

HALLEY PEREIRA DA SILVA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE CONECTORES DE
CISALHAMENTO TIPO CRESTBOND**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S586s
2013

Silva, Halley Pereira da, 1986-

Simulação numérica do comportamento de conectores de cisalhamento tipo crestbond / Halley Pereira da Silva. – Viçosa, MG, 2013.
xv, 109f. : il. (algumas color.) ; 29cm.

Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 104-109

1. Método dos elementos finitos. 2. Simulação (Computadores). 3. Métodos de simulação. 4. Análise numérica. 5. Cisalhamento. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

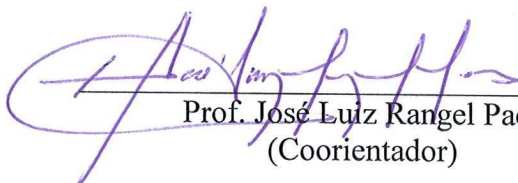
CDD 22. ed. 624.17

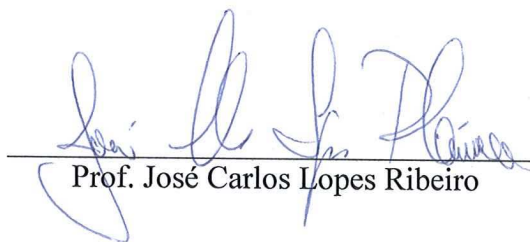
HALLEY PEREIRA DA SILVA

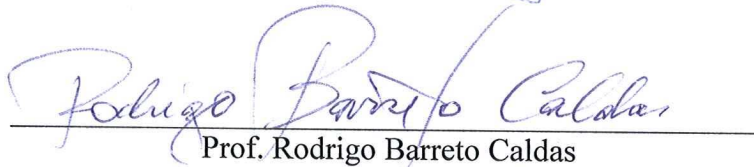
**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE CONECTORES DE
CISALHAMENTO TIPO CRESTBOND**

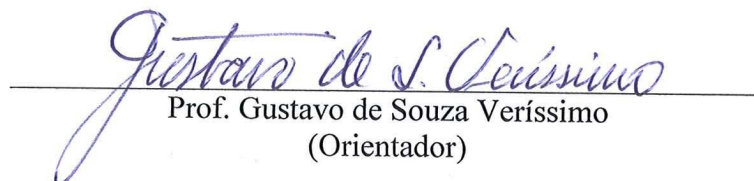
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Aprovada: 28 de janeiro de 2013.


Prof. José Luiz Rangel Paes
(Coorientador)


Prof. José Carlos Lopes Ribeiro


Prof. Rodrigo Barreto Caldas


Prof. Gustavo de Souza Veríssimo
(Orientador)

*À minha amada esposa, Bela, à minha
família e a todos os meus amigos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por todas as graças alcançadas, permitindo que eu chegasse até aqui.

À minha esposa, Izabela, minha *Bela*, pelo companheirismo de sempre e por ser esta pessoa maravilhosa que Deus colocou em meu caminho, sempre me apoiando e me dando forças para seguir em frente, e à sua família pelo apoio.

Aos meus pais, Adão e Raimunda, e aos meus irmãos, Arley, Kérley e Charley, pelo apoio e pelo carinho de sempre.

Aos meus queridos sobrinhos, Gabriel e Maria Eduarda, paixões da minha vida, cuja presença sempre me deixa mais feliz.

Aos meus tios, Noel e Eva, hoje presentes ao lado de Deus, pela alegria e simplicidade de sempre, e a todos os demais familiares pelo carinho.

Ao meu orientador Prof. Gustavo de Souza Veríssimo, pela confiança e amizade. Obrigado por esta oportunidade e por acreditar no meu trabalho.

Ao Prof. José Luiz Rangel, meu também orientador, pelo incentivo e pela ajuda de sempre. Nunca conheci alguém que ame e defenda tanto sua profissão.

Ao Prof. José Carlos Lopes Ribeiro, pela oportunidade de trabalho conjunto, pela amizade adquirida e por compartilhar conhecimentos diversos.

Aos Professores Carlos Recarey e Jorge Bonilla, da Universidad Central de Las Villas (Cuba), pela troca de informações em relação à modelagem numérica.

Ao Prof. Rodrigo Barreto Caldas por aceitar participar deste trabalho e pelas riquíssimas contribuições dadas.

Aos amigos do mestrado, Giuliana, Luiza e Raphael, Eliane, Washington, Carlos Augusto, Maila, Maria Cláudia, José Francisco, Ladir, Aruac, Ciro, André e Rafael Dalvi, pelo companheirismo e ajuda durante todo o tempo em que estivemos juntos.

A todos os amigos e colegas da UFV, em especial aqueles da Engenharia Civil.

Aos meus grandes amigos, Hallys, Eduardo, Pablo, Wanderson, Guilherme e Denis, que apesar da distância, serão sempre companheiros inseparáveis.

A todos os professores que fazem parte do curso de Engenharia Civil e à Universidade Federal de Viçosa, em especial ao DEC, pela formação e pelas oportunidades.

À CAPES, via programa REUNI, pelo apoio financeiro, através da bolsa concedida.

A todos, meu muito obrigado.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Justificativa e relevância do tema	5
1.4 Metodologia	7
1.5 Estrutura da dissertação.....	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Histórico.....	9
2.2 Generalidades sobre a ligação entre aço e concreto.....	13
2.3 Conectores de cisalhamento formados a partir de chapas planas de aço	15
2.3.1 Conector <i>Perfobond</i>	15
2.3.2 Conector <i>Crestbond</i>	16
2.4 O ensaio <i>push-out</i>	18
2.4.1 Preparação dos modelos.....	19
2.4.2 Procedimento de ensaio.....	19
2.4.3 Avaliação do ensaio	20
2.5 Estudos sobre conexões de cisalhamento.....	21
2.6 Análise não-linear	26
2.6.1 O método de Newton-Raphson	27
2.7 O Modelo de Dano Plástico (<i>Concrete Damaged Plasticity</i>)	28
3 MODELO NUMÉRICO.....	30
3.1 Considerações preliminares	30
3.2 Características geométricas do modelo numérico.....	31
3.2.1 Tipo e tamanho dos elementos.....	32
3.3 Características dos materiais	34
3.3.1 Modelo constitutivo para o aço.....	35
3.3.2 Modelo constitutivo para o concreto.....	35
3.4 Condições de contorno	41
3.5 Aplicação do carregamento.....	42
3.6 Restrições e interações de contato.....	43
3.6.1 Restrições do tipo <i>Tie</i>	43
3.6.2 Interação de contato entre superfícies	44
3.6.3 Interação entre armadura e a laje (<i>embedded constrain</i>)	46

3.7	Estratégias de análise	46
3.7.1	Análise não-linear material e geométrica.....	47
4	ANÁLISE NUMÉRICA.....	48
4.1	Modelo A3 – Série A	48
4.1.1	Descrição do modelo experimental.....	48
4.1.2	Descrição do modelo numérico.....	50
4.1.3	Resultados	52
4.1.4	Análise dos resultados.....	56
4.2	Modelos B1 e B2 – Série B.....	56
4.2.1	Descrição dos modelos experimentais	56
4.2.2	Descrição do modelo numérico.....	58
4.2.3	Resultados	60
4.2.4	Análise dos resultados.....	64
4.3	Modelo C1 – Série C.....	64
4.3.1	Descrição do modelo experimental.....	64
4.3.2	Descrição do modelo numérico.....	65
4.3.3	Resultados	67
4.3.4	Análise dos resultados.....	70
4.4	Modelo D5a – Série D.....	71
4.4.1	Descrição do modelo experimental.....	71
4.4.2	Descrição do modelo numérico.....	73
4.4.3	Resultados	75
4.4.4	Análise dos resultados.....	79
4.5	Modelo D5b – Série D	79
4.5.1	Descrição do modelo experimental.....	79
4.5.2	Descrição do modelo numérico.....	80
4.5.3	Resultados	82
4.5.4	Análise dos resultados.....	86
5	DISCUSSÃO	87
5.1	Considerações preliminares	87
5.2	Influência da representação da interface conector-laje	87
5.3	Influência do modelo constitutivo do concreto.....	92
6	CONCLUSÕES	101
6.1	Conclusões gerais.....	101
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados para definição do <i>Tension Stiffening</i>	40
Tabela 4.1 - Modelos experimentais e numéricos utilizados na análise.	48
Tabela 4.2 - Características Geométricas e Físicas do Modelo A3.....	50
Tabela 4.3 – Simulações numéricas realizadas com o modelo A3.	51
Tabela 4.4 - Características Geométricas e Físicas dos Modelos B1 e B2.	58
Tabela 4.5 – Simulações numéricas realizadas com o modelo B1_B2.....	59
Tabela 4.6 – Características Geométricas e Físicas do Modelo C1.	65
Tabela 4.7 – Simulações numéricas realizadas com o modelo C1.	66
Tabela 4.8 – Características Geométricas e Físicas do Modelo D5a.	73
Tabela 4.9 – Simulações numéricas realizadas com o modelo D5a.	74
Tabela 4.10 – Características Geométricas e Físicas do Modelo D5b.....	80
Tabela 4.11 – Simulações numéricas realizadas com o modelo D5b.	81
Tabela 5.1 - Resumo comparativo das simulações numéricas realizadas.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Conectores de cisalhamento usuais: (a) <i>stud</i> ; (b) perfil U laminado (VERÍSSIMO, 2007).	3
Figura 1.2 – Conector <i>Perfobond</i> : contínuo e descontínuo.	3
Figura 1.3 - Conector <i>Crestbond</i> : contínuo e descontínuo (VERÍSSIMO, 2007).	4
Figura 2.1 – Relação força-deslizamento para conectores de cisalhamento (OLIVEIRA, 2007).	14
Figura 2.2 – Cisalhamento dos pinos virtuais de concreto, em dois planos de corte, nos furos do <i>Perfobond</i>	16
Figura 2.3 – Características de um ensaio <i>push-out</i> típico com conector <i>stud</i> , segundo a EN 1994-1-1:2004.	18
Figura 2.4 – Determinação da capacidade de deslizamento δ_u (EN 1994-1-1:2004).	20
Figura 2.5 – Arranjo dos modelos numéricos: (a) simulado por Kalfas <i>et al.</i> (1997) (KALFAS <i>et al.</i> , 1997); (b) simulado por Oguejiofor e Hosain (1997) (OGUEJIOFOR e HOSAIN, 1997).	22
Figura 2.6 - O Método de Newton-Raphson (adaptada de LOURENÇO, 1999).	28
Figura 2.7 – Resposta do concreto sobre carga uniaxial submetido à: (a) Tração; (b) Compressão.	29
Figura 3.1 – Modelo numérico: (a) modelo completo; (b) um quarto do modelo.	32
Figura 3.2 – Elemento C3D8R do ABAQUS (HIBBITT <i>et al.</i> , 2009).	32
Figura 3.3 – Aspecto geral da malha de elementos finitos utilizada no modelo numérico.	34
Figura 3.4 – Curva tensão×deformação admitida para o aço no modelo numérico.	35
Figura 3.5 – Curva admitida para o concreto comprimido no modelo numérico (EN 1992-1-1:2004).	38
Figura 3.6 – Curva admitida para o concreto tracionado no modelo numérico (adaptado de HIBBITT <i>et al.</i> , 2009).	39
Figura 3.7 – Curva tensão×deslocamento pós-pico (<i>Tension Stiffening</i>) admitida para o concreto tracionado no modelo numérico.	39
Figura 3.8 – Representação das condições de contorno utilizadas no modelo numérico.	41
Figura 3.9 – Aplicação do carregamento no modelo numérico.	42
Figura 3.10 – Nó em que foi medido o deslizamento relativo entre o perfil e a laje.	43

Figura 3.11 – Aplicação da restrição do tipo <i>Tie</i> : (a) entre o conector e a mesa do perfil; (b) entre a parte frontal do conector e seu contato com a laje.	44
Figura 3.12 – Regiões onde foram aplicadas as interações de contato: (a) região da laje (em rosa); (b) região do conector (em vermelho).....	45
Figura 3.13 – Interação entre a armadura e a laje (<i>Embedded Constrain</i>).....	46
Figura 4.1 – Conector <i>Crestbond</i> utilizado no modelo A3 (VERÍSSIMO, 2007).....	49
Figura 4.2 – Geometria do modelo experimental A3 (VERÍSSIMO, 2007).	49
Figura 4.3 – Curva tensão×deformação do concreto comprimido utilizada no modelo A3.....	51
Figura 4.4 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Veríssimo A3 e A3_201.....	52
Figura 4.5 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Veríssimo A3 e A3_202.....	53
Figura 4.6 – Tensões de von Mises (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo A3: (a) A3_201 (Restrição tipo <i>Tie</i>); (b) A3_202 (Interação de contato).....	53
Figura 4.7 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação A3_201): (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.	54
Figura 4.8 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação A3_202): (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.	54
Figura 4.9 – Tensões S22 (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo A3: (a) A3_201 (Restrição tipo <i>Tie</i>); (b) A3_202 (Interação de contato).	55
Figura 4.10 – Conector <i>Crestbond</i> : (a) aspecto da deformação no ensaio experimental; (b) aspecto da deformação no modelo numérico (simulação A3_201).....	55
Figura 4.11 – Conector <i>Crestbond</i> utilizado nos modelos B1 e B2 (VERÍSSIMO, 2007).	57
Figura 4.12 – Geometria dos modelos B1 e B2 (VERÍSSIMO, 2007).....	57
Figura 4.13 – Curva tensão×deformação do concreto comprimido utilizada no modelo B1_B2.	59
Figura 4.14 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Veríssimo B1 e B2 e B1_B2_201.....	60
Figura 4.15 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Veríssimo B1 e B2 e B1_B2_202.....	61

Figura 4.16 – Tensões de von Mises (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo B1_B2: (a) B1_B2_201 (Restrição tipo <i>Tie</i>); (b) B1_B2_202 (Interação de contato).....	61
Figura 4.17 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação B1_B2_201): (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.....	62
Figura 4.18 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação B1_B2_202): (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.....	62
Figura 4.19 – Tensões S22 (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo B1_B2: (a) B1_B2_201 (Restrição tipo <i>Tie</i>); (b) B1_B2_202 (Interação de contato).....	63
Figura 4.20 – Conector <i>Crestbond</i> : (a) aspecto da deformação nos ensaios; (b) aspecto da deformação no modelo numérico (simulação B1_B2_202).....	63
Figura 4.21 – Curva tensão×deformação do concreto comprimido utilizada no modelo C1.....	66
Figura 4.22 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Veríssimo C1 e C1_201.....	67
Figura 4.23 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Veríssimo C1 e C1_202.....	68
Figura 4.24 – Tensões de von Mises (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo C1: (a) C1_201 (Restrição tipo <i>Tie</i>); (b) C1_202 (Interação de contato).....	68
Figura 4.25 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação C1_201): (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.....	69
Figura 4.26 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação C1_202): (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.....	69
Figura 4.27 – Tensões S22 (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo C1: (a) C1_201 (Restrição tipo <i>Tie</i>); (b) C1_202 (Interação de contato).....	70
Figura 4.28 – Conector <i>Crestbond</i> : (a) aspecto da deformação no ensaio experimental; (b) aspecto da deformação no modelo numérico (simulação C1_202).....	70
Figura 4.29 – Conector <i>Crestbond-PL</i> utilizado no modelo D5a (OLIVEIRA, 2007).	72
Figura 4.30 – Geometria do modelo D5 (OLIVEIRA, 2007).....	72
Figura 4.31 – Curva tensão×deformação do concreto comprimido utilizada no modelo D5a.....	74

Figura 4.32 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Oliveira D5a e D5a_201.....	75
Figura 4.33 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Oliveira D5a e D5a_202.....	76
Figura 4.34 – Tensões de von Mises (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo D5a: (a) D5a_201 (Restrição tipo <i>Tie</i>); (b) D5a_202 (Interação de contato).....	76
Figura 4.35 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação D5a_201): (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.....	77
Figura 4.36 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação D5a_202): (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.....	77
Figura 4.37 – Tensões S22 (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo D5a: (a) D5a_201 (Restrição tipo <i>Tie</i>); (b) D5a_202 (Interação de contato).....	78
Figura 4.38 – Conector <i>Crestbond-PL</i> : (a) aspecto da deformação no ensaio experimental; (b) aspecto da deformação no modelo numérico (simulação D5a_202).....	78
Figura 4.39 – Curva tensão×deformação do concreto comprimido utilizada no modelo D5b.....	81
Figura 4.40 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Oliveira D5b e D5b_201.....	82
Figura 4.41 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Oliveira D5b e D5b_202.....	83
Figura 4.42 – Tensões de von Mises (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo D5b: (a) D5b_201 (Restrição tipo <i>Tie</i>); (b) D5b_202 (Interação de contato).....	83
Figura 4.43 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação D5b_201): (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.....	84
Figura 4.44 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação D5b_202): (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.....	84
Figura 4.45 – Tensões S22 (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo D5b: (a) D5b_201 (Restrição tipo <i>Tie</i>); (b) D5b_202 (Interação de contato).....	85
Figura 4.46 – Conector <i>Crestbond-PL</i> : (a) aspecto da deformação no ensaio experimental; (b) aspecto da deformação no modelo numérico (simulação D5b_202).....	85

Figura 5.1 - Comparação dos resultados do modelo A3 para diferentes representações da interface conector-laje.....	88
Figura 5.2 - Comparação dos resultados do modelo B1_B2 para diferentes representações da interface conector-laje.....	89
Figura 5.3 - Comparação dos resultados do modelo C1 para diferentes representações da interface conector-laje.....	90
Figura 5.4 - Comparação dos resultados do modelo D5a para diferentes representações da interface conector-laje.....	90
Figura 5.5 - Comparação dos resultados do modelo D5b para diferentes representações da interface conector-laje.....	91
Figura 5.6 - Curvas tensão×deformação do concreto comprimido com as mesmas deformações últimas - Modelo A3.....	94
Figura 5.7 - Comparação dos resultados do modelo A3 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com restrições tipo <i>Tie</i>).	94
Figura 5.8 - Comparação dos resultados do modelo A3 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com interações de contato).	95
Figura 5.9 - Curvas tensão×deformação do concreto comprimido com as mesmas tensões residuais - Modelo A3.	96
Figura 5.10 - Comparação dos resultados do modelo A3 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com restrições tipo <i>Tie</i>).	96
Figura 5.11 - Comparação dos resultados do modelo A3 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com interações de contato).	97
Figura 5.12 - Curvas tensão×deformação do concreto comprimido com as mesmas deformações últimas - Modelo B1_B2.	97
Figura 5.13 - Comparação dos resultados do modelo B1_B2 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com restrições tipo <i>Tie</i>).	98
Figura 5.14 - Comparação dos resultados do modelo B1_B2 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com interações de contato).....	98
Figura 5.15 - Curvas tensão×deformação do concreto comprimido com as mesmas tensões residuais - Modelo B1_B2.....	99
Figura 5.16 - Comparação dos resultados do modelo B1_B2 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com restrições tipo <i>Tie</i>).	99
Figura 5.17 - Comparação dos resultados do modelo B1_B2 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com interações de contato).....	100

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

b_f	Largura da mesa do perfil de aço
d	Altura do perfil de aço
d_c	Variável de dano associada à compressão do concreto
d_t	Variável de dano associada à tração do concreto
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{cm}	Resistência média à compressão do concreto
f_{ctm}	Resistência média à tração do concreto
f_y	Resistência ao escoamento do aço
t_f	Espessura da mesa do perfil de aço
t_w	Espessura da alma do perfil de aço
u_{10}	Deslocamento máximo do concreto
E	Módulo de elasticidade
E_{cm}	Módulo de elasticidade secante do concreto
G_f	Energia de fratura do concreto
P_{Rk}	Força característica determinada num ensaio <i>push-out</i> – corresponde a 90% da carga máxima atingida neste ensaio
γ_c	Peso específico do concreto
δ_u	Capacidade de deslizamento de um modelo <i>push-out</i> segundo a EN 1994-1-1:2004. Deslizamento correspondente a P_{Rk}
δ_{uk}	Capacidade de deslizamento característico de um modelo <i>push-out</i> . Corresponde a $0,9 \delta_u$

ε_c	Deformação do concreto à compressão
ε_{c1}	Deformação do concreto à compressão correspondente à tensão máxima
ε_{cu1}	Deformação última do concreto à compressão
ε_e	Deformação elástica do concreto à compressão
ε_{pl}	Deformação plástica do concreto à compressão
ε_y	Deformação específica de escoamento do aço
σ_{b0}	Resistência à compressão do concreto no estado biaxial
σ_{c0}	Resistência à compressão do concreto no estado uniaxial
σ_{t0}	Tensão de ruptura do concreto à tração
ν	Coefficiente de Poisson
Φ	Diâmetro
Ψ	Ângulo de dilatância do concreto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EC2	Eurocode 2
EN	Norma Europeia
MEF	Método dos Elementos Finitos

RESUMO

SILVA, Halley Pereira da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2013. **Simulação numérica do comportamento de conectores de cisalhamento tipo crestbond**. Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo. Coorientadores: José Luiz Rangel Paes e Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga.

Nos últimos anos, vários estudos sobre conectores de cisalhamento em chapas planas de aço perfuradas têm sido conduzidos, com vistas à sua aplicação em estruturas mistas de aço e concreto, incluindo abordagens experimentais e numéricas. Apesar disso, o comportamento desses conectores ainda permanece como objeto de investigações. Neste trabalho, apresenta-se o desenvolvimento de um modelo numérico capaz de simular o comportamento da ligação aço-concreto com conectores de cisalhamento *Crestbond*, utilizando o Método dos Elementos Finitos. A análise numérica foi feita por meio do *software* ABAQUS, considerando-se o comportamento elastoplástico para o aço e a aplicação do Modelo de Dano Plástico para o concreto. Para validação do modelo numérico, foram utilizados resultados experimentais obtidos por Veríssimo (2007) e por Oliveira (2007). Nas simulações numéricas foram avaliadas a influência do modelo constitutivo do concreto e a influência do modo de representação da ligação aço-concreto através de duas estratégias: utilização de restrições tipo *Tie* e utilização de interações de contato entre superfícies. Estas estratégias mostraram-se capazes de representar adequadamente os fenômenos observados nos ensaios de laboratório, principalmente quando se utilizaram interações de contato entre superfícies. O modelo numérico desenvolvido é adequado para a simulação do comportamento estrutural dos conectores *Crestbond*, sendo capaz de representar a interação entre aço e concreto, de caracterizar a carga máxima resistida pela conexão e de caracterizar as deformações do conector, constituindo uma ferramenta útil para vários outros estudos.

ABSTRACT

SILVA, Halley Pereira da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, January, 2013. **Numerical simulation of the behavior of crestbond shear connectors.** Adviser: Gustavo de Souza Veríssimo. Co-advisers: José Luiz Rangel Paes and Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga.

In the latest years, several studies about shear connectors in perforated flat steel plates have been conducted in order to assess its application in composite structures of steel and concrete, including experimental and numerical approaches. Nevertheless, the behavior of these connectors remains a subject of investigation. This work presents the development of a numerical model capable of simulating the behavior of steel-concrete connection with Crestbond shear connectors using the Finite Element Method. The numerical analysis was performed using the ABAQUS software, considering the elastoplastic behavior for steel and the Concrete Damage Plasticity model for concrete. In order to validate the numerical model, experimental results obtained by Veríssimo (2007) and Oliveira (2007) were used for comparisons. In numerical simulations were evaluated the influence of concrete constitutive model, and the influence of the steel-concrete connection representation using two strategies: Tie restrictions and contact interactions between surfaces. These strategies proved to be able to adequately represent the phenomena observed in laboratory tests, especially those that used contact interactions between surfaces. The numerical model is suitable for simulating the structural behavior of Crestbond connectors, being able to represent the interaction between steel and concrete, to characterize the maximum load resisted by the connection and to characterize the deformation of the connector, providing a useful tool for several other studies.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

As estruturas mistas de aço e concreto são utilizadas há um bom tempo na engenharia civil, principalmente na construção de pontes e edifícios. Como exemplos destas estruturas, pode-se citar as lajes mistas de concreto com fôrma de aço incorporada, os pilares mistos constituídos por um perfil envolvido por concreto ou por um tubo preenchido com concreto e as vigas mistas.

Os elementos estruturais mistos de aço e concreto oferecem diversas vantagens econômicas e construtivas. O concreto apresenta boa resistência quando submetido à compressão, porém sua resistência à tração é baixa (cerca de 1/10 de sua resistência à compressão). Já o aço possui grande resistência tanto à tração quanto à compressão, porém pode apresentar problemas de instabilidade para elementos esbeltos comprimidos. Nos elementos estruturais mistos de aço e concreto normalmente configura-se a seção de modo que cada material trabalhe na condição em que apresenta seu melhor desempenho, ou seja, o concreto à compressão e o aço à tração. Esse é o caso, por exemplo, da viga mista, que surgiu como consequência da utilização de vigas de aço projetadas para suportar lajes de concreto. Ao longo do tempo, a interação entre esses dois elementos passou a ser considerada, caracterizando um sistema misto.

O trabalho solidário entre o aço e o concreto traz uma série de vantagens para os elementos estruturais mistos em relação aos não mistos. No caso das vigas mistas, por exemplo, a seção de aço pode ser reduzida devido à ação conjunta da laje de concreto e do perfil de aço. Nos sistemas de pisos com vigas mistas, pode-se diminuir a altura dos perfis metálicos, reduzindo-se o peso de aço da estrutura, diminuindo-se a altura total do edifício e, conseqüentemente, reduzindo-se o custo final da construção. Além disso, os elementos mistos são geralmente mais rígidos quando comparados aos não mistos de

mesma dimensão, apresentando menores deformações. Os sistemas de piso mistos possibilitam ainda a dispensa de fôrmas e escoramentos, maior precisão dimensional da construção, pelo caráter industrializado dos perfis metálicos, e redução das proteções contra incêndio e corrosão do aço pela presença e atuação do concreto no sistema misto.

Para que a seção trabalhe como mista é necessário que os dois materiais trabalhem em conjunto, que estejam conectados, ou seja, é necessário que o deslizamento na interface entre o aço e o concreto seja restringido ou impedido. Essa conexão é feita com o auxílio de conectores de cisalhamento mecânicos, que permitem a transferência de forças longitudinais do aço para o concreto e vice-versa, além de resistir a forças transversais ao eixo do elemento, que tendem a causar a separação dos materiais na interface entre ambos (efeito conhecido como *uplift*). Os conectores de cisalhamento são geralmente instalados no perfil de aço através de solda, antes da concretagem.

Existem vários tipos de conectores de cisalhamento que têm sido utilizados e diversos aspectos econômicos e técnicos continuam a motivar o desenvolvimento de novos produtos. Vários desses conectores apresentam algum tipo de limitação, seja quanto à aplicabilidade, ao desempenho ou à fabricação, razão pela qual ainda permanecem como objeto de estudo.

A variedade de dispositivos utilizados como conectores de cisalhamento e suas configurações influenciam diretamente no comportamento da conexão, no que diz respeito à transmissão de forças entre as seções de aço e concreto, na capacidade de deformação e no modo de ruptura. Especialmente no caso das vigas mistas, é desejável que o conector tenha um comportamento rígido em estado limite de serviço, para evitar problemas de fadiga, e comportamento dúctil em estado limite último, para que a ruptura da conexão se dê de maneira dúctil.

No Brasil, dois tipos de conectores de cisalhamento têm sido empregados com maior frequência (Figura 1.1): o conector tipo pino com cabeça, também conhecido como *stud bolt*, e o conector em perfil U laminado. O conector tipo pino com cabeça, apesar de possibilitar grande produtividade na instalação, requer um equipamento especial de solda por eletrofusão e um gerador de grande capacidade. Os conectores em perfil U apresentam menor produtividade na instalação, pois são soldados manualmente com

solda convencional, com uma das mesas assentadas sobre a viga de aço e com o plano da alma perpendicular ao eixo longitudinal da viga de aço. São indicados somente para sistemas com lajes de concreto maciças. Sua aplicação em sistemas de piso com *steel-deck* ou com pré-laje de concreto é inviável.

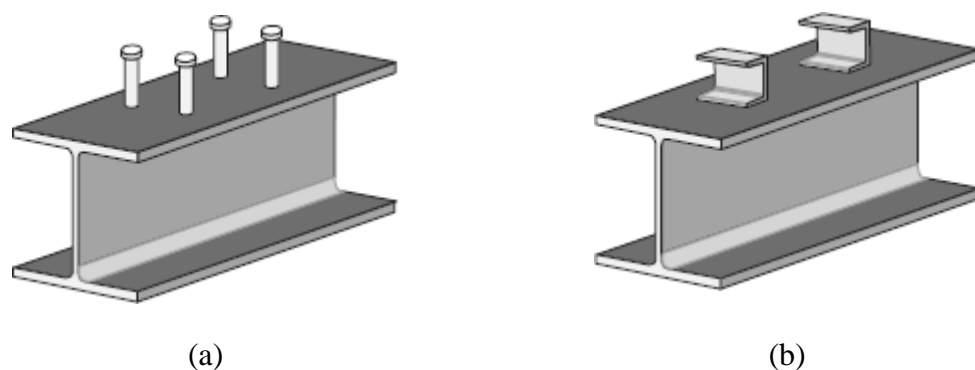


Figura 1.1 – Conectores de cisalhamento usuais: (a) *stud*; (b) perfil U laminado (VERÍSSIMO, 2007).

No final da década de 1980, Leonhardt *et al.* (1987) desenvolveram um novo conector de cisalhamento, denominado *Perfobond*, que consiste de uma chapa plana de aço com furos circulares (Figura 1.2).

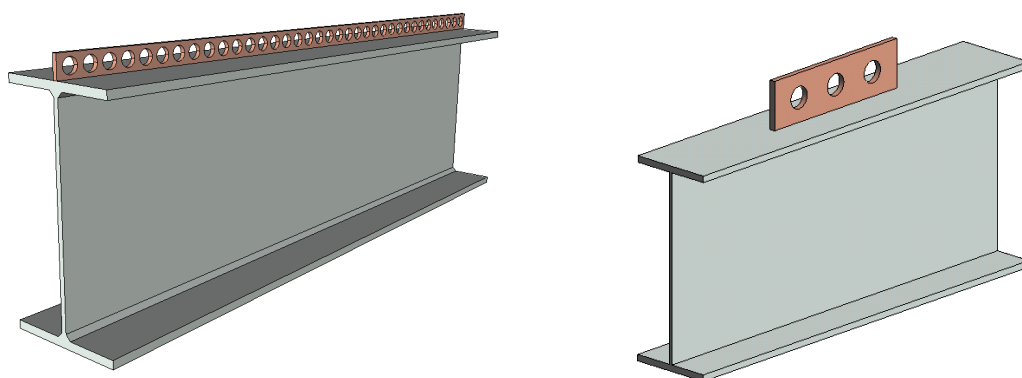


Figura 1.2 – Conector *Perfobond*: contínuo e descontínuo.

Originalmente o *Perfobond* foi concebido para ser empregado em pontes mistas e na forma de uma chapa contínua, com a armadura da laje trabalhando sobre o conector, tendo sido desenvolvido como uma alternativa ao baixo desempenho dos *studs* à fadiga. Um dos pontos negativos desse conector é a dificuldade para o posicionamento da armadura inferior da laje quando as barras de aço têm que passar por dentro das aberturas. Mais recentemente, estudos têm sido conduzidos a fim de avaliar o

desempenho do *Perfobond* numa configuração descontínua, para utilização em sistemas de piso de edifícios (OGUEJIOFOR, 1994).

Veríssimo (2007) desenvolveu outro conector de cisalhamento formado por uma chapa contínua, denominado *Crestbond*, cujo princípio de funcionamento mecânico é similar ao do *Perfobond*. O *Crestbond* consiste de uma chapa plana de aço recortada na forma de uma crista, com saliências e reentrâncias trapezoidais, conforme mostrado na Figura 1.3.

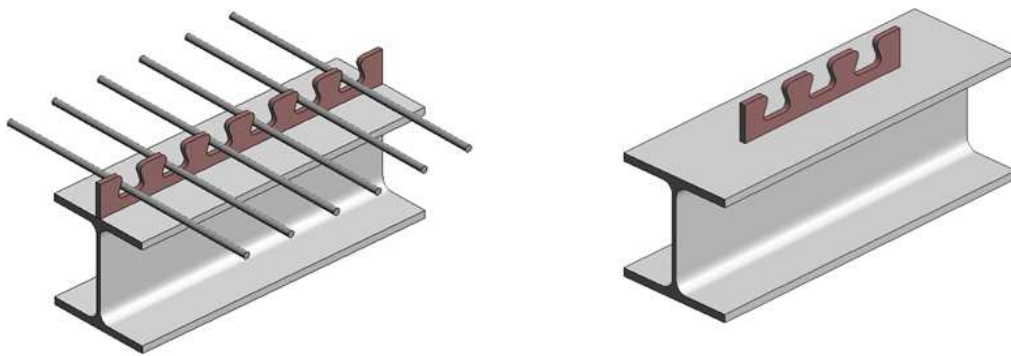


Figura 1.3 - Conector *Crestbond*: contínuo e descontínuo (VERÍSSIMO, 2007).

Por serem constituídos por uma chapa plana posicionada longitudinalmente em relação ao eixo do perfil, esses conectores em chapa são adequados para sistemas de piso que utilizam pré-laje de concreto pré-fabricada como fôrma (OLIVEIRA, 2007).

De acordo com Veríssimo (2007), o conector *Crestbond* concilia uma série de vantagens em relação a outros mecanismos de conexão usuais, tais como:

- simplicidade e baixo custo de fabricação e instalação;
- ductilidade superior à do *Perfobond*, preservando o comportamento rígido em estado de serviço;
- furos abertos para facilitar a disposição da armadura da laje;
- desenho simétrico, que proporciona maior produtividade na fabricação, permitindo a obtenção de dois conectores a cada corte;
- geometria em chapa contínua, ideal para sistemas com pré-laje.

As primeiras pesquisas a respeito de estruturas mistas de aço e concreto foram realizadas por meio de modelos experimentais. Atualmente, com o avanço dos microcomputadores, estudos de caráter numérico têm ocorrido com maior frequência, possibilitando estudos mais detalhados e com um custo muito menor do que o exigido por um programa experimental. Dentre as ferramentas existentes para análise numérica, destacam-se pacotes comerciais desenvolvidos com base no Método dos Elementos Finitos (MEF), que podem reproduzir numericamente de forma satisfatória o comportamento de uma estrutura.

O modelo numérico desenvolvido neste trabalho foi construído no ABAQUS, um *software* para análises avançadas por elementos finitos que oferece muitos recursos para a elaboração de modelos. O ABAQUS permite análises lineares ou não lineares, estáticas ou dinâmicas e também oferece recursos para a realização de análises de flambagem e de pós-flambagem.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é simular o comportamento do conector *Crestbond* em ensaios do tipo *push-out* por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- elaborar um modelo numérico de elementos finitos capaz de representar o comportamento estrutural de conectores *Crestbond* em ensaios de cisalhamento direto (*push-out*);
- avaliar estratégias de modelagem como: refinamento da malha de elementos finitos, representação do concreto e da armadura e representação da interface entre aço e concreto;
- comparar os resultados obtidos por meio do modelo numérico com resultados experimentais disponíveis para o conector *Crestbond*.

1.3 Justificativa e relevância do tema

O comportamento de um elemento misto está intimamente relacionado ao sistema de conexão entre o aço e o concreto, que exige o emprego de conectores de cisalhamento.

Existe uma variedade desses dispositivos mecânicos, mas apenas alguns são amplamente empregados por terem seu comportamento mecânico, modos de falha e critérios de projeto bem conhecidos. Os conectores de cisalhamento normalmente utilizados no Brasil ainda apresentam inconvenientes, como já mencionado. Desta forma, torna-se importante a avaliação do comportamento de novos tipos de conectores.

Vários estudos têm sido realizados sobre outros tipos de conectores formados a partir de chapas longitudinais, como é o caso do *Perfobond* e do *Crestbond*, entretanto seu comportamento mecânico ainda não foi amplamente estudado. Veríssimo *et al.* (2005) apresentaram resultados experimentais que indicaram um grande potencial de aplicação do conector *Crestbond*, com vantagens sobre os conectores usualmente empregados no Brasil.

Em relação ao conector *stud*, o *Crestbond* possui a vantagem de poder ser produzido em pequenas fábricas, não necessitando de grandes equipamentos. Além disso, esse conector pode ser instalado facilmente com eletrodo de solda comum, possuindo o filete de solda contínuo, podendo ser soldado em chapas de menor espessura.

Em relação ao conector em perfil U, o *Crestbond* apresenta a vantagem de poder ser empregado em sistemas de piso em que se utiliza uma pré-laje de concreto como fôrma. Usualmente os perfis laminados destinados às vigas possuem mesas com pequena largura, inviabilizando o emprego do conector em perfil U quando se usa a pré-laje de concreto como fôrma. Nestes casos, o espaço livre disponível sobre a mesa do perfil metálico não é suficiente para soldar um conector em perfil U, mas permite a colocação de um conector em chapa longitudinal.

Em relação ao *Perfobond*, o conector *Crestbond* apresenta como vantagens os furos abertos, que facilitam a disposição das barras de armadura, maior ductilidade em estado limite último e maior deslizamento característico (VERÍSSIMO *et al.*, 2006).

O conector *Crestbond* foi concebido como uma alternativa aos conectores de cisalhamento usuais. A primeira etapa de investigações do seu comportamento mecânico compreendeu dois programas experimentais (VERÍSSIMO, 2007), nos quais foram realizados 41 ensaios de cisalhamento direto tipo *push-out*, por meio dos quais se

obtem a curva força-deslizamento que caracteriza o comportamento do conector. Este trabalho constitui a primeira iniciativa no sentido de tentar simular o comportamento estrutural do conector *Crestbond* por meio de um modelo numérico de elementos finitos. Enquanto os experimentos em laboratório possibilitam, em geral, uma avaliação do comportamento global do modelo, as análises com modelos numéricos de elementos finitos permitem avaliar as tensões, as deformações e o grau de fissuração em pontos específicos do modelo numérico.

A partir do momento em que se consegue uma boa calibração do modelo numérico com resultados experimentais, torna-se possível estudar as influências de diversos parâmetros no modelo, explorando várias combinações de possibilidades e investigando como o modelo se comporta para cada combinação de parâmetros. A partir disso torna-se possível avaliar as potencialidades e as deficiências do conector, bem como elaborar modelos de cálculo, estabelecer critérios de projeto, prescrições de norma, etc., além de estudar seu desempenho em elementos estruturais tais como vigas mistas de aço e concreto, pilares mistos e ligações mistas.

