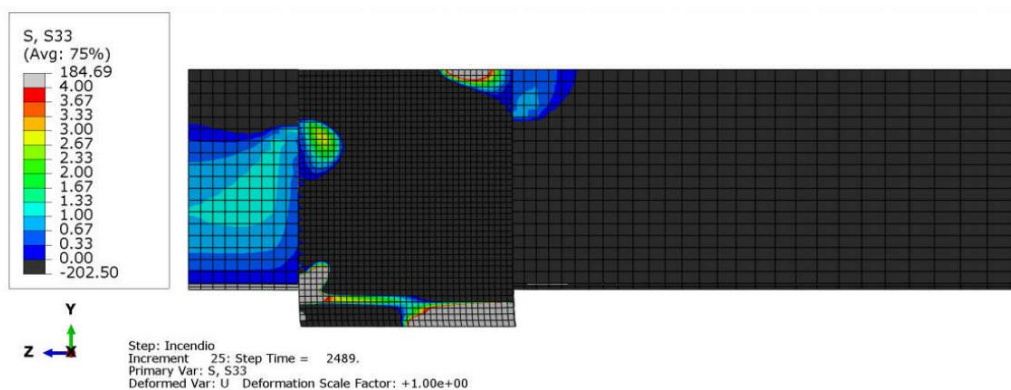


Figura 6.81 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

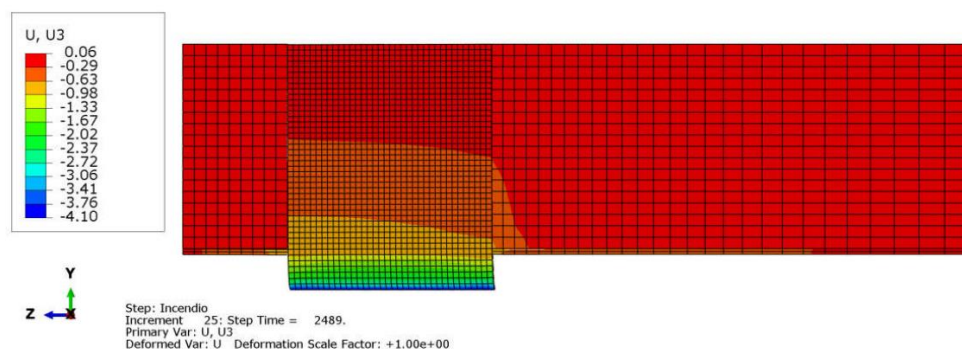


Figura 6.82 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

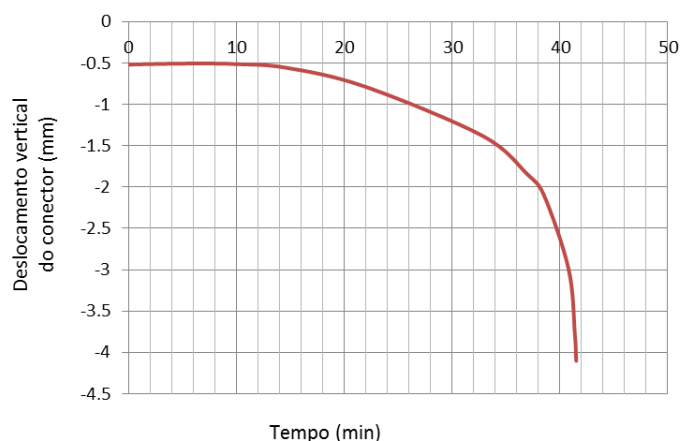


Figura 6.83 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 515°C e 590°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 214 MPa (redução de 38%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 30% (70% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,27. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 4,10 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,51 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 221 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.84 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

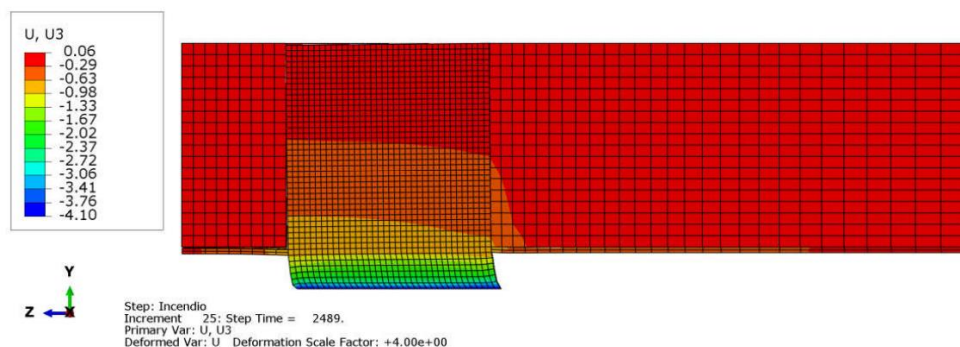


Figura 6.84 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores da Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 200 mm é de 1,35. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,51 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,66 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 200 mm (4,15 mm) tenha sido maior do que o de 600 mm (4,10 mm). Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser melhores do que os obtidos no de 200 mm, pelo fato da parte externa do conector ter ficado menos deformada, e além disso, o tempo resistente foi maior (35%).

Obs.: Em comparação com os valores da Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 400 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 400 mm é de 1,00. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,51 mm) foi menor do que o de 400 mm (0,70 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 400 mm (4,53 mm) tenha sido maior do que o de 600 mm (4,10 mm). Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser praticamente iguais aos obtidos no de 400 mm, pelo fato ter tido deformação parecidas e tempos resistentes iguais.

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 1,11. Em ambos os casos as falhas aconteceram por cisalhamento na parte externa do conector. No momento da falha, a tensão final máxima de Von Mises no Crestbond foi de 205 MPa, a da Chapa Passante foi de 221 MPa, sendo a razão entre elas de 0,93. O Crestbond temperatura final menor do que a Chapa Passante, fazendo com que ele tivesse f_y maior, porém falhou com um tempo inferior.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do deslocamento do Crestbond (5,05 mm) tenha sido maior do que a da Chapa Passante (4,10). Portanto, a Chapa Passante teve comportamento um pouco melhor do que o Crestbond, por ter ficado menos deformada, mas apesar disso o tempo resistente ter sido apenas ligeiramente maior (11%).

6.5.2 50% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 43 minutos

As Figuras 6.85 a 6.89 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 600 mm com nível de carga de 50%.