O estudo do comportamento da conexão mista por meio de simulação numérica possibilita uma análise mais detalhada e mais profunda dos aspectos de interesse, normalmente com custos inferiores aos de uma análise experimental.

1.4 Metodologia

Para o estudo do comportamento estrutural do conector *Crestbond* através de simulações numéricas foi utilizado o *software* ABAQUS. Primeiramente foi construído um modelo numérico, definindo-se todas as propriedades necessárias, tais como geometria, modelos constitutivos dos materiais, condições de contorno, elementos, malha, dentre outros. Após esta etapa foram realizadas simulações numéricas de ensaios experimentais presentes na literatura, validando-se o modelo numérico. Posteriormente, foram apresentados os resultados, juntamente com uma discussão sobre os principais pontos da análise numérica realizada.

1.5 Estrutura da dissertação

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica, resultado de uma ampla investigação de programas experimentais e de simulações numéricas já realizados com conectores de cisalhamento, principalmente aqueles formados a partir de chapas planas de aço.

No Capítulo 3 é apresentada uma descrição do modelo numérico e das estratégias utilizadas na modelagem.

No Capítulo 4 estão descritas as simulações numéricas realizadas e seus respectivos resultados. Ao todo foram feitas dez simulações principais, distribuídas em grupos segundo a estratégia de modelagem utilizada.

O Capítulo 5 compreende a discussão dos resultados e no Capítulo 6 encontram-se as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico

De acordo com Malite (1990), os estudos referentes aos sistemas estruturais mistos de aço e concreto tiveram início antes da Primeira Guerra Mundial, em 1914, na Inglaterra, com base em uma série de ensaios de sistemas de pisos. Entre os anos de 1922 e 1939 foram realizadas várias construções englobando edifícios e pontes adotando-se o sistema de vigas mistas.

No Brasil, a construção mista ficou restrita a alguns edifícios e pequenas pontes, na década de 1950. Nos últimos anos, entretanto, sua utilização vem crescendo consideravelmente na construção de edifícios industriais, comerciais, pontes, etc., devido ao aumento considerável da produção de aço no Brasil e do desenvolvimento de novas tecnologias.

Em relação aos conectores de cisalhamento existem inúmeros trabalhos publicados na literatura, englobando diversas geometrias (DAVIES, 1969; LEONHARDT *et al.*, 1987; KLAIBER e WIPF, 2000; LORENC *et al.*, 2007; VERÍSSIMO, 2007; VIANNA *et al.*, 2008; CHEN e AL-DARZI, 2009). Com o avanço dos computadores, muitos estudos estão voltados para análises numéricas.

Alguns dos estudos, tanto numéricos quanto experimentais, encontrados na literatura nos últimos anos estão citados a seguir.

Kalfas *et al.* (1997) realizaram um estudo baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) para simular e analisar o ensaio *push-out* utilizando-se conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça (*studs*), através do *software* COSMOS/M.

Oguejiofor e Hosain (1997) realizaram um estudo numérico do comportamento dos conectores *Perfobond* em ensaios *push-out* usando o programa ANSYS. O principal objetivo do estudo foi estabelecer expressões capazes de prever a capacidade deste conector, usando dados gerados numericamente.

Lam *et al.* (2000) descreveram a modelagem, através do MEF, de vigas de aço agindo em conjunto com lajes de concreto pré-moldadas de núcleo oco (lajes alveolares).

Nishido *et al.* (2000) realizaram um estudo do comportamento força-deslizamento de conectores de cisalhamento *Perfobond*, utilizando ensaios de cisalhamento direto e ensaios de flexão de vigas, bem como análises numéricas via MEF, visando seu emprego em pontes mistas de aço e concreto.

No trabalho de Sebastian e McConnel (2000) é apresentado um programa desenvolvido com base no MEF para análise de estruturas mistas em geral de aço e concreto armado, inclusive treliças espaciais mistas, com os conectores de cisalhamento sendo representados por um elemento especial envolvendo molas axiais e rotacionais.

Kim *et al.* (2001) descreveram um estudo do comportamento da conexão entre vigas de aço e lajes mistas, que utilizam conectores de cisalhamento soldados através do *deck*. Um estudo experimental envolvendo três testes *push-out* foi realizado. O ensaio *push-out* foi simulado e analisado em duas e três dimensões através do programa de elementos finitos LUSAS.

Tristão (2002) realizou simulações numéricas, através do MEF, de ensaios do tipo *push-out* com conectores do tipo pino com cabeça e perfil U formado a frio, através do *software* ANSYS.

El-Lobody e Lam (2003) analisaram, via MEF, vigas mistas de lajes maciças e de lajes alveolares, comparando resultados encontrados em simulações numéricas com os obtidos em experimentos realizados por eles mesmos.

Kirchhof *et al.* (2003) realizaram uma modelagem de elementos finitos por meio do *software* ABAQUS, com vistas à simulação do comportamento estrutural de vigas mistas.

Valente e Cruz (2004) apresentaram resultados de experimentos realizados na Universidade do Minho utilizando conectores de cisalhamento *Perfobond* em concreto leve, com o objetivo de descrever o comportamento da ligação, analisar e comparar a contribuição dos diferentes elementos no deslizamento entre o perfil metálico e a laje de concreto, caracterizando, desta forma, a ductilidade da conexão.

Jeong *et al.* (2005) propuseram um método de análise do comportamento da interface aço-concreto de um *deck* de ponte mista, utilizando o programa DIANA, com base em resultados de ensaios *push-out*.

Lam e El-Lobody (2005) desenvolveram um modelo numérico tridimensional usando o programa ABAQUS para simular ensaios *push-out* utilizando conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça (*studs*).

El-Lobody e Young (2006) estudaram o desempenho estrutural da conexão de cisalhamento em vigas mistas com chapa de aço perfilada com o auxílio de um modelo de elementos finitos não linear, desenvolvido para estudar o comportamento de conectores de cisalhamento *studs* soldados através da fôrma de aço.

Kim e Jeong (2006) apresentaram um programa de testes realizado para *decks* de pontes mistas de aço-concreto com conectores de cisalhamento *Perfobond*. Para validar a eficácia do sistema de *deck* proposto para aplicação em ponte, ensaios *push-out*, ensaios de flexão em escala real e ensaios com a conexão *deck*-viga para cada perfil de *steel deck* foram realizados.

Veríssimo *et al.* (2006) apresentaram o desenvolvimento do conector *Crestbond* e um programa experimental realizado no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, em Guimarães, Portugal.

Al-Darzi *et al.* (2007) desenvolveram um modelo de elementos finitos com o *software* ANSYS para simular o ensaio *push-out* de conectores *Perfobond*, posteriormente utilizado para a realização de um estudo paramétrico. Os parâmetros estudados foram: altura e espessura do conector, área e resistência ao escoamento da armadura transversal, resistência à compressão do concreto e furos no conector.

Queiroz *et al.* (2007) investigaram o comportamento da conexão de cisalhamento com interação total e parcial em vigas mistas usando o *software* ANSYS.

Mirza e Uy (2008) realizaram um estudo numérico, com o *software* ABAQUS, analisando a resistência e a ductilidade de conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça (*stud bolt*) em vigas mistas com lajes maciças e com lajes com fôrma de aço incorporada.

Vianna *et al.* (2008) apresentaram os resultados de dezoito ensaios *push-out* realizados na Universidade de Coimbra, em Portugal, em conectores de cisalhamento T-*Perfobond*. As variáveis investigadas foram: espessura da laje de concreto, resistência à compressão de concreto, geometria do conector, posição relativa do conector para a direção da carga, número de furos e disposição dos conectores de cisalhamento.

Chen e Al-Darzi (2009) desenvolveram vários modelos de elementos finitos para simular o ensaio *push-out*, testando a aplicabilidade de conectores de cisalhamento *Perfobond* modificados, ou seja, substituindo os furos circulares por furos triangulares.

Nguyen e Kim (2009) desenvolveram um modelo de elementos finitos não-linear para a simulação de ensaios *push-out* com o objetivo de investigar a capacidade resistente de conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça (*stud bolt*) com diâmetros maiores ou iguais a 22 mm. O programa ABAQUS foi utilizado para a simulação numérica.

Mirza e Uy (2010) apresentaram o desenvolvimento de um modelo de elementos finitos, utilizando o programa ABAQUS, para estudar o comportamento dos conectores de cisalhamento *studs* em testes *push-out*, que incorpora fenômenos como retração e fluência do concreto.

Kim *et al.* (2011) realizaram ensaios *push-out* para examinar a resistência de conectores de cisalhamento *Perfobond* ondulados.

Rodrigues e Laím (2011) realizaram um estudo do comportamento do conector de cisalhamento *Perfobond* sob altas temperaturas, com o objetivo principal de investigar a influência do número de furos nos conectores, a presença de armaduras transversais

passando por esses furos, e o comportamento de dois conectores colocados lado a lado em altas temperaturas.

Nos trabalhos de Qureshi *et al.* (2011a, b) foi desenvolvido um modelo de elementos finitos não-linear tridimensional para estudar o comportamento de vigas mistas com chapa perfilada orientada perpendicularmente ao seu eixo.

2.2 Generalidades sobre a ligação entre aço e concreto

O principal mecanismo entre os elementos mistos de aço e concreto é a ligação que proporciona o trabalho conjunto entre os materiais constituintes. De acordo com Queiroz *et al.* (2001), essa ligação pode se dar por meios mecânicos, que é o caso dos conectores e mossas, por atrito, ou, em alguns casos, por simples aderência e repartição de cargas, como por exemplo nos pilares mistos sujeitos apenas à compressão.

No caso de vigas mistas, tanto a aderência como o atrito, embora possam atingir valores bem elevados, não são levados em consideração no cálculo da ligação entre os materiais, pois são fenômenos que apresentam um comportamento pouco previsível. Alguns ensaios em estruturas mistas mostram que, quando são aplicadas cargas de valores baixos, a maior parte do cisalhamento longitudinal se desenvolve na interface por aderência química entre a pasta de cimento e a superfície de aço (QUEIROZ *et al.*, 2001). Porém, para cargas mais elevadas ocorre o rompimento desta aderência, que não pode mais ser restaurada. Os valores de carga em que ocorre a quebra da adesão química são extremamente variáveis, dependendo de vários fatores, dos quais se destacam: o fator água-cimento, a formação de fissuras e a retração do concreto.

Percebe-se também uma quebra prematura da adesão química em ensaios com carregamentos dinâmicos, o que leva a uma baixa confiabilidade do sistema. Assim, torna-se impraticável levar em conta estes fenômenos no cálculo de vigas mistas, sendo necessário então o emprego de conectores de cisalhamento para transmitir o cisalhamento na interface entre o aço e o concreto.

Os conectores de cisalhamento estão sujeitos também a forças que tendem a separar os dois elementos componentes nas vigas mistas, efeito conhecido como *uplift*. Estas

forças são muito pequenas em comparação com as forças de cisalhamento longitudinais, não sendo necessário calculá-las na prática, uma vez que os conectores de cisalhamento usualmente empregados possuem dispositivos que garantem resistência suficiente a este efeito (JOHNSON, 2004).

Em se tratando de rigidez, os conectores de cisalhamento podem ser classificados em rígidos ou flexíveis. Esta classificação é determinada de acordo com a relação entre a força aplicada e o deslizamento medido, conforme pode ser visto na Figura 2.1, retirada do trabalho de Oliveira (2007).

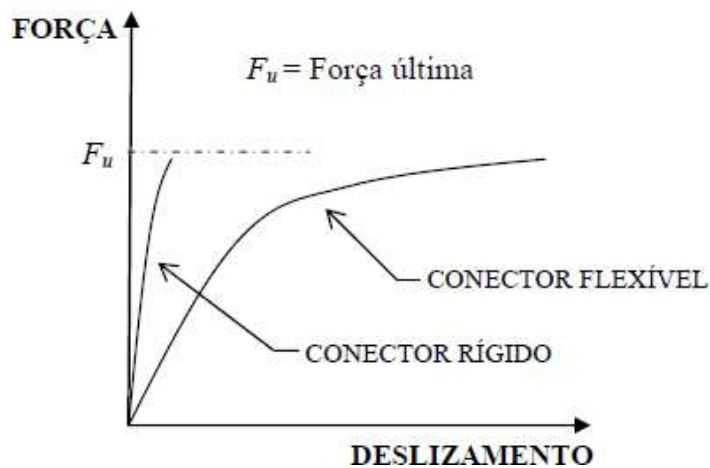


Figura 2.1 – Relação força-deslizamento para conectores de cisalhamento (OLIVEIRA, 2007).

Os conectores flexíveis geralmente apresentam um modo de colapso mais dúctil e menos catastrófico do que os conectores rígidos, entretanto os conectores flexíveis estão mais propensos ao fenômeno de fadiga, por se deformarem mais quando carregados.

Já os conectores rígidos se deformam muito pouco quando carregados, não apresentando problemas relacionados à fadiga, proporcionando uma conexão praticamente sem deslizamento na interface aço-concreto na fase de serviço. Por outro lado, podem ocasionar ruptura frágil, que pode ocorrer por esmagamento ou cisalhamento do concreto. Este tipo de ruptura é indesejável para qualquer tipo de construção.

Um conector de cisalhamento ideal é aquele cujo comportamento é caracterizado por deslizamento nulo (ou quase nulo) para cargas de serviço e ductilidade em estado limite último. Portanto, as características de um conector rígido são desejáveis em condições

de serviço e as características de um conector dúctil são desejáveis em estado limite último (VERÍSSIMO, 2007).

2.3 Conectores de cisalhamento formados a partir de chapas planas de aço

2.3.1 Conector *Perfobond*

Como os conectores *stud* apresentavam comportamento flexível, portanto propensos à fadiga, quando considerado o efeito dinâmico das cargas móveis em pontes, havia a necessidade de estudar outros tipos de conectores. No fim da década de 80, a empresa de engenharia alemã *Leonhardt, Andrä und Partners*, de Stuttgart, realizou um estudo do comportamento de vários conectores de cisalhamento rígidos. Ao final deste estudo, a empresa desenvolveu e patenteou o conector *Perfobond* (LEONHARDT *et al.*, 1987), que de acordo com Zellner (1987) foi utilizado pela primeira vez no projeto da terceira ponte do Rio Caroni, na Venezuela.

Como já mencionado, o conector *Perfobond* consiste basicamente de uma chapa plana de aço, com furos circulares, soldada sobre a mesa superior do perfil de aço. Em seu estudo, Zellner (1987) afirma que os pequenos filetes de solda longitudinais causam menos problemas de tensões residuais por soldagem e problemas de fadiga do que as soldas dos *studs*. O concreto que preenche as aberturas do conector forma pinos virtuais dentro da peça, proporcionando resistência ao cisalhamento na direção longitudinal em dois planos (Figura 2.2), e isso evita que o elemento de concreto se separe do perfil metálico, caracterizando o chamado *efeito de pino*. Desta forma, não é necessária uma cabeça de ancoragem, como nos conectores *stud*. Além disso, este conector apresenta uma rigidez maior do que a do *stud*, o que praticamente elimina o deslizamento e a fissuração do concreto para cargas de serviço.

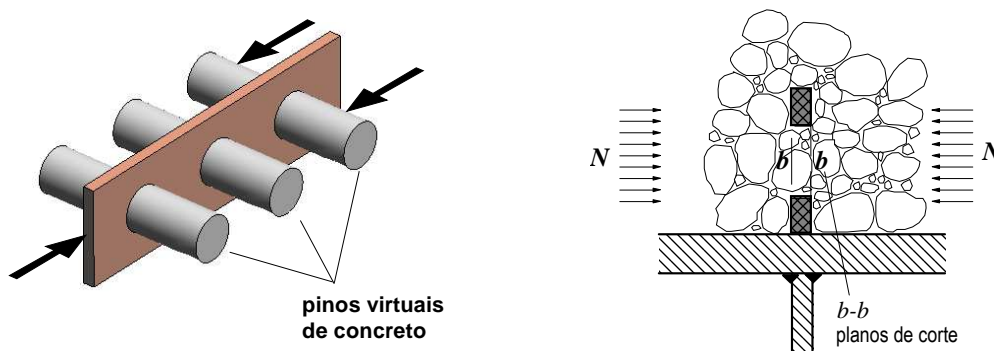


Figura 2.2 – Cisalhamento dos pinos virtuais de concreto, em dois planos de corte, nos furos do *Perfobond*.

O conector *Perfobond* foi originalmente desenvolvido para ser aplicado em pontes, porém com o passar dos anos vários estudos foram e têm sido realizados visando sua aplicação em estruturas de edifícios (OGUEJIOFOR, 1990; VELDANDA, 1991; OQUEJIOFOR, 1994; QUDDUSI, 1994; STUDNICKA, 2000). Esses estudos demonstraram que a rigidez do *Perfobond* é muito alta, sendo impraticável admitir a redistribuição dos esforços entre todos os conectores, como normalmente é feito no projeto de estruturas de edifícios quando se usam conectores *stud*. Sendo assim, para sua aplicação em estruturas de edifícios é necessário que a distribuição destes conectores seja feita de acordo com a variação do fluxo de cisalhamento ao longo do elemento estrutural.

A capacidade resistente e a ductilidade da conexão são aumentadas com a colocação de barras de aço de armadura da laje, que podem passar por dentro dos furos do conector ou no seu entorno. Porém, há certa dificuldade para a colocação da armadura inferior da laje, quando as barras têm que passar por dentro dos furos do conector, caracterizando uma desvantagem desse dispositivo.

2.3.2 Conector *Crestbond*

Nas últimas décadas, alguns tipos de conectores de cisalhamento formados a partir de chapas de aço têm sido estudados (GALJAARD e WALRAVEN, 2001; CHEN e AL-DARZI, 2009).

Como já mencionado, Veríssimo (2007) desenvolveu um conector de cisalhamento, denominado *Crestbond*, formado por uma chapa plana dentada com saliências e

reentrâncias trapezoidais que proporcionam resistência ao cisalhamento longitudinal e ao *uplift*. Inicialmente, vislumbrava-se a criação de um conector que apresentasse boa rigidez em situação de serviço e maior ductilidade que o conector *Perfobond*. Aliado a isso, o conector deveria apresentar uma forma geométrica que facilitasse o arranjo da armadura dos elementos de concreto e a possibilidade de um corte simétrico, permitindo a obtenção de duas peças com um único corte. Desta forma surgiu o conector *Crestbond*. Detalhes da geometria do *Crestbond* podem ser vistos no trabalho de Veríssimo (2007).

O *Crestbond* apresentou elevada resistência ao cisalhamento e boa ductilidade nos ensaios de laboratório, evidenciando, desta forma, a possibilidade do seu emprego em estruturas de edifícios.

A resistência de conectores em chapa perfurada como o *Crestbond* e o *Perfobond* está relacionada aos seguintes fatores:

- força de compressão devida ao contato do concreto com a face frontal do conector;
- cisalhamento dos pinos virtuais de concreto;
- resistência ao cisalhamento da laje;
- influência da taxa de armadura transversal.

A pesquisa realizada por Veríssimo (2007) mostrou diversos aspectos e vantagens importantes da conexão com o *Crestbond* em relação ao observado nas conexões em que se utiliza o *stud* ou o *Perfobond*. Esses aspectos e vantagens estão relacionados ao modo de ruptura, à carga máxima e à capacidade de deformação da conexão. O *Crestbond* apresentou comportamento estrutural adequado, caracterizado por alta rigidez para cargas de serviço e grande ductilidade em estado limite último. Observou-se nessa pesquisa que o limite de proporcionalidade da conexão é bem elevado, de forma que para as condições usuais de serviço, que ocorre em estruturas de edifícios, a conexão trabalha em regime elástico.

2.4 O ensaio *push-out*

No estudo dos conectores de cisalhamento é de fundamental importância o conhecimento do comportamento força-deslizamento da conexão. Uma das maneiras de analisar esse comportamento é através de ensaios tipo *push-out* padronizados. Na Figura 2.3 é apresentado o esquema de um ensaio *push-out* típico, segundo a especificação da EN 1994-1-1:2004. Os modelos consistem de duas pequenas lajes de concreto de $60 \times 65 \times 15$ cm conectadas a um perfil metálico pelos conectores de cisalhamento.

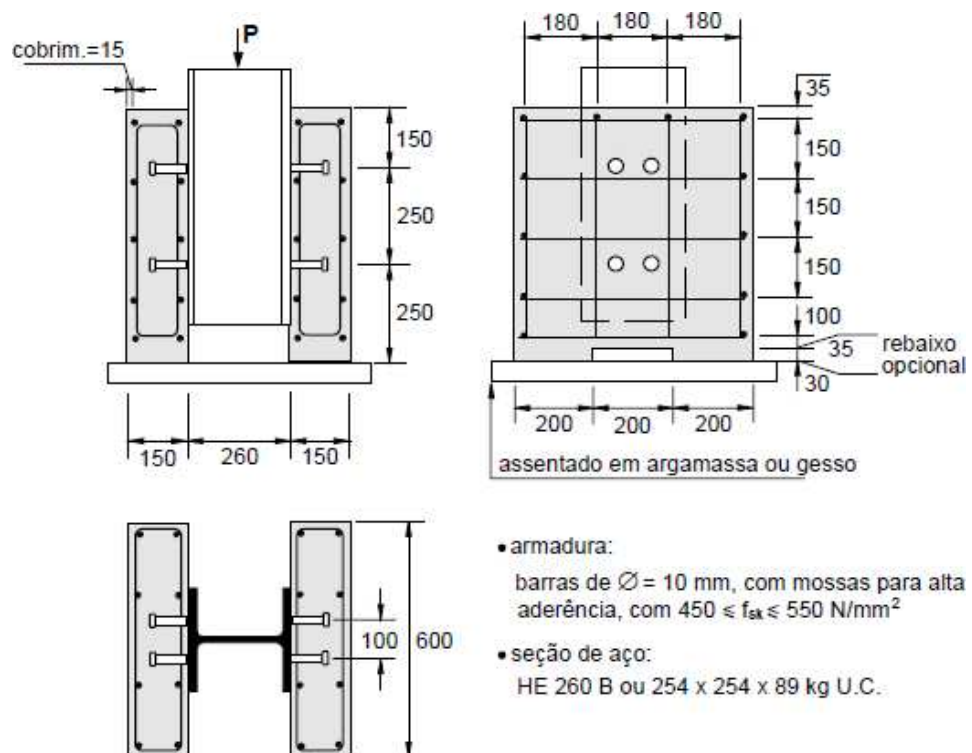


Figura 2.3 – Características de um ensaio *push-out* típico com conector *stud*, segundo a EN 1994-1-1:2004.

A especificação da norma europeia EN 1994-1-1:2004 para os ensaios *push-out*, vigente atualmente, tem sido seguida em todo mundo, criando uma padronização desse experimento e possibilitando a comparação de resultados experimentais realizados por diferentes autores.

Como indicado na Figura 2.3, um carregamento é aplicado ao perfil metálico, que desliza em relação às lajes de concreto até que ocorra o colapso da conexão. Durante todo o processo de carregamento, são registrados os deslizamentos relativos entre o aço

e o concreto, assim como a força atuante, em intervalos de tempo pré-fixados. Com isso é possível fazer o traçado da curva força-deslizamento. As variáveis a serem investigadas incluem a geometria e as propriedades mecânicas da laje de concreto, dos conectores de cisalhamento e da armadura da laje.

2.4.1 Preparação dos modelos

É preciso eliminar a aderência entre a mesa da viga de aço e a laje de concreto no modelo de ensaio, através de algum tipo de lubrificante. Isto garante que a resistência medida no experimento esteja associada principalmente ao desempenho do conector.

No momento da concretagem dos modelos para o ensaio *push-out*, devem ser retirados no mínimo quatro corpos de prova de concreto (cilíndricos ou cúbicos), para a determinação da resistência à compressão. A resistência do concreto f_{cm} deve ser tomada como a média dos corpos de prova e à época do ensaio deve ser de $70\% \pm 10\%$ da resistência especificada f_{ck} das vigas para as quais o ensaio é projetado. Isto é possível utilizando-se um concreto de um f_{ck} específico, entretanto executando os ensaios antes dos 28 dias de cura dos modelos. Os corpos de prova devem sofrer cura normal.

Em relação ao conector de cisalhamento, deve-se determinar a resistência ao escoamento, a resistência à tração e o alongamento máximo de uma amostra representativa do material do mesmo.

2.4.2 Procedimento de ensaio

Na fase inicial do ensaio, devem ser aplicados 25 ciclos de carregamento e descarregamento, com a força oscilando entre 5% e 40% da carga de ruptura estimada. Os incrementos de força subsequentes devem ser aplicados de forma que a ruptura não ocorra em menos de 15 minutos.

O deslizamento longitudinal entre a laje de concreto e a viga de aço deve ser medido de forma contínua durante todo o processo de aplicação da força, desde o início do carregamento até atingida a força máxima. O deslizamento deve ser medido até que a força aplicada decresça pelo menos 20% em relação à força máxima. A separação

transversal entre a seção de aço e as lajes (*uplift*) também deve ser medida durante o carregamento, tão próximo quanto possível de cada grupo de conectores.

2.4.3 Avaliação do ensaio

Se três ensaios em corpos de prova nominalmente idênticos são realizados, e o desvio padrão de qualquer resultado individual não excede 10% da média de todos os ensaios, a resistência característica P_{Rk} deve ser tomada como a menor carga de colapso (dividida pelo número de conectores) reduzida de 10%. Caso o desvio da média exceda 10%, pelo menos mais três ensaios do mesmo tipo devem ser realizados e sua avaliação deve ser feita de acordo com o Anexo D da EN 1994-1-1:2004.

A capacidade de deslizamento de um corpo de prova (δ_u) corresponde ao deslizamento medido para o nível de carga característica, como ilustrado na Figura 2.4. Ou seja, corresponde ao deslizamento máximo no qual o conector ainda suporta 90% de sua resistência máxima ($P_{Rk} = 0,9P_{max}$).

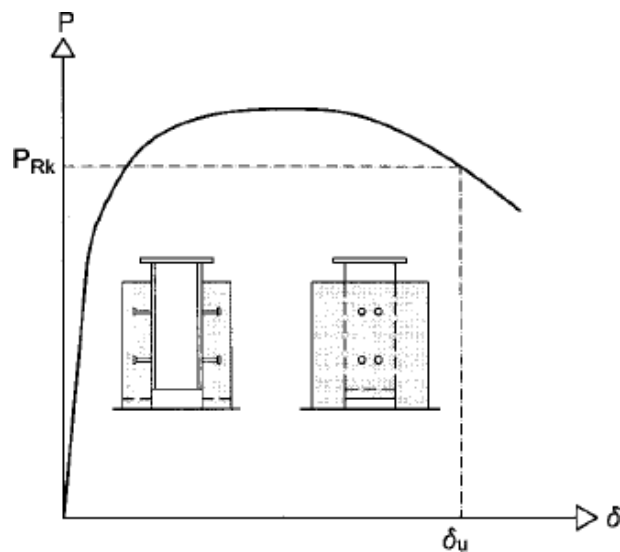


Figura 2.4 – Determinação da capacidade de deslizamento δ_u (EN 1994-1-1:2004).

A capacidade de deslizamento característica δ_{uk} deve ser tomada como o menor dos valores de δ_u obtidos nos ensaios, reduzido de 10% ($\delta_{uk} = 0,9\delta_u$).

A resistência do conector ao *uplift* é verificada através da separação transversal entre o perfil de aço e as lajes de concreto, que deve ser inferior a 50% do deslizamento

longitudinal correspondente, quando os conectores estão sujeitos a 80% da sua carga última. Caso isso não ocorra, o desempenho da conexão não é considerado satisfatório.

2.5 Estudos sobre conexões de cisalhamento

Através do ensaio *push-out* é possível determinar vários parâmetros da conexão, como já mencionado, porém muitas vezes é difícil elaborar formulações analíticas para a predição da capacidade resistente do conector, devido à complexidade envolvida na análise de tensões e deformações. Por essa razão, na maioria dos casos têm sido propostas expressões empíricas ou semi-empíricas para representar o comportamento dos conectores de cisalhamento. Com o avanço das tecnologias de computação e análise numérica, tem se tornado viável realizar análises de estruturas de um modo geral por meio de simulação computacional.

Nas últimas décadas tem sido cada vez mais frequente a utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) para o estudo do comportamento de elementos estruturais, com a finalidade de prever sua capacidade última ou para a realização de estudos paramétricos.

Embora forneça uma solução aproximada, devido à discretização do contínuo em elementos finitos e à aproximação da solução em cada elemento por funções de interpolação, o MEF apresenta uma convergência para a solução exata quando se aumenta a discretização do contínuo, desde que as funções de interpolação do elemento obedeçam condições mínimas de acordo com o tipo de problema avaliado.

Existem muitos estudos acerca dos diversos tipos de conectores de cisalhamento, sejam estudos experimentais, através de ensaios, sejam estudos realizados através de análises numéricas. Vários destes estudos são citados a seguir.

Existem diversos estudos experimentais e numéricos sobre vários tipos de conectores de cisalhamento. Vários destes estudos são citados a seguir.

Os estudos realizados por Kalfas *et al.* (1997), simulando e analisando o ensaio *push-out*, utilizando-se conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça (*studs*), apresentaram resultados muito próximos aos experimentais, realizados pelos mesmos

autores, ficando todos a favor da segurança. Neste estudo não foram levados em consideração o encruamento do aço e a contribuição das armaduras. Além disso, os comportamentos à tração e à compressão do concreto foram considerados de forma similar como elastoplásticos perfeitos. Os autores utilizaram da simetria do ensaio e modelaram apenas metade do *push-out* (Figura 2.5a). O máximo desvio ocorrido entre os resultados numéricos e os resultados experimentais foi de 14%. Desta forma, os autores concluíram que a análise numérica poderia substituir o processo experimental, em casos como o estudado, com uma diminuição de tempo e custos.

Oguejiofor e Hosain (1997) estudaram numericamente o comportamento dos conectores *Perfobond* em ensaios *push-out*. Nesse trabalho foram gerados dados da resistência última do conector *Perfobond*, usando um número de variáveis que poderiam influenciar seu comportamento. Também se aproveitando da simetria, apenas um quarto da estrutura foi modelada (Figura 2.5b). As equações derivadas da análise numérica mostraram-se próximas dos valores experimentais, na maioria dos casos, conservadores.

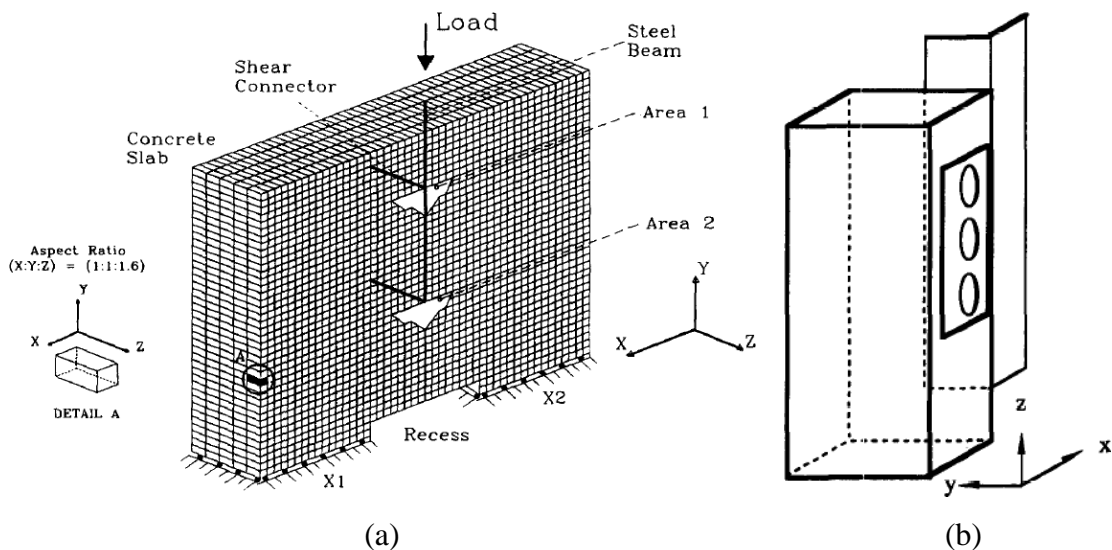


Figura 2.5 – Arranjo dos modelos numéricos: (a) simulado por Kalfas *et al.* (1997) (KALFAS *et al.*, 1997); (b) simulado por Oguejiofor e Hosain (1997) (OGUEJIOFOR e HOSAIN, 1997).

Trabalhos como os de Kalfas *et al.*(1997) e de Oguejiofor e Housain (1997), simulam através de modelos numéricos o ensaio *push-out* com o objetivo de avaliar o comportamento dos conectores de cisalhamento. Esses modelos representam de forma satisfatória a relação força-deslizamento entre o perfil de aço e a laje de concreto. Entretanto, nesses modelos há uma simplificação ao se utilizar elementos

bidimensionais e uniaxiais para o perfil metálico e para o conector, respectivamente, deixando-se de avaliar de forma mais abrangente parâmetros como a concentração de tensões e de deformações.

Studnicka *et al.* (2000) realizaram 61 ensaios *push-out* de conectores *Perfobond* com aberturas de 32 e 60 mm de diâmetro, em concreto normal e leve, variando a quantidade de armadura transversal. Após a avaliação dos resultados experimentais, os autores desenvolveram equações de resistência ao cisalhamento para todos os casos estudados, apropriadas para o projeto estrutural.

No estudo de Lam *et al.* (2000) foi usado o *software* de elementos finitos ABAQUS para simular numericamente vigas de aço agindo em conjunto com lajes alveolares, comparando-se os resultados com ensaios experimentais realizados pelos mesmos autores. O estudo demonstrou primeiramente que uma análise de tensão bidimensional é suficientemente precisa, desde que os dados de entrada corretos do material e das características do conector de cisalhamento *stud* obtidos de ensaios *push-out* sejam utilizados. O modelo numérico apresentou bons resultados e posteriormente foi utilizado para a realização de um estudo paramétrico extenso para investigar o comportamento à flexão de vigas mistas com lajes alveolares, com variações na taxa de armadura transversal, no espaçamento dos *studs* e na seção de aço.

Nishido *et al.* (2000) realizaram um estudo do comportamento força-deslizamento de conectores *Perfobond*, variando o número de furos e a espessura do conector em doze ensaios *push-out*, além da colocação ou não de armadura nos mesmos. Os autores realizaram também um ensaio de flexão de viga, visando seu emprego em pontes. Além disso, simularam via MEF alguns destes ensaios, alcançando boa concordância entre os resultados. Os resultados experimentais mostraram que a presença de armaduras através dos furos do conector pode aumentar a capacidade resistente da conexão e seu uso é efetivo para grandes deslizamentos, mesmo utilizando-se barras de pequeno diâmetro. Os testes também mostraram que o conector necessita de um cobrimento suficiente para evitar grande fissuração. Além disso, a capacidade resistente da conexão aumenta de acordo com o número de furos no conector, mas não proporcionalmente. A distância entre os furos influencia o resultado.

Tristão (2002) apresentou simulações numéricas com elementos finitos de ensaios *push-out*, com conectores tipo pino com cabeça e perfil U formado a frio, usando o *software* ANSYS, que permite a análise dos modelos em regime de não-linearidade física e geométrica. O trabalho inclui um estudo paramétrico com vistas à determinação da resistência última e da relação força-deslizamento dos conectores. Apresentam como variáveis de interesse o número de conectores na laje de concreto, a quantidade de armadura inserida no concreto, o diâmetro do conector *stud*, a resistência do concreto, a espessura e a posição de soldagem do conector tipo perfil U formado a frio. Os resultados foram comparados com valores obtidos experimentalmente.

El-Lobody e Lam (2003) apresentaram modelos de elementos finitos para a análise de vigas mistas com lajes maciças e com lajes alveolares. Para ambos os modelos, elementos sólidos tridimensionais de oito nós foram usados. A não-linearidade do material de todos os componentes das vigas mistas foi levada em consideração. As curvas características força-deslizamento não-lineares dos conectores de cisalhamento *studs* foram incluídas nos modelos. Os modelos conseguiram prever o comportamento carga-flecha e a distribuição de tensões ao longo do comprimento da viga. Foi obtida uma boa concordância entre os modelos numéricos e os resultados experimentais publicados anteriormente pelos mesmos autores.

Shim (2004) realizou ensaios *push-out* em conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça (*studs*) com diâmetros de até 30 mm. O autor investigou o comportamento estático e à fadiga e comparou com valores prescritos pela EN 1994-1-1:2004 para *studs* com diâmetros convencionais. Os resultados mostraram que a resistência ao cisalhamento presente na EN 1994-1-1:2004 fornece valores conservadores para os conectores estudados e, portanto, a equação empírica presente na EN 1994-1-1:2004 pode ser extrapolada para conectores *stud* de maior diâmetro.

Nos testes realizados por Valente e Cruz (2004) com conectores de cisalhamento *Perfobond* em ensaios *push-out* utilizando-se concreto leve, os autores analisaram a influência de parâmetros como a resistência do concreto, a disposição da armadura e a existência e o espaçamento de furos no conector. Uma comparação importante com os resultados experimentais obtidos por diferentes autores utilizando concreto com peso normal foi estabelecida. Os testes mostraram que os mecanismos de falha observados

foram associados com a ruptura das lajes de concreto, com pouca ou nenhuma deformação do *Perfobond*. A falha ocorreu com a progressão completa de uma fissura longitudinal até o topo da laje, o esmagamento de concreto sob o *Perfobond* e um deslizamento descontrolado entre o perfil metálico e a laje de concreto. Os resultados indicaram que este tipo de conector não garante um comportamento dúctil da conexão.

No estudo de Lam e El-Lobody (2005) um modelo numérico do ensaio *push-out* foi validado utilizando-se resultados de testes experimentais e dados apresentados em normas de uso correntes. Nesse modelo, o comportamento do concreto foi admitido como elastoplástico perfeito. Um estudo paramétrico foi realizado para investigar variações na resistência do concreto e no diâmetro de conectores *stud*. O modelo de elementos finitos permitiu uma melhor compreensão dos diferentes modos de colapso observados durante os testes experimentais e também da capacidade resistente dos conectores de cisalhamento nas lajes maciças de concreto. Os resultados da análise numérica ficaram bem próximos dos resultados obtidos de ensaios *push-out* e dos dados especificados por normas. Os autores concluíram que este tipo de modelo de elementos finitos pode substituir ensaios experimentais para determinar a capacidade resistente de conectores de cisalhamento.