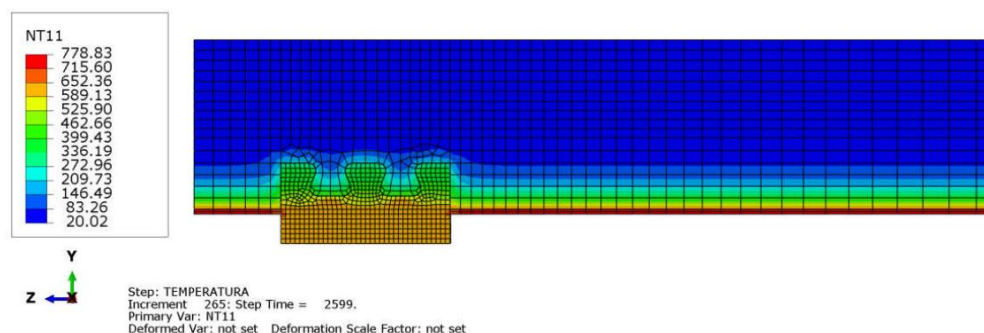


Figura 6.85 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

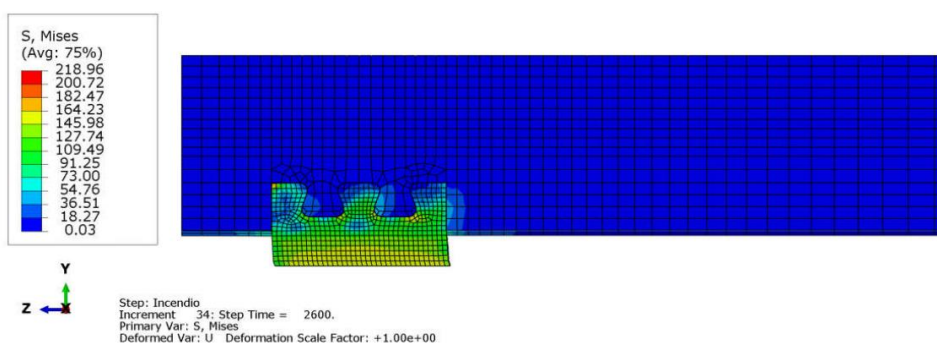


Figura 6.86 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

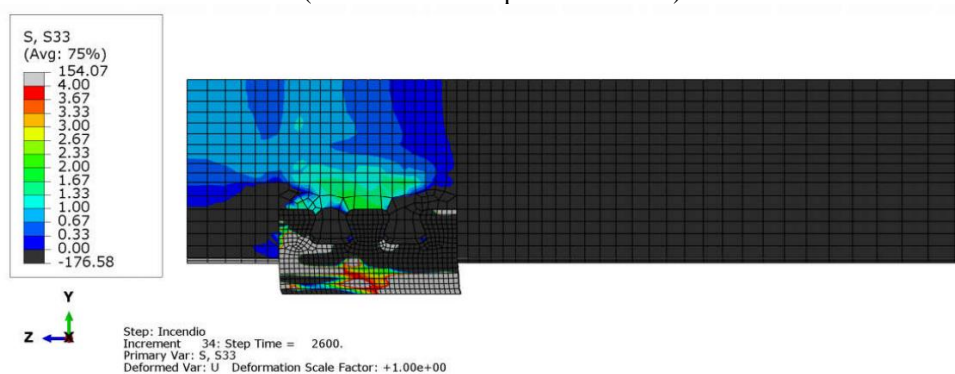


Figura 6.87 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

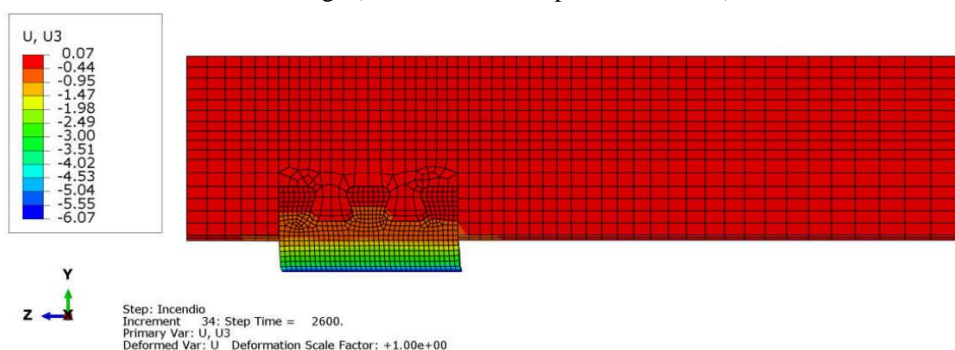


Figura 6.88 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 70% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

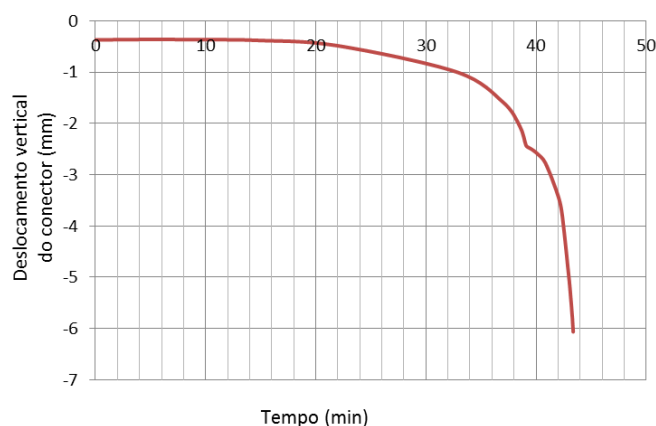


Figura 6.89 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 590°C e 652°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 147 MPa (redução de 57%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 50% (50% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,14. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 6,07 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,37 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 164 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa do Crestbond que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.90 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

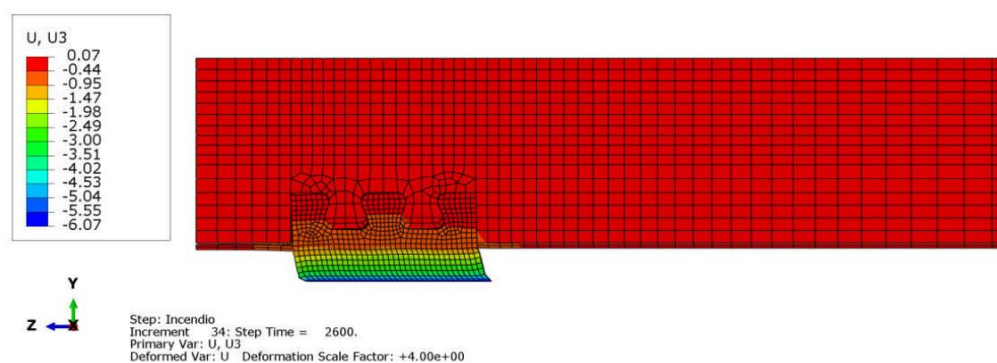


Figura 6.90 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 200 mm é de 1,16. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,37 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,18 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 200 mm (6,47 mm) tenha sido maior do que o de 600 mm (6,07 mm). Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 200 mm, pelo fato da parte externa do conector ter ficado menos deformada e o tempo resistente foi apenas ligeiramente maior (16%).

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 400 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 400 mm é de 1,10. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,37 mm) foi menor do que o de 400 mm (0,51 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 400 mm (4,32 mm) tenha sido menor do que o de 600 mm (6,07 mm). Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 400 mm, pelo fato da parte externa do conector ter ficado menos deformada e o tempo resistente foi apenas ligeiramente maior (10%).

Chapa Passante

Tempo Resistente: 51 minutos

As Figuras 6.91 a 6.95 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 600 mm com nível de carga de 50%.

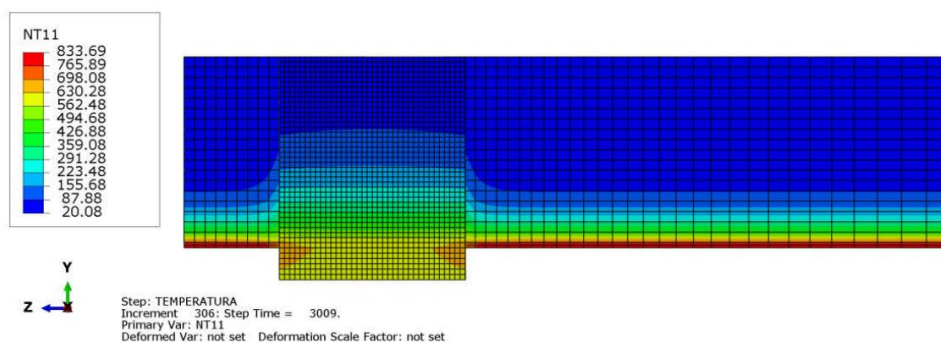


Figura 6.91 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

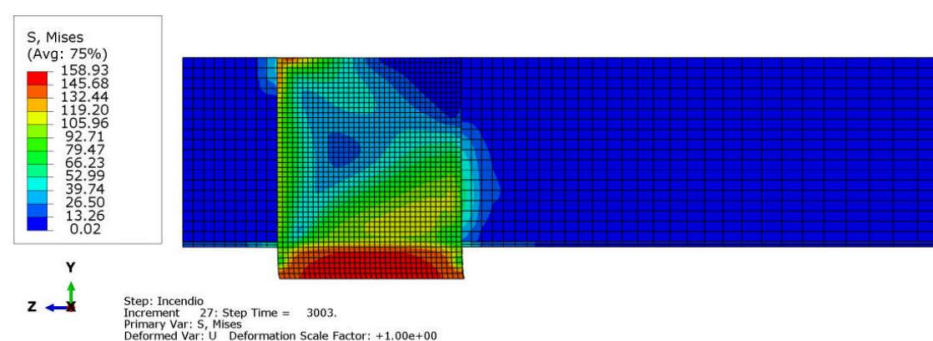


Figura 6.92 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

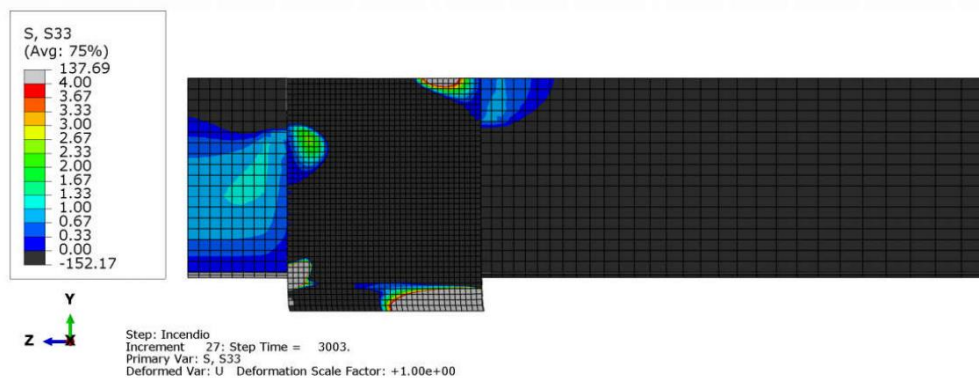


Figura 6.93 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

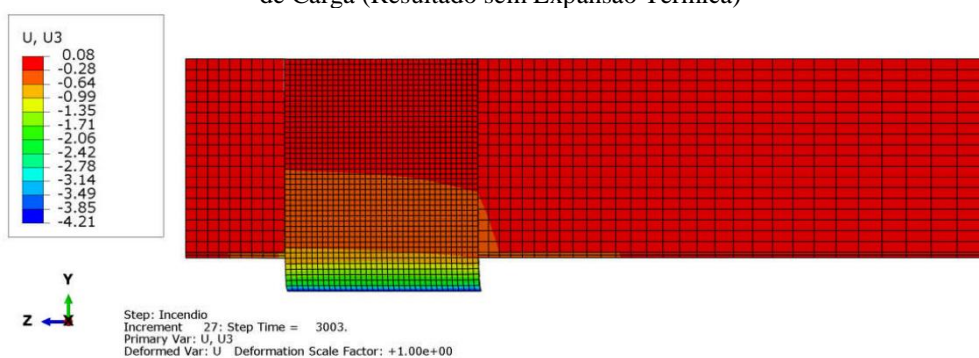


Figura 6.94 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

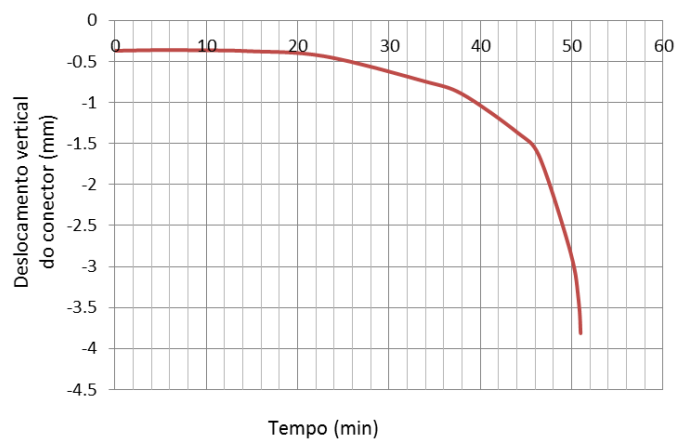


Figura 6.95 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 562°C e 660°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 161 MPa (redução de 53%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 50% (50% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,06. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 3,81 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,37 mm). A tensão final

máxima de Von Mises no conector alcançou 158 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.96 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

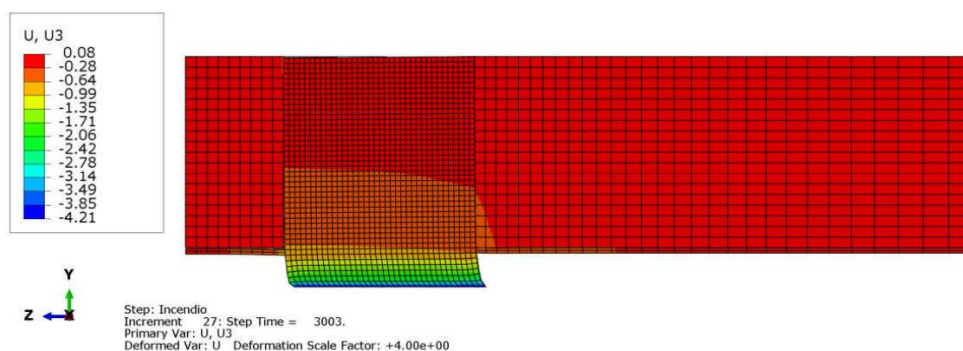


Figura 6.96 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 50% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores da Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 200 mm é de 1,21. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,37 mm) foi menor do que o de 200 mm (1,15 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 200 mm (5,14 mm) tenha sido maior do que o de 600 mm (3,81 mm). Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 200 mm, pelo fato da parte externa do conector ter ficado menos deformada e o tempo resistente foi maior (21%).

Obs.: Em comparação com os valores da Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 400 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 400 mm é de 1,00. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,37 mm) foi menor do que o de 400 mm (0,50 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 400 mm (4,09 mm) tenha sido maior do que o de 600 mm (3,81 mm). Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser praticamente iguais aos obtidos no de 400 mm, pelo fato ter tido deformação parecidas e tempos resistentes iguais.

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 1,19. Em ambos os casos as falhas aconteceram por cisalhamento na parte externa do conector. No momento da falha, a tensão final máxima de Von Mises no Crestbond foi de 164 MPa, a da Chapa Passante foi de 158 MPa, sendo a razão entre elas de 1,04. O Crestbond apresentou temperatura final menor do que a Chapa Passante, fazendo com que ele tivesse f_y maior, porém falhou com um tempo inferior.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do deslocamento do Crestbond (6,07 mm) tenha sido maior do que a da Chapa Passante (3,81). Portanto, a Chapa Passante teve comportamento um pouco melhor do que o Crestbond, por ter ficado menos deformada, mas apesar disso o tempo resistente ter sido apenas ligeiramente maior (19%).

6.5.3 30% de Carga

Crestbond

Tempo Resistente: 54 minutos

As Figuras 6.97 a 6.101 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com o Crestbond para o diâmetro de 600 mm com nível de carga de 30%.

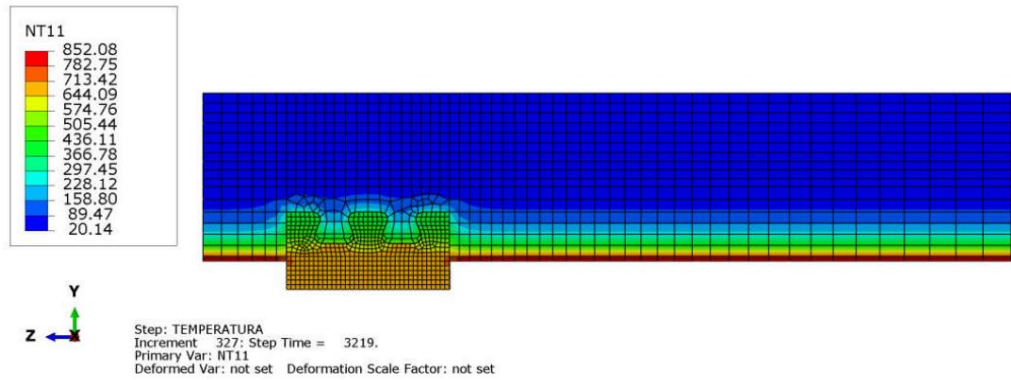


Figura 6.97 - Distribuição de Temperatura no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