Veríssimo (2007) apresentou o desenvolvimento e a análise experimental do conector *Crestbond*, realizado parte no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, em Guimarães (Portugal) e parte no Laboratório de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais. O programa consistiu de 41 ensaios *push-out*, incluindo análises de comportamento e comparações com os conectores *stud* e *Perfobond*. Os estudos realizados indicaram que o conector *Crestbond* apresenta um comportamento estrutural adequado, associado a diversas vantagens construtivas e econômicas, mostrando-se interessante para o uso em vigas mistas de edifícios, porém ainda requer um estudo mais aprofundado em que se incluem análises numéricas.

No trabalho de Nguyen e Kim (2009), em que foi desenvolvido um modelo de elementos finitos de ensaios *push-out* com conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça (*stud bolt*) com diâmetros maiores ou iguais a 22 mm, inicialmente foi realizada uma validação do modelo numérico, através da comparação dos resultados da análise por elementos finitos com resultados experimentais de outros autores. Posteriormente,

foi realizado um extenso estudo paramétrico para estudar os efeitos da capacidade resistente da conexão, comparando os resultados com o disposto em normas. Nas simulações realizadas neste estudo, os autores utilizaram o chamado Modelo de Dano Plástico, descrito adiante, para caracterizar o material concreto. Um total de 32 ensaios *push-out* foram investigados nesse estudo, com o diâmetro do conector variando de 22 a 30 mm e a resistência do concreto variando de 25 a 60 MPa.

Qureshi *et al.* (2011a) estudaram o comportamento de vigas mistas com fôrma de aço incorporada com nervuras orientadas perpendicularmente ao seu eixo, via MEF, utilizando o programa ABAQUS. Nesse estudo foram levadas em conta as não-linearidades geométrica e de material. Modelos elastoplásticos foram usados para caracterizar todos os componentes de aço e o Modelo de Dano Plástico foi utilizado para o concreto. Após a validação, através de comparação com resultados experimentais, o modelo foi usado para realizar um amplo estudo paramétrico para investigar o efeito do espaçamento transversal dos conectores em testes *push-out* com duplos *studs* colocados em posições favoráveis e defasadas, utilizando diferentes resistências de concreto.

Em outro trabalho, Qureshi *et al.* (2011b) desenvolveram e validaram um modelo tridimensional de elementos finitos para uma viga mista, utilizando-o em um estudo paramétrico para investigar a influência da posição do conector *stud* e da espessura da chapa perfilada da fôrma sobre a resistência, ductilidade e os modos falha do conector de cisalhamento soldado através da chapa perfilada. Nesse trabalho também foram consideradas as não-linearidades geométrica e de material, assim como a consideração do Modelo de Dano Plástico para o concreto. Um total de 240 testes *push-out* foram analisados com diferentes espessuras de chapa, posições do *stud* na nervura, resistência do concreto e espaçamentos transversais, utilizando-se o programa ABAQUS.

2.6 Análise não-linear

Durante muito tempo a Lei de Hooke foi utilizada para determinar cargas de colapso e para o dimensionamento de estruturas em geral. Porém, a Teoria da Elasticidade linear possui suas limitações, pois existem diversos aspectos que provocam um comportamento não-linear das estruturas, tais como:

- a não-linearidade material (os modelos constitutivos dos materiais, principalmente aço e concreto, são não-lineares);
- a não-linearidade geométrica (os deslocamentos e deformações podem ser tais que a configuração geométrica inicial não possa mais ser utilizada para exprimir as condições de equilíbrio);
- a não-linearidade de contato (alterações das condições de apoio ou de aplicação de cargas podem ser tais que as condições de apoio inicial não possam mais ser utilizadas para exprimir as condições de equilíbrio).

Segundo Lourenço (1999), a solução para essas limitações da Teoria da Elasticidade passa por adicionar a essa teoria o comportamento não-linear. A análise não-linear completa, que contempla o comportamento da estrutura durante todo o histórico de aplicação das cargas é a forma mais realista de cálculo estrutural, incluindo etapas sucessivas, desde a ausência de cargas, passando pelo comportamento em serviço, considerando o comportamento não-linear até que se atinja o colapso.

Quando se trabalha considerando a não-linearidade, pode ser verificada a existência de mais de uma solução para o problema. Portanto, por vezes acontece de a solução obtida não ser a solução procurada.

2.6.1 O método de Newton-Raphson

Nos programas de análise não-linear são utilizados métodos para obtenção do equilíbrio a cada incremento de carga. O Método de Newton-Raphson é capaz de encontrar a solução de equilíbrio até à vizinhança da carga máxima do modelo, enquanto a rigidez da estrutura ainda é positiva. É um método iterativo incremental, que permite obter os deslocamentos de uma estrutura para uma dada força e vice-versa, ou seja, permite também obter as forças de uma estrutura para um dado deslocamento. Para isso, toma-se um ponto qualquer do domínio da função que governa o comportamento da estrutura, calcula-se a sua derivada neste ponto e calcula-se o ponto de interseção da tangente com o eixo das ordenadas, a fim de encontrar um novo ponto do domínio da função. Repete-se este procedimento até encontrar a posição de equilíbrio, que representa os deslocamentos (ou forças) procurados (Figura 2.6). Para se obter sucesso neste

processo, deve-se primeiramente delimitar um intervalo, a fim de estimar um valor inicial adequado. Uma boa escolha da solução inicial pode melhorar a convergência do processo iterativo e, inclusive, determinar a convergência ou a divergência do processo. Para isso, existem quatro condições a serem satisfeitas:

- o intervalo delimitado deve conter a raiz da função;
- a função deve ser diferenciável em todo intervalo;
- a primeira derivada no intervalo não deve trocar de sinal;
- a segunda derivada no intervalo não deve trocar de sinal.

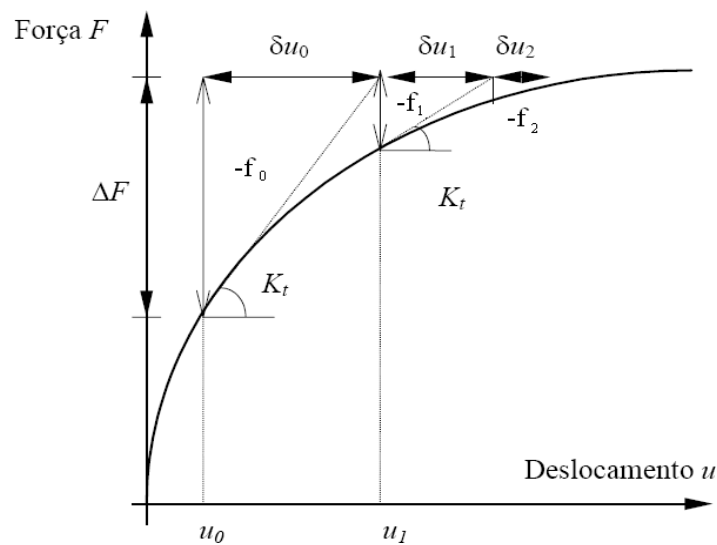


Figura 2.6 - O Método de Newton-Raphson (adaptada de LOURENÇO, 1999).

2.7 O Modelo de Dano Plástico (*Concrete Damaged Plasticity*)

O Modelo de Dano Plástico (*Concrete Damaged Plasticity*) disponível no ABAQUS é baseado no modelo proposto por Lubliner *et al.* (1989) e Lee e Fenves (1998). Segundo Hibbitt *et al.* (2009), este modelo destina-se à análise das estruturas de concreto sob cargas que podem ser monotônicas, cíclicas ou dinâmicas, sendo também adequado para a análise de outros materiais frágeis, como rochas, argamassas e cerâmicas. Apesar de destinar-se principalmente à análise de estruturas de concreto armado, este modelo pode ser utilizado também para concreto simples.

De acordo com Bonilla (2008), quando submetido a baixas pressões de confinamento, o concreto se comporta de forma muito frágil, onde os mecanismos de falha principais são quebras ou fissurações na tração e esmagamento na compressão. O comportamento frágil do concreto tende a desaparecer quando as pressões confinantes são suficientemente grandes para impedir a propagação de fissuras. A teoria constitutiva expressa no Modelo de Dano Plástico é dirigida para tornar irreversíveis os efeitos de danos associados com os mecanismos de falha que ocorrem nos materiais de concreto ou de outros materiais quebradiços sujeitos a baixas pressões confinantes (menos do que quatro ou cinco vezes a resistência final à compressão).

Na Figura 2.7 está representado o processo de degradação da rigidez que descreve o Modelo de Dano Plástico para os casos de tração e compressão respectivamente. A degradação da rigidez elástica é significativamente diferente nos ensaios de tração e compressão. Nesse modelo a degradação da resposta do concreto é caracterizada por duas variáveis de dano uniaxiais independentes, d_t e d_c , referentes à tração e compressão, respectivamente, que podem assumir valores entre zero e um. Quando o valor é igual a zero, representa o material não danificado e quando igual a um, representa perda total de rigidez.

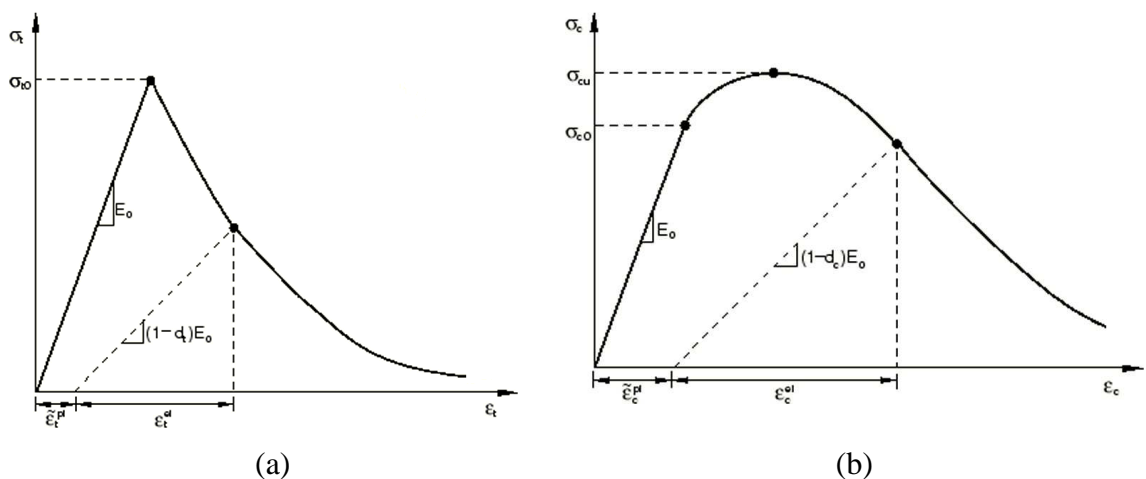


Figura 2.7 – Resposta do concreto sobre carga uniaxial submetido à: (a) Tração; (b) Compressão.

3 MODELO NUMÉRICO

3.1 Considerações preliminares

Com o intuito de se alcançar os objetivos propostos, este trabalho foi realizado em duas etapas: a construção de um modelo numérico com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) e, usando este modelo, a simulação numérica de experimentos reais descritos na literatura.

O modelo numérico foi construído no ABAQUS, um *software* de análise estrutural avançado, baseado no MEF. Este *software* possui um pré e pós-processador gráfico e um *solver* com capacidade de realizar análises estáticas ou dinâmicas, lineares ou não-lineares. Além disso, o programa possui uma extensa biblioteca de elementos finitos, permitindo a elaboração de vários tipos de modelos, podendo-se utilizar um ou mais materiais.

O modelo construído foi utilizado na simulação numérica de ensaios realizados por Veríssimo (2007) e por Oliveira (2007). Os autores realizaram ensaios do tipo *push-out* com conectores de cisalhamento *Crestbond*. Dessa forma, foram utilizados para os modelos simulados nesta dissertação, a geometria, os parâmetros, as propriedades dos materiais e a nomenclatura dos ensaios definidos nos trabalhos referenciados.

A elaboração dos modelos numéricos consiste basicamente de algumas etapas que dependem umas das outras, que são:

- 1) definição das dimensões geométricas do modelo;
- 2) escolha dos tipos de elementos finitos a serem adotados;
- 3) definição das propriedades físicas dos materiais;
- 4) definição da malha de elementos finitos a ser adotada;

- 5) discretização da geometria do modelo;
- 6) definição das condições de contorno e de solicitação;
- 7) escolha dos parâmetros para efetuar o processamento, como por exemplo, número de incrementos, número máximo de iterações e critério de convergência;
- 8) processamento.

É importante salientar que neste trabalho realizou-se uma micro-modelagem para uma melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem com o conector de cisalhamento. Com esse tipo de abordagem é possível estudar de forma mais realista as distribuições de tensões e deformações no modelo, os modos de ruptura dos conectores e sua interação com o concreto.

Em estudos como os de vigas mistas, por exemplo, é interessante utilizar uma macro-modelagem para os conectores. Com esse tipo de abordagem os conectores de cisalhamento são substituídos por elementos matemáticos que contém as propriedades dos mesmos, como se fossem molas virtuais, cujo comportamento é representado pela curva força-deslizamento do conector obtida nos experimentos de laboratório.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram realizados testes de modelagem utilizando-se um método de análise dinâmica, chamado no ABAQUS de método explícito (ABAQUS/Explicit), e um método estático, chamado no ABAQUS de método implícito (ABAQUS/Standard). No primeiro caso, as curvas força-deslizamento apresentaram grandes oscilações, difíceis de serem controladas, principalmente na fase pós-pico. Os resultados obtidos com o método implícito foram melhores, razão pela qual optou-se por adotá-lo em todas as simulações numéricas descritas neste trabalho.

3.2 Características geométricas do modelo numérico

Como o modelo padrão utilizado nos ensaios *push-out* conforme a EN 1994-1-1:2004 é duplamente simétrico, adotou-se apenas um quarto da geometria do mesmo para construir o modelo numérico, conforme pode ser visto na Figura 3.1. Além disso, essa simplificação conduz a uma análise com menor tempo de processamento e menor custo computacional, sendo utilizada por diversos autores (OGUEJIOFOR e HOSAIN, 1997; LAM e EL-LOBODY, 2005; CHROMIAK e STUDNICKA, 2006; AL-DARZI *et al.*,

2007; BONILLA, 2008; NGUYEN e KIM, 2009; MIRZA e UY, 2010; QURESHI *et al.*, 2011a; QURESHI *et al.*, 2011b).

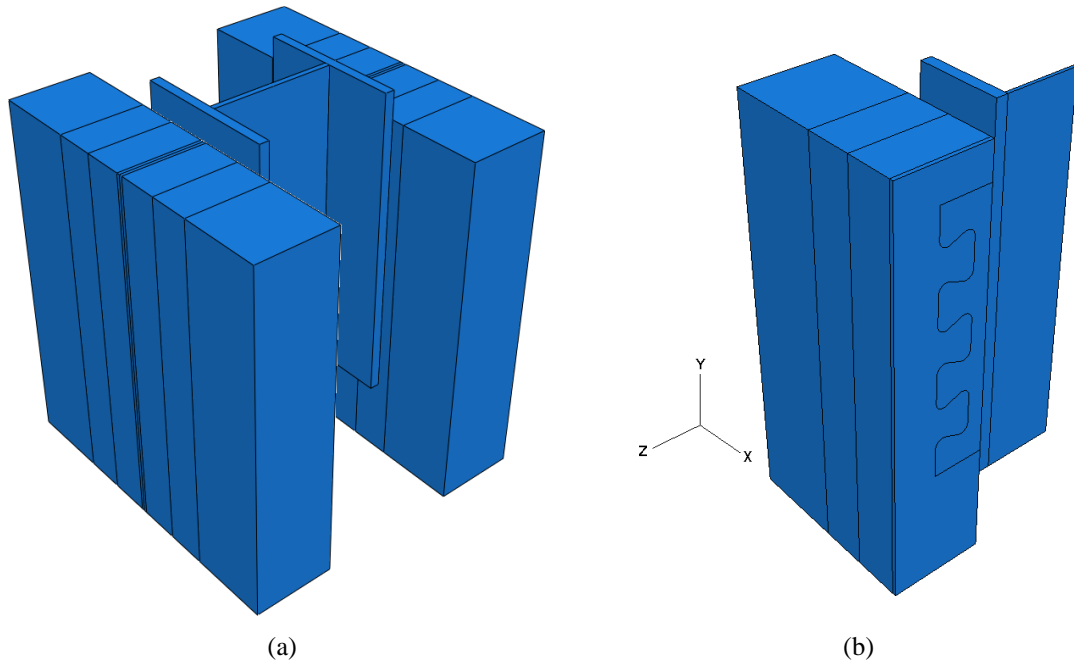


Figura 3.1 – Modelo numérico: (a) modelo completo; (b) um quarto do modelo.

3.2.1 Tipo e tamanho dos elementos

A laje de concreto, o perfil metálico e o conector foram discretizados com elementos sólidos do tipo C3D8R presente na biblioteca do ABAQUS/Standard (Figura 3.2). Esses elementos possuem oito nós com integração reduzida e cada nó possui três graus de liberdade translacionais.

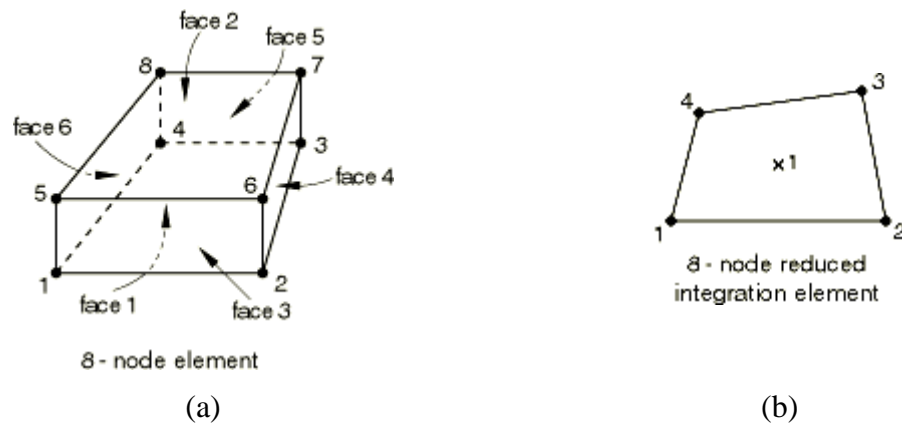


Figura 3.2 – Elemento C3D8R do ABAQUS (HIBBITT *et al.*, 2009).

A armadura foi modelada com elementos tridimensionais de treliça do tipo T3D2. Esses elementos possuem dois nós, com três graus de liberdade translacionais por nó.

Após a seleção dos elementos, foram realizados alguns testes com diferentes estruturas para a malha do modelo. O gerador de malha do ABAQUS sugere algoritmos de geração de malha diferenciados, dependendo da geometria do elemento a ser discretizado. O melhor tipo de malha que o ABAQUS é capaz de gerar é chamado, no contexto do *software*, de “malha estruturada”. Nessa modalidade, os elementos possuem maior uniformidade formal e dimensional, porém menor capacidade de adaptação a formas não regulares. Quando o elemento a ser discretizado possui uma forma não regular, é necessário utilizar outro algoritmo de geração de malha ou subdividir o elemento em partições relativamente regulares que possibilitem a geração de uma malha estruturada. A princípio ficou evidente que o perfil de aço podia ser discretizado com malha estruturada. Após alguns testes, constatou-se que o conector e a laje podiam ter sua malha gerada por um processo denominado no ABAQUS de varredura (*sweep*). Os testes revelaram que os resultados obtidos para um modelo discretizado por varredura são tão bons quanto aqueles obtidos para uma malha estruturada com elementos de dimensão equivalente. Por essa razão, optou-se por discretizar o conector e a laje por varredura, para suprimir eventuais subdivisões dos elementos, agilizando a modelagem.

Em modelos de elementos finitos, à medida que se diminui o tamanho da malha na discretização de um volume, melhor a aproximação com o modelo real, pois com elementos menores, reduz-se o erro cometido ao computar as funções de interpolação nos elementos. Em contrapartida, aumentam a quantidade de nós e o tempo de processamento do modelo. Dependendo da densidade da malha, pode-se inviabilizar a análise com os recursos de que se dispõe. Assim, procura-se um valor para as dimensões dos elementos de malha, tal que o ganho de precisão nos resultados torna-se muito pequeno caso esse valor seja ainda reduzido.

Neste trabalho foi realizada uma avaliação da objetividade da malha, no intuito de se avaliar até que dimensão dos elementos o ganho de precisão nos resultados era justificável. Entretanto, como estavam sendo comparadas duas estratégias de modelagem da ligação laje-conector, quais sejam, interação de contato e restrição tipo *Tie*, a modelagem com interação de contato condicionou a dimensão mínima dos

elementos a um certo valor, devido à limitação de memória dos computadores utilizados. Assim, para todos os casos estudados adotou-se o mesmo valor para a dimensão média dos elementos.

Ao final da avaliação, chegou-se às seguintes dimensões de malha: a laje de concreto foi modelada com elementos com uma malha não uniforme, partindo de 10 mm no entorno dos conectores e aumentando com a distância do conector; o perfil metálico foi modelado com uma malha de 30 mm e o conector foi modelado com uma malha de 10 mm, conforme representado na Figura 3.3. Além disso, a armadura foi modelada com elementos com uma malha, partindo de 30 mm próximo do conector e aumentando com a distância do mesmo.

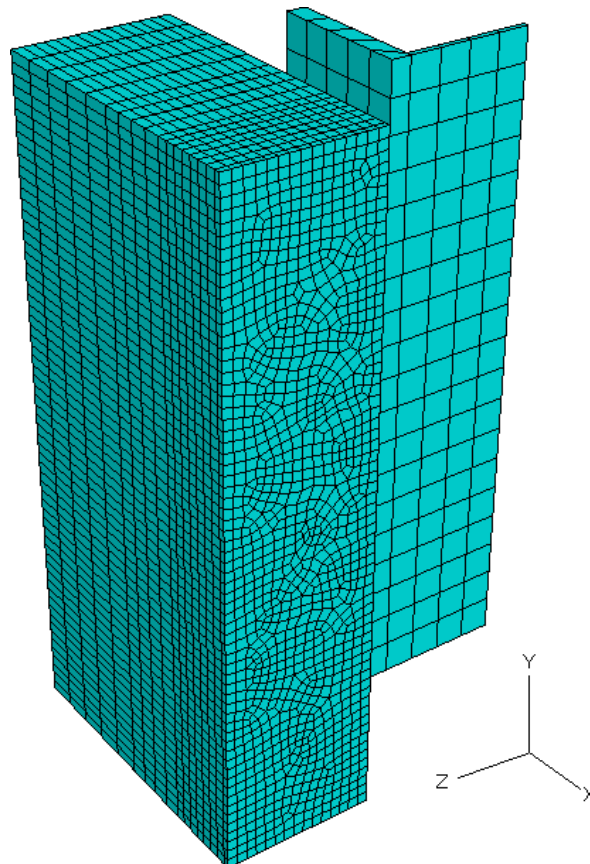


Figura 3.3 – Aspecto geral da malha de elementos finitos utilizada no modelo numérico.

3.3 Características dos materiais

Nos modelos elaborados neste trabalho foi considerado o comportamento não linear dos materiais aço e concreto.

3.3.1 Modelo constitutivo para o aço

Foi admitido para o aço presente nos modelos, tanto do perfil, quanto do conector, quanto da armadura, um comportamento elastoplástico sem encruamento (elastoplástico perfeito), associado ao critério de escoamento de von Mises. Pode-se observar na Figura 3.4, que quando a tensão equivalente é menor que a tensão de escoamento (f_y), o comportamento do material tem uma correspondência com o trecho elástico-linear da relação tensão×deformação. No caso desta tensão ser maior ou igual à tensão de escoamento, o material desenvolverá deformações plásticas.

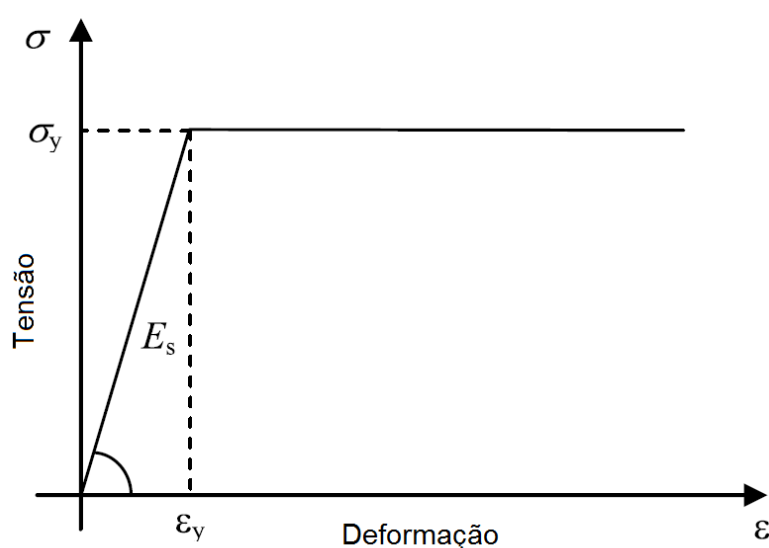


Figura 3.4 – Curva tensão×deformação admitida para o aço no modelo numérico.

Para a armadura foi admitido um módulo de elasticidade $E = 210000$ MPa e para o conector e o perfil metálico um módulo de elasticidade $E = 200000$ MPa.

3.3.2 Modelo constitutivo para o concreto

Sabe-se que o concreto é um material que possui diferentes resistências na tração e na compressão. Segundo Hibbitt *et al.* (2009), uma das formas de se representar tal comportamento é através do Modelo de Dano Plástico (*Concrete Damaged Plasticity*). De acordo com Luccioni (2003), este modelo permite descrever a degradação progressiva das propriedades mecânicas de diversos materiais, sendo atualmente muito utilizado para descrever o comportamento tensão×deformação de materiais frágeis, tais como concreto e cerâmica, por exemplo.

O Modelo de Dano Plástico está disponível no ABAQUS e foi utilizado para caracterizar o comportamento mecânico do concreto no presente trabalho. Este modelo constitutivo permite caracterizar, de maneira realista, a relação tensão×deformação do concreto, especialmente a perda de rigidez a partir do ponto de sua resistência máxima, como observado em ensaios. Este modelo requer a definição adicional de um modelo elástico para sua posterior utilização.

3.3.2.1 Domínio elástico

Para o domínio elástico do material concreto foi utilizado o modelo de material ELASTIC, presente no ABAQUS, no qual são requeridos os parâmetros: módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν).

O módulo de elasticidade do concreto (E_{cm}), pode ser descrito pela seguinte equação, de acordo com a EN 1992-1-1:2004:

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (3.1)$$

com E_{cm} em GPa e f_{cm} em MPa.

O coeficiente de Poisson foi admitido com valor igual a 0,2.

3.3.2.2 Domínio plástico

Para a caracterização do domínio plástico do concreto foi utilizado o Modelo de Dano Plástico (*Concrete Damaged Plasticity*), como já mencionado, disponível na biblioteca de materiais do ABAQUS. No Modelo de Dano Plástico são definidos parâmetros referentes à plasticidade, parâmetros referentes ao comportamento do concreto à compressão, além de parâmetros referentes ao comportamento do concreto à tração.

- **Parâmetros plásticos**

Os principais parâmetros plásticos a serem informados para o Modelo de Dano Plástico são: o ângulo de dilatância (ψ) e a razão entre as resistências à compressão no estado biaxial e uniaxial (σ_{b0}/σ_{c0}).

De acordo com Malm (2009), o ângulo de dilatância mede a inclinação que o potencial plástico alcança para altas tensões de confinamento. Esse autor realizou um estudo de simulação do comportamento do concreto em modelos numéricos, chegando à conclusão de que baixos valores do ângulo de dilatância produzem um comportamento frágil no concreto, enquanto altos valores produzem um comportamento dúctil. O autor analisou ainda várias recomendações para o valor do ângulo de dilatância e concluiu que a diferença de comportamento do concreto é apenas marginal quando se utiliza valores entre 30° e 40°. É ainda mais específico quando relata que o valor ideal está entre 35° e 38° para casos de alta tensão de confinamento. Frente a essas recomendações admitiu-se um ângulo de dilatância $\psi = 36^\circ$ para o modelo de elementos finitos desenvolvido neste trabalho.

Para a razão entre as resistências à compressão no estado biaxial e uniaxial foi admitido um valor $(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) = 1,16$, que é o valor *default* admitido pelo ABAQUS.

Há ainda outros parâmetros a serem informados como a excentricidade e a viscosidade, sendo todos admitidos como valores iguais a zero.

- **Parâmetros referentes ao comportamento do concreto à compressão**

O comportamento não linear do concreto à compressão pode ser representado através de uma curva uniaxial tensão×deformação, como pode ser visto na Figura 3.5. Nesta figura podem ser observadas duas partes distintas. Na primeira parte é assumido um comportamento elástico linear até cerca de 40% da resistência média à compressão do concreto ($0,4 f_{cm}$), de acordo com a norma EN 1992-1-1:2004. A segunda parte é representada por uma equação de uma parábola de 2º grau, que tem início na tensão de $0,4 f_{cm}$, alcançando o valor da deformação última do concreto (ϵ_{cu1}). Essa parte da curva pode ser determinada através da seguinte equação, extraída da EN 1992-1-1:2004:

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \frac{kn - n^2}{1 + (k - 2)n} \quad (3.2)$$

em que:

$$n = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}};$$

$$k = 1,05 E_{cm} \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}};$$

ε_c é a deformação do concreto à compressão;

ε_{c1} é a deformação do concreto à compressão correspondente à tensão máxima (f_{cm});

E_{cm} é o módulo de elasticidade secante do concreto.

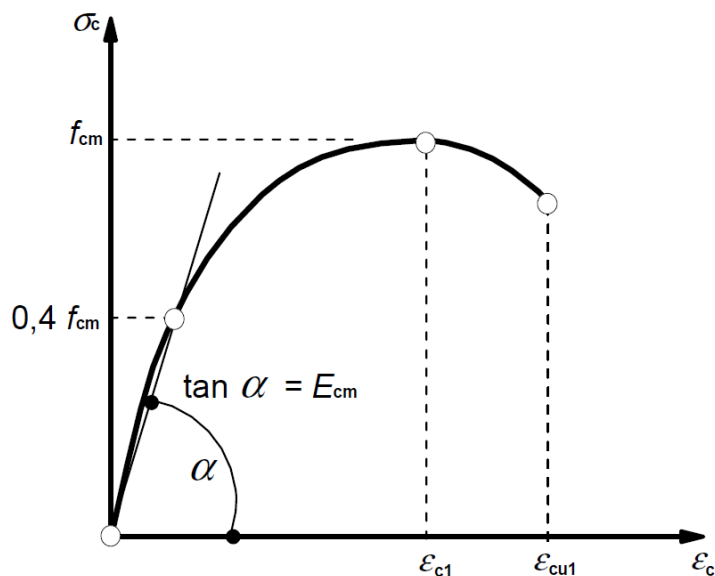


Figura 3.5 – Curva admitida para o concreto comprimido no modelo numérico (EN 1992-1-1:2004).

Os parâmetros a serem informados no ABAQUS neste caso são os pares tensões (σ) e deformações plásticas (ε_{pl}) do concreto. A curva tensão×deformação pode ser obtida, como mostrado anteriormente. Para obter as deformações plásticas (ε_{pl}), basta subtrair das deformações encontradas em cada ponto da curva (ε_c), suas respectivas deformações elásticas (ε_e).

- **Parâmetros referentes ao comportamento do concreto à tração**

O comportamento não linear do concreto à tração pode ser representado através de uma curva uniaxial tensão×deformação, como pode ser visto na Figura 3.6. Nesta figura podem ser observados dois trechos distintos. No primeiro trecho é assumido um comportamento elástico linear até a tensão atingir o valor da resistência à tração do concreto. No segundo, que é influenciado pela presença e taxa de armadura, é considerada a contribuição do concreto entre fissuras (*Tension Stiffening*).

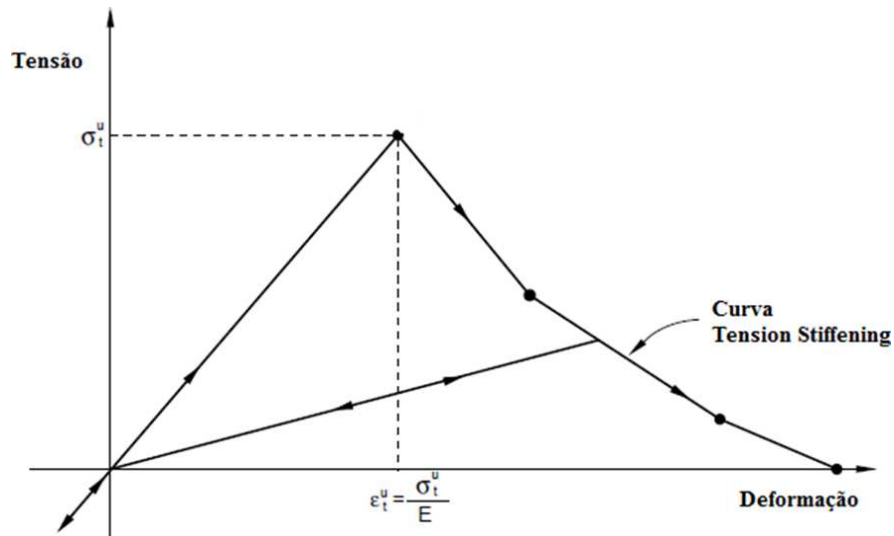


Figura 3.6 – Curva admitida para o concreto tracionado no modelo numérico (adaptado de HIBBITT *et al.*, 2009).

O efeito *Tension Stiffening* na fase pós-pico da curva pode ser especificado por meio de uma relação tensão×deformação pós-falha ou por aplicação de um critério de energia de fratura. De acordo com Hibbitt *et al.* (2009), em casos com pouca ou nenhuma armadura, a abordagem através da relação tensão×deformação muitas vezes provoca resultados sensíveis à malha. Portanto, o critério de energia de fratura foi utilizado no presente trabalho. Com essa abordagem, o comportamento frágil do concreto foi caracterizado por uma resposta tensão×deslocamento, como pode ser visto na Figura 3.7, ao invés de uma resposta tensão×deformação. O deslocamento é determinado por abertura de fissura, o que não depende do comprimento do elemento nem do tamanho da malha.

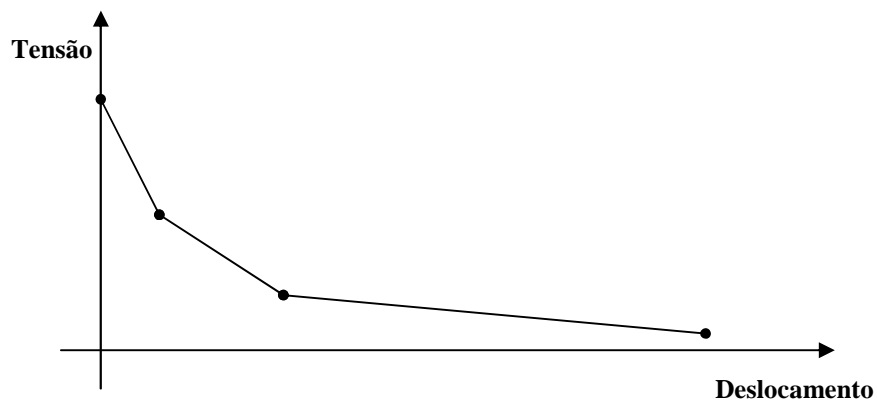


Figura 3.7 – Curva tensão×deslocamento pós-pico (*Tension Stiffening*) admitida para o concreto tracionado no modelo numérico.

De acordo com Hibbitt *et al.* (2009), o maior valor de deslocamento para a curva tensão×deslocamento para o concreto tracionado está entre 0,05 e 0,08 mm. Porém, segundo Fink *et al.* (2006), até um deslocamento de 1,00 mm, valor este consideravelmente maior que os anteriores, a resposta estrutural é muito semelhante àquela obtida quando se utiliza o valor máximo sugerido por Hibbitt *et al.* (2009), e, além do mais, a convergência numérica torna-se mais fácil.

Uma solução para se definir de maneira mais adequada o deslocamento máximo para o concreto tracionado é a aplicação da Teoria de Hillerborg. Segundo Hibbitt *et al.* (2009), Hillerborg define que a energia necessária para abrir uma fratura (G_f) é um parâmetro do material. Dessa forma, o comportamento frágil do concreto pode ser caracterizado por uma curva tensão×deslocamento linear, na qual a área abaixo da curva representa a energia de fratura (G_f). Segundo Hibbitt *et al.* (2009), o valor de G_f varia entre 40 N/m (para concreto com resistência à compressão de aproximadamente 20 MPa) e 120 N/m (para concreto com resistência à compressão de aproximadamente 40 MPa). Portanto, conhecendo o valor da energia de fratura (G_f) e da tensão de ruptura à tração (σ_{t0}), é possível calcular o deslocamento máximo da curva tensão×deslocamento para o concreto tracionado (u_{10}), dado pela equação (3.3):

$$u_{10} = \frac{2G_f}{\sigma_{t0}} \quad (3.3)$$

Neste trabalho foram realizados vários testes utilizando-se diversos valores para esse deslocamento máximo, chegando-se a um valor de 0,50 mm, que se encontra abaixo do valor máximo proposto por Fink *et al.* (2006). Os demais pontos foram tomados de forma a manter a natureza da curva tensão×deslocamento (Figura 3.7) proposta por Hibbitt *et al.* (2009). Os pares estão mostrados na Tabela 3.1 abaixo, em que f_{ctm} é a resistência média à tração do concreto.

Tabela 3.1 – Dados para definição do *Tension Stiffening*.

σ_t (MPa)	u (mm)
f_{ctm}	0,00
$0,60 f_{ctm}$	0,05
$0,30 f_{ctm}$	0,15
$0,05 f_{ctm}$	0,50

Os valores de resistência média à tração (f_{ctm}) utilizados neste trabalho foram tomados de acordo com a norma EN 1992-1-1:2004, pela seguinte equação:

$$f_{ctm} = 0,30 f_{ck}^{(2/3)} \quad (3.4)$$

sendo f_{ctm} e f_{ck} dados em MPa, com:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)} \quad (3.5)$$

3.4 Condições de contorno

Como o modelo representa apenas um quarto da geometria do modelo real, é necessário garantir que as superfícies de simetria tenham condições de contorno que representem a situação real.

Todos os nós da superfície em destaque na Figura 3.8a, que corresponde à base do experimento, foram restringidos na direção do eixo y às translações, já que esta base resiste às cargas de compressão. Os nós da superfície destacada na Figura 3.8b foram restringidos na direção do eixo z às translações, devido à simetria do modelo neste plano da alma do perfil metálico. Também devido à simetria, os nós da superfície destacada na Figura 3.8c foram restringidos às translações na direção do eixo x .