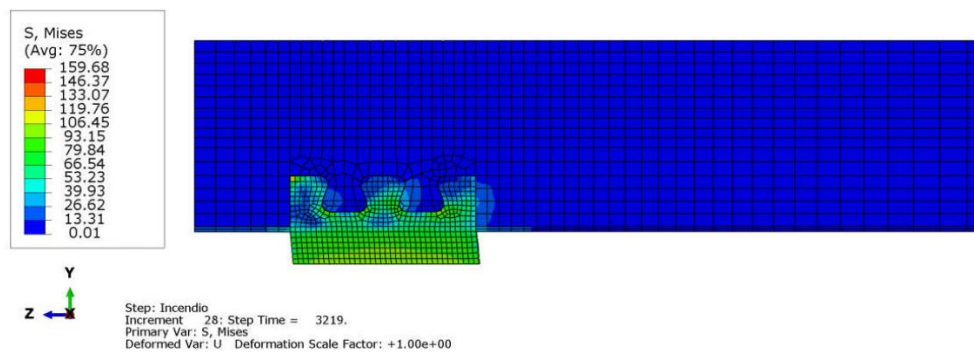


Figura 6.98 - Tensões de Von Mises no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

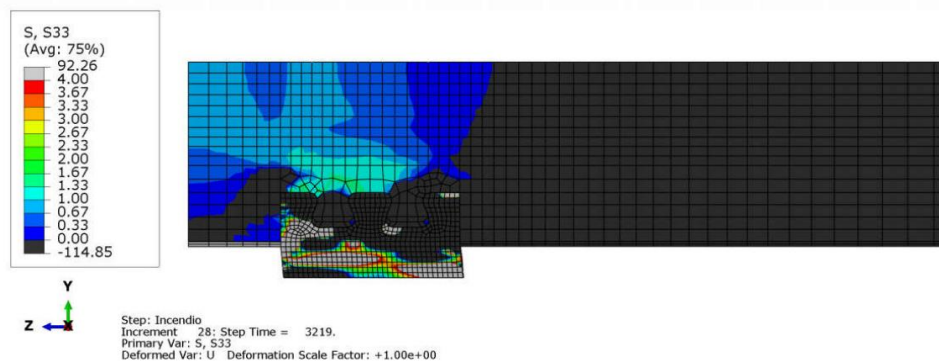


Figura 6.99 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

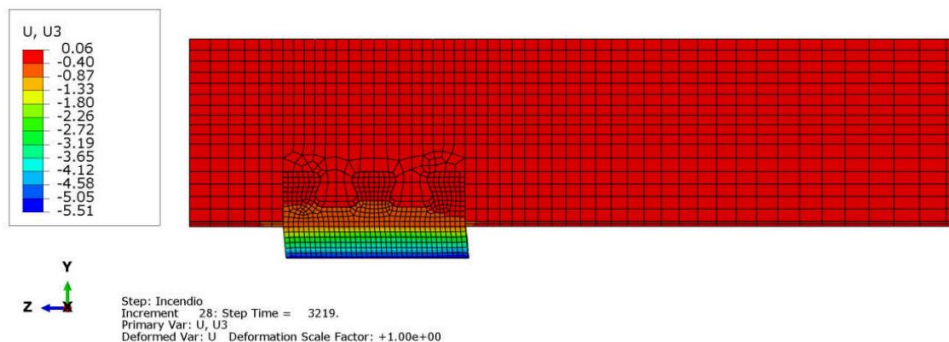


Figura 6.100 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

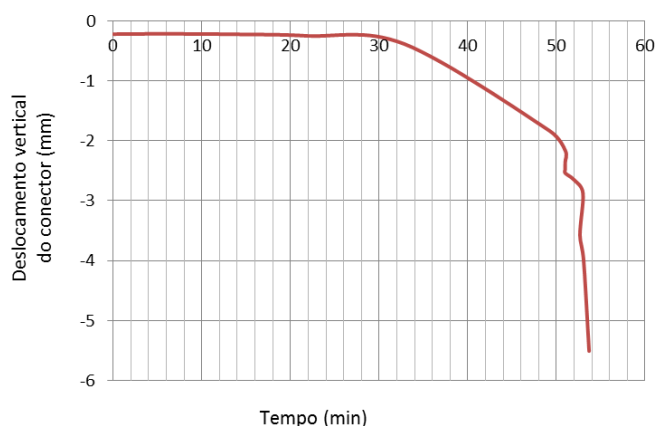


Figura 6.101 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa do Crestbond que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 644°C e 713°C. Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 100 MPa (redução de 71%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 70% (30% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,00. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 4,00 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,22 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 106 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa do Crestbond que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.102 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

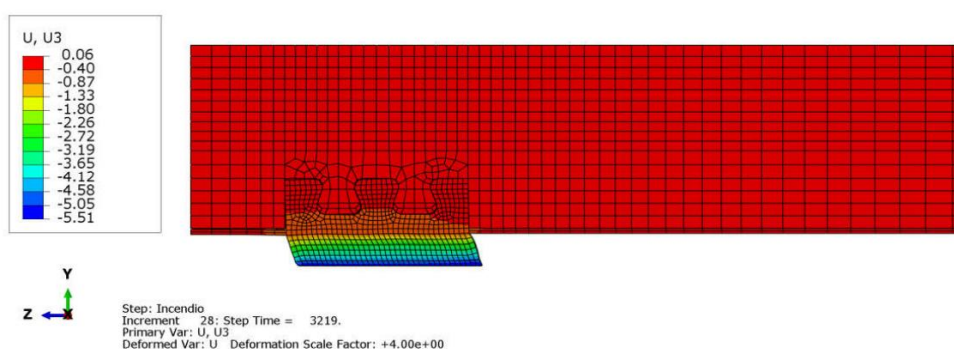


Figura 6.102 - Deformada (deslocamento) no Pilar com o Crestbond de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 200 mm é de 1,15. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,22 mm) foi menor do que o de 200 mm (0,71 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 200 mm (5,31 mm) tenha sido menor do que o de 600 mm (5,51 mm). Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser um pouco melhor do que os obtidos no de 200 mm, pelo fato da parte externa do conector ter ficado menos deformada, porém, o tempo resistente foi apenas ligeiramente maior (15%).

Obs.: Em comparação com os valores do Crestbond com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 400 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 400 mm é de 1,00. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,22 mm) foi menor do que o de 400 mm (0,31 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 400 mm (5,84 mm) tenha sido maior do que o de 600 mm (5,51 mm). Portanto, os resultados do Crestbond no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser praticamente iguais aos obtidos no de 400 mm, pelo fato ter tido deformação parecidas e tempos resistentes iguais.

Chapa Passante

Tempo Resistente: 64 minutos

As Figuras 6.103 a 6.107 mostram como ficou, no momento da falha estrutural, a distribuição de temperatura, as tensões de Von Mises, esforços de tração no concreto e o deslocamento longitudinal do pilar misto tubular preenchido com concreto com a Chapa Passante para o diâmetro de 600 mm com nível de carga de 30%.

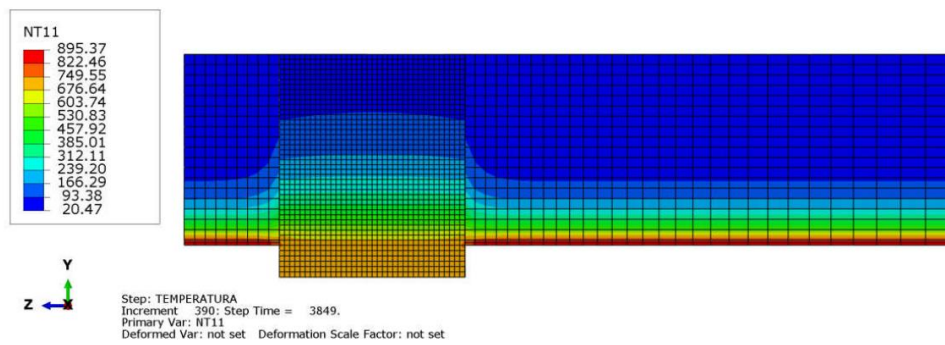


Figura 6.103 - Distribuição de Temperatura no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

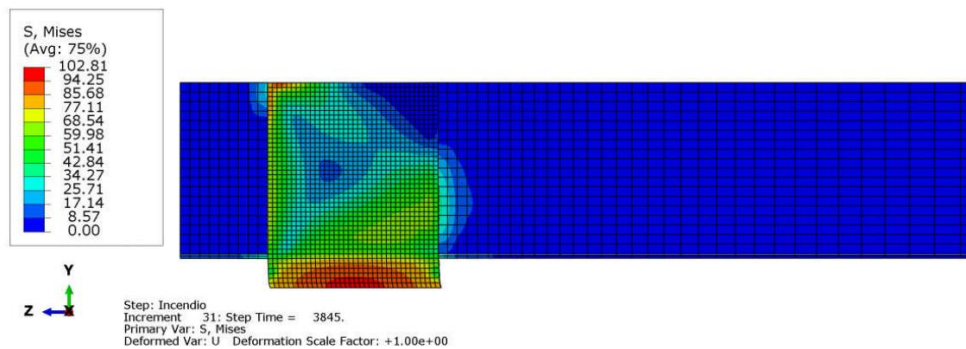


Figura 6.104 - Tensões de Von Mises no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

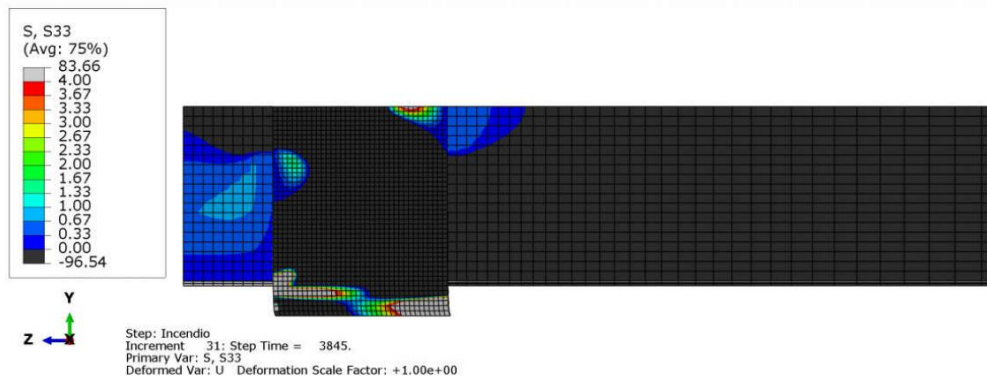


Figura 6.105 - Tensões de Tração no Concreto no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

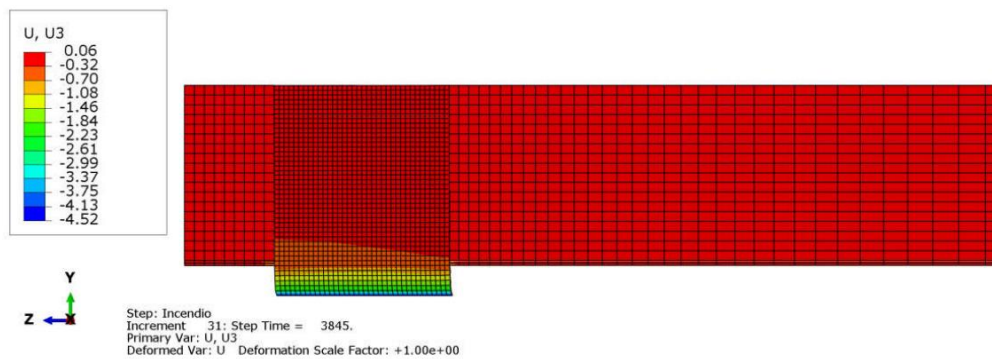


Figura 6.106 - Deslocamento Longitudinal no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

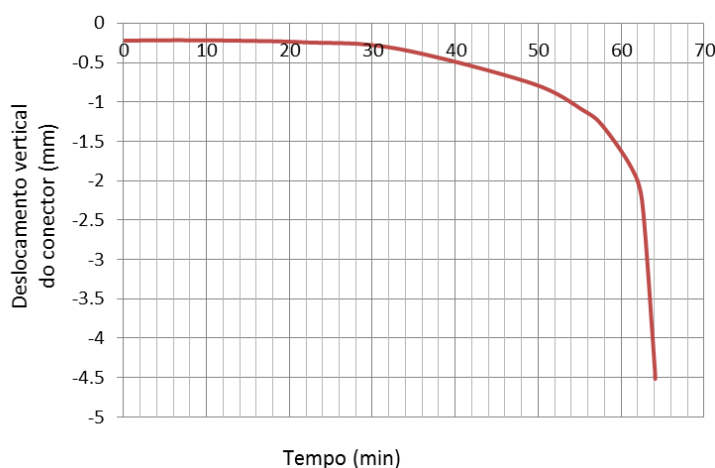


Figura 6.107 - Gráfico do Deslocamento Longitudinal ao Longo do Tempo de Exposição ao Incêndio do Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

No momento da falha estrutural, a parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento fica com temperatura variando entre 676°C e 750°C . Isto fez com a parte externa do conector ficasse com f_y aproximado de 79 MPa (redução de 77%), sendo que a carga aplicada foi diminuída em 70% (30% da carga resistente em temperatura ambiente), sendo que a razão destes dois valores percentuais é de 1,10. Foi escolhido o ponto central da parte externa do conector que recebe o carregamento para medir o deslocamento, sendo que o valor final foi de 4,52 mm em situação de incêndio (em temperatura ambiente foi de 0,22 mm). A tensão final máxima de Von Mises no conector alcançou 102 MPa. A falha estrutural ocorreu por cisalhamento na parte externa da Chapa Passante que recebe o carregamento. Isto aconteceu pela perda da capacidade resistente que o conector teve com o aumento de temperatura. A Figura 6.108 mostra com mais detalhes como ficou a deformada no momento da falha estrutural, nela são mostrados os valores de deslocamento.

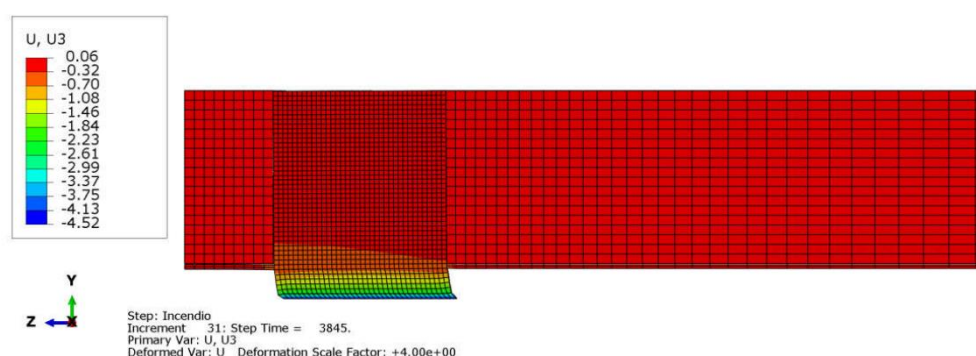


Figura 6.108 - Deformada (Deslocamento) no Pilar com a Chapa Passante de Diâmetro de 600 mm com 30% de Carga (Resultado sem Expansão Térmica)

Obs.: Em comparação com os valores da Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 200 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 200 mm é de 1,28. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,22 mm) foi menor do que o de 200 mm (0,73 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 200 mm (4,23 mm) tenha sido maior do que o de 600 mm (4,52 mm). Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser melhores do que os obtidos no de 200 mm, pelo fato da parte externa do conector ter ficado menos deformada, e além disso, teve tempo resistente maior (28%).

Obs.: Em comparação com os valores da Chapa Passante com o mesmo nível de carga e de diâmetro de 400 mm obteve-se as seguintes observações: A razão do tempo resistente do diâmetro de 600 mm sobre o de 400 mm é de 1,02. O deslocamento em temperatura ambiente do diâmetro de 600 mm (0,22 mm) foi menor do que o de 400 mm (0,30 mm). Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos minutos finais, independente que o valor final do diâmetro de 400 mm (4,17 mm) tenha sido menor do que o de 600 mm (4,52 mm). Portanto, os resultados da Chapa Passante no tubo de diâmetro de 600 mm mostraram ser semelhantes aos obtidos no de 400 mm, pelo fato ter tido deformação parecidas e tempos resistentes praticamente iguais.

Considerações

A razão do tempo resistente da Chapa Passante sobre o do Crestbond é de 1,19. Em ambos os casos as falhas aconteceram por cisalhamento na parte externa do conector. No momento da falha, a tensão final máxima de Von Mises no Crestbond foi de 106 MPa, a da Chapa Passante foi de 102 MPa, sendo a razão entre elas de 1,04. O Crestbond apresentou temperatura final menor do que a Chapa Passante, fazendo com que ele tivesse f_y maior, porém falhou com um tempo inferior.