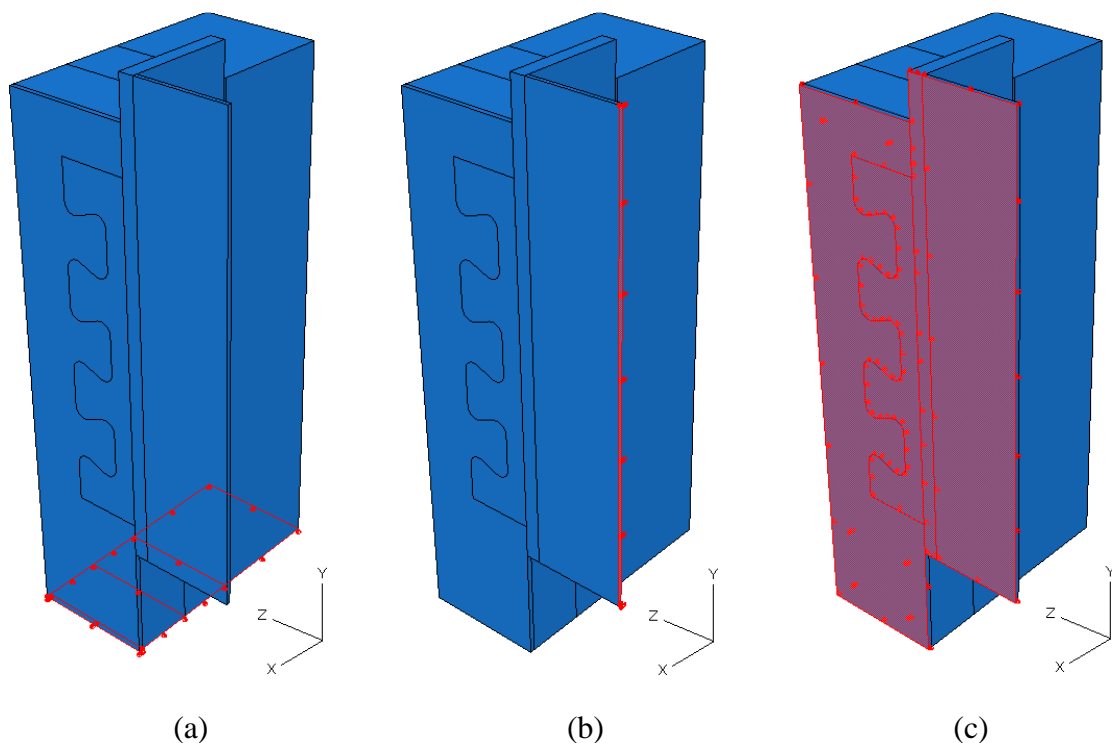


Figura 3.8 – Representação das condições de contorno utilizadas no modelo numérico.

3.5 Aplicação do carregamento

O efeito do carregamento é simulado por meio da aplicação de deslocamentos prescritos na superfície superior do perfil metálico, como pode ser visto na Figura 3.9. Ao contrário da aplicação de uma força, que pode decrescer ao longo da análise numérica, o deslocamento tende sempre a crescer em casos como o ensaio *push-out*. Sendo assim, não se faz necessária a utilização de métodos mais complexos de resolução de sistemas, como é o caso do método de Riks. Com a utilização desta estratégia, a força é medida como a reação total agindo na superfície em que foi aplicado o deslocamento prescrito, para cada incremento do mesmo.

O valor do deslocamento prescrito aplicado nas análises realizadas foi de 10 mm, porém nem todas as simulações alcançaram tal patamar, devido a algum problema de convergência numérica.

O deslizamento relativo foi medido em um dos nós da superfície inferior do perfil metálico em relação aos nós da superfície inferior da laje (base), considerando-se que esses nós não se deslocam na direção do carregamento. Este nó pode ser visto na Figura 3.10.

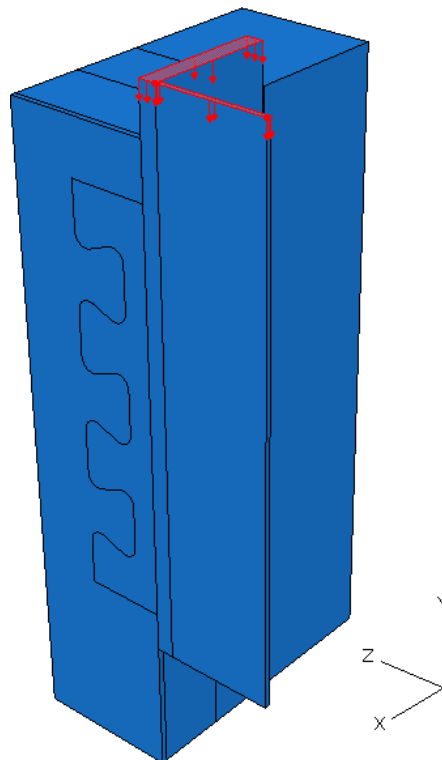


Figura 3.9 – Aplicação do carregamento no modelo numérico.

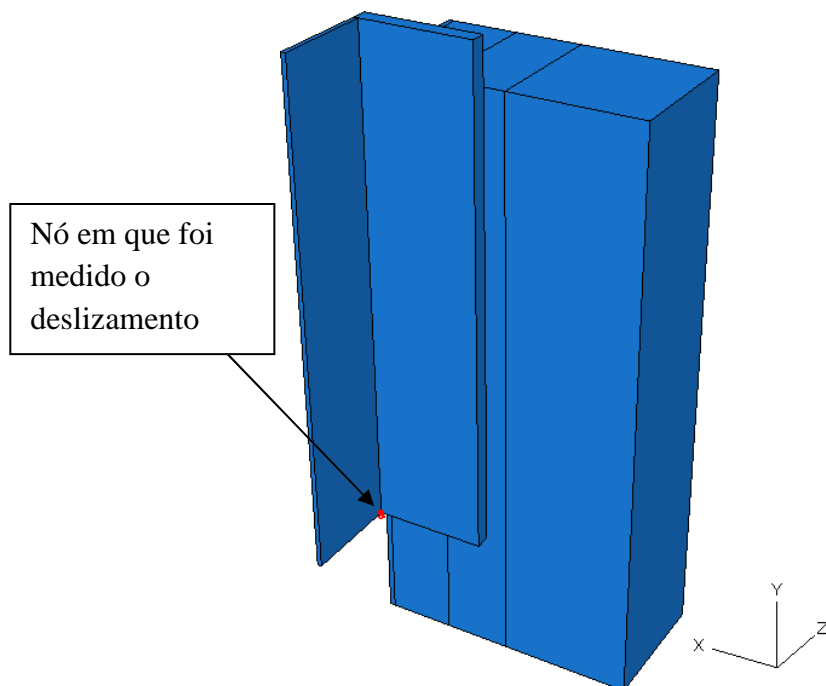


Figura 3.10 – Nó em que foi medido o deslizamento relativo entre o perfil e a laje.

3.6 Restrições e interações de contato

Para simular a ligação existente entre o conector e a laje no ensaio *push-out*, foram desenvolvidas duas estratégias de modelagem: a utilização de restrições do tipo *Tie* e a utilização de interações de contato entre superfícies.

3.6.1 Restrições do tipo *Tie*

A restrição do tipo *Tie*, disponível no ABAQUS, que significa amarrar ou vincular, permite fazer a vinculação entre duas superfícies, de modo que os nós presentes na junção entre estas superfícies possuam os mesmos deslocamentos. Em outras palavras, esta restrição permite amarrar duas superfícies que estão em contato, fazendo uma ligação rígida entre as mesmas.

Para a aplicação da restrição do tipo *Tie* é necessária a definição de duas superfícies: uma superfície chamada de *Master* e outra superfície chamada de *Slave*.

No presente trabalho, este tipo de restrição foi utilizado no contato entre o perfil metálico e o conector, como pode ser visto na Figura 3.11a. No ensaio esses dois

elementos são soldados, portanto essa restrição representa de forma bem realista essa condição. Como foi retratado anteriormente o *Tie* foi utilizado também como uma das estratégias de modelagem para simular a ligação entre o conector e laje de concreto. Esta restrição foi aplicada na interface frontal dos conectores em contato com a laje, como pode ser observado na Figura 3.11b.

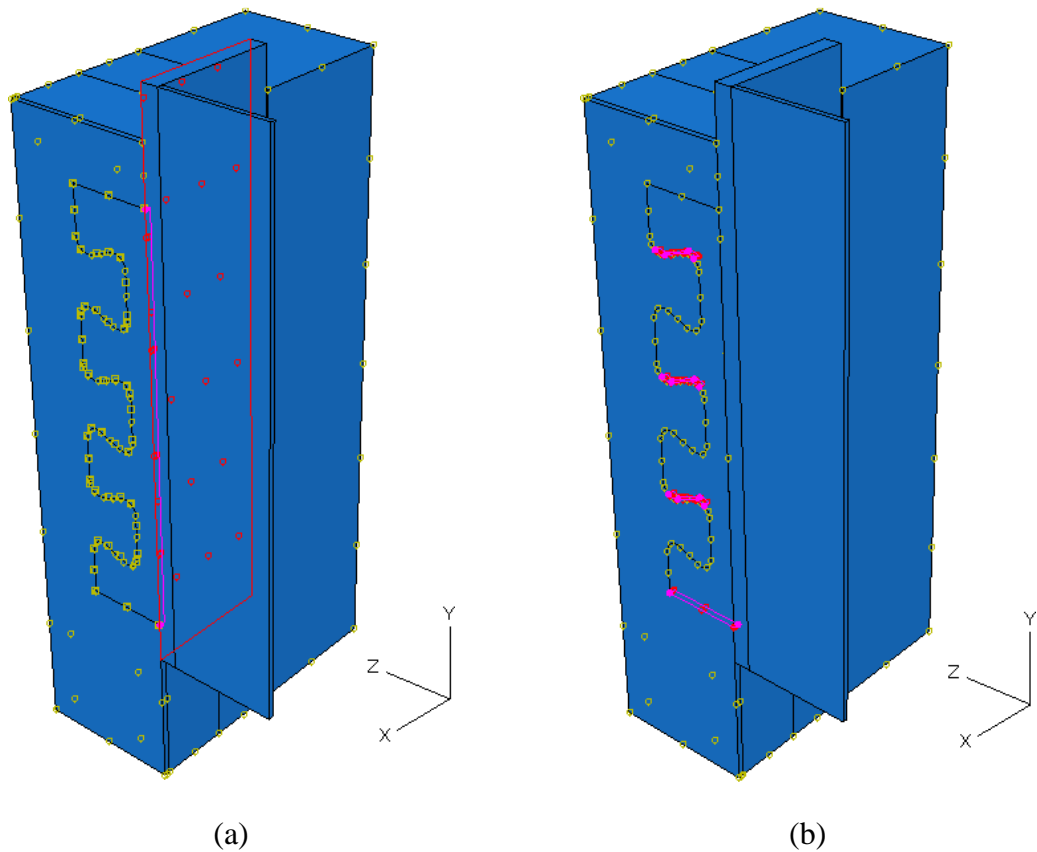


Figura 3.11 – Aplicação da restrição do tipo *Tie*: (a) entre o conector e a mesa do perfil; (b) entre a parte frontal do conector e seu contato com a laje.

3.6.2 Interação de contato entre superfícies

Como já descrito, outra estratégia para simular a ligação entre o conector e a laje de concreto é a utilização de interações de contato, através da definição de superfícies de contato, que interagem segundo propriedades definidas para as mesmas. Na Figura 3.12 estão identificadas as superfícies de contato da laje de concreto e do conector *Crestbond* utilizadas neste trabalho. Pode-se observar que todas as faces da laje de concreto que estão em contato com o conector formam a superfície de contato da laje, e o contrário também acontece com o conector, ou seja, todas as faces que estão em contato com a laje formam sua superfície de contato.

Para a aplicação deste tipo de interação também é necessário a definição de duas superfícies: uma superfície chamada de *Master* e outra superfície chamada de *Slave*.

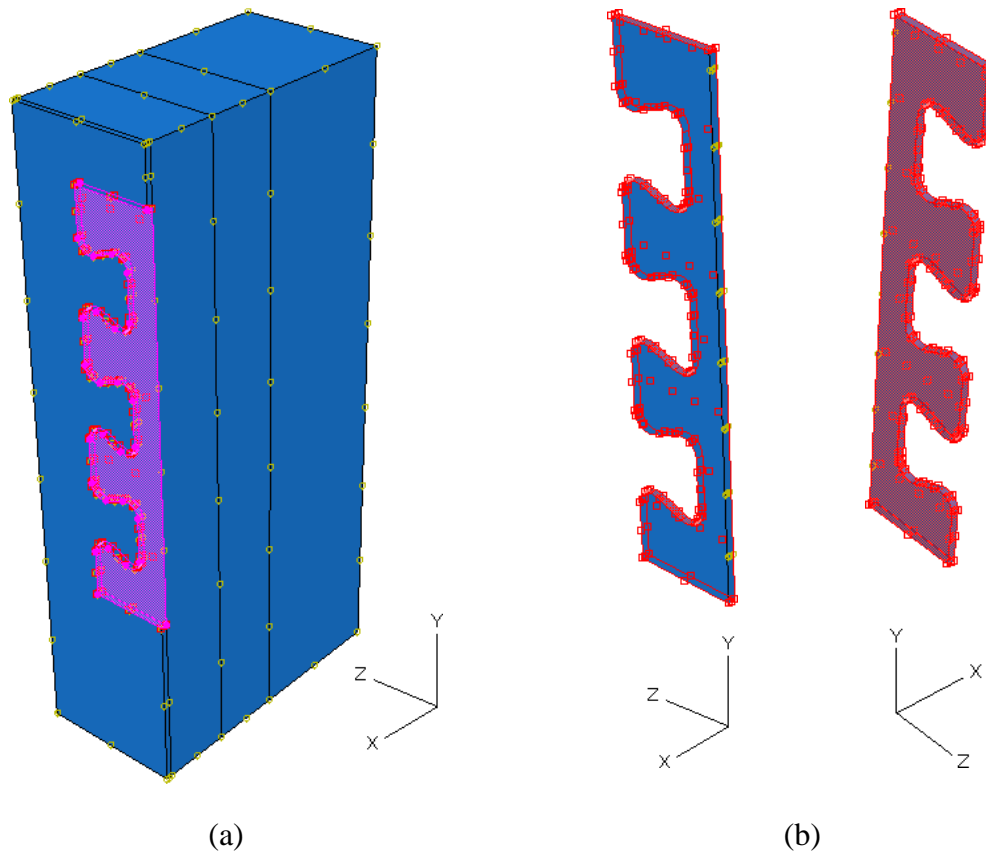


Figura 3.12 – Regiões onde foram aplicadas as interações de contato: (a) região da laje (em rosa); (b) região do conector (em vermelho).

Para a definição completa desta interação entre superfícies é necessária a definição das propriedades desse contato. Neste trabalho as propriedades do contato foram definidas através dos comportamentos normal e tangencial entre superfícies.

O comportamento normal foi assumido como do tipo *Hard*, assim denominado pelo ABAQUS. Este tipo de comportamento assume uma penetração mínima da superfície *Slave* na superfície *Master*.

O comportamento tangencial foi assumido como do tipo sem atrito, que corresponde no ABAQUS ao tipo *Frictionless*.

3.6.3 Interação entre armadura e a laje (*embedded constrain*)

A restrição do tipo *Embedded Constrain*, presente no ABAQUS, foi aplicada para a armadura e a laje de concreto, como pode ser visto na Figura 3.13. Nesta restrição, os graus de liberdade translacionais dos nós nos elementos da armadura são restringidos para valores interpolados dos correspondentes graus de liberdade dos elementos da laje de concreto. Neste tipo de interação são definidas duas regiões: uma chamada de *embedded region*, que corresponde à armadura, e outra chamada de *host region*, correspondente à laje de concreto neste caso.

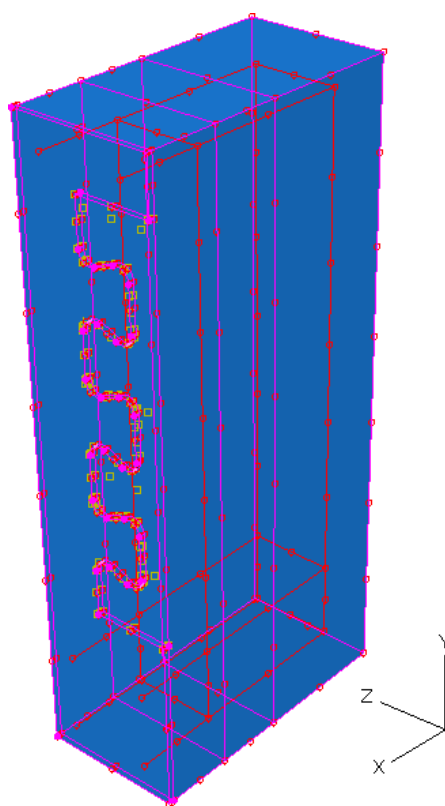


Figura 3.13 – Interação entre a armadura e a laje (*Embedded Constrain*).

3.7 Estratégias de análise

Para simular o comportamento dos conectores de cisalhamento no ensaio *push-out*, realizou-se uma análise considerando a não-linearidade material e geométrica.

3.7.1 *Análise não-linear material e geométrica*

Com a realização de uma análise não-linear material e geométrica, é possível simular o comportamento do modelo durante todas as fases do carregamento. Neste tipo de análise considera-se o comportamento dos materiais por meio dos respectivos modelos constitutivos e a influência dos deslocamentos sobre as solicitações, à medida que o carregamento é introduzido.

Como estratégia de análise, decidiu-se aplicar, ao invés de força, um deslocamento prescrito na superfície superior do perfil metálico, como descrito no item 3.5. Este deslocamento é aplicado em pequenos incrementos e o equilíbrio é obtido pelo Método de Newton-Raphson (ver item 2.6.1).

4 ANÁLISE NUMÉRICA

A análise numérica foi baseada em ensaios tipo *push-out* realizados por Veríssimo (2007) e por Oliveira (2007), utilizando-se conectores de cisalhamento do tipo *Crestbond*, sendo tomados neste trabalho três ensaios do primeiro e mais dois ensaios do segundo autor, totalizando uma análise de cinco modelos numéricos. A diferença entre os ensaios está basicamente relacionada à forma e tamanho dos conectores e à resistência do concreto. Na Tabela 4.1 apresenta-se a relação dos modelos experimentais e os respectivos modelos numéricos considerados nesta análise.

Tabela 4.1 - Modelos experimentais e numéricos utilizados na análise.

Referência	Modelo experimental	Modelo numérico
Veríssimo (2007)	A3 – Série A	A3
	B1/B2 – Série B	B1_B2
	C1 – Série C	C1
Oliveira (2007)	D5a – Série D	D5a
	D5b – Série D	D5b

4.1 Modelo A3 – Série A

4.1.1 Descrição do modelo experimental

O modelo A3 está entre os primeiros modelos ensaiados por Veríssimo (2007), fazendo parte da série A, assim denominada pelo autor. Neste modelo foi experimentado o primeiro protótipo do conector *Crestbond* no ensaio *push-out*. Este conector, denominado CR50-R10, está representado na Figura 4.1 a seguir.

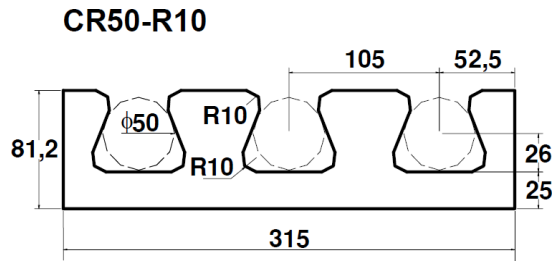


Figura 4.1 – Conector *Crestbond* utilizado no modelo A3 (VERÍSSIMO, 2007).

Na Figura 4.2 apresentam-se as características geométricas das partes componentes do modelo experimental.

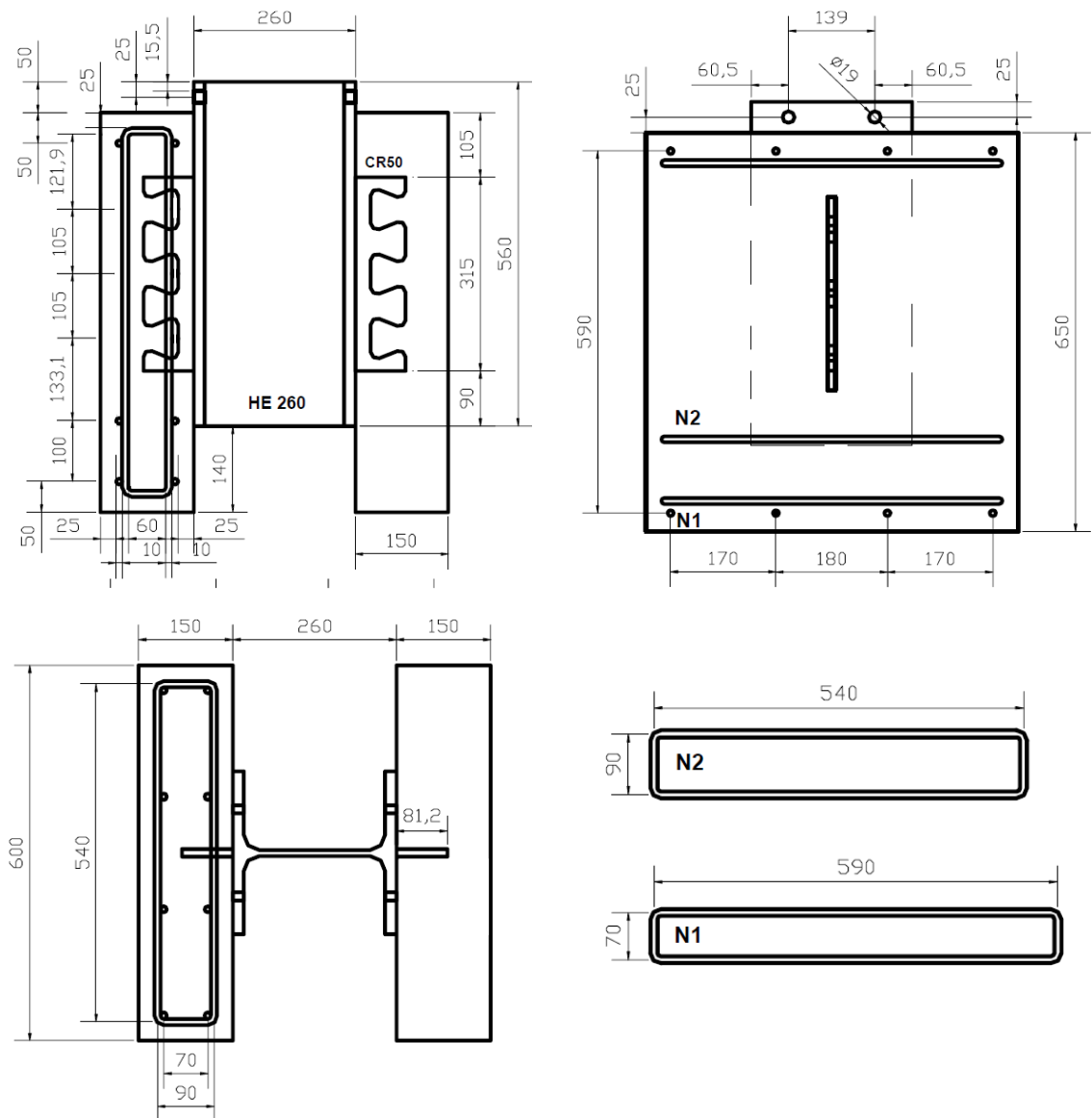


Figura 4.2 – Geometria do modelo experimental A3 (VERÍSSIMO, 2007).

Na Tabela 4.2 a seguir apresenta-se um resumo das características geométricas do modelo experimental, incluindo também características físicas das partes componentes do *push-out*.

Tabela 4.2 - Características Geométricas e Físicas do Modelo A3.

CARACTERÍSTICAS DO <i>PUSH-OUT</i>				
Características Geométricas e Físicas	fonte	Veríssimo (2007)		
	perfil	Tipo HEB 260		
		d	260	mm
		b_f	260	mm
		t_w	10	mm
		t_f	17,5	mm
		comp.	560	mm
		aço	S 275	
	f_y	324	MPa	
	laje	largura	600	mm
		comp.	650	mm
		espessura	150	mm
		f_c	33,1	MPa
	conector	comp.	315	mm
		espessura	12,5	mm
		aço	USI CIVIL 300	
		f_y	359	MPa
armadura	aço	S 500		
	f_y	500	MPa	

4.1.2 Descrição do modelo numérico

Para a montagem do modelo numérico foram tomadas todas as características apresentadas no modelo experimental. Desenvolveu-se um modelo de elementos finitos, conforme descrito no Capítulo 3, no qual foi utilizado apenas um quarto da geometria do modelo real para a análise numérica, como descrito no item 3.2.

A malha de elementos finitos do perfil de aço é composta por 400 nós, 171 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 30 mm. O conector de cisalhamento é composto por 540 nós, 209 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 10 mm. A laje de concreto é composta por 22019 nós, 19363 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 10 mm próximo ao conector. A armadura é composta por 93 nós, 100

elementos tipo T3D2, com dimensão de 30 mm próximo ao conector. Todos os elementos possuem características conforme apresentado no item 3.2.1.

Para o comportamento dos materiais admitiu-se o descrito no item 3.3, tomando-se as características apresentadas na Tabela 4.2.

Foram realizadas duas simulações para este modelo: uma utilizando como estratégia de interação entre o conector e a laje restrições do tipo *Tie* e outra utilizando interações de contato entre superfícies. O módulo de elasticidade do concreto foi tomado de acordo com a norma EN 1992-1-1:2004 (EC2). Na Tabela 4.3 estão descritas essas simulações com suas denominações.

Tabela 4.3 – Simulações numéricas realizadas com o modelo A3.

Modelo	f_c (MPa)	E_{cm} (MPa)	Referência	Ligação Laje/Conector
A3_201	33,1	31500	EC2	Restrição tipo <i>Tie</i>
A3_202	33,1	31500	EC2	Interação de Contato

A curva tensão×deformação do concreto comprimido foi descrita conforme item 3.3.2. Na Figura 4.3 está mostrada essa curva utilizada nas simulações deste modelo. Essa curva foi extrapolada além dos 3,5‰ de deformação última, de forma a se ter o último ponto com uma tensão correspondente a 50% da resistência média à compressão.

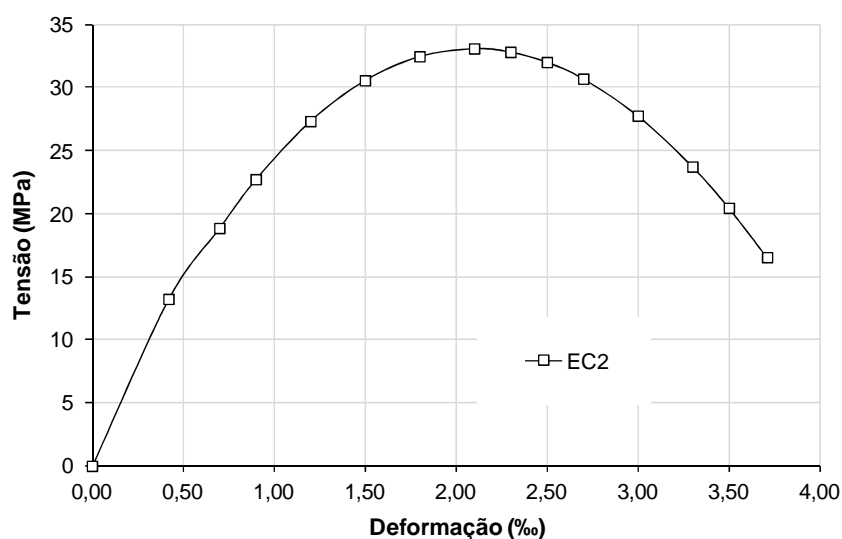


Figura 4.3 – Curva tensão×deformação do concreto comprimido utilizada no modelo A3.

4.1.3 Resultados

Na Figura 4.4 e na Figura 4.5 apresentam-se as curvas força×deslizamento relativo das simulações numéricas, juntamente com a curva do modelo experimental A3. A carga máxima obtida no ensaio foi de 338,1 kN.

De acordo com a Figura 4.4, a carga máxima obtida na simulação numérica A3_201 foi de 335,2 kN, o que representa uma diferença da ordem de -0,8 % com relação ao valor experimental.

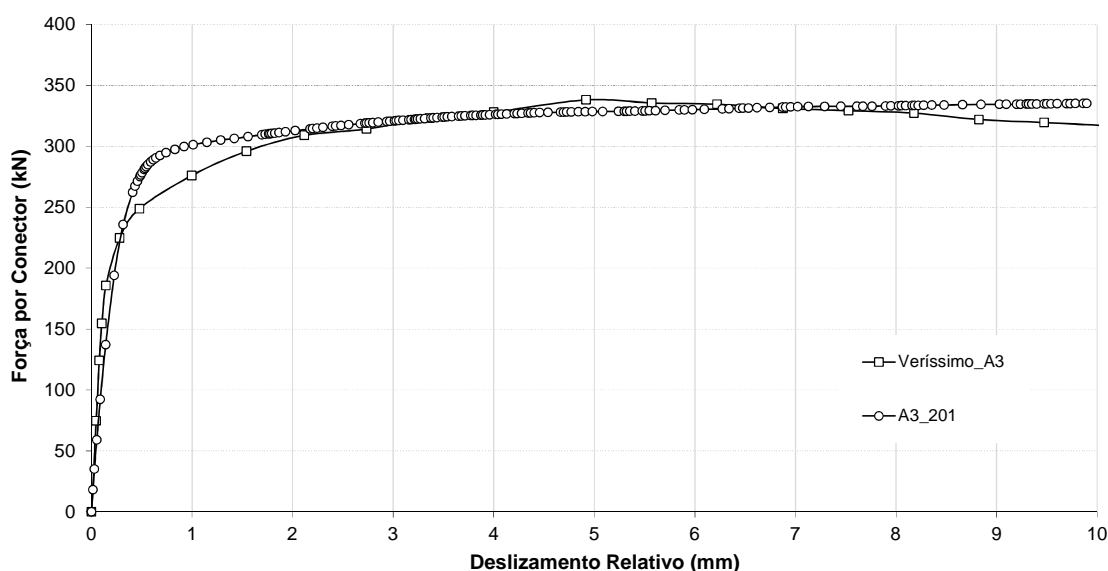


Figura 4.4 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Veríssimo A3 e A3_201.

De acordo com a Figura 4.5, a carga máxima obtida na simulação numérica A3_202 foi de 294,5 kN, o que representa uma diferença da ordem de -12,9 % com relação ao valor experimental.

Na Figura 4.6 apresenta-se a distribuição das tensões de von Mises, em MPa, para as simulações realizadas para este modelo. A simulação A3_202 refere-se àquela em que foi utilizada uma interação de contato entre superfícies para representar a ligação entre a laje e o conector e a simulação A3_201 refere-se àquela em que foi utilizada uma restrição tipo *Tie* para representar esta ligação.

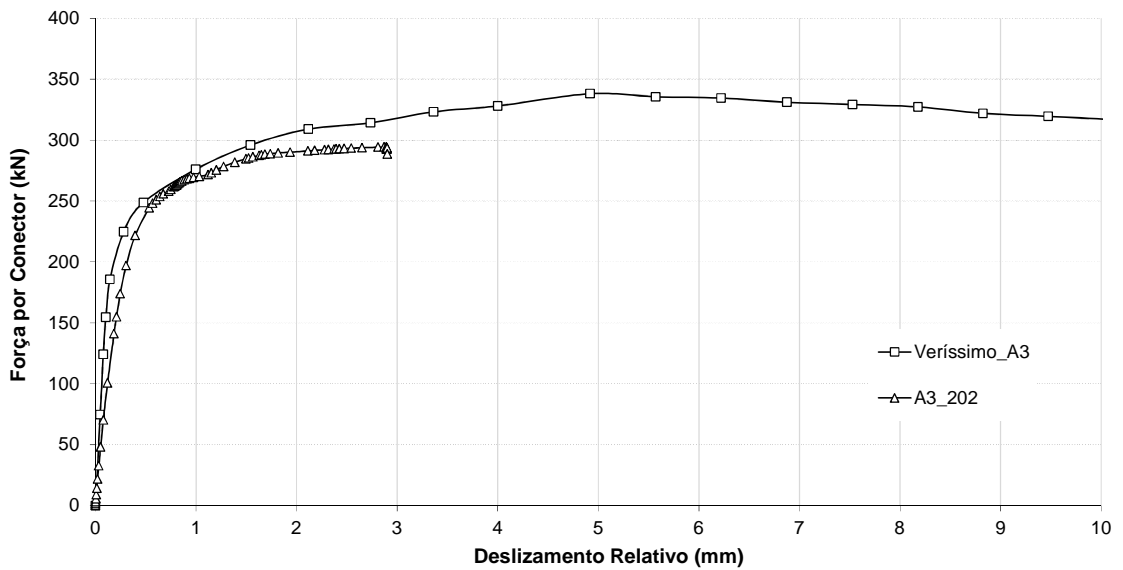


Figura 4.5 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Veríssimo A3 e A3_202.

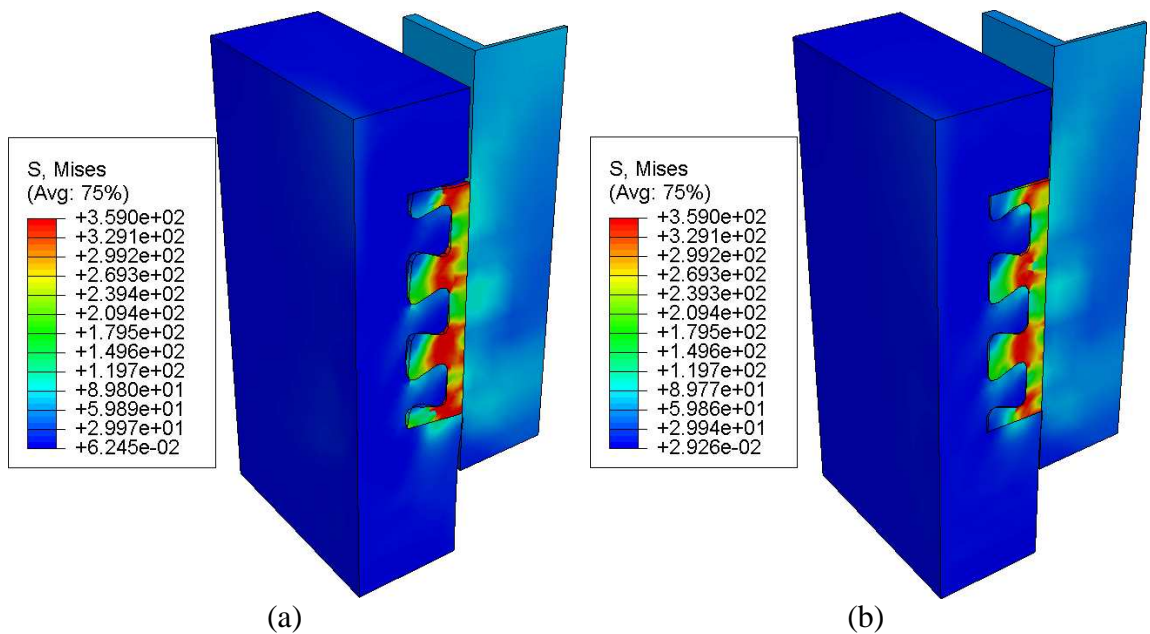


Figura 4.6 – Tensões de von Mises (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo A3: (a) A3_201 (Restrição tipo Tie); (b) A3_202 (Interação de contato).

Na Figura 4.7 e na Figura 4.8 são mostradas as deformações plásticas equivalentes na laje de concreto das simulações A3_201 e A3_202, respectivamente, ao final do processamento numérico, onde fica evidente o comportamento dos *pinos de concreto* que se formam no interior da laje. Essa deformação plástica equivalente corresponde à representação do estado de deformações tridimensionais, que ocorre em um ponto do material, em um estado uniaxial equivalente.

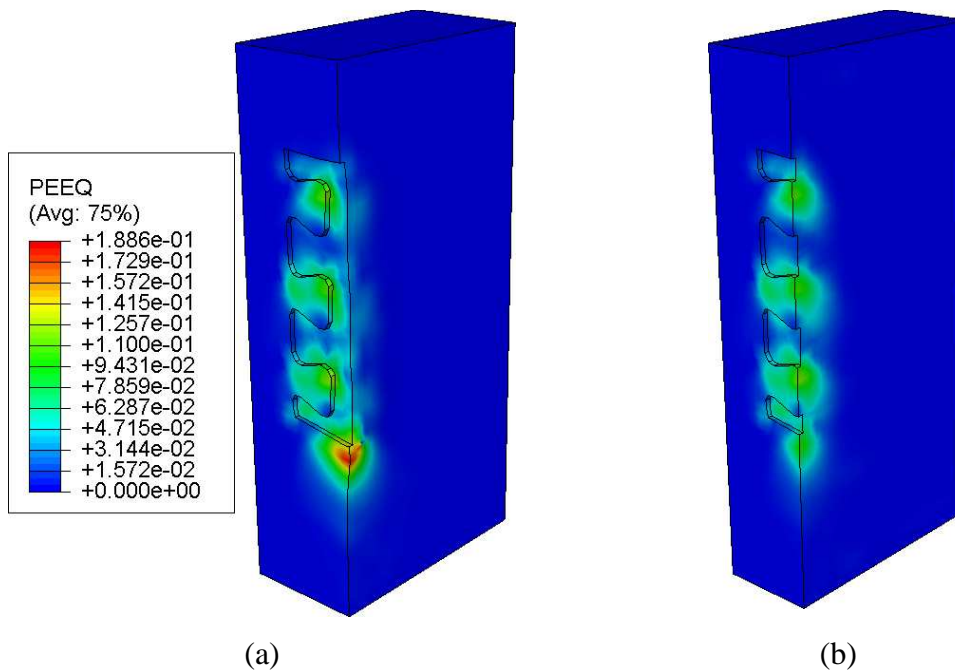


Figura 4.7 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação A3_201):
 (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.

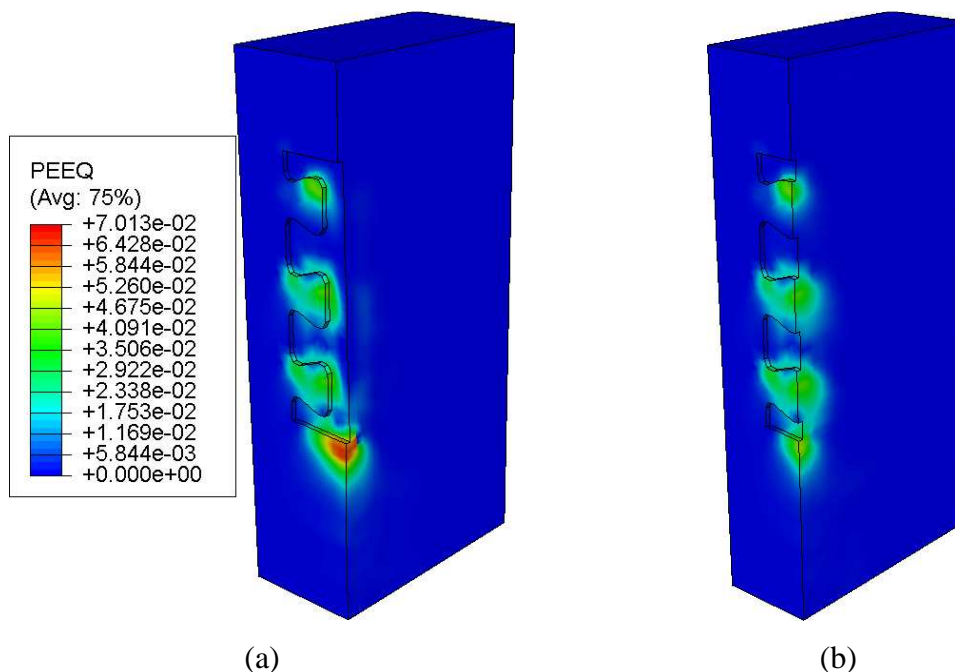


Figura 4.8 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação A3_202):
 (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.

Na Figura 4.9 estão apresentadas as tensões normais na direção do eixo y (S_{22}), em MPa, para as simulações numéricas do modelo A3, em que fica perceptível o efeito do confinamento do concreto, com as tensões atingindo altíssimos valores.

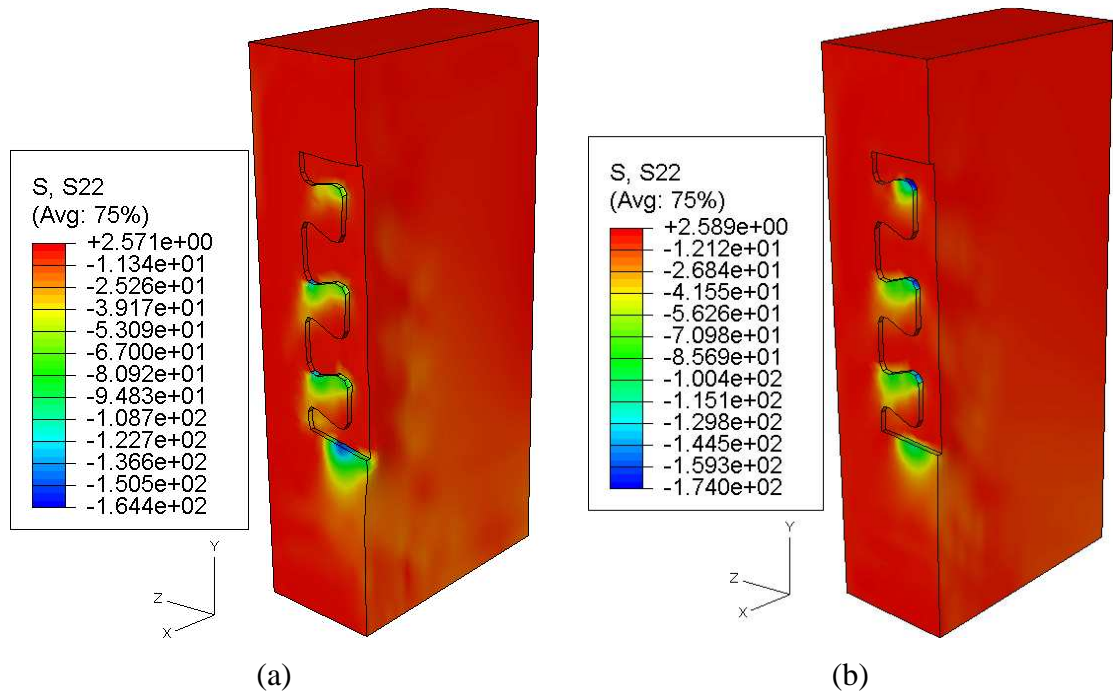


Figura 4.9 – Tensões S22 (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo A3:
(a) A3_201 (Restrição tipo Tie); (b) A3_202 (Interação de contato).

Na Figura 4.10 apresenta-se o aspecto da deformação do conector *Crestbond* ao final dos ensaios, tanto no caso do experimento, quanto na análise numérica, sendo que esta corresponde à simulação A3_201, na qual a carga máxima obtida foi a que mais se aproximou do valor experimental.

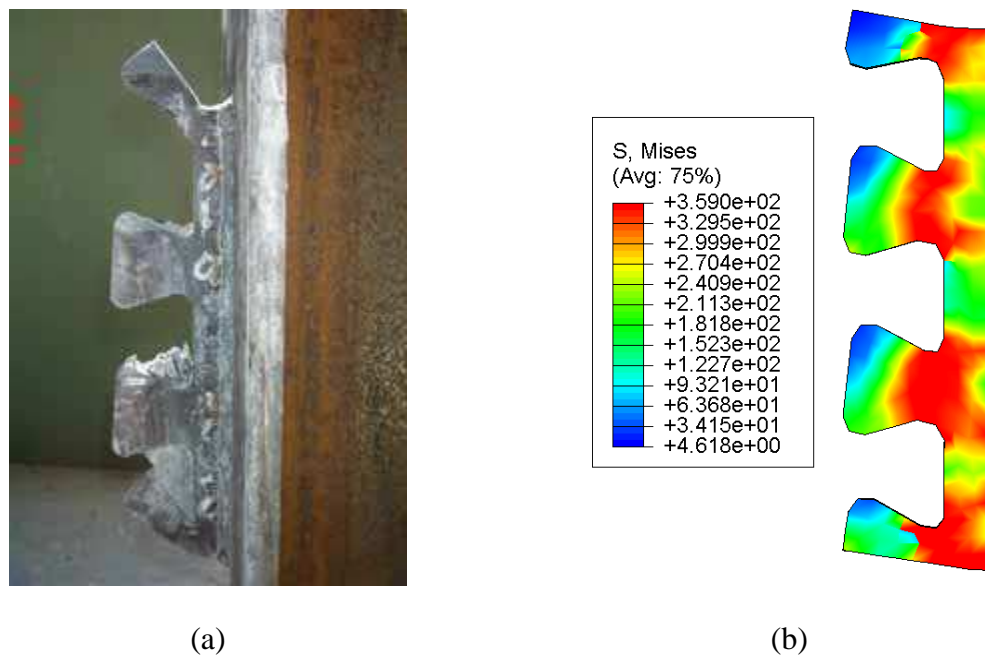


Figura 4.10 – Conector *Crestbond*: (a) aspecto da deformação no ensaio experimental;
(b) aspecto da deformação no modelo numérico (simulação A3_201).

4.1.4 Análise dos resultados

Com base na comparação dos resultados experimentais com os que foram obtidos por meio das simulações numéricas pode-se afirmar que o modelo numérico foi capaz de representar adequadamente o comportamento do conector *Crestbond* nos ensaios *push-out* em condições de colapso, o que fica evidenciado pela proximidade entre a carga máxima experimental e a numérica.

Além da proximidade entre os valores de cargas máximas, pode-se observar que as simulações numéricas apresentaram rigidez bem próxima ao observado no modelo experimental. Pode-se observar ainda, em função dos resultados obtidos, que as estratégias para simular a ligação entre o conector e a laje neste modelo numérico foram capazes de representar adequadamente o comportamento do ensaio *push-out*, apesar de a simulação na qual foram utilizadas interações de contato entre superfícies não ter atingido o deslizamento inicialmente estipulado.

Analisando-se a Figura 4.10, observa-se uma semelhança na deformação do conector entre o modelo experimental e o modelo numérico. Pode-se observar nos dois casos uma maior deformação dos dentes da extremidade do conector. O deslocamento observado na simulação numérica é menos acentuado que o exibido na foto do modelo experimental porque no ensaio o deslizamento chegou a atingir 30 mm e a laje, mesmo fissurada, exercendo esforços sobre os dentes do conector já plastificados levou a grandes deformações. Neste modelo os dentes da extremidade do conector possuem bases menores que os dentes intermediários.

4.2 Modelos B1 e B2 – Série B

4.2.1 Descrição dos modelos experimentais

Os modelos B1 e B2 fazem parte da série B ensaiada por Veríssimo (2007). Nestes modelos foi experimentado o segundo protótipo do conector de cisalhamento tipo *Crestbond*, denominado CR56b-R12, no ensaio *push-out*. A diferença deste conector para aquele do modelo A3 está no tamanho da base dos dentes das extremidades do mesmo, que neste caso possuem tamanho idêntico às bases dos dentes intermediários, como pode ser observado na Figura 4.11.

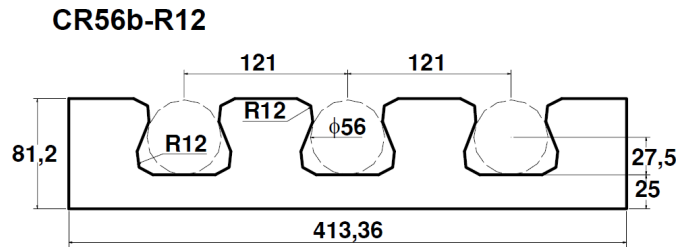


Figura 4.11 – Conector *Crestbond* utilizado nos modelos B1 e B2 (VERÍSSIMO, 2007).

Na Figura 4.12 apresentam-se as características geométricas do modelo experimental.

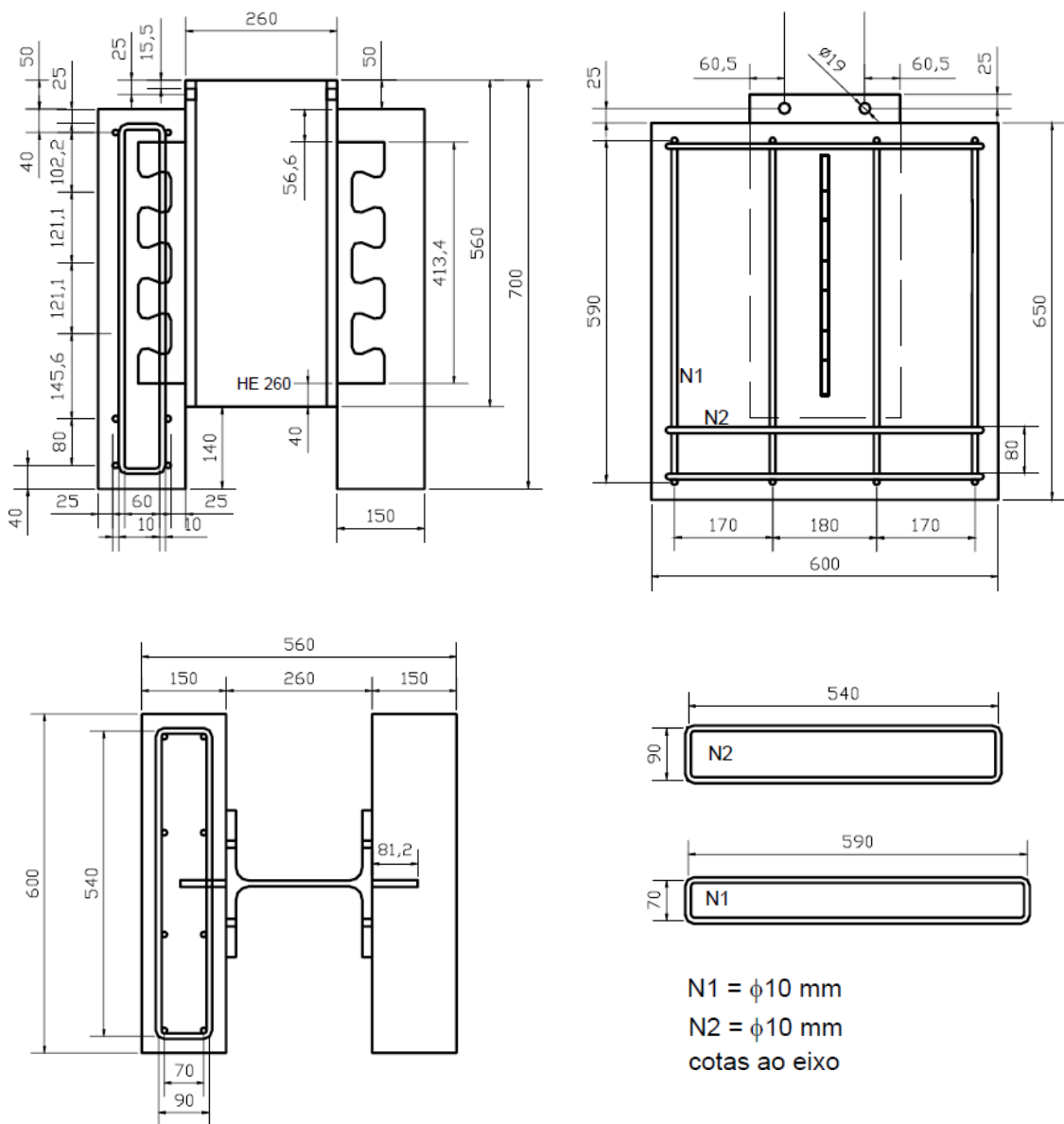


Figura 4.12 – Geometria dos modelos B1 e B2 (VERÍSSIMO, 2007).

Na Tabela 4.4 a seguir apresenta-se um resumo das características geométricas do modelo experimental, incluindo também características físicas das partes componentes do *push-out*.

Tabela 4.4 - Características Geométricas e Físicas dos Modelos B1 e B2.

CARACTERÍSTICAS DO <i>PUSH-OUT</i>				
Características Geométricas e Físicas	fonte	Veríssimo (2007)		
	perfil	Perfil HEB 260		
		d	260	mm
		b_f	260	mm
		t_w	10	mm
		t_f	17,5	mm
		comp.	560	mm
		aço	S 275	
		f_y	324	MPa
	laje	largura	600	mm
		comp.	650	mm
		espessura	150	mm
		f_c	26,6	MPa
	conector	comp.	413,36	mm
		espessura	12,5	mm
		Aço	S 275 JR	
		f_y	324	MPa
	armadura	Aço	S 500	
f_y		500	MPa	

4.2.2 Descrição do modelo numérico

Para a montagem do modelo numérico foram tomadas todas as características apresentadas no modelo experimental. Desenvolveu-se um modelo de elementos finitos, conforme descrito no Capítulo 3, no qual foi utilizado apenas um quarto da geometria do modelo real para a análise numérica, como descrito no item 3.2.

A malha de elementos finitos do perfil de aço é composta por 400 nós, 171 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 30 mm. O conector de cisalhamento é composto por 646 nós, 258 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 10 mm. A laje de concreto é composta por 20793 nós, 18225 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 10 mm em torno do conector. A armadura é composta por 93 nós,

100 elementos tipo T3D2, com dimensão de 30 mm próximo ao conector. Todos os elementos possuem características conforme apresentado no item 3.2.1.

Para o comportamento dos materiais admitiu-se o descrito no item 3.3, tomando-se as características apresentadas na Tabela 4.4.

Foram realizadas duas simulações para este modelo: uma utilizando como estratégia de interação entre o conector e a laje restrições do tipo *Tie* e outra utilizando interações de contato entre superfícies. O módulo de elasticidade do concreto foi tomado de acordo com a norma EN 1992-1-1:2004 (EC2). Na Tabela 4.5 estão descritas essas simulações com suas denominações.

Tabela 4.5 – Simulações numéricas realizadas com o modelo B1_B2.

Simulação	f_c (MPa)	E_{cm} (MPa)	Referência	Ligação Laje/Conector
B1_B2_201	26,6	29500	EC2	Restrição tipo <i>Tie</i>
B1_B2_202	26,6	29500	EC2	Interação de Contato

A curva tensão×deformação do concreto comprimido foi descrita conforme item 3.3.2. Na Figura 4.13 está mostrada essa curva utilizada nas simulações deste modelo. Essa curva foi extrapolada além dos 3,5‰ de deformação última, de forma a se ter o último ponto com uma tensão correspondente a 25% da resistência média à compressão.

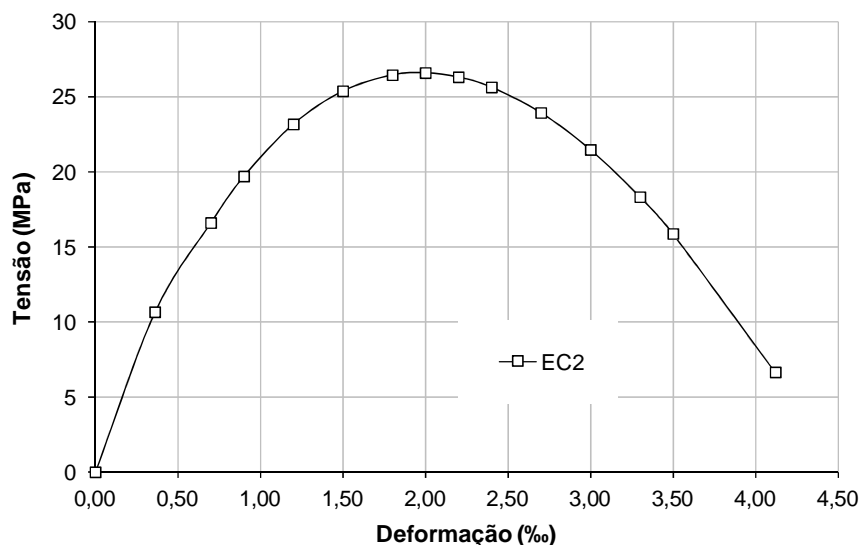


Figura 4.13 – Curva tensão×deformação do concreto comprimido utilizada no modelo B1_B2.

4.2.3 Resultados

Na Figura 4.14 e na Figura 4.15 apresentam-se as curvas força×deslizamento relativo das simulações numéricas, juntamente com as curvas dos modelos experimentais B1 e B2. A carga máxima obtida no ensaio foi de 306,5 kN.

De acordo com a Figura 4.14, a carga máxima obtida na simulação numérica B1_B2_201 foi de 324,6 kN, o que representa uma diferença da ordem de 5,9 % com relação ao valor experimental.

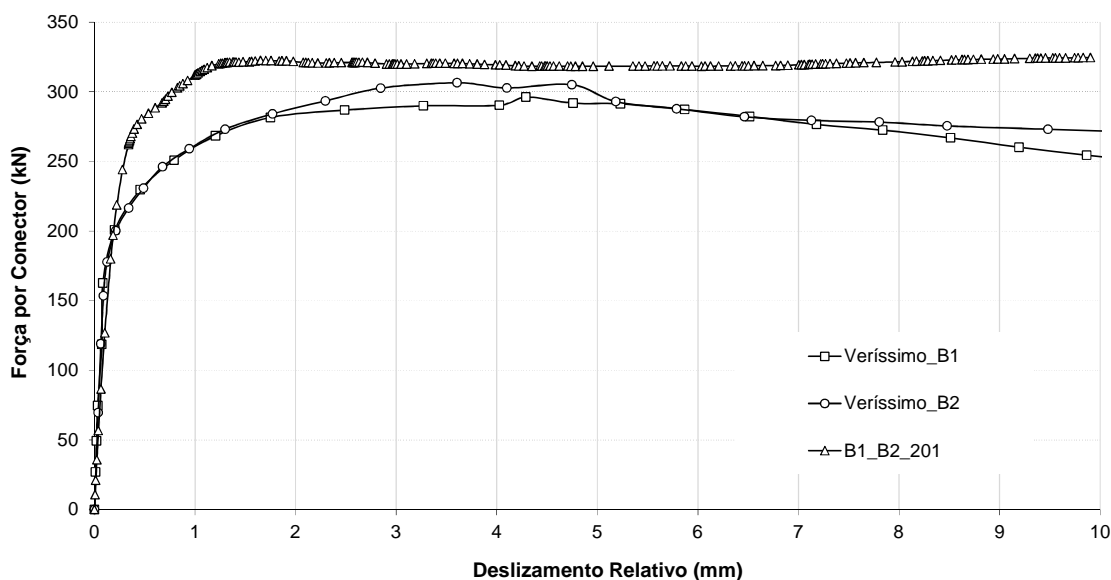


Figura 4.14 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Veríssimo B1 e B2 e B1_B2_201.

De acordo com a Figura 4.15, a carga máxima obtida na simulação numérica B1_B2_202 foi de 312,6 kN, o que representa uma diferença da ordem de 2,0 % com relação ao valor experimental.

Na Figura 4.16 apresenta-se a distribuição das tensões de von Mises, em MPa, para as simulações numéricas realizadas para este modelo. A simulação B1_B2_202 refere-se àquela em que foi utilizada uma interação de contato entre superfícies para representar a ligação entre a laje e o conector e a simulação B1_B2_201 refere-se àquela em que foi utilizada uma restrição tipo *Tie* para representar esta ligação.

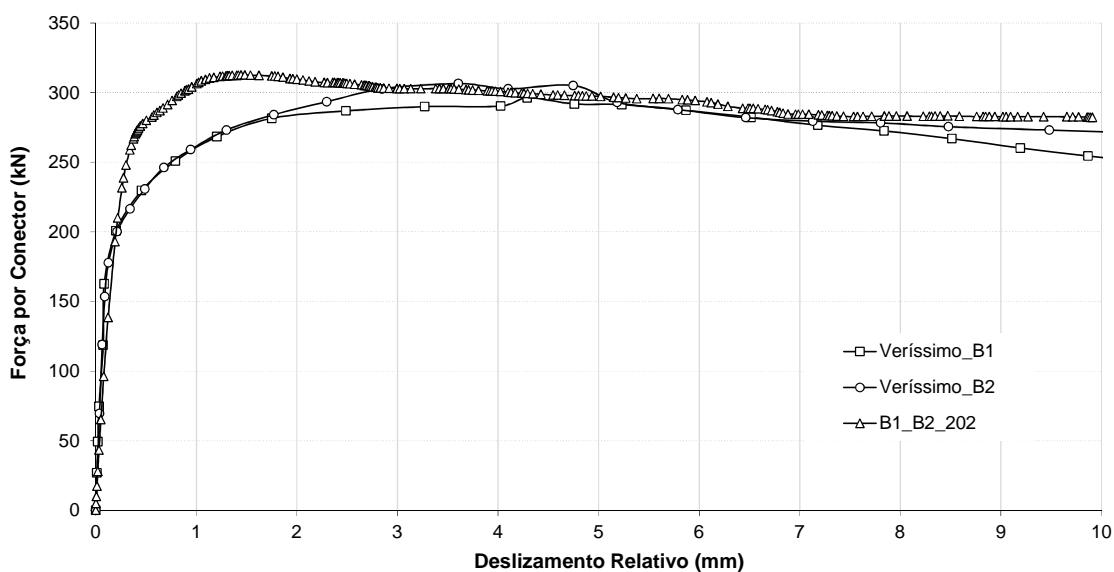


Figura 4.15 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Veríssimo B1 e B2 e B1_B2_202.

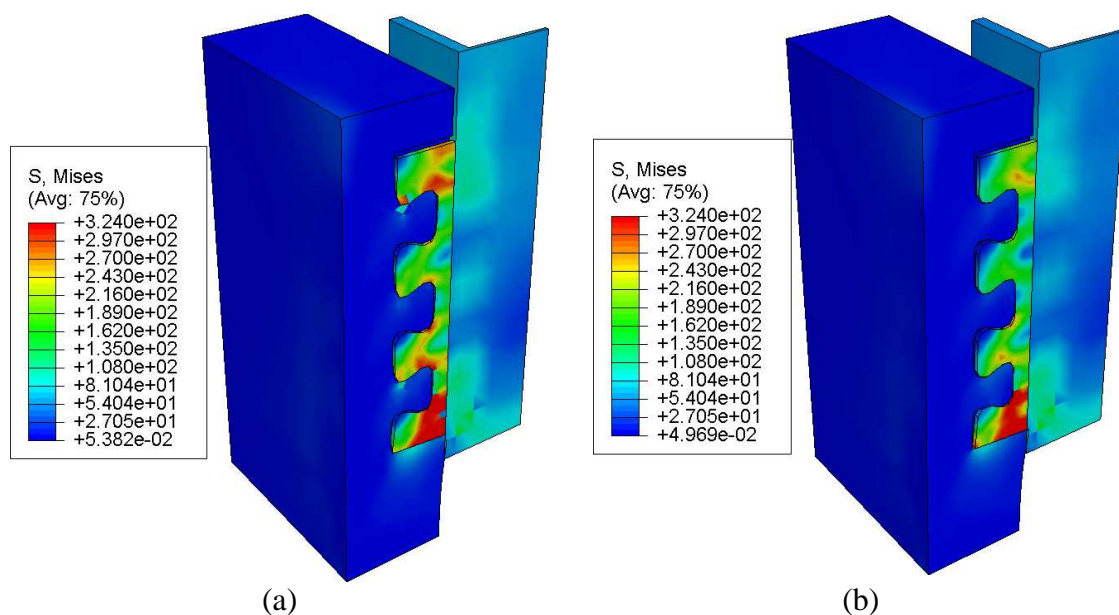


Figura 4.16 – Tensões de von Mises (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo B1_B2: (a) B1_B2_201 (Restrição tipo Tie); (b) B1_B2_202 (Interação de contato).

Na Figura 4.17 e na Figura 4.18 são mostradas as deformações plásticas equivalentes na laje de concreto das simulações B1_B2_201 e B1_B2_202, respectivamente, ao final do processamento numérico, onde fica evidente o comportamento dos *pinos de concreto* que se formam no interior da laje.

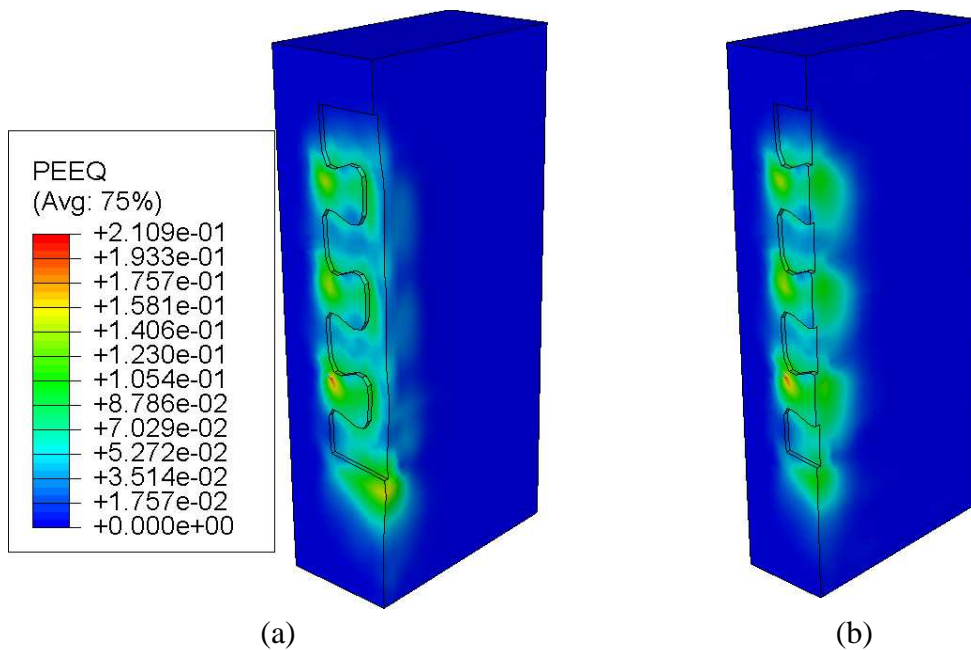


Figura 4.17 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação B1_B2_201):
(a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.

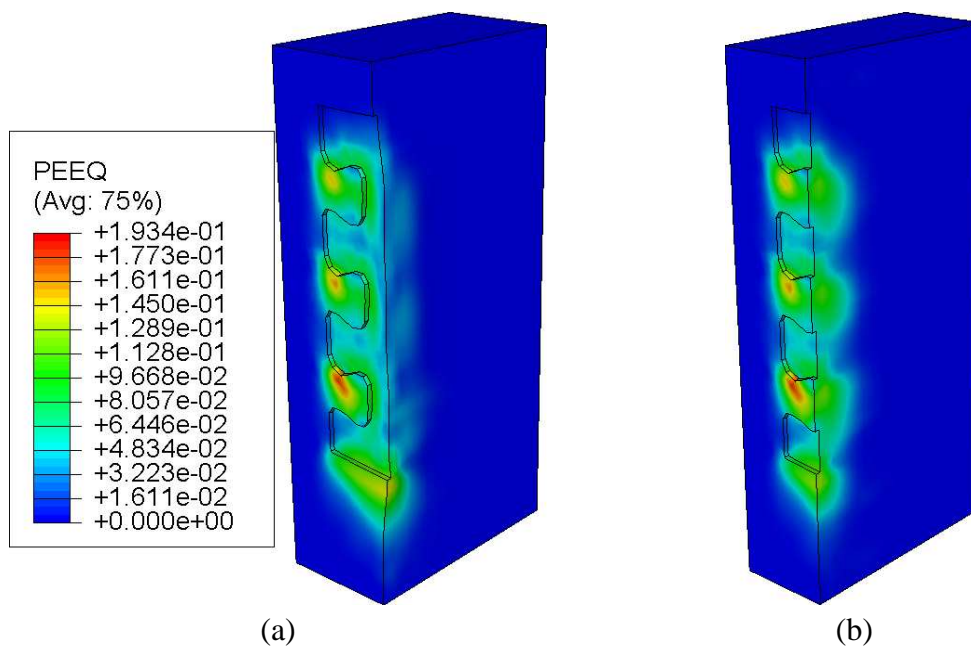


Figura 4.18 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação B1_B2_202):
(a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.

Na Figura 4.19 estão apresentadas as tensões normais na direção do eixo y (S_{22}), em MPa, para as simulações numéricas do modelo B1_B2, em que fica perceptível o efeito do confinamento do concreto, com as tensões atingindo altíssimos valores.

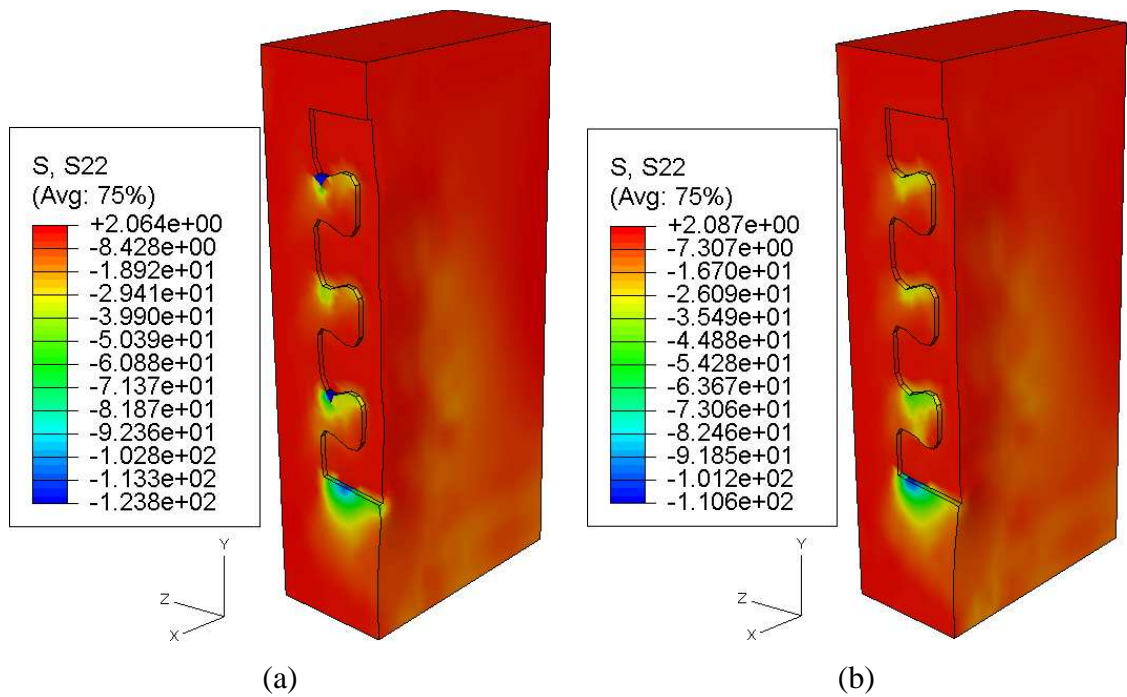


Figura 4.19 – Tensões S22 (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo B1_B2:
 (a) B1_B2_201 (Restrição tipo *Tie*); (b) B1_B2_202 (Interação de contato).

Na Figura 4.20 apresenta-se o aspecto da deformação dos conectores *Crestbond* ao final dos ensaios e da análise numérica, sendo esta correspondente à simulação B1_B2_202, na qual a carga máxima obtida foi a que mais se aproximou do valor experimental.

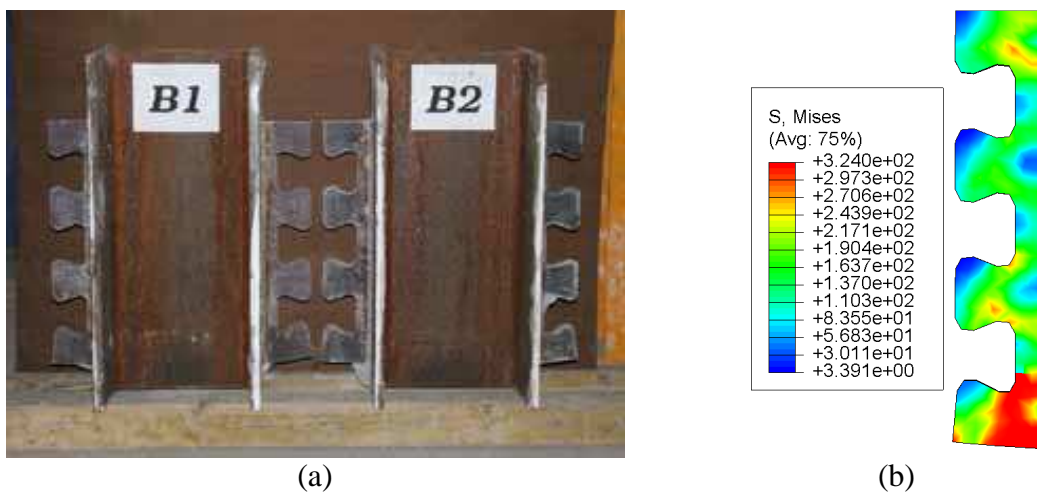


Figura 4.20 – Conector *Crestbond*: (a) aspecto da deformação nos ensaios;
 (b) aspecto da deformação no modelo numérico (simulação B1_B2_202).

4.2.4 Análise dos resultados

Com base na comparação dos resultados experimentais com os que foram obtidos por meio das simulações numéricas, pode-se afirmar que o modelo numérico foi capaz de representar adequadamente o comportamento do conector *Crestbond* nos ensaios *push-out* em condições de colapso, o que fica evidenciado pela proximidade entre a carga máxima experimental e a numérica.

Além da proximidade entre os valores de cargas máximas obtidos, pode-se observar que as simulações numéricas apresentaram rigidez bem próxima ao observado no modelo experimental.

Pode-se observar ainda, em função dos resultados obtidos, que as estratégias para simular a ligação entre o conector e a laje neste modelo numérico foram capazes de representar adequadamente o comportamento do ensaio *push-out*.

Analisando-se a Figura 4.20, observa-se uma grande semelhança na deformação do conector entre o modelo experimental e o modelo numérico. Pode-se observar nos dois casos uma maior deformação do dente da extremidade inferior do conector, mesmo com o nível de deslizamento da simulação numérica não sendo o mesmo do modelo experimental.

4.3 Modelo C1 – Série C

4.3.1 Descrição do modelo experimental

O modelo C1 faz parte da série C ensaiada por Veríssimo (2007). Neste modelo foi experimentado também o segundo protótipo do conector de cisalhamento tipo *Crestbond* no ensaio *push-out*, ou seja, o conector é o mesmo descrito nos modelos B1 e B2. A diferença deste modelo para o B1_B2 é basicamente a resistência à compressão do concreto, que neste caso é bem superior à daquele.

As características geométricas do modelo experimental C1 são as mesmas dos modelos B1 e B2, como apresentado na Figura 4.12, mostrada anteriormente no item 4.2.1.

Na Tabela 4.6 a seguir apresenta-se um resumo das características geométricas do modelo experimental, incluindo também características físicas das partes componentes do *push-out*.

Tabela 4.6 – Características Geométricas e Físicas do Modelo C1.

CARACTERÍSTICAS DO <i>PUSH-OUT</i>				
Características Geométricas e Físicas	fonte	Veríssimo (2007)		
	perfil	Perfil HEB 260		
		d	260	mm
		b_f	260	mm
		t_w	10	mm
		t_f	17,5	mm
		comp.	560	mm
		aço	S 275	
		f_y	324	MPa
	laje	largura	600	mm
		comp.	650	mm
		espessura	150	mm
		f_c	46,9	MPa
	conector	comp.	413,36	mm
		espessura	12,5	mm
		aço	S 275 JR	
		f_y	324	MPa
	armadura	aço	S 500	
f_y		500	MPa	

4.3.2 Descrição do modelo numérico

Para a montagem do modelo numérico foram tomadas todas as características apresentadas no modelo experimental. Desenvolveu-se um modelo de elementos finitos, conforme descrito no Capítulo 3, no qual foi utilizado apenas um quarto da geometria do modelo real para a análise numérica, como descrito no item 3.2.

A malha de elementos finitos do perfil de aço é composta por 171 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 30 mm, com 400 nós. O conector de cisalhamento é composto por 258 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 10 mm, com 646 nós. A laje de concreto é composta por 18225 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 10 mm em torno do conector, com 20793 nós. A armadura é composta por

100 elementos tipo T3D2, com dimensão de 30 mm próximo ao conector, com 93 nós. Todos os elementos possuem características conforme apresentado no item 3.2.1.