Os deslocamentos em temperatura ambiente de ambos os casos foram praticamente iguais. Em situação de incêndio as curvas de deslocamento apresentaram comportamento parecidos com a mesma tendência de falha, sendo que os deslocamentos aumentaram consideravelmente nos

minutos finais, independente que o valor final do deslocamento do Crestbond (5,51 mm) tenha sido maior do que a da Chapa Passante (4,52). Portanto, a Chapa Passante teve comportamento um pouco melhor do que o Crestbond, por ter ficado menos deformada, mas apesar disso o tempo resistente ter sido apenas ligeiramente maior (19%).

6.6 Quadro Resumo

As tabelas 6.1 e 6.2 a seguir mostram um resumo comparativo dos tempos resistentes e dos deslocamentos finais entre o Crestbond e a Chapa Passante obtidos nas simulações numéricas sem expansão térmica.

Tabela 6.1 - Comparação dos Tempos Resistentes entre o Crestbond e a Chapa Passante (Resultados Sem Expansão Térmica)

Comparação dos Tempos Resistentes entre o Crestbond e a Chapa Passante					
Diâmetro (mm)	Nível de carga (%)	Crestbond (min)	Chapa Passante (min)	Diferença (min)	Razão (Chapa Passante/Crestbond)
200	70	31	31	0	1,00
	50	37	42	5	1,14
	30	47	50	3	1,06
400	70	36	42	6	1,17
	50	39	51	12	1,31
	30	54	63	9	1,17
600	70	38	42	4	1,11
	50	43	51	8	1,19
	30	54	64	11	1,19

Obs: Todas as Falhas ocorreram na parte externa do Conector de Cisalhamento

Tabela 6.2 - Comparação dos Deslocamentos Finais entre o Crestbond e a Chapa Passante (Resultados Sem Expansão Térmica)

Comparação dos Deslocamentos Finais entre o Crestbond e a Chapa Passante em Situação de Incêndio				
Diâmetro (mm)	Nível de carga (%)	Crestbond (mm)	Chapa Passante (mm)	Diferença (mm)
200	70	7,77	4,15	3,62
	50	6,47	5,14	1,33
	30	5,31	4,23	1,08
400	70	5,38	4,53	0,85
	50	4,32	4,09	0,23
	30	5,84	4,17	1,67
600	70	5,05	4,10	0,95
	50	6,07	3,81	2,26
	30	5,51	4,52	0,99

Somente no diâmetro de 200 mm e com o nível de carga de 70% os tempos resistentes foram iguais, nos demais casos a Chapa Passante resistiu mais que o Crestbond. Mas apesar disso, somente em um caso (diâmetro de 400 mm e com nível de carga de 50%) teve apenas uma diferença maior que 20%, o que mostra que os tempos resistentes obtidos do Crestbond e da Chapa Passante foram próximos.

Em todos os casos os deslocamentos finais do Crestbond foram maiores do que os obtidos pela Chapa Passante. Entretanto, as curvas de deslocamentos mostraram que ambos os conectores tiveram a mesma tendência de falha, independente de qual seja o valor final, elas aconteceram com pequenas diferenças de tempo.

6.7 Comparação dos Tempos Resistentes com e sem Expansão Térmica

As Tabelas 6.3 a 6.6 a seguir mostram um resumo comparativo dos tempos resistentes e dos deslocamentos finais do Crestbond e da Chapa Passante obtidos nas simulações numéricas com e sem expansão térmica.

Tabela 6.3 - Comparação dos Tempos Resistentes do Crestbond com e sem Expansão Térmica

Comparação dos Tempos Resistentes do Crestbond com e sem Expansão Térmica					
Diâmetro (mm)	Nível de carga (%)	Com Expansão Térmica (min)	Sem Expansão Térmica (min)	Diferença (min)	Razão (Sem Expansão/ Com Expansão)
200	70	8	31	23	3,88
	50	15	37	22	2,47
	30	43	47	4	1,09
400	70	25	36	11	1,44
	50	34	39	5	1,15
	30	43	54	11	1,26
600	70	27	38	11	1,41
	50	40	43	3	1,08
	30	50	53	3	1,06

Tabela 6.4 - Comparação dos Tempos Resistentes da Chapa Passante com e sem Expansão Térmica

Comparação dos Tempos Resistentes entre da Chapa Passante com e sem Expansão Térmica					
Diâmetro (mm)	Nível de carga (%)	Com Expansão Térmica (min)	Sem Expansão Térmica (min)	Diferença (min)	Razão (Sem Expansão/ Com Expansão)
200	70	7	31	24	4,43
	50	23	42	19	1,83
	30	30	50	20	1,67
400	70	18	42	24	2,33
	50	28	51	23	1,82
	30	59	63	4	1,07
600	70	31	42	11	1,35
	50	43	51	8	1,19
	30	46	64	18	1,39

Tabela 6.5 - Comparação dos Deslocamento Finais do Crestbond com e sem Expansão Térmica

Comparação dos Deslocamentos Finais do Crestbond com e sem Expansão Térmica				
Diâmetro (mm)	Nível de carga (%)	Com Expansão Térmica (mm)	Sem Expansão Térmica (mm)	Diferença (mm)
200	70	2,11	7,77	5,66
	50	1,91	6,47	4,56
	30	2,90	5,31	2,41
400	70	2,86	5,38	2,52
	50	2,83	4,32	1,49
	30	1,92	5,84	3,92
600	70	2,52	5,05	2,53
	50	5,02	6,07	1,05
	30	4,41	5,51	1,10

Tabela 6.6 - Comparação dos Deslocamentos Finais da Chapa Passante com e sem Expansão Térmica

Comparação dos Deslocamentos Finais da Chapa Passante com e sem Expansão Térmica				
Diâmetro (mm)	Nível de carga (%)	Com Expansão Térmica (mm)	Sem Expansão Térmica (mm)	Diferença (mm)
200	70	1,98	4,15	2,17
	50	2,70	5,14	2,44
	30	2,39	4,23	1,84
400	70	1,64	4,53	2,89
	50	1,86	4,09	2,23
	30	4,16	4,17	0,01
600	70	2,72	4,10	1,38
	50	2,67	3,81	1,14
	30	1,28	4,52	3,24

Os valores dos tempos resistentes sem expansão térmica foram maiores em todos os casos, sendo que quanto menor o diâmetro, maiores foram as diferenças. Alguns resultados apresentam diferenças superiores a 100%, isto mostra que o Abaqus pode ter tido problemas de convergência numérica da solução das curvas de deslocamentos, sendo que teve casos que não mostrou uma tendência de aumento significativo. Somente em alguns casos os resultados tiveram tempos resistentes próximos (com uma diferença de no máximo 20%). Além disso, os deslocamentos finais dos conectores de cisalhamento, sem considerar a expansão térmica, foram maiores do que os obtidos usando a expansão térmica.