Para o comportamento dos materiais admitiu-se o descrito no item 3.3, tomando-se as características apresentadas na Tabela 4.6.

Foram realizadas duas simulações para este modelo: uma utilizando como estratégia de interação entre o conector e a laje restrições do tipo *Tie*, e outra utilizando interações de contato entre superfícies. O módulo de elasticidade do concreto foi tomado de acordo com a norma EN 1992-1-1:2004 (EC2). Na Tabela 4.7 estão descritas essas simulações com suas denominações.

Tabela 4.7 – Simulações numéricas realizadas com o modelo C1.

Modelo	f_c (MPa)	E_{cm} (MPa)	Referência	Ligação Laje/Conector
C1_201	46,9	34976	EC2	Restrição tipo <i>Tie</i>
C1_202	46,9	34976	EC2	Interação de Contato

A curva tensão×deformação do concreto comprimido foi descrita conforme o item 3.3.2. Na Figura 4.21 está mostrada a curva utilizada nas simulações deste modelo. Essa curva foi extrapolada além dos 3,5‰ de deformação última, de forma a se ter o último ponto com uma tensão correspondente a 10% da resistência média à compressão.

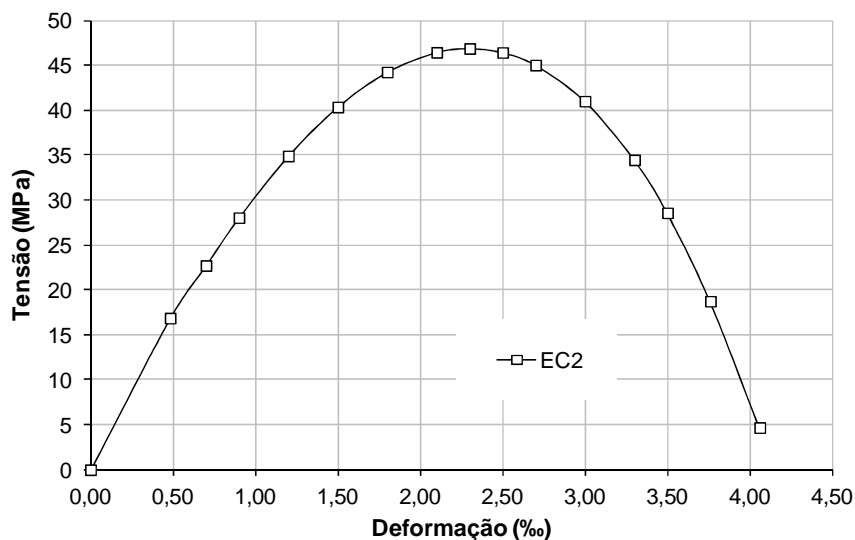


Figura 4.21 – Curva tensão×deformação do concreto comprimido utilizada no modelo C1.

4.3.3 Resultados

Na Figura 4.22 e na Figura 4.23 apresentam-se as curvas força×deslizamento relativo das simulações numéricas, juntamente com a curva do modelo experimental C1. A carga máxima obtida no ensaio foi de 361,3 kN.

De acordo com a Figura 4.22, a carga máxima obtida na simulação numérica C1_201 foi de 407,7 kN, o que representa uma diferença da ordem de 12,8 % com relação ao valor experimental.

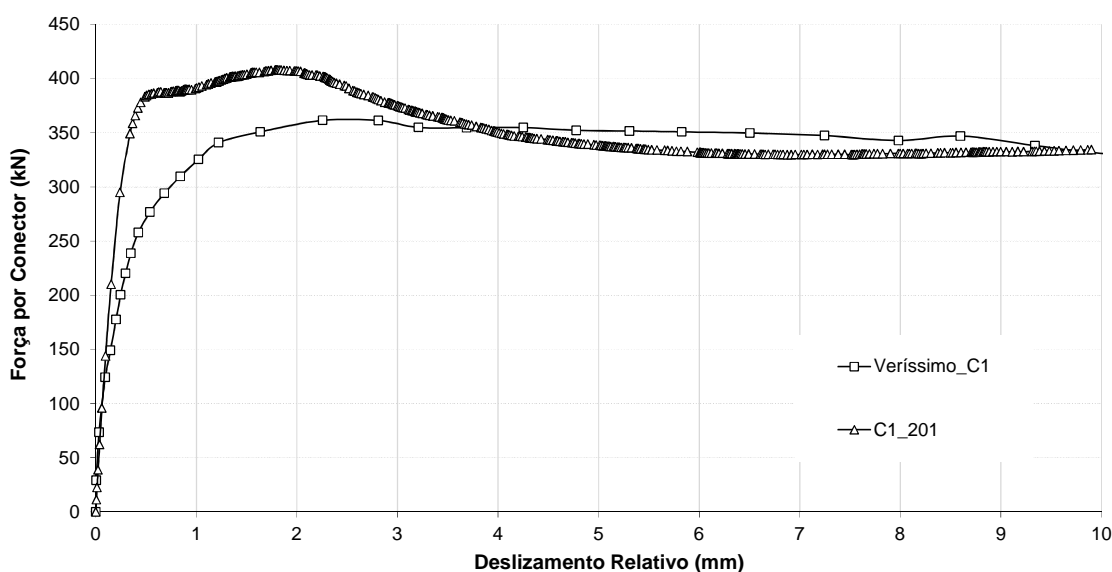


Figura 4.22 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Veríssimo C1 e C1_201.

De acordo com a Figura 4.23, a carga máxima obtida na simulação numérica C1_202 foi de 396,7 kN, o que representa uma diferença da ordem de 9,8 % com relação ao valor experimental.

Na Figura 4.24 apresenta-se a distribuição das tensões de von Mises, em MPa, para as simulações realizadas para este modelo. A simulação C1_202 refere-se àquela em que foi utilizada uma interação de contato entre superfícies para representar a ligação entre a laje e o conector e a simulação C1_201 refere-se àquela em que foi utilizada uma restrição tipo *Tie* para representar esta ligação.

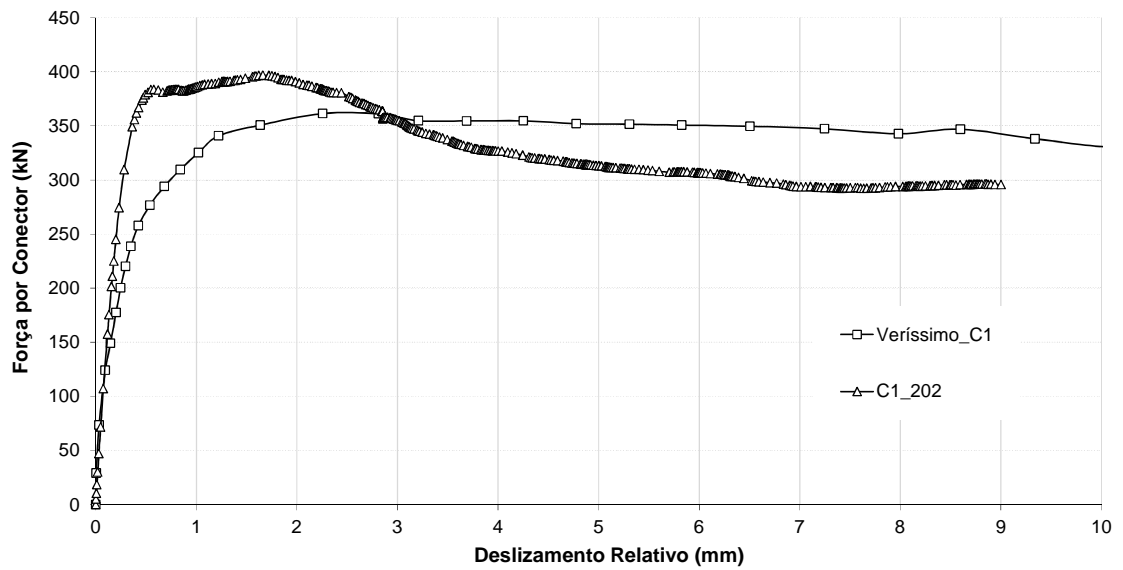


Figura 4.23 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Veríssimo C1 e C1_202.

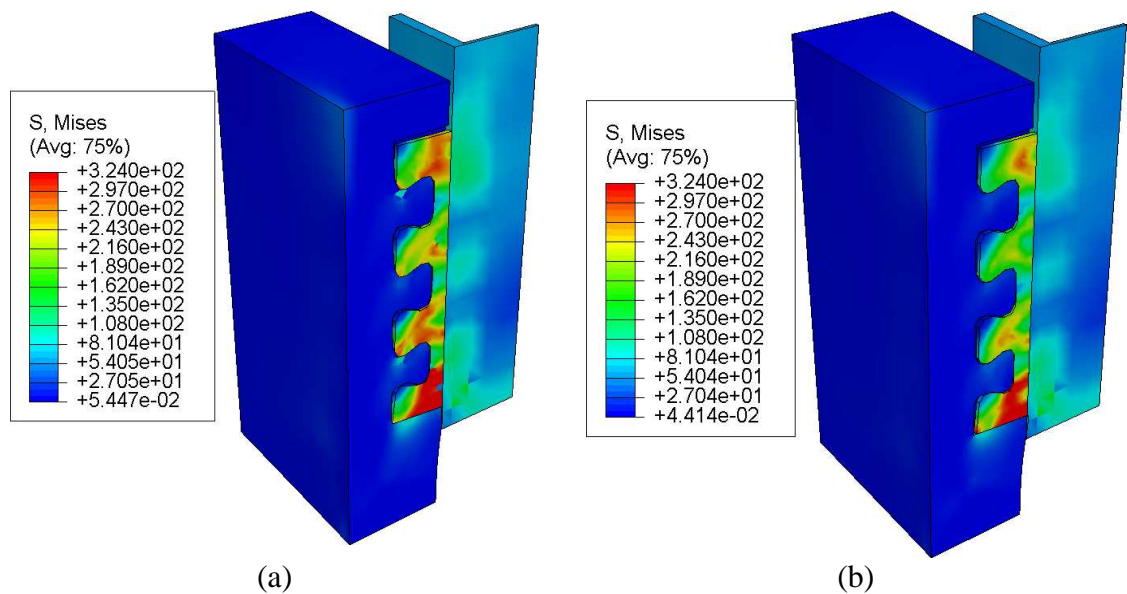


Figura 4.24 – Tensões de von Mises (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo C1: (a) C1_201 (Restrição tipo Tie); (b) C1_202 (Interação de contato).

Na Figura 4.25 e na Figura 4.26 são mostradas as deformações plásticas equivalentes na laje de concreto das simulações C1_201 e C1_202, respectivamente, ao final do processamento numérico, onde fica evidente o comportamento dos *pinos de concreto* que se formam no interior da laje.

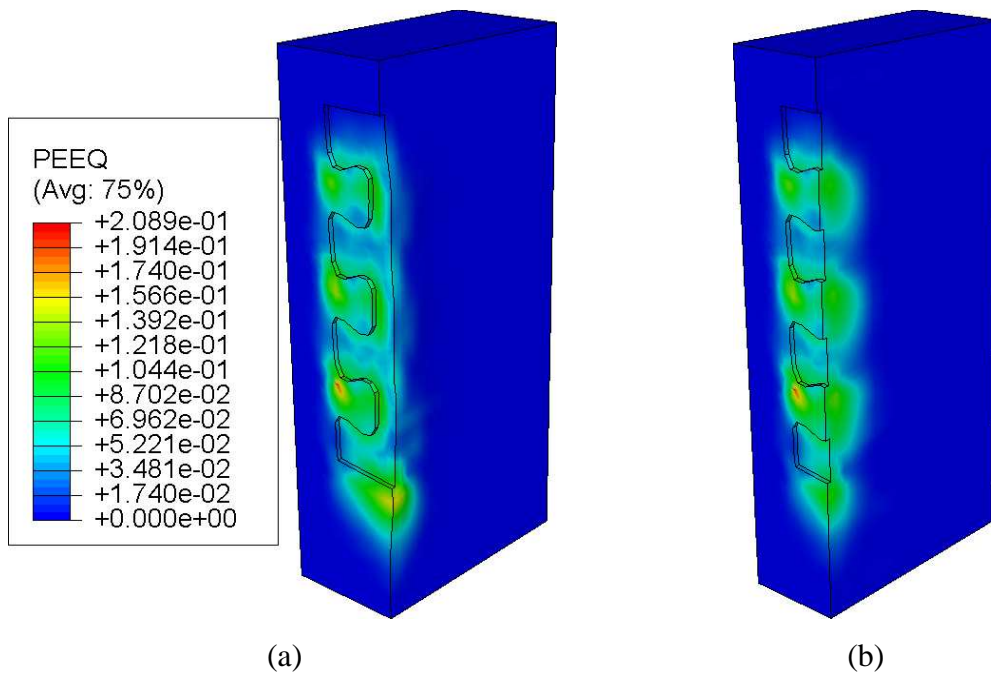


Figura 4.25 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação C1_201):
 (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.

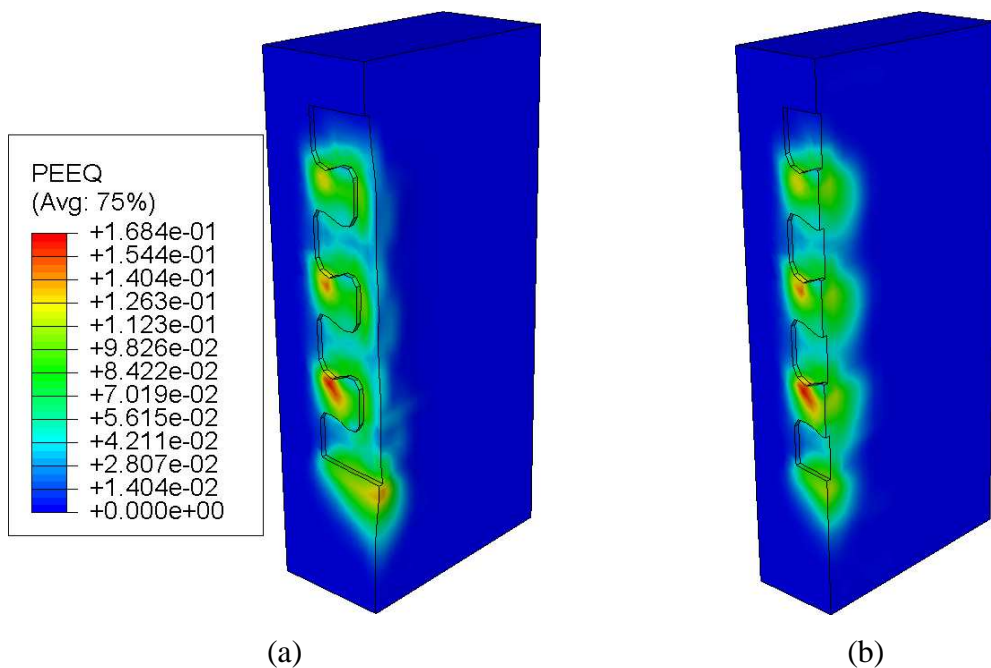


Figura 4.26 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação C1_202):
 (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.

Na Figura 4.27 estão apresentadas as tensões normais na direção do eixo y (S_{22}), em MPa, para as simulações numéricas do modelo C1, em que fica perceptível o efeito do confinamento do concreto, com as tensões atingindo valores superiores a 100 MPa.

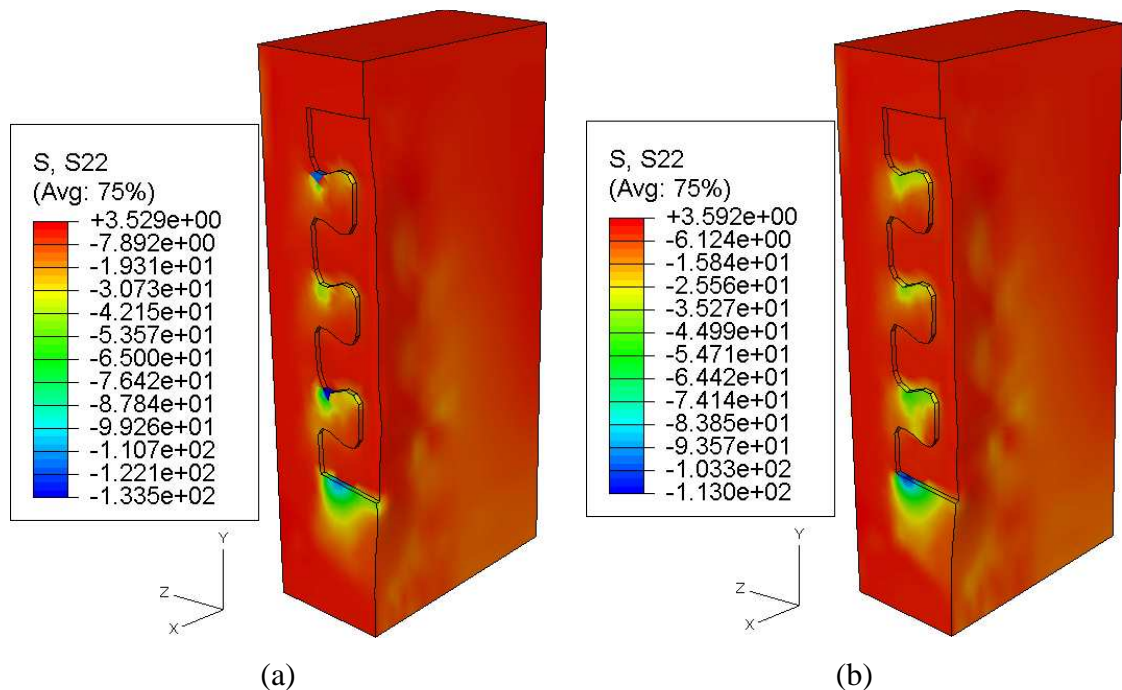


Figura 4.27 – Tensões S22 (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo C1: (a) C1_201 (Restrição tipo *Tie*); (b) C1_202 (Interação de contato).

Na Figura 4.28 apresenta-se o aspecto da deformação dos conectores *Crestbond* ao final dos ensaios, tanto no caso do experimento, quanto na análise numérica, sendo esta correspondente à simulação C1_202.

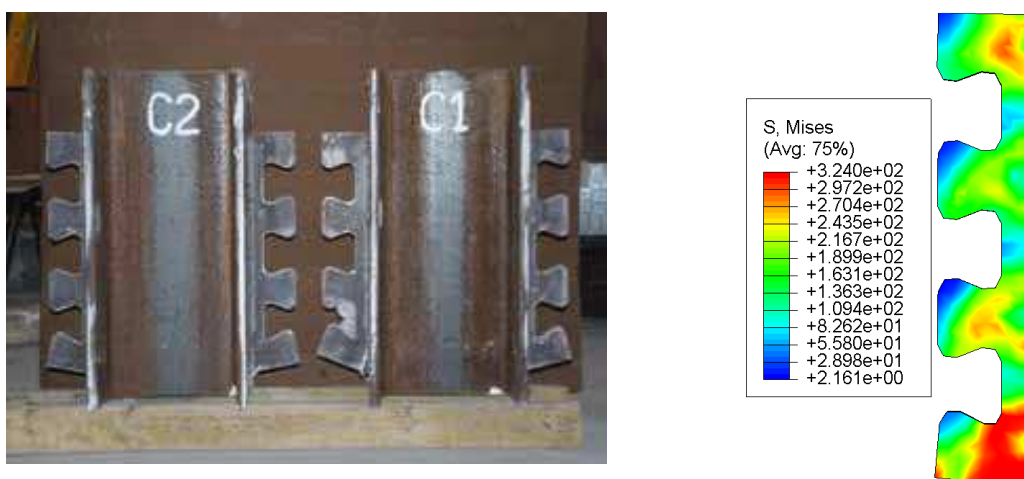


Figura 4.28 – Conector *Crestbond*: (a) aspecto da deformação no ensaio experimental; (b) aspecto da deformação no modelo numérico (simulação C1_202).

4.3.4 Análise dos resultados

Com base na comparação dos resultados experimentais com os que foram obtidos por meio das simulações numéricas pode-se afirmar que o modelo numérico foi capaz de

representar adequadamente o comportamento do conector *Crestbond* nos ensaios *push-out* em condições de colapso, o que fica evidenciado pela proximidade entre a carga máxima experimental e a numérica.

Apesar da proximidade entre os valores das cargas máximas obtidas experimentalmente e numericamente, pode-se observar que as simulações numéricas apresentaram rigidez próxima ao observado no modelo experimental até cerca de 40% da carga real. Acima deste patamar, a rigidez das simulações numéricas apresentou valor superior ao experimental, principalmente no início do carregamento, até as análises atingirem um deslizamento relativo próximo de 0,5 mm.

Pode-se observar ainda, em função dos resultados obtidos, que as estratégias para simular a ligação entre o conector e a laje neste modelo numérico apresentaram valores muito próximos, diferentemente dos modelos anteriores. De qualquer forma, estas estratégias foram capazes de representar adequadamente o comportamento do ensaio *push-out*, principalmente no que se refere à carga máxima obtida.

Analisando-se a Figura 4.28, observa-se uma grande semelhança na deformação do conector entre o modelo experimental e o modelo numérico. Pode-se observar nos dois casos uma maior deformação do dente da extremidade inferior do conector, mesmo com o nível de deslizamento da simulação numérica não sendo o mesmo do modelo experimental.

4.4 Modelo D5a – Série D

4.4.1 Descrição do modelo experimental

O modelo D5a faz parte da série D ensaiada por Oliveira (2007). De acordo com o autor, o conector utilizado nesta série possui a mesma geometria do conector *Crestbond* desenvolvido por Veríssimo (2007), exceto por uma distância maior entre a base do conector e os dentes, permitindo sua montagem com pré-laje. Esse conector foi denominado de *Crestbond-PL*. Sua configuração geométrica é mostrada na Figura 4.29.

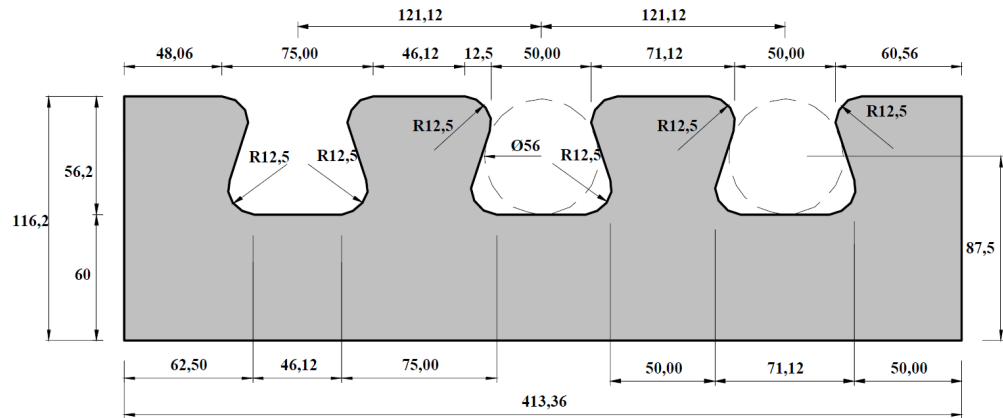


Figura 4.29 – Conector *Crestbond-PL* utilizado no modelo D5a (OLIVEIRA, 2007).

Na Figura 4.30 apresentam-se as características geométricas do modelo experimental.

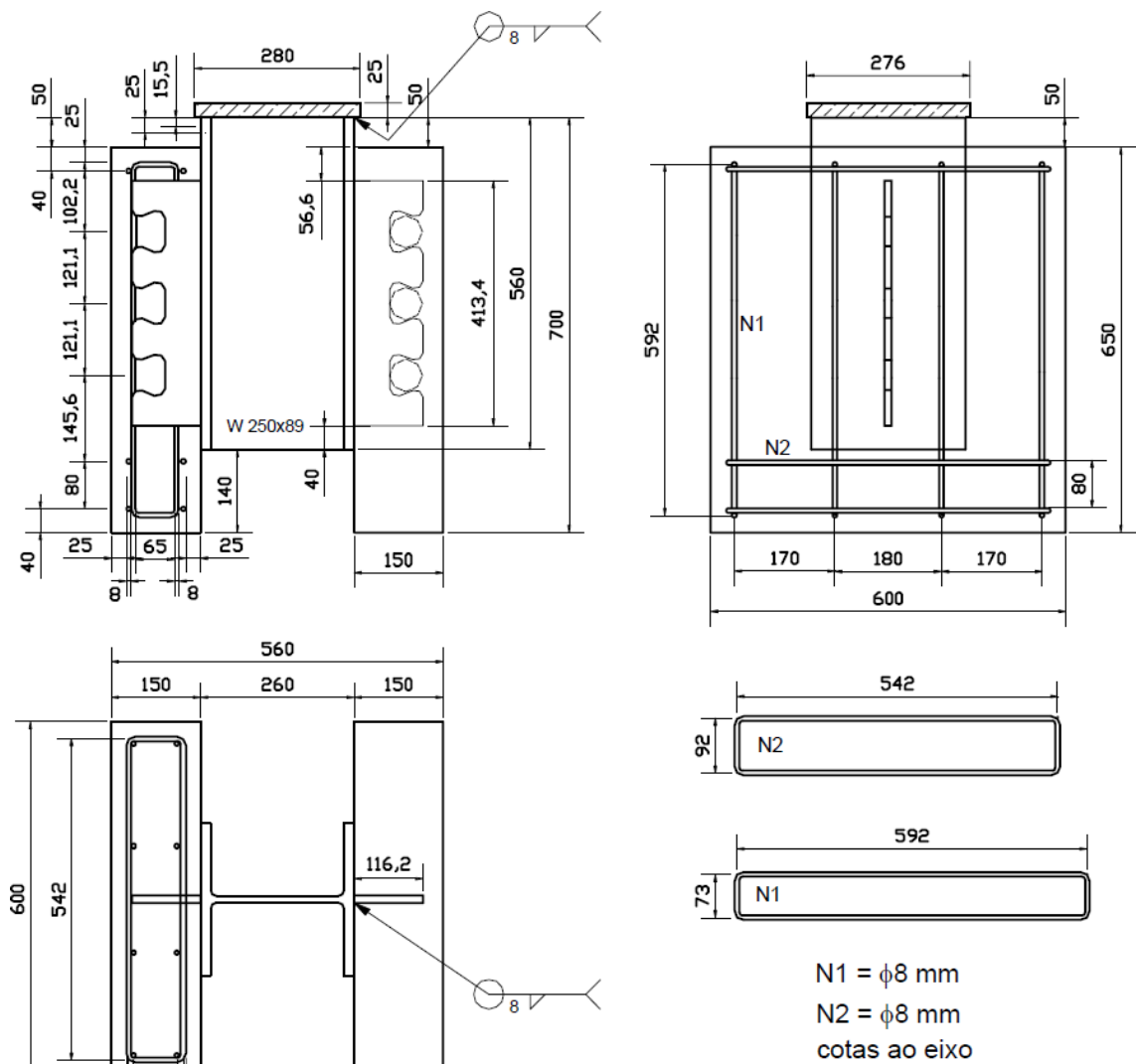


Figura 4.30 – Geometria do modelo D5 (OLIVEIRA, 2007).

Na Tabela 4.8 apresentam-se as características geométricas do modelo experimental, incluindo também características físicas das partes componentes do *push-out*.

Tabela 4.8 – Características Geométricas e Físicas do Modelo D5a.

CARACTERÍSTICAS DO <i>PUSH-OUT</i>				
Características Geométricas e Físicas	fonte	Oliveira (2007)		
	perfil	Perfil W250x89		
		d	260	mm
		b_f	256	mm
		t_w	10,7	mm
		t_f	17,5	mm
		comp.	560	mm
		aço	ASTM A 572 G50	
	f_y	345	MPa	
	laje	largura	600	mm
		comp.	650	mm
		espessura	150	mm
		f_c	22,2	MPa
	conector	comp.	413,36	mm
		espessura	12,5	mm
		aço	USI-CIVIL 350	
		f_y	436	MPa
armadura	aço	CA-50		
	f_y	500	MPa	

4.4.2 Descrição do modelo numérico

Para a montagem do modelo numérico foram tomadas todas as características apresentadas no modelo experimental. Desenvolveu-se um modelo de elementos finitos, conforme descrito no Capítulo 3, no qual foi utilizado apenas um quarto da geometria do modelo real para a análise numérica, como descrito no item 3.2.

A malha de elementos finitos do perfil de aço é composta por 400 nós, 171 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 30 mm. O conector de cisalhamento é composto 430 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 10 mm, com por 998 nós. A laje de concreto é composta por 18602 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 10 mm em torno do conector, 21207 nós. A armadura é composta por 100 elementos

tipo T3D2, com dimensão de 30 mm próximo ao conector, com 93 nós. Todos os elementos possuem características conforme apresentado no item 3.2.1.

Para o comportamento dos materiais admitiu-se o descrito no item 3.3, tomando-se as características apresentadas na Tabela 4.8.

Foram realizadas duas simulações para este modelo: uma utilizando restrições do tipo *Tie*, como estratégia de interação entre o conector e a laje, e outra utilizando interações de contato entre superfícies. O módulo de elasticidade do concreto foi tomado de acordo com a norma EN 1992-1-1:2004 (EC2). Na Tabela 4.9 estão descritas essas simulações com suas denominações.

Tabela 4.9 – Simulações numéricas realizadas com o modelo D5a.

Modelo	f_c (MPa)	E_{cm} (MPa)	Referência	Ligação Laje/Conector
D5a_201	22,2	27950	EC2	Restrição tipo <i>Tie</i>
D5a_202	22,2	27950	EC2	Interação de Contato

A curva tensão×deformação do concreto comprimido foi descrita conforme item 3.3.2. Na Figura 4.31 está mostrada a curva utilizada nas simulações deste modelo. Essa curva foi extrapolada além dos 3,5% de deformação última, de forma a se ter o último ponto com uma tensão correspondente a 25% da resistência média à compressão.

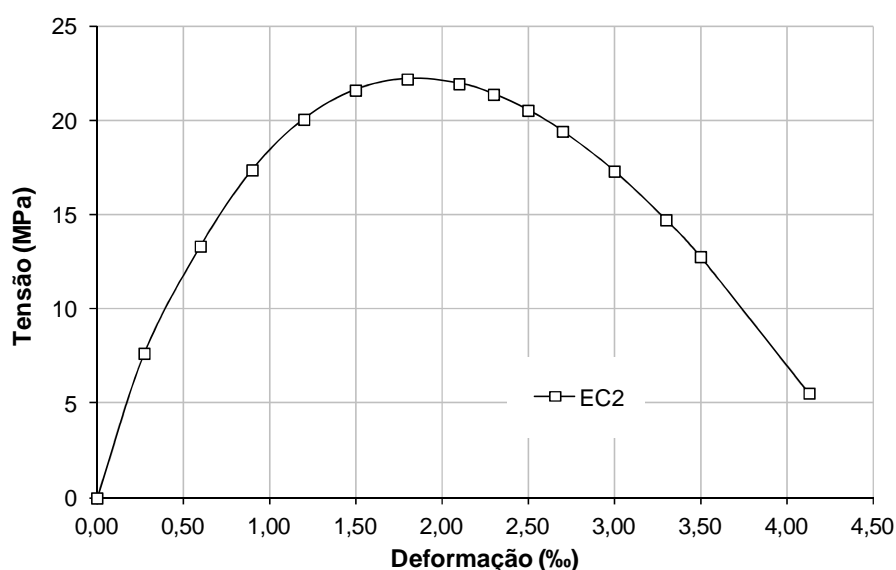


Figura 4.31 – Curva tensão×deformação do concreto comprimido utilizada no modelo D5a.

4.4.3 Resultados

Na Figura 4.32 e na Figura 4.33 apresentam-se as curvas força×deslizamento relativo das simulações numéricas, juntamente com a curva do modelo experimental D5a. A carga máxima obtida no ensaio foi de 308,4 kN.

De acordo com a Figura 4.32, a carga máxima obtida na simulação numérica D5a_201 foi de 322,6 kN, o que representa uma diferença da ordem de 4,6 % com relação ao valor experimental.

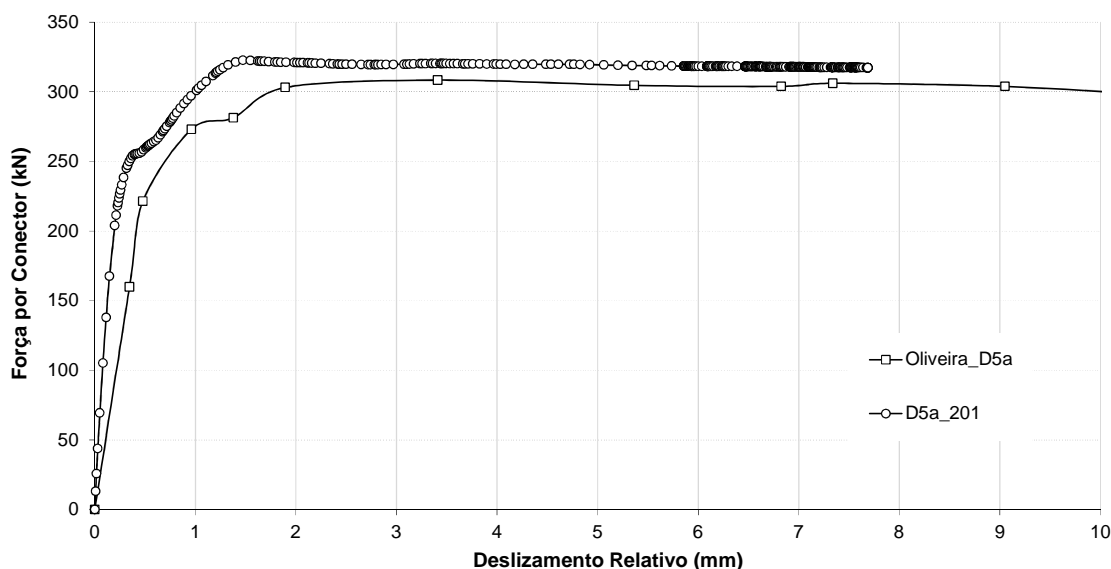


Figura 4.32 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Oliveira D5a e D5a_201.

De acordo com a Figura 4.33, a carga máxima obtida na simulação numérica D5a_202 foi de 314,3 kN, o que representa uma diferença da ordem de 1,9 % com relação ao valor experimental.

Na Figura 4.34 apresenta-se a distribuição das tensões de von Mises, em MPa, para as simulações numéricas realizadas para este modelo. A simulação D5a_202 refere-se àquela em que foi utilizada uma interação de contato entre superfícies para representar a ligação entre a laje e o conector e a simulação D5a_201 refere-se àquela em que foi utilizada uma restrição tipo *Tie* para representar esta ligação.

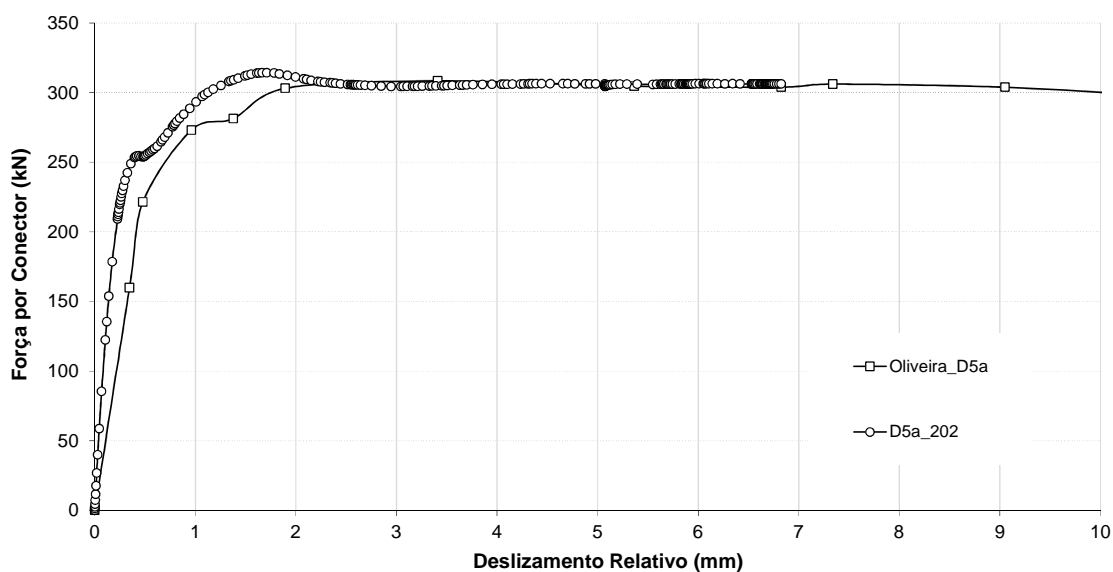


Figura 4.33 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Oliveira D5a e D5a_202.

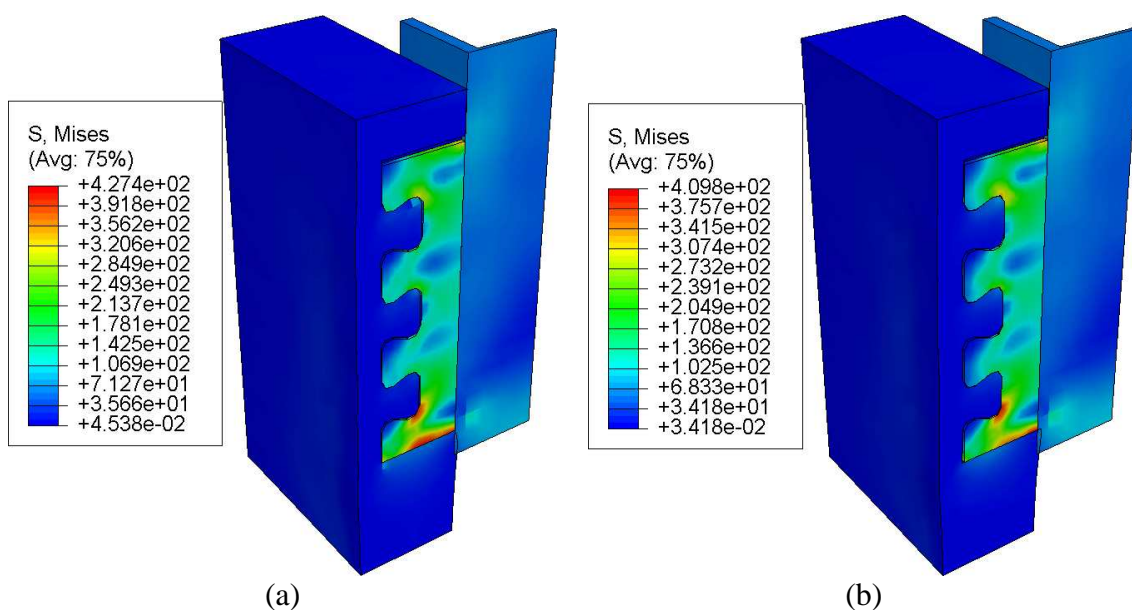


Figura 4.34 – Tensões de von Mises (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo D5a: (a) D5a_201 (Restrição tipo *Tie*); (b) D5a_202 (Interação de contato).

Na Figura 4.35 e na Figura 4.36 são mostradas as deformações plásticas equivalentes na laje de concreto das simulações D5a_201 e D5a_202, respectivamente, ao final do processamento numérico, onde fica evidente o comportamento dos *pinos de concreto* que se formam no interior da laje.

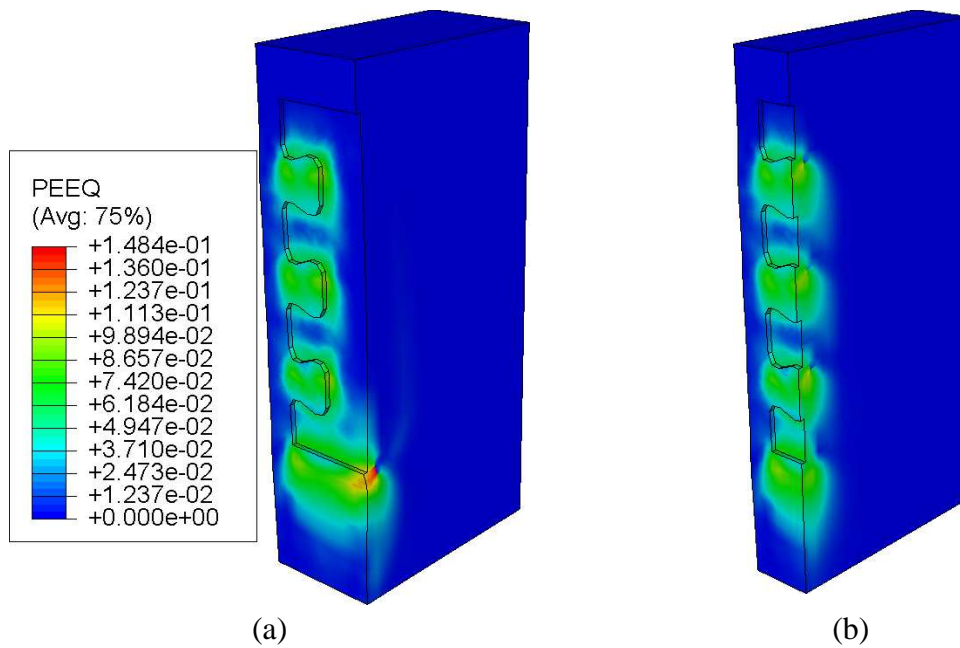


Figura 4.35 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação D5a_201): (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.

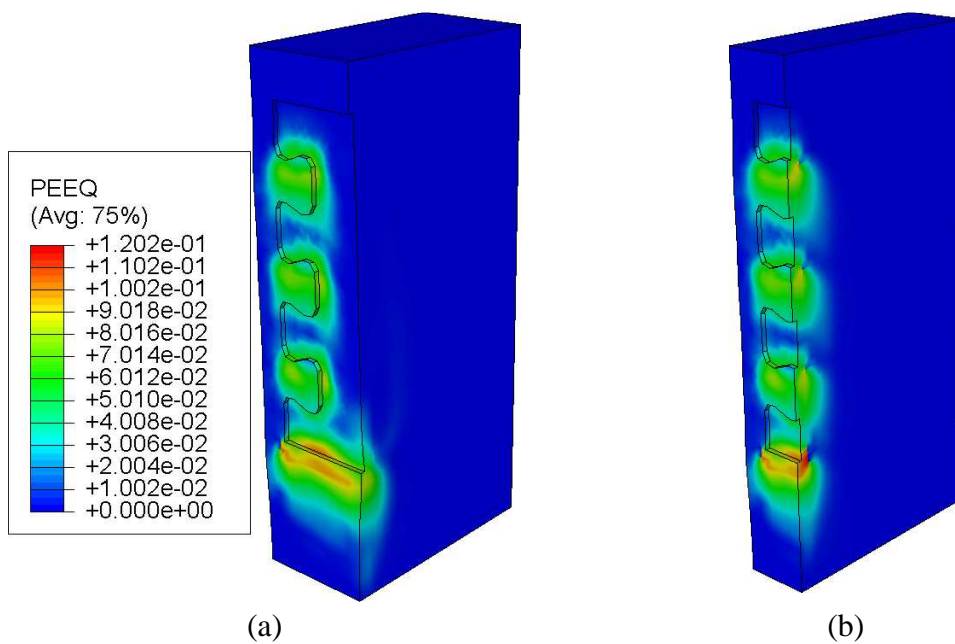


Figura 4.36 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação D5a_202): (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.

Na Figura 4.37 estão apresentadas as tensões normais na direção do eixo y (S_{22}), em MPa, para as simulações numéricas do modelo D5a, em que fica perceptível o efeito do confinamento do concreto, com as tensões atingindo valores próximos a 100 MPa.

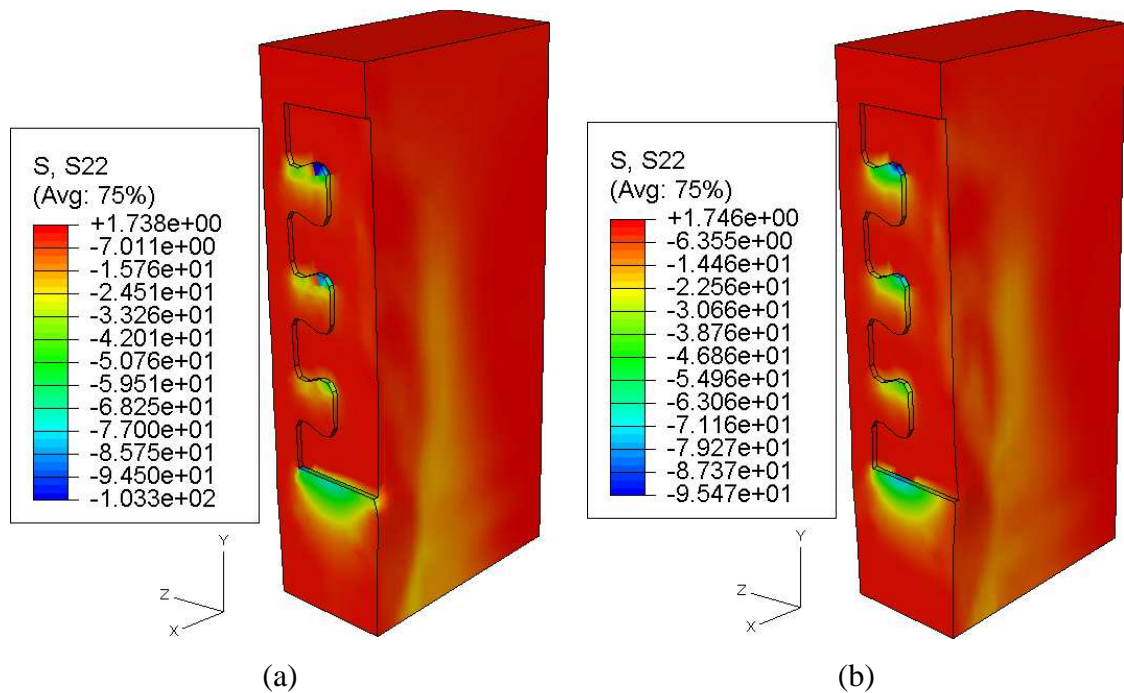


Figura 4.37 – Tensões S22 (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo D5a: (a) D5a_201 (Restrição tipo Tie); (b) D5a_202 (Interação de contato).

Na Figura 4.38 apresenta-se o aspecto dos conectores *Crestbond-PL* ao final dos ensaios, tanto no caso do experimento, quanto na análise numérica, sendo que a Figura 4.38b corresponde à simulação D5a_202, na qual a carga máxima obtida foi a que mais se aproximou do valor experimental.

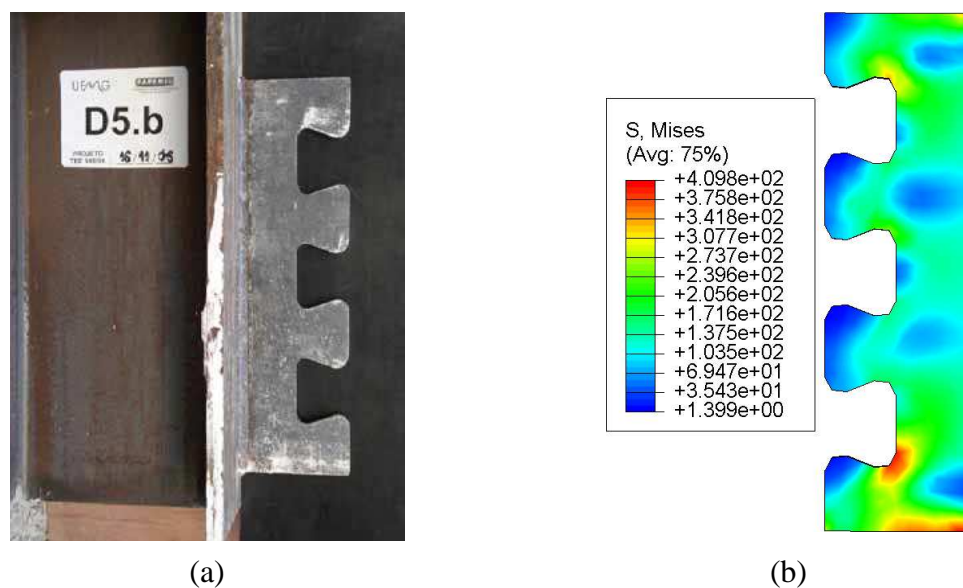


Figura 4.38 – Conector *Crestbond-PL*: (a) aspecto do conector após o ensaio; (b) aspecto do conector ao final da simulação numérica (simulação D5a_202).

4.4.4 Análise dos resultados

Comparando-se os resultados experimentais com os que foram obtidos por meio das simulações numéricas, pode-se afirmar que o modelo numérico foi capaz de representar adequadamente o comportamento do conector *Crestbond-PL* nos ensaios *push-out* em condições de colapso, o que fica evidenciado pela proximidade entre a carga máxima experimental e a numérica.

Além da proximidade entre os valores de cargas máximas, pode-se observar que as simulações numéricas apresentaram rigidez bem próxima ao observado no modelo experimental, com exceção do trecho inicial.

Pode-se observar ainda, em função dos resultados obtidos, que as estratégias para simular a ligação entre o conector e laje neste modelo numérico foram capazes de representar adequadamente o comportamento do ensaio *push-out*.

Analisando-se a Figura 4.38, observa-se uma grande semelhança no aspecto final do conector entre o modelo experimental e o modelo numérico. Pode-se observar, nos dois casos, que a deformação visual é pequena, se comparada às outras séries simuladas.

4.5 Modelo D5b – Série D

4.5.1 Descrição do modelo experimental

O modelo D5b também faz parte da série D ensaiada por Oliveira (2007). O conector utilizado nesta série possui a mesma geometria do conector *Crestbond* utilizado no modelo D5a (Figura 4.29), mostrado anteriormente.

As características geométricas do modelo experimental também são as mesmas mostradas para o modelo D5a (Figura 4.30).

Na Tabela 4.10 apresenta-se um resumo das características geométricas e físicas do modelo experimental. A única diferença deste modelo para o modelo D5a está na resistência média do concreto à compressão, que neste caso é superior.

Tabela 4.10 – Características Geométricas e Físicas do Modelo D5b.

CARACTERÍSTICAS DO <i>PUSH-OUT</i>				
Características Geométricas e Físicas	fonte	Oliveira (2007)		
	perfil	Perfil W250x89		
		d	260	mm
		b_f	256	mm
		t_w	10,7	mm
		t_f	17,5	mm
		comp.	560	mm
		aço	ASTM A 572 G50	
	f_y	345	MPa	
	laje	largura	600	mm
		comp.	650	mm
		espessura	150	mm
		f_c	32,1	MPa
	conector	comp.	413,36	mm
		espessura	12,5	mm
		aço	USI-CIVIL 350	
		f_y	436	MPa
armadura	aço	CA-50		
	f_y	500	MPa	

4.5.2 Descrição do modelo numérico

Para a montagem do modelo numérico foram tomadas todas as características apresentadas no modelo experimental. Desenvolveu-se um modelo de elementos finitos, conforme descrito no Capítulo 3, no qual foi utilizado apenas um quarto da geometria do modelo real para a análise numérica, como descrito no item 3.2.

A malha de elementos finitos do perfil de aço é composta por 171 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 30 mm, com 400 nós. O conector de cisalhamento é composto por 430 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 10 mm, com 998 nós. A laje de concreto é composta por 18602 elementos tipo C3D8R, com dimensão máxima de 10 mm em torno do conector, com 21207 nós. A armadura é composta por 100 elementos tipo T3D2, com dimensão de 30 mm próximo ao conector, com 93 nós. Todos os elementos possuem características conforme 3.2.1.

Para o comportamento dos materiais admitiu-se o descrito no item 3.3, tomando-se as características apresentadas na Tabela 4.10.

Foram realizadas duas simulações para este modelo: uma utilizando restrições do tipo *Tie*, como estratégia de interação entre o conector e a laje, e outra utilizando interações de contato entre superfícies. O módulo de elasticidade do concreto foi tomado de acordo com a norma EN 1992-1-1:2004 (EC2). Na Tabela 4.9 estão descritas essas simulações com suas denominações.

Tabela 4.11 – Simulações numéricas realizadas com o modelo D5b.

Modelo	f_c (MPa)	E_{cm} (MPa)	Referência	Ligação Laje/Conector
D5b_201	32,1	31200	EC2	Restrição tipo <i>Tie</i>
D5b_202	32,1	31200	EC2	Interação de Contato

A curva tensão×deformação do concreto comprimido foi descrita conforme item 3.3.2. Na Figura 4.39 está mostrada essa curva utilizada nas simulações deste modelo. Essa curva foi extrapolada além dos 3,5% de deformação última, de forma a se ter o último ponto com uma tensão correspondente a 25% da resistência média à compressão.

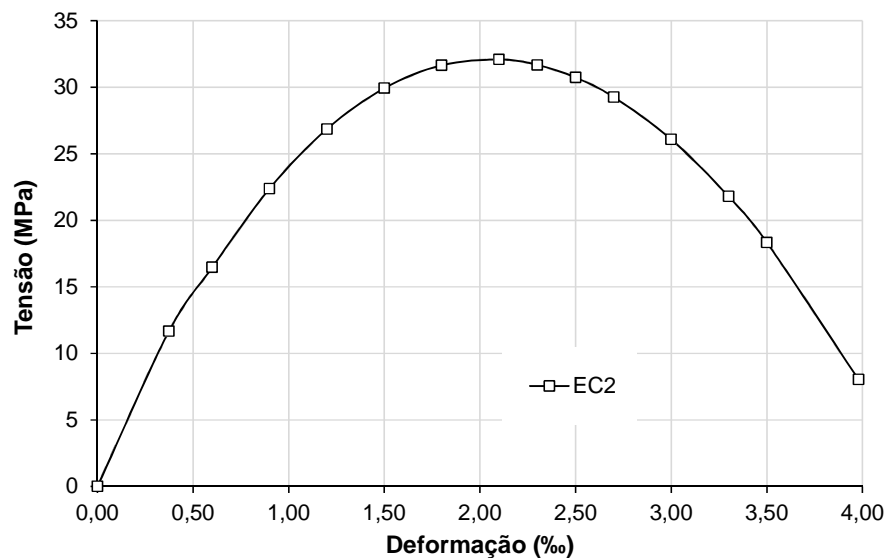


Figura 4.39 – Curva tensão×deformação do concreto comprimido utilizada no modelo D5b.

4.5.3 Resultados

Na Figura 4.40 e na Figura 4.41 apresentam-se as curvas força×deslizamento relativo das simulações numéricas, juntamente com a curva do modelo experimental D5b. A carga máxima obtida no ensaio foi de 375,9 kN.

De acordo com a Figura 4.40, a carga máxima obtida na simulação numérica D5b_201 foi de 396,3 kN, o que representa uma diferença da ordem de 5,4 % com relação ao valor experimental.

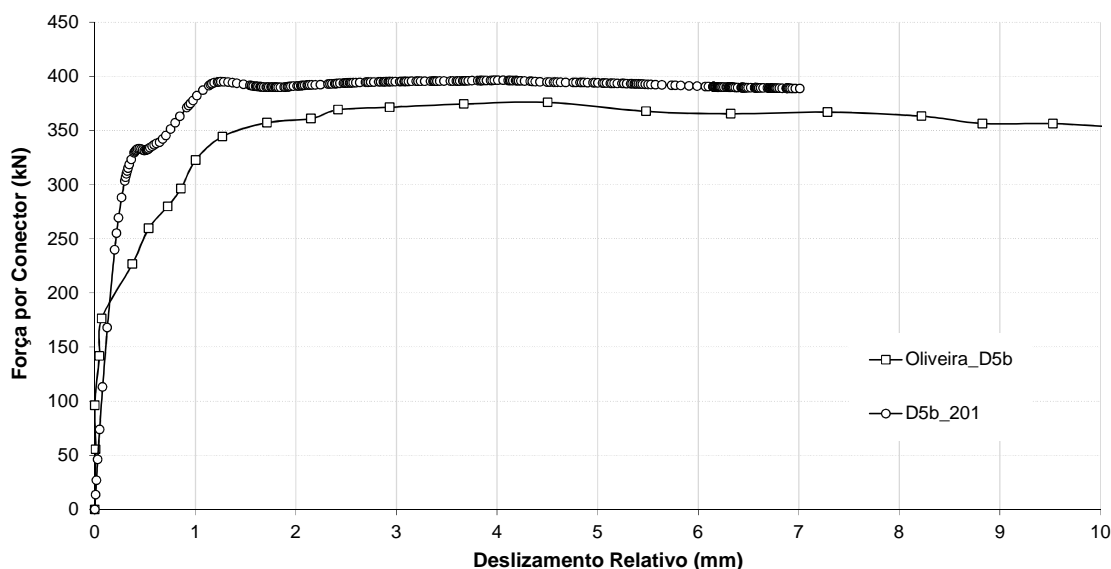


Figura 4.40 - Curvas força×deslizamento relativo para os modelos Oliveira D5b e D5b_201.

De acordo com a Figura 4.41, a carga máxima obtida na simulação numérica D5b_202 foi de 393,4 kN, o que representa uma diferença da ordem de 4,7 % com relação ao valor experimental.

Na Figura 4.42 apresenta-se a distribuição das tensões de von Mises, em MPa, para as simulações numéricas realizadas para este modelo. A simulação D5b_202 refere-se àquela em que foi utilizada uma interação de contato entre superfícies para representar a ligação entre a laje e o conector e a simulação D5b_201 refere-se àquela em que foi utilizada uma restrição tipo *Tie* para representar esta ligação. É interessante notar que na simulação em que se utilizou interação de contato o aço do conector não chega a atingir a tensão de escoamento de 436 MPa.

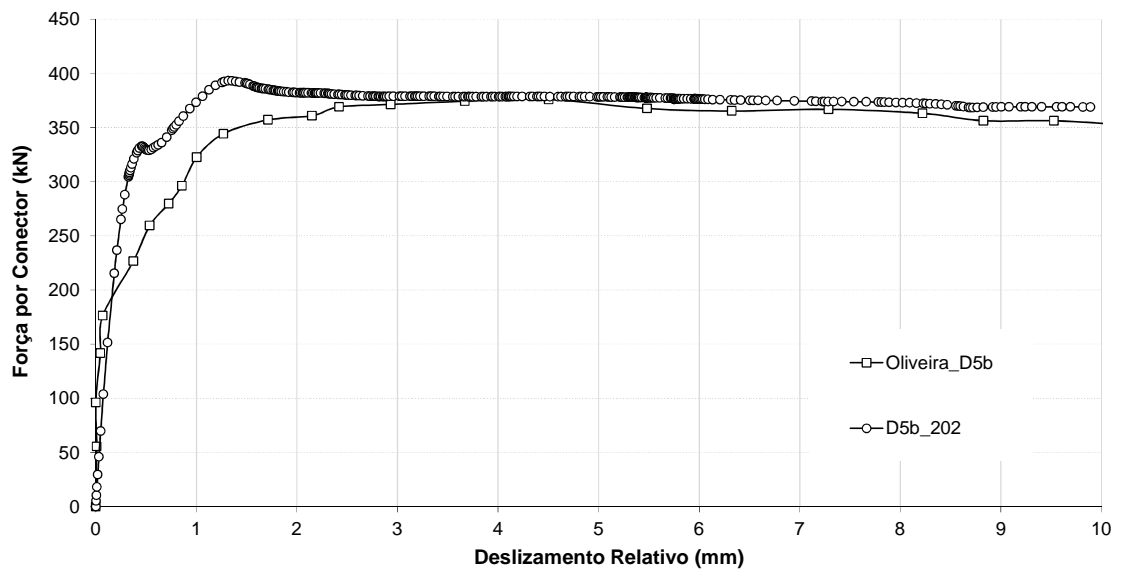


Figura 4.41 - Curvas força×deslocamento relativo para os modelos Oliveira D5b e D5b_202.

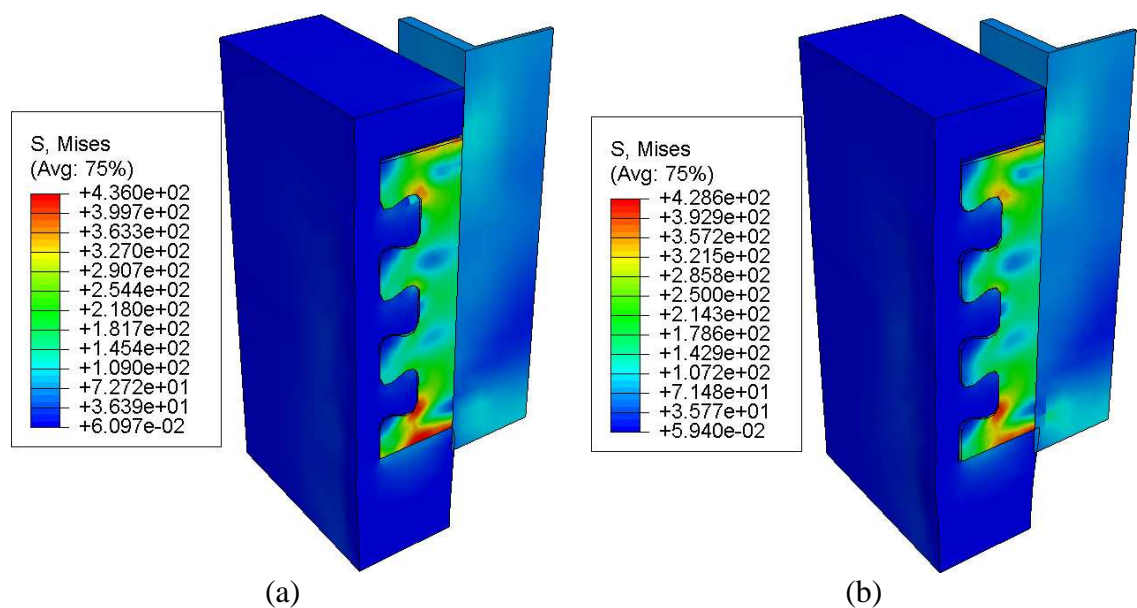


Figura 4.42 – Tensões de von Mises (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo D5b: (a) D5b_201 (Restrição tipo *Tie*); (b) D5b_202 (Interação de contato).

Na Figura 4.43 e na Figura 4.44 são mostradas as deformações plásticas equivalentes na laje de concreto das simulações D5b_201 e D5b_202, respectivamente, ao final do processamento numérico, onde fica evidente o comportamento dos *pinos de concreto* que se formam no interior da laje. É interessante notar que nas simulações com elementos de contato o concreto se deforma mais e a resposta do modelo é mais próxima da resposta experimental.

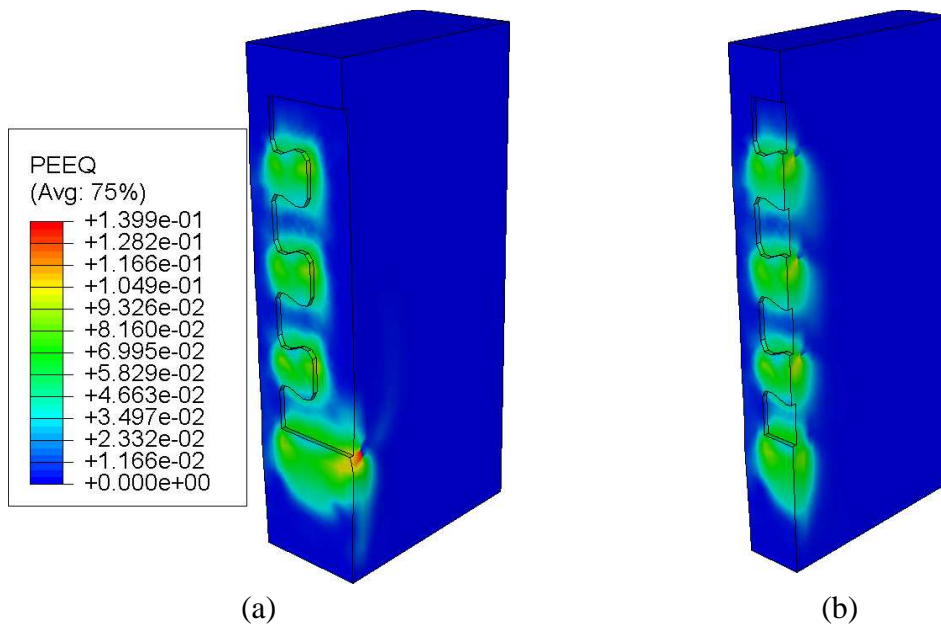


Figura 4.43 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação D5b_201):
 (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.

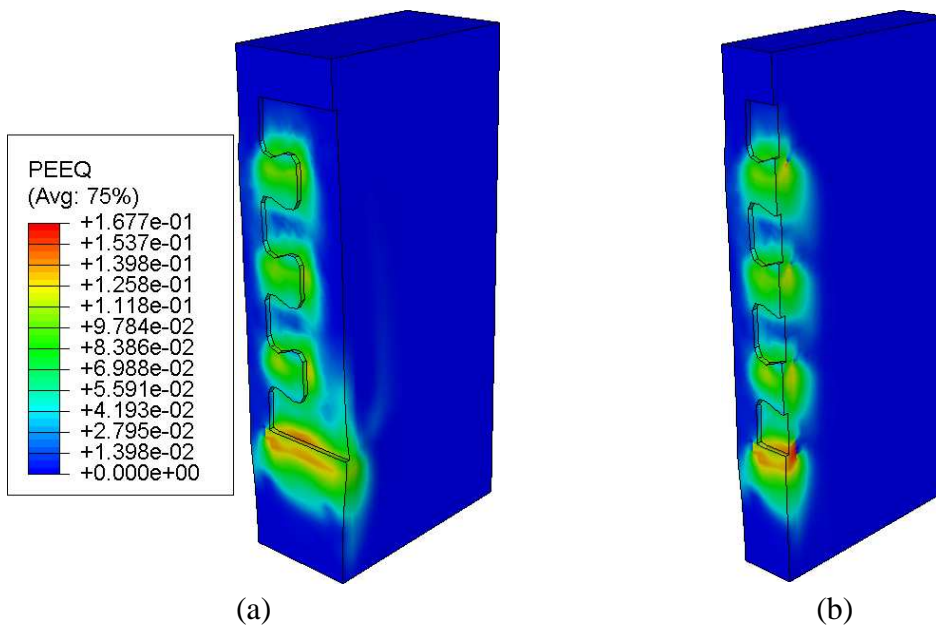


Figura 4.44 - Deformações plásticas equivalentes na laje de concreto (simulação D5b_202):
 (a) vista da laje sem o conector; (b) corte à meia altura do conector.

Na Figura 4.45 estão apresentadas as tensões normais na direção do eixo y (S_{22}), em MPa, para as simulações numéricas do modelo D5b, em que fica perceptível o efeito do confinamento do concreto, com as tensões atingindo valores superiores a 100 MPa.

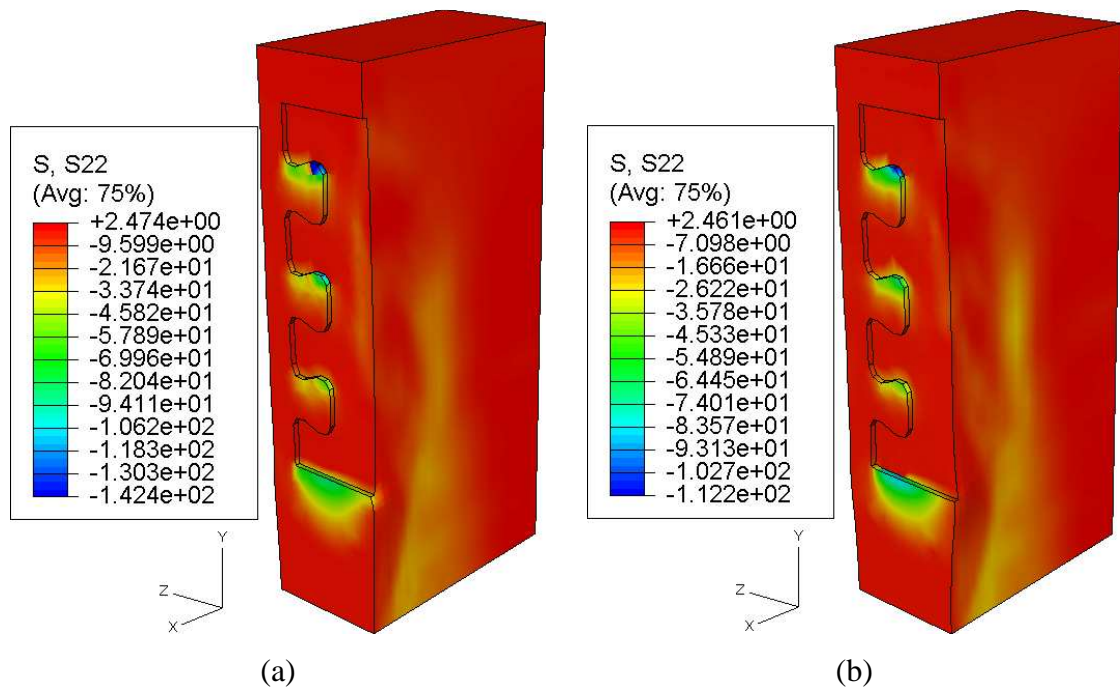


Figura 4.45 – Tensões S22 (MPa) ao fim da análise nas simulações do modelo D5b:
 (a) D5b_201 (Restrição tipo *Tie*); (b) D5b_202 (Interação de contato).

Na Figura 4.46 apresenta-se o aspecto dos conectores *Crestbond-PL* ao final dos ensaios, tanto no caso do experimento, quanto na análise numérica. O conector praticamente não se deformou. Ressalta-se que para esta simulação (D5b_202), a carga máxima obtida foi muito próxima do valor experimental.

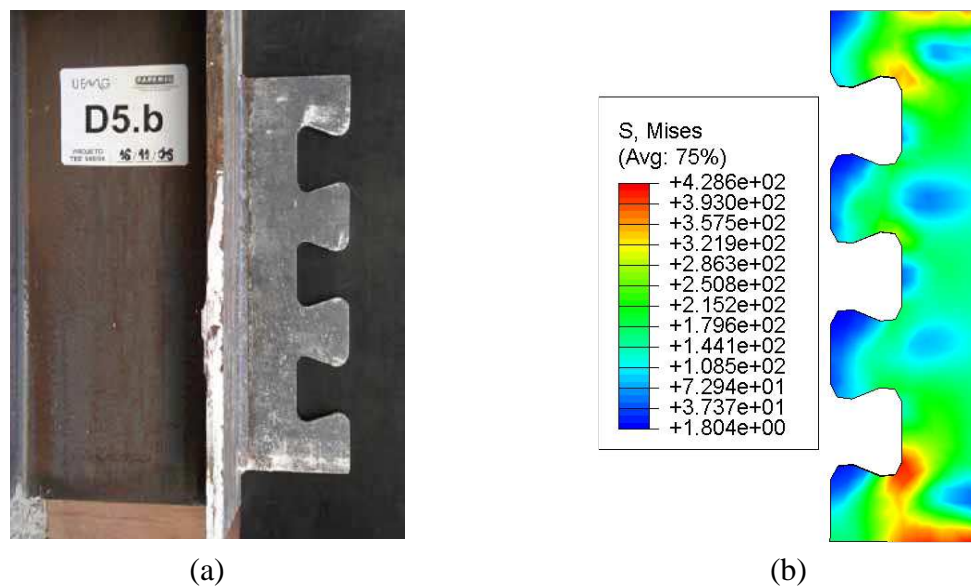


Figura 4.46 – Conector *Crestbond-PL*: (a) aspecto da deformação no ensaio experimental;
 (b) aspecto da deformação no modelo numérico (simulação D5b_202).

4.5.4 Análise dos resultados

Com base na comparação dos resultados experimentais com os que foram obtidos por meio das simulações numéricas, pode-se afirmar que o modelo numérico foi capaz de representar adequadamente o comportamento do conector *Crestbond-PL* nos ensaios *push-out* em condições de colapso, o que fica evidenciado pela proximidade entre a carga máxima experimental e a numérica.

Além da proximidade entre os valores de cargas máximas, pode-se observar que as simulações numéricas apresentaram rigidez bem próxima ao observado no modelo experimental.

Pode-se observar ainda, em função dos resultados obtidos, que as estratégias para simular a ligação entre o conector e laje neste modelo numérico foram capazes de representar adequadamente o comportamento do ensaio *push-out*.

Analisando-se a Figura 4.46, observa-se uma grande semelhança no aspecto final do conector entre o modelo experimental e o modelo numérico. Pode-se observar nos dois casos que a deformação é praticamente imperceptível visualmente, assim como no modelo D5a.

5 DISCUSSÃO

5.1 Considerações preliminares

Os modelos simulados neste trabalho constituem um subconjunto de um grupo maior de modelos experimentais ensaiados por Veríssimo (2007) e por Oliveira (2007). As simulações foram realizadas para aqueles modelos que não continham armadura passante nos furos do conector *Crestbond*.

Ao longo deste trabalho, procurou-se representar da maneira mais real possível os modelos descritos através da análise numérica. Foram realizados estudos da malha dos componentes do modelo e um estudo da melhor forma de se representar o modelo constitutivo do concreto, que era a maior dificuldade nessas análises. Ao final, chegou-se ao modelo numérico descrito no Capítulo 3, que foi aplicado às simulações numéricas descritas no Capítulo 4, apresentando bons resultados.

Neste capítulo, discutem-se algumas questões referentes às estratégias adotadas no modelo numérico e seus respectivos resultados.

5.2 Influência da representação da interface conector-laje

No presente trabalho, como já descrito, foram utilizadas duas estratégias de modelagem com relação à representação da interface conector-laje: a utilização de restrições tipo *Tie*, em que uma superfície é ligada à outra formando uma conexão rígida, e a utilização de interações de contato, em que superfícies fazem contato entre si utilizando-se propriedades especificadas. Nas figuras a seguir são mostradas as comparações dos resultados das simulações realizadas com estas duas estratégias para cada um dos modelos analisados.

Na Figura 5.1 estão mostrados os resultados das simulações numéricas do modelo A3. Percebe-se que os valores de carga máxima das simulações numéricas estão muito próximos do valor da carga máxima do modelo experimental.

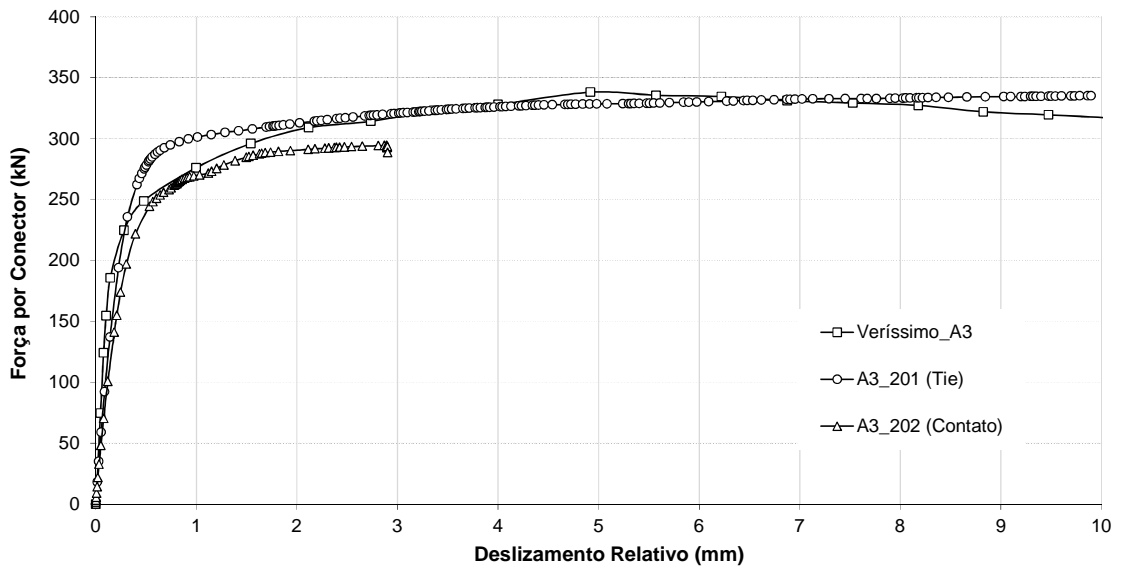


Figura 5.1 - Comparação dos resultados do modelo A3 para diferentes representações da interface conector-laje.

Neste caso o modelo que utiliza restrições tipo *Tie* entre superfícies apresentou o valor de carga máxima praticamente o mesmo do valor experimental, porém não permitiu caracterizar a perda de rigidez após alcançar a força resistente máxima do conector, o que acontece no modelo experimental. O modelo que considera a interação por contato, apesar de mais realista, apresentou problemas de convergência numérica. Pode-se observar que sua rigidez é muito próxima àquela do modelo experimental, como pode ser visto pela semelhança entre as curvas, principalmente na parte inicial do carregamento.

Na Figura 5.2 estão mostrados os resultados das simulações numéricas do modelo B1_B2. Percebe-se que os valores de carga máxima das simulações numéricas também estão muito próximos do valor da carga máxima do modelo experimental.