6.8 Observações do Capítulo

Este capítulo mostrou os resultados do Crestbond e da Chapa Passante como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto em situação de incêndio, sendo desconsiderado o efeito da expansão térmica. Os dados obtidos ao longo deste capítulo permitem fazer os seguintes comentários:

- O fenômeno da expansão térmica influenciou de forma significativa a análise estrutural, sendo que neste capítulo os resultados obtidos foram diferentes em relação ao anterior;
- A expansão térmica fez com que o programa tivesse maiores dificuldades para a convergência da solução das curvas de deslocamentos. Por causa disto, houve diferenças (sendo em alguns casos com diferenças maiores que 100%) dos tempos resistentes com e sem expansão;
- Em todos os casos quando comparados os tempos resistentes com e sem expansão térmica, os com expansão térmica apresentam tempo resistente inferior, sendo que em muitos as diferenças são muito grandes;
- Em todos os casos avaliados as falhas acontecerem por cisalhamento na parte externa do conector que recebe o carregamento. Tanto para o Crestbond como para a Chapa Passante, a resistência ao escoamento do aço (f_y) diminuiu consideravelmente e as tensões finais de Von Mises permaneceram altas e o como pode ser observado nos gráficos os deslocamentos longitudinais dos conectores aumentaram muito durante o tempo de exposição ao incêndio;
- Quando comparado com o mesmo nível de carga com o uso do Crestbond, para quase todos os casos, quanto maior o diâmetro, maior foi o tempo resistente;
- Quando comparado com o mesmo nível de carga com o uso da Chapa Passante, o diâmetro de 200 mm teve tempo resistente menor do que os de 400 e 600 mm (ambos tiveram o mesmo tempo resistente).
- Para quase todos os casos o tempo resistente da Chapa Passante foi maior (quase todos menor que 20%) do que o do Crestbond. A única exceção foi para o diâmetro de 200 mm com o nível de carga de 70%, em que os tempos resistentes de ambos os conectores foram iguais. Isto mostra

que o comportamento do Crestbond e da Chapa Passante foram semelhantes, não sendo conclusivo para definir que a Chapa Passante teve resultados realmente melhores;

- Em todos os casos estudados, quando comparado com o mesmo nível de carga e o mesmo diâmetro, no momento de falha do Crestbond, a Chapa Passante apresenta um menor deslocamento final;

- A espessura e a altura de ambos os conectores são iguais, porém o comprimento é diferente, sendo que o Crestbond apresenta aberturas e geometria constante. Isso faz com que a Chapa Passante tenha volume maior, fazendo com que ela tenha maior rigidez. Pelo fato do Crestbond ter uma menor rigidez e ter elevado a temperatura de forma mais rápida do que o Chapa Passante, isso fez com que ele apresentasse a tendência de falha em um intervalo de tempo menor em situação de incêndio, porém as diferenças de tempo foram pequenas para quase todos os casos, mostrando resultados semelhantes para os dois conectores;

- Quando comparado com o mesmo diâmetro e o mesmo nível de carregamento, no momento da falha a parte externa do Crestbond apresentou deformação final maior do que a parte externa da Chapa Passante.

Com todos esses comentários é possível concluir que, nas análises realizadas sem considerar o efeito da expansão térmica, a Chapa Passante apresentou-se ser apenas um pouco melhor do que o Crestbond para todos os casos. Ao longo do capítulo mostra que os comportamentos dos dois conectores foram semelhantes nas análises em situação de incêndio sem considerar o efeito da expansão térmica. Os tempos resistentes da Chapa Passante são ligeiramente maior (menor que 20%) para quase todos os casos, sendo diferenças pequenas. Além disso, mesmo a Chapa Passante apresentando deslocamentos finais menores do que os do Crestbond, as curvas dos gráficos de deslocamentos mostram a mesma tendência de falha (independente de qual seja o valor final, o deslocamento aumenta rapidamente apenas nos últimos minutos antes da falha) para ambos os conectores.

7

CONCLUSÕES

7.1 Considerações Gerais

Neste capítulo apresenta-se, de maneira resumida, as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento deste trabalho. Em seguida estão elencadas as sugestões para trabalhos futuros relacionados ao uso de conectores de cisalhamento como dispositivos de transferência de carga em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto em situação de incêndio.

A revisão bibliográfica, apresentada no capítulo 2, serviu para conhecer os trabalhos relacionados ao tema desta dissertação que foram realizados por meio de análises numéricas. A maioria das referências são recentes (menos de 10 anos) e o Abaqus foi a principal ferramenta usada nas simulações. Não foi encontrado na literatura nenhum trabalho a respeito de conectores em pilares mistos em situação de incêndio, somente sugestões presentes em normas. A maioria dos trabalhos tratam apenas de compressão axial em pilares mistos. Porém, foi possível entender os principais itens que são estudados em pilares mistos em temperatura elevada, sendo isto de fundamental importância para desenvolver uma metodologia para este trabalho.

O capítulo 3 tratou de reproduzir modelos numéricos (presentes na literatura) sobre compressão axial em pilares mistos em situação de incêndio. Este capítulo foi importante para poder entender como utilizar o programa Abaqus nas análises térmicas e estruturais em temperatura elevada. Além disso, serviu para compreender melhor as propriedades térmicas e mecânica do aço e do concreto que variam em função da temperatura em que os elementos estruturais estão expostos durante o incêndio.

Após a reprodução dos modelos numéricos presentes na literatura, foi possível desenvolver um modelo numérico com a presença de conector de cisalhamento em situação de incêndio,

conforme mostra o capítulo 4. Para isto, foram necessárias algumas adaptações ao modelo do capítulo 3, entre elas as condições de contorno que impediu a transladação vertical do topo do pilar. O carregamento foi aplicado diretamente no Crestbond e na Chapa Passante, não sendo uma força axial de compressão no pilar. Além disso, este capítulo mostra e comparara a variação de temperatura na parte externa do Crestbond e da Chapa Passante ao longo do tempo para os três diâmetros de tubos de aço estudados. Em todos os casos o Crestbond apresentou temperatura maior, porém as diferenças foram pequenas, sendo de no máximo 98°C e até 12%, ocorrendo apenas em alguns instantes. Isso mostrou que os dois conectores tiveram comportamento térmico bem parecidos, independente de qual fosse o comprimento da Chapa Passante.

Os capítulos 5 e 6 mostraram os resultados obtidos na análise estrutural de duas formas diferentes: uma considerando o efeito da expansão térmica dos materiais e a outra não. Além de servir como comparativo, a razão de ter feito um capítulo sem expansão térmica foi principalmente por problemas de convergência nos resultados com expansão térmica.

Os resultados com expansão térmica (capítulo 5) mostraram que cada conector saiu melhor em um determinado caso (diâmetro e/ou nível de carregamento), não mantendo, portanto, um padrão. Nas análises dos tempos resistente em um mesmo diâmetro (200, 400 e 600mm), em nenhum deles a Chapa Passante teve tempos resistentes maiores ou menores que o Crestbond para todos níveis de carga avaliado (30, 50 e 70%). Isso mostra que são necessários estudos mais aprofundados para tentar entender melhor o comportamento destes conectores em pilares mistos em situação de incêndio.

Os resultados das análises estruturais sem expansão térmica (capítulo 6) mantiveram um padrão, com a Chapa Passante apresentando um maior tempo resistente, porém na maioria dos casos as diferenças, em relação ao Crestbond, foram pequenas (menor que 20%). As análises ficaram menos complexas e o Abaqus não apresentou os mesmos problemas de convergência, sendo que o tempo de processamento e o número de incrementos foram muito menores. Os resultados mostraram que a Chapa Passante teve comportamento um pouco melhor do que o Crestbond, não sendo conclusivo para ser considerado melhor. Além disso, o Crestbond tem a vantagem de poder proporcionar uma maior facilidade de colocação de armaduras longitudinais nos pilares mistos do que a Chapa Passante.

O fenômeno da expansão térmica influenciou de forma significativa a análise estrutural. Os resultados sem expansão térmica foram bem diferentes do que os obtidos com expansão térmica na maioria dos casos. Na comparação entre resultados, teve-se alguns casos que foram observadas diferenças maiores que 100% nos tempos resistentes sem expansão térmica em relação aos tempos resistentes com expansão. Em todos os casos os tempos resistentes sem expansão térmica foram maiores do que os com expansão.

Em todos os resultados obtidos sem expansão térmica as falhas ocorreram por cisalhamento na parte externa dos conectores de cisalhamento. Nos resultados com expansão térmica a falha no concreto foi o principal motivo do colapso estrutural. Isto aconteceu devido aos esforços de tração provocados por efeitos térmicos juntamente com a carga transferida dos conectores, fazendo com que o concreto sofresse muita fissuração. Além disso, em alguns resultados com expansão térmica a falha ocorreu por cisalhamento na parte externa dos conectores pela perda da capacidade resistente com a elevação de temperatura.

O aumento do diâmetro dos tubos fez com tivesse uma tendência de melhorar o comportamento estrutural. Isto aconteceu porque a elevação da temperatura ocorre de maneira mais lenta no núcleo de concreto, nos diâmetros maiores em relação aos menores, fazendo com que aumentasse os tempos resistentes na maioria dos casos. Todos os resultados obtidos com o diâmetro de 200 mm, independente se analisados com ou sem expansão térmica, tiveram piores resultados de tempo resistentes e de deformação em relação aos diâmetros de 400 e 600mm. O diâmetro de 600 mm proporcionou a maioria dos melhores resultados, porém em alguns casos as diferenças de comportamento dos conectores em relação ao diâmetro de 400 foram pequenas ou praticamente igual.

7.2 Sugestões para Estudos Futuros

Como o objetivo principal deste trabalho é entender o comportamento de conectores de cisalhamento em pilares mistos em situação de incêndio, é importante que o estudo seja validado experimentalmente. Além disso, para a continuação do tema deste trabalho é sugerido a realização de novos trabalhos, sendo eles experimentais e/ou numéricos e que abordam os seguintes itens em temperatura elevada:

- Estudar o uso do conector parafuso em pilares mistos;
- Fazer análises com seções tubulares quadradas e retangulares;
- Analisar mais níveis de carregamento nos conectores;
- Estudar diferentes tamanhos de diâmetros e também espessura dos tubos;
- Combinação de aplicação de carga no pilar misto e no conector de cisalhamento;
- Considerar a restrição axial e rotacional no topo dos pilares;
- Estudar diferentes formas de considerar a expansão térmica dos materiais, principalmente do concreto;
- Estudar o uso de proteção térmica, principalmente na região das ligações;
- Estudar diferentes propriedades térmicas e mecânicas do concreto;
- Fazer análises com uso de armaduras no núcleo de concreto;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, O. P. - *Estudo do Comportamento de Conectores Crestbond em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto* - Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

AGUIAR, O. P.; CALDAS, R. B.; OLIVEIRA, H. M.; FAKURY, R. H. - *Estudo De Conectores Crestbond Em Pilares Mistos Preenchidos Com Concreto* - Revista da Estrutura de Aço, Centro Brasileiro de Construção em Aço (CBCA), 2015.

American Institute Of Steel Construction – *Specification For Structural Steel Buildings* – ANSI/AISC 360, 2010.

Anderberg Y, Thelandersson S. *Stress and deformation characteristics of concrete, 2-experimental investigation and material behaviour model. Bulletin 54*. Lund, Sweden: Lund Institute of Technology, 1976.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – *Perfil Tubular, De Aço Carbono, Formado a Frio, Com e Sem Costura, De Seção Circular, Quadrada Ou Retangular Para Usos Estruturais* – NBR 8261, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios* – NBR 8800, 2008.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – *Projeto De Estruturas De Aço e De Estruturas Mistas de Aço e Concreto De Edificações Com Perfis Tubulares* – NBR 16239, 2013.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. *CAN/CSA-S16 Limit States Design Of Steel Structures*. Mississauga, Ontario, December, 2005.

CALDAS, R. B., *Análise Numérica De Estruturas De Aço, Concreto E Mistas Em Situação De Incêndio*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

Espinos, A., *Numerical analysis of the fire resistance of circular and elliptical slender concrete filled tubular columns*. Tese de Doutorado, Universitat Politècnica De València, 2012.

CARDOSO, H. S., *Estudo Teórico-Experimental de Parafusos Utilizados como Dispositivos de Transferência de Carga em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

CASTRO E SILVA, A. L. R. *Análise Numérica Não-Linear Da Flambagem Local De Perfis De Aço Estrutural Submetidos à Compressão Uniaxial*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

CEN, EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004

CEN, EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, 2004

CEN, EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3: *Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, 2005

CEN, EN 1993-1-2:2005 Eurocode 3: *Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*, 2005

CEN, EN 1994-1-1:2005, *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*, 2005

CEN, EN 1994-1-2: 2005, *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-2: - Structural fire design*, 2005

Chabot M, Lie TT. *Experimental studies on the fire resistance of hollow steel columns filled with bar-reinforced concrete*. Internal report No. 628. Ottawa, 1992.

FAKURY, R. H.; CALDAS, R. B.; BRANCO, A. C. *Análise Em Situação De Incêndio Da Estrutura Mista De Aço e Concreto Projetada Para Transformação De Um Edifício Histórico Em Moderno Centro Cultural*, Revista da Estrutura de Aço, Vol 1, Numero 1, Abril 2012.

EN 1993-1-1 : *Design of steel structures - Part 1-1: General Rules And Rules For Buildings – Eurocode 3*, 2005.

ESPINÓS, A; ROMERO, M.L.; HOSPITALER, A. - *Finite Element Analysis Of The Fire Behaviour Of Concrete Filled Circular Hollow Section Columns* (Universitat Politècnica de València, Espanha), European "Fire Resistance of Innovate and Slender Concrete Filled Tubular Composite Columns", Ano: 2013, cap. 1.

HONG, S.; VARNA, A. H. - *Analytical Modeling Of The Standard Fire Behavior Of Loaded CFT Columns*, Journal of Constructional Steel Research, 2009

LAÍM, L.M.S.; RODRIGUES, J.P.; CORREIA, A.M.; PIRES, T.A. - *Numerical Analysis Of Composite Steel-Concrete Columns Under Fire Conditions* (Universidade de Coimbra,

Portugal), European "Fire Resistance of Innovate and Slender Concrete Filled Tubular Composite Columns", 2013, cap. 4.

Li LY, Purkiss J. Stress-strain constitutive equations of concrete material at elevated temperatures. *Fire Safety Journal* 40(7):669-686, 2005.

Lie TT. 1984. *A procedure to calculate fire resistance of structural members*. *Fire and materials* 8(1):40-48

Lie TT, Chabot M. 1992. *Experimental studies on the fire resistance of hollow steel columns filled with plain concrete*. Internal report No. 611. Ottawa, Canada: Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada (NRCC)

Lie TT, Irwin RJ. *Fire resistance of rectangular steel columns filled with barreinforced concrete*. *Journal of Structural Engineering*;121(5):797–805, 2005

PIRES, T. A. C., *Fire Resistance Of Composite Columns Made Of Concrete Filled Circular Hollow Sections And With Restrained Thermal Elongation*. Tese de Doutorado, Universidade de Coimbra, 2013

PIRES, T. A. C.; RODRIGUES, J. P. C.; SILVA, J. R.; GARCIA, I. - *Estudo Paramétrico Do Comportamento Ao Fogo De Colunas Tubulares De Aço Preenchidas Com Betão* - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Dept, Portugal e Universidade Federal de Pernambuco, Brasil - IX Congresso de Construção Metálica e Mista & I Congresso Luso-Brasileiro de Construção Metálica Sustentável, 2013.

Poh KW. *Stress–strain–temperature relationships for structural steel*. *Journal of Materials in Civil Engineering* ;13(5):371–9, 2001.

RIBEIRO, J. C. L., *Desenvolvimento e Aplicação de Sistema Computacional para Simulação Via Método dos Elementos Finitos do Comportamento de Estruturas de Aço e Mistas em Situação de Incêndio*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

RODRIGUES, J. P. C.; LAÍM, L. - *Behaviour Of Perfobond Shear Connectors At High Temperatures* - Universidade de Coimbra, Portugal. Article in ENGINEERING STRUCTURES - outubro, 2011.

SCHAUMANN, P.; KLEIBOEMER, I. - *3D-Modelling Of Concrete-Filled Circular Composite Columns With Embedded Steel Core In Case Of Fire* (Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Alemanha), European "Fire Resistance of Innovate and Slender Concrete Filled Tubular Composite Columns, 2013, cap 2.

Schneider U. 1988. Concrete at high temperatures – A general review. *Fire Safety Journal* 13:55-68

SILVA, Maila Aparecida Pereira da. Modelos Semiempíricos Para A Estimativa Da Capacidade Resistente De Conectores De Cisalhamento Crestbond E Porfobond. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, 2011.

SIMULIA (2014). Software ABAQUS 6.14. Dassault Systèmes, USA.

VERÍSSIMO, G.S. - *Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte., 2007.

WANG, K; YOUNG, B. - *Fire resistance of concrete-filled high strength steel tubular columns. Thin-Walled Structures*, 2013.

Yin J, Zha XX, Li LY. *Fire resistance of axially loaded concrete filled steel tube columns*. Journal of Constructional Steel Research 62(7):723-729, 2006.