A simulação que utiliza restrições tipo *Tie* entre superfícies não permitiu caracterizar a perda de rigidez após alcançar a força resistente máxima do conector, o que é caracterizado nos ensaios experimentais. A simulação que considera a interação por contato permitiu representar de maneira mais realista, sobretudo o comportamento pós-

pico do conector de cisalhamento. Apesar dessas diferenças, pode-se afirmar que o modelo com restrições tipo *Tie* também permite representar de maneira aproximada o comportamento do conector.

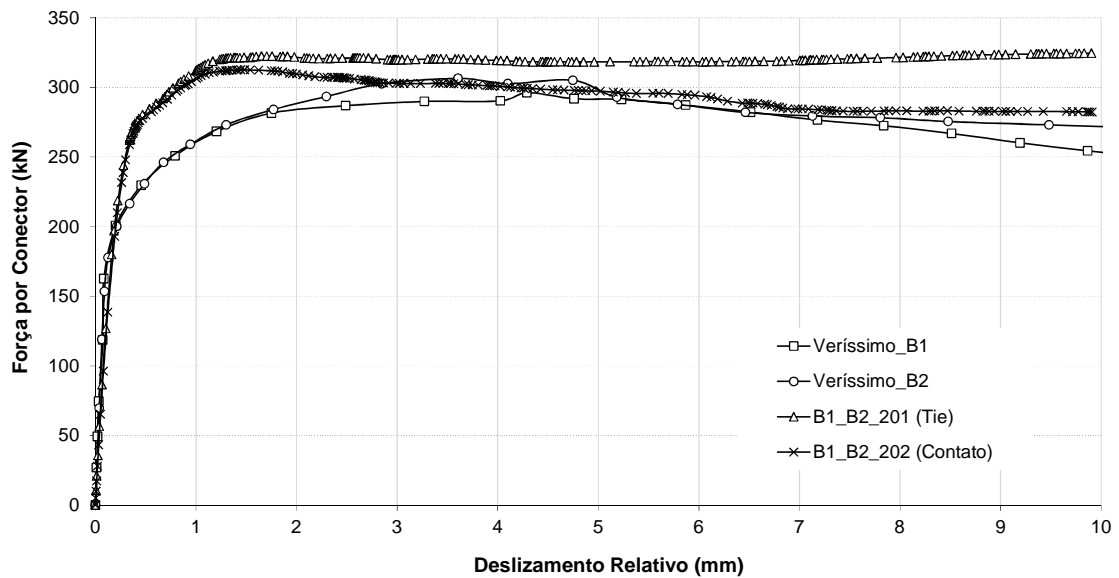


Figura 5.2 - Comparação dos resultados do modelo B1_B2 para diferentes representações da interface conector-laje.

Para o modelo B1_B2 não houve diferença significativa de tempo de processamento, assim como não houve interrupção de processamento devido a algum problema numérico, tanto para o modelo com restrições tipo *Tie*, como para aquele que utiliza interações de contato. No entanto, em alguns modelos, podem surgir problemas de convergência numérica em zonas com danos mais avançados. Portanto, as duas estratégias para tratamento da interface aço-concreto podem ser úteis para análise numérica.

Na Figura 5.3 estão mostrados os resultados das simulações numéricas do modelo C1. Percebe-se que os valores de carga máxima das simulações numéricas também estão muito próximos do valor da carga máxima do modelo experimental.

Pode-se observar que as duas simulações apresentaram curvas semelhantes até atingirem a carga máxima. A partir deste ponto, a simulação que considera interação por contato apresentou uma perda de rigidez mais avançada em comparação com a simulação que considera restrições do tipo *Tie*, sendo esta mais próxima do ensaio experimental.

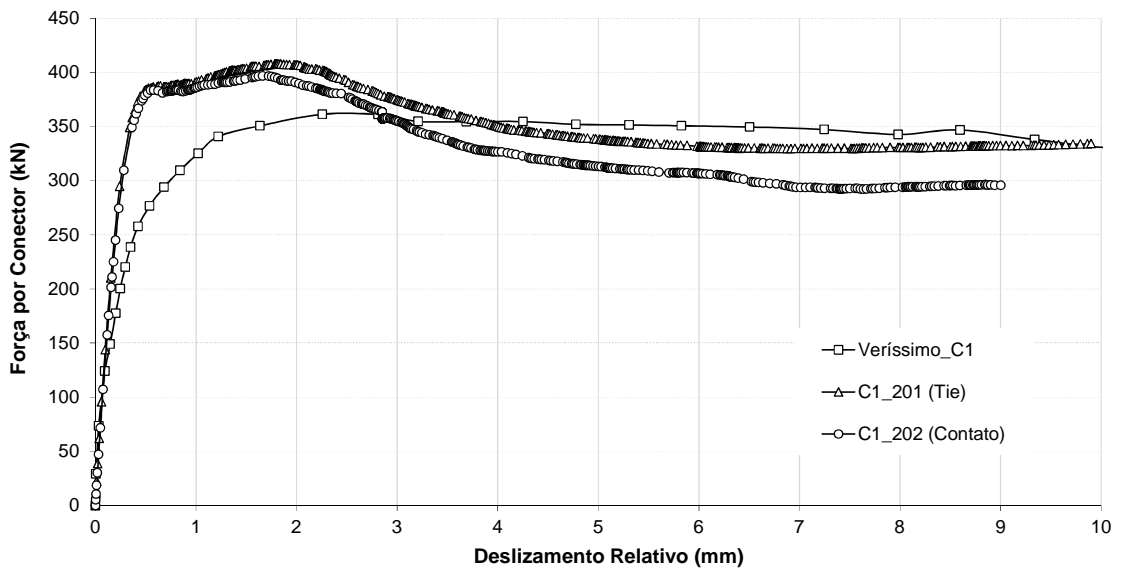


Figura 5.3 - Comparação dos resultados do modelo C1 para diferentes representações da interface conector-laje.

Na Figura 5.4 estão mostrados os resultados das simulações numéricas do modelo D5a. Percebe-se que os valores de carga máxima das simulações numéricas estão muito próximos do valor da carga máxima do modelo experimental.

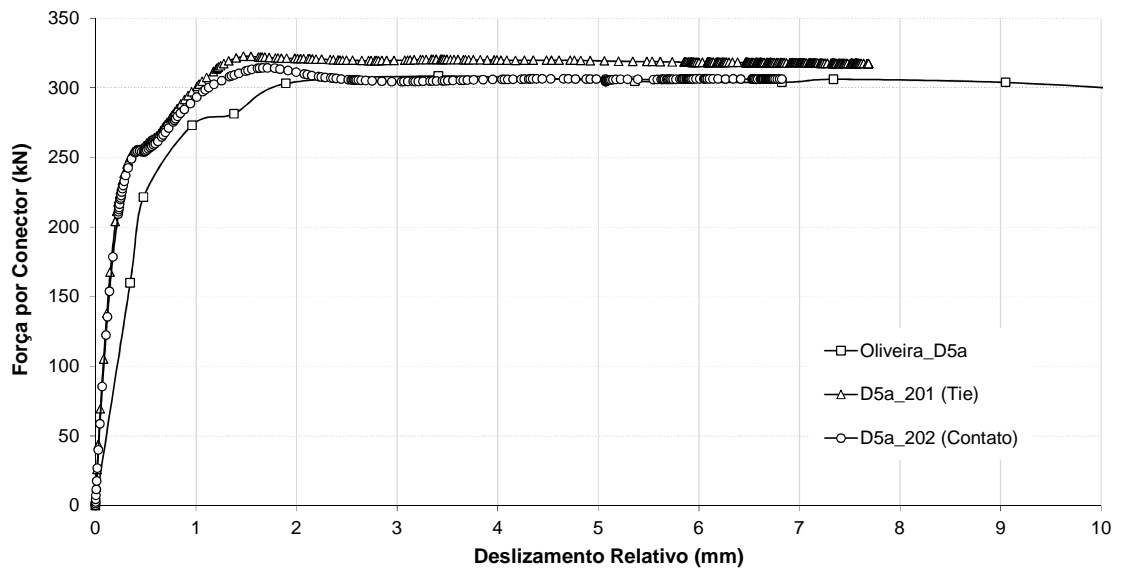


Figura 5.4 - Comparação dos resultados do modelo D5a para diferentes representações da interface conector-laje.

Neste caso, as duas simulações apresentaram valores de carga máxima semelhantes. O modelo que considera a interação por contato apresentou uma curva muito semelhante ao modelo experimental, apesar da rigidez inicial ser um pouco diferente.

Na Figura 5.5 estão mostrados os resultados das simulações numéricas do modelo D5b. Percebe-se novamente que os valores de carga máxima das simulações numéricas estão muito próximos do valor da carga máxima do modelo experimental.

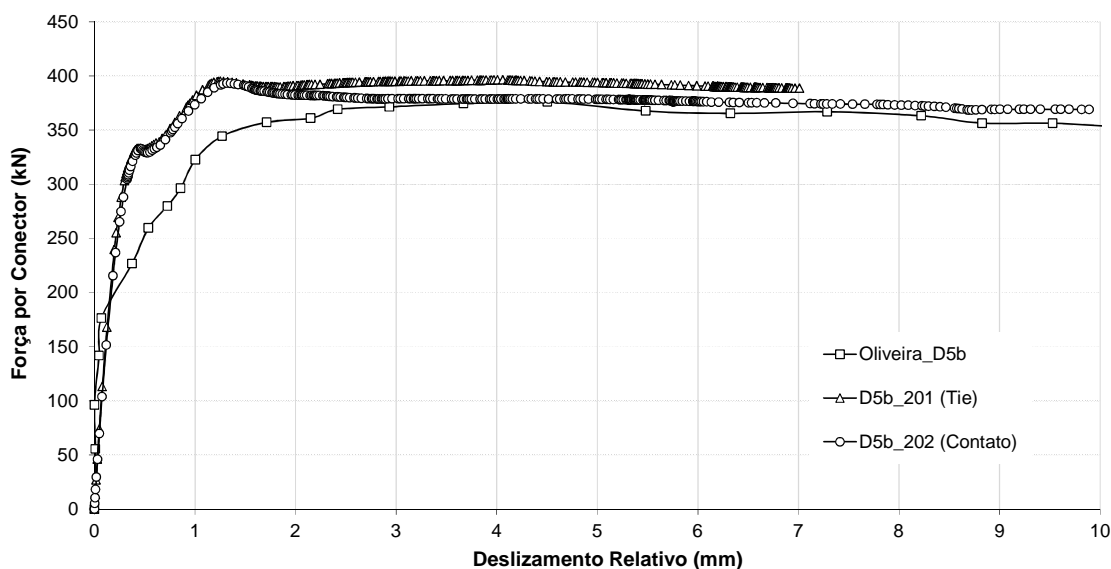


Figura 5.5 - Comparação dos resultados do modelo D5b para diferentes representações da interface conector-laje.

Neste caso, as duas simulações apresentaram valores de carga máxima semelhantes. Diferentemente dos modelos anteriores, a simulação que utiliza restrições do tipo *Tie* entre superfícies é que apresentou problemas de convergência numérica. O modelo que considera a interação por contato apresentou uma curva muito semelhante ao modelo experimental, apesar da rigidez inicial ser um pouco diferente.

De maneira geral, os valores de carga máxima dos modelos numéricos estão próximos dos valores de carga máxima dos modelos experimentais. Os modelos que utilizam restrições tipo *Tie* entre superfícies representam uma simplificação do verdadeiro comportamento da interface aço-concreto, não permitindo caracterizar a perda de rigidez após alcançar a força resistente máxima do conector de maneira tão eficiente, o que é caracterizado nos ensaios experimentais. Os modelos que consideram a interação por contato permitem representar de maneira mais realista, sobretudo o comportamento pós-pico do conector de cisalhamento. Apesar dessas diferenças, pode-se afirmar que os modelos com restrições tipo *Tie* também permitem representar de maneira aproximada o comportamento do conector, mas para isso é necessário definir adequadamente os locais de aplicação das referidas restrições. Para os modelos analisados, não houve diferença

significativa de tempo de processamento. Como observado em alguns modelos, podem surgir problemas de convergência numérica em zonas com danos mais avançados. Portanto, as duas estratégias para tratamento da interface aço-concreto podem ser úteis para análise numérica.

Na Tabela 5.1 apresenta-se um resumo das simulações realizadas com todos os modelos com as respectivas diferenças percentuais de carga máxima em relação aos modelos experimentais. A tabela foi organizada de modo a se ter uma melhor percepção da influência da estratégia de representação da interface conector-laje.

Tabela 5.1 - Resumo comparativo das simulações numéricas realizadas.

Modelo	f_c (MPa)	E_{cm} (MPa)	Referência	Ligação Laje/Conector	Diferença
A3_201	33,1	31500	EC2	Restrição tipo <i>Tie</i>	-0,8%
A3_202	33,1	31500	EC2	Interação de Contato	-12,9%
B1_B2_201	26,6	29500	EC2	Restrição tipo <i>Tie</i>	5,9%
B1_B2_202	26,6	29500	EC2	Interação de contato	2,0%
C1_201	46,9	34976	EC2	Restrição tipo <i>Tie</i>	12,8%
C1_202	46,9	34976	EC2	Interação de Contato	9,8%
D5a_201	22,2	27950	EC2	Restrição tipo <i>Tie</i>	4,6%
D5a_202	22,2	27950	EC2	Interação de Contato	1,9%
D5b_201	32,1	31200	EC2	Restrição tipo <i>Tie</i>	5,4%
D5b_202	32,1	31200	EC2	Interação de Contato	4,7%

Pode-se perceber que a diferença nos resultados entre cargas máximas com o uso de diferentes estratégias na representação da interface conector-laje teve variação de 0,7 % (modelo D5b) a 12,1 % (modelo A3). Assim, pode-se afirmar que as duas estratégias representam de forma satisfatória a interação entre o aço e o concreto no ensaio *push-out*.

5.3 Influência do modelo constitutivo do concreto

Além das simulações numéricas apresentadas no Capítulo 4, foram realizadas também outras simulações para diferentes comportamentos do concreto à compressão para cada um dos modelos experimentais descritos. Para isso, foram admitidas equações constitutivas distintas, tomando como base a curva tensão×deformação do concreto

comprimido da norma EN 1992-1-1:2004, como descrito no item 3.3.2, utilizando-se diferentes módulos de elasticidade para o concreto. Esses módulos foram tomados de acordo com a EN 1992-1-1:2004, através da equação (3.1), presente no item 3.3.2, e de acordo com a ABNT NBR 8800:1986.

De acordo com a ABNT NBR 8800:1986, a expressão para o cálculo do módulo de elasticidade do concreto é:

$$E_{cm} = 42 \gamma_c^{1,5} \sqrt{f_{cm}} \quad (5.1)$$

sendo γ_c o peso específico do concreto em kN/m^3 e f_{cm} em MPa.

Essa expressão tem a vantagem de levar em consideração o peso específico do concreto. Para essas simulações foram utilizados pesos específicos do concreto de 24 kN/m^3 (concreto simples) e 25 kN/m^3 (concreto armado).

Em todas as simulações apresentadas neste item, a armadura está discretizada de forma que cada barra componente da mesma forma um único elemento da malha. Esta não é a situação mais apropriada, uma vez que quanto menor a malha dos elementos componentes, melhor a aproximação com o modelo real. Porém, o objetivo neste item é mostrar a influência do modelo constitutivo do concreto nas simulações numéricas, sendo de menor importância a discretização dessa armadura.

A princípio, acreditava-se que o uso de diferentes módulos de elasticidade do concreto influenciaria nos resultados das análises numéricas. Assim, foram realizadas diversas simulações numéricas, a fim de comprovar ou não tal hipótese.

Na Figura 5.6 estão mostradas as curvas tensão×deformação do concreto comprimido utilizadas no modelo A3. Pode-se observar que as três curvas apresentam a mesma deformação última do concreto à compressão (3,5%).

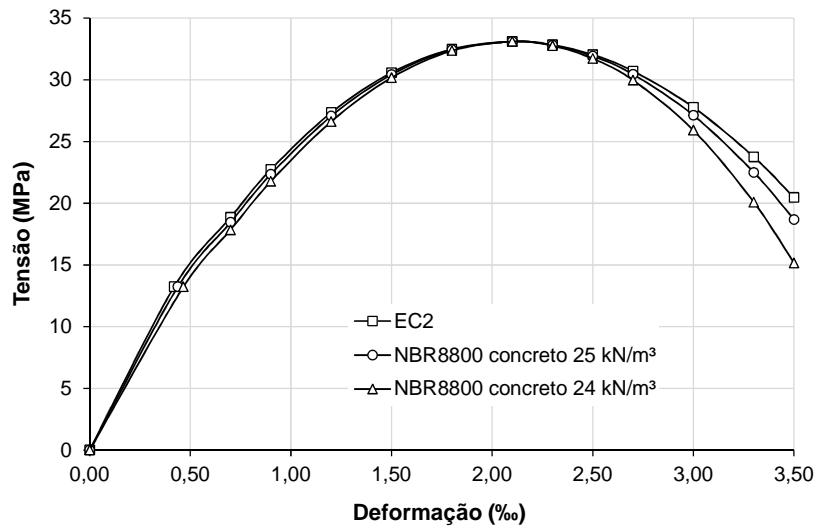


Figura 5.6 - Curvas tensão×deformação do concreto comprimido com as mesmas deformações últimas - Modelo A3.

Na Figura 5.7 são mostrados os resultados do modelo A3 em que se utilizaram restrições do tipo *Tie* na representação da ligação conector-laje para os três módulos de elasticidade do concreto utilizados. Percebe-se que os resultados para os três casos ficaram próximos do resultado experimental, sendo que a simulação A3_03, aquela em que se utilizou o módulo de elasticidade do concreto de acordo com a ABNT NBR 8800:1986, com peso específico do concreto de 25 kN/m³, aparentemente apresentou o valor de carga máxima mais próximo do real.

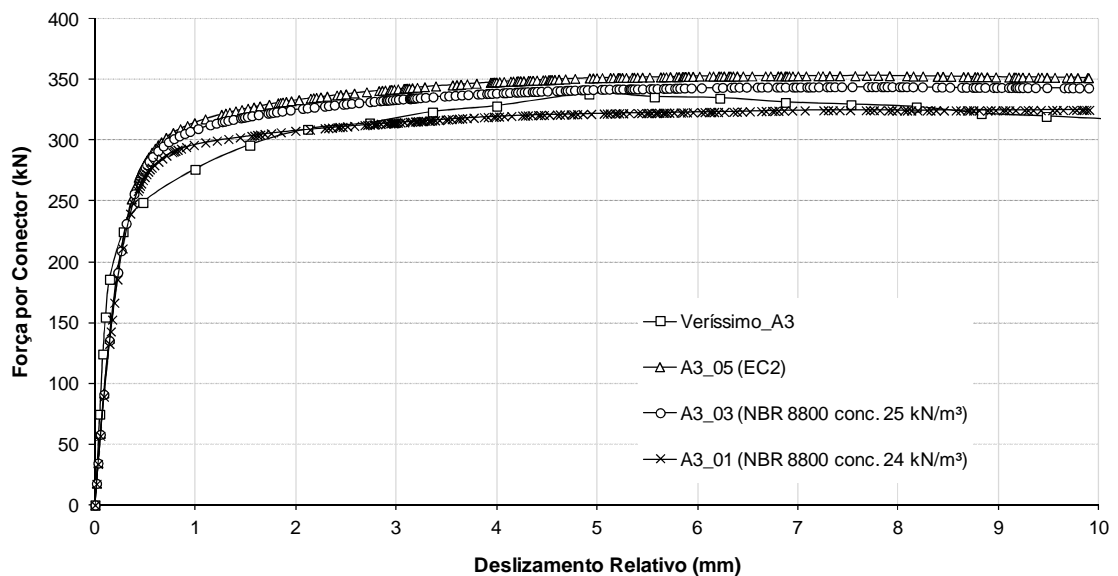


Figura 5.7 - Comparação dos resultados do modelo A3 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com restrições tipo *Tie*).

Já na Figura 5.8 são mostrados os resultados do modelo A3 em que se utilizaram interações de contato na representação da ligação conector-laje para os três módulos de elasticidade do concreto utilizados. Neste caso todas as simulações não chegaram ao final do processamento numérico, ou seja, ao deslizamento relativo requerido. Isto pode ter se dado devido ao uso das interações de contato, que exigem muita memória, associado à limitação de memória dos computadores utilizados. De qualquer maneira percebe-se que, até o ponto em que as análises foram processadas, os valores de carga máxima obtidos da análise numérica ficaram próximos do valor experimental, sendo que a simulação em que se utilizou o módulo de elasticidade do concreto de acordo com a norma EN 1992-1-1:2004 (A3_06) foi aquela que, aparentemente mais se aproximou do valor real, inclusive com a rigidez acompanhado o modelo experimental.

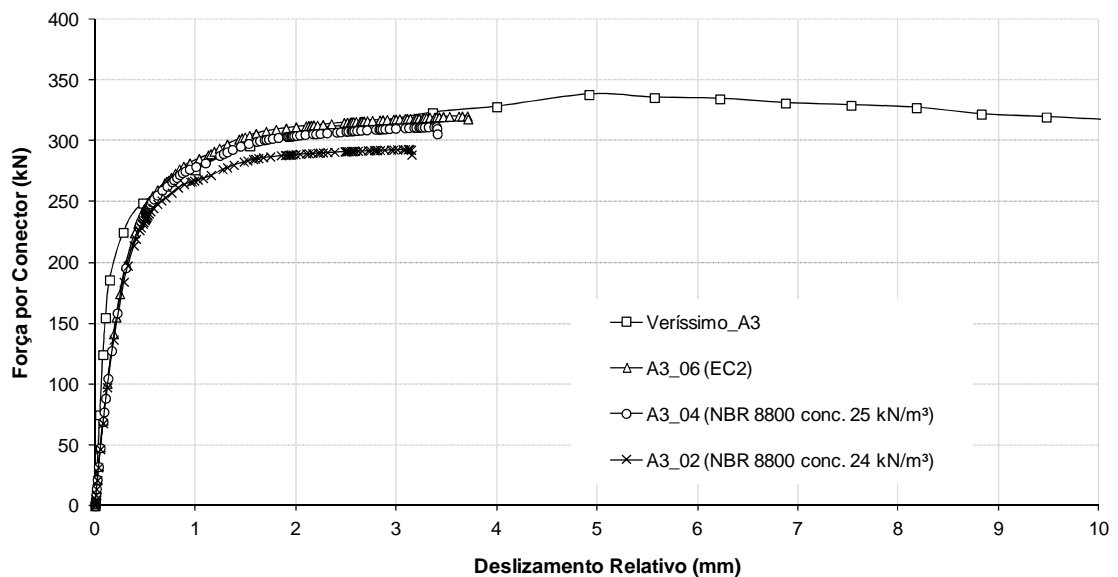


Figura 5.8 - Comparação dos resultados do modelo A3 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com interações de contato).

O fato é que, depois de uma longa análise, percebeu-se que as diferenças entre cargas máximas nos resultados das simulações numéricas não estavam relacionadas aos diferentes módulos de elasticidade do concreto e sim às tensões residuais nas curvas tensão×deformação do concreto comprimido, ou seja, aos níveis de tensão correspondentes aos últimos pontos dessas curvas. O ABAQUS considera que para um valor de deformação superior ao último ponto da curva, a tensão correspondente será aquela informada para esse último ponto.

Para comprovar essa situação foram realizadas simulações numéricas adicionais. Na Figura 5.9 estão mostradas as curvas tensão×deformação do concreto comprimido utilizadas para essas novas simulações do modelo A3, extrapoladas além da deformação última de 3,5%, de modo que o último ponto das três curvas esteja em um mesmo patamar de tensão.

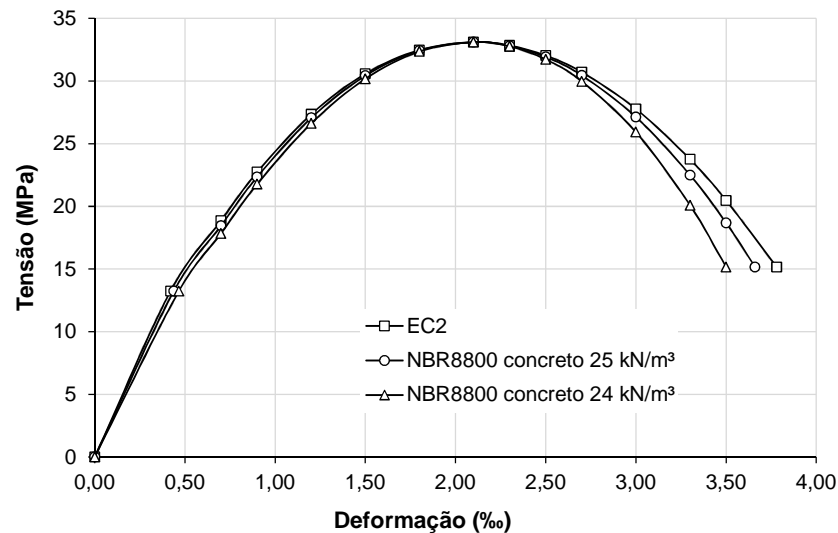


Figura 5.9 - Curvas tensão×deformação do concreto comprimido com as mesmas tensões residuais - Modelo A3.

Na Figura 5.10 e na Figura 5.11 são mostrados os resultados dessas simulações numéricas adicionais do modelo A3, utilizando-se, respectivamente, restrições do tipo *Tie* e interações de contato para representar a ligação conector-laje.

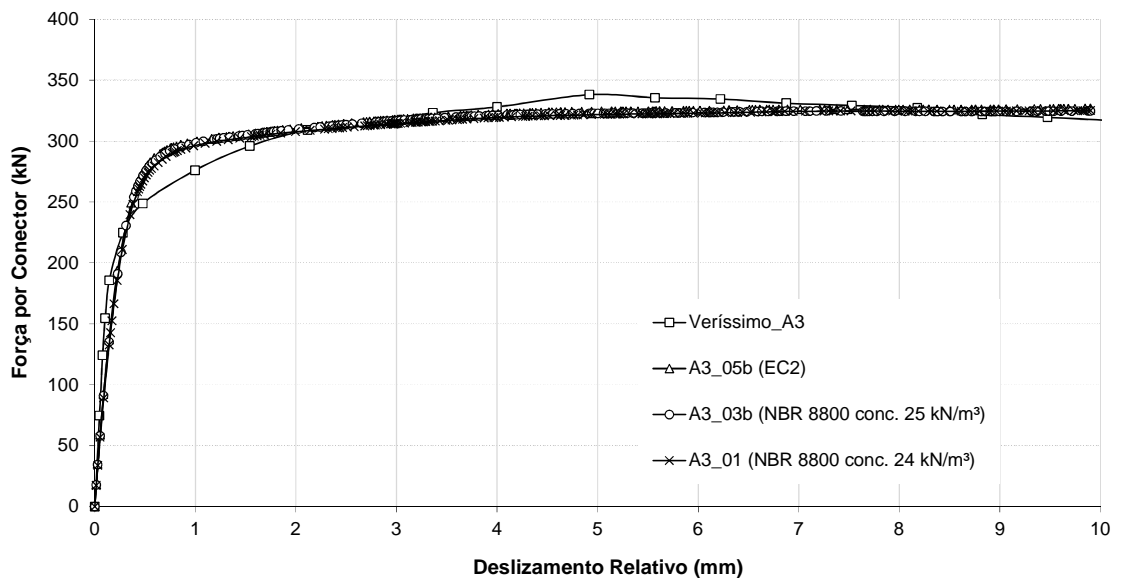


Figura 5.10 - Comparação dos resultados do modelo A3 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com restrições tipo *Tie*).

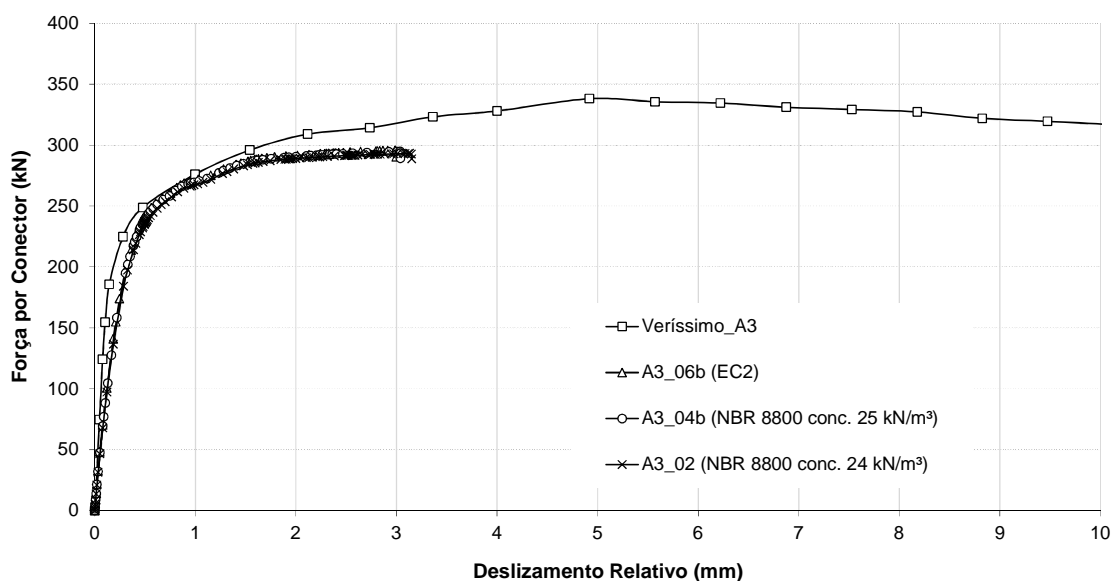


Figura 5.11 - Comparação dos resultados do modelo A3 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com interações de contato).

Pode-se observar que não houve diferença alguma nesses casos, comprovando que a influência nos resultados de cargas máximas está realmente na definição da tensão residual da curva tensão×deformação do concreto comprimido utilizada nas análises. A seguir é feita a mesma comparação com o modelo B1_B2.

Na Figura 5.12 estão mostradas as curvas tensão×deformação do concreto comprimido utilizadas no modelo B1_B2 em um primeiro momento. Pode-se observar que as três curvas apresentam a mesma deformação última do concreto à compressão (3,5%).

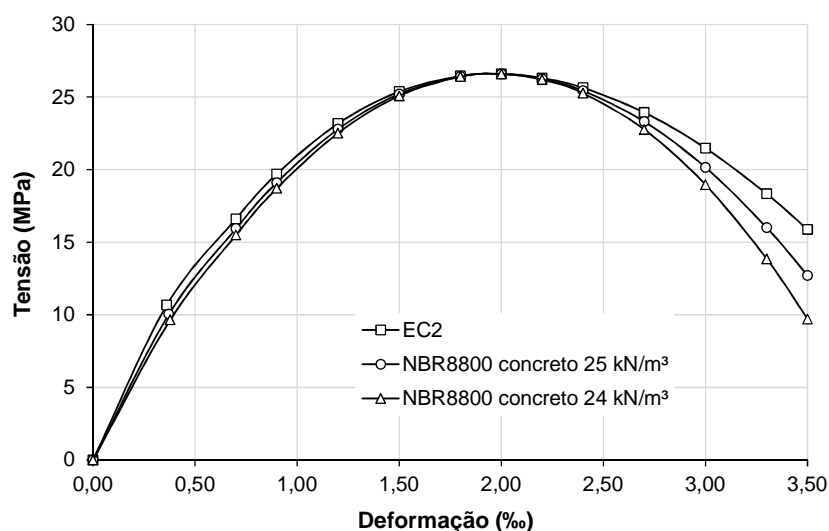


Figura 5.12 - Curvas tensão×deformação do concreto comprimido com as mesmas deformações últimas - Modelo B1_B2.

Na Figura 5.13 e na Figura 5.14 são mostrados os resultados das simulações numéricas com a utilização das curvas anteriores do modelo B1_B2 em que se utilizaram, respectivamente, restrições do tipo *Tie* e interações de contato para representar a ligação conector-laje. Pode-se perceber de uma melhor maneira a falsa influência da variação do módulo de elasticidade do concreto nos resultados.

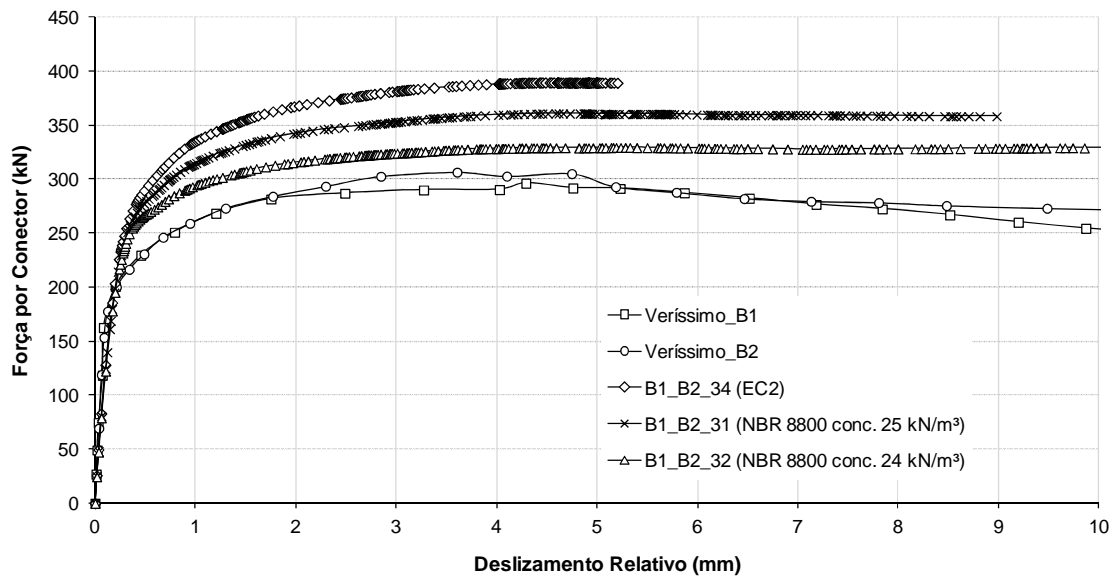


Figura 5.13 - Comparação dos resultados do modelo B1_B2 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com restrições tipo *Tie*).

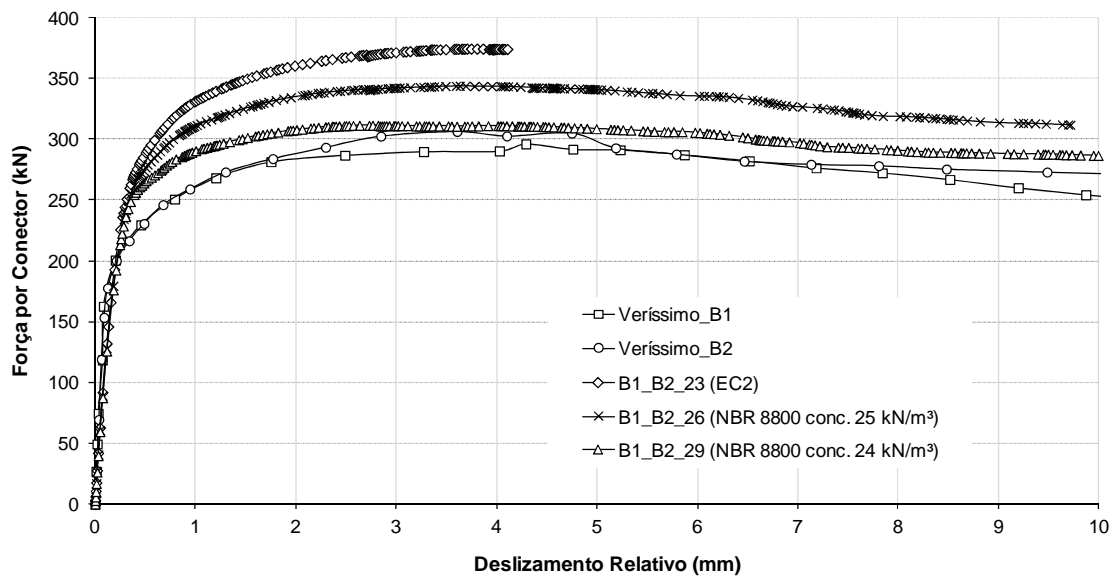


Figura 5.14 - Comparação dos resultados do modelo B1_B2 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com interações de contato).

Agora, na Figura 5.15 estão mostradas as curvas tensão×deformação do concreto comprimido utilizadas para simulações adicionais do modelo B1_B2, extrapoladas além da deformação última de 3,5%, de modo que o último ponto das três curvas esteja em um mesmo patamar de tensão.

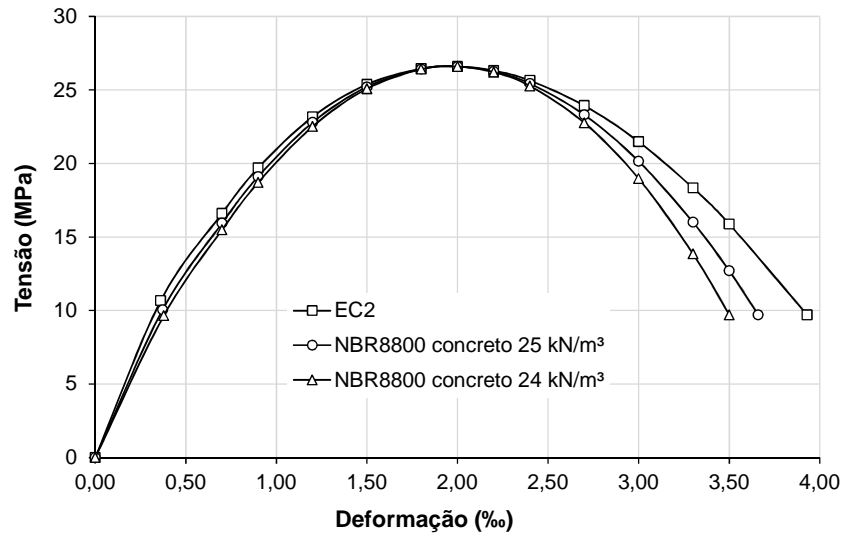


Figura 5.15 - Curvas tensão×deformação do concreto comprimido com as mesmas tensões residuais - Modelo B1_B2.

Na Figura 5.10 e na Figura 5.11 são mostrados os resultados das simulações numéricas adicionais com a utilização das curvas anteriores para o modelo B1_B2, utilizando-se, respectivamente, restrições do tipo *Tie* e interações de contato para representar a ligação conector-laje.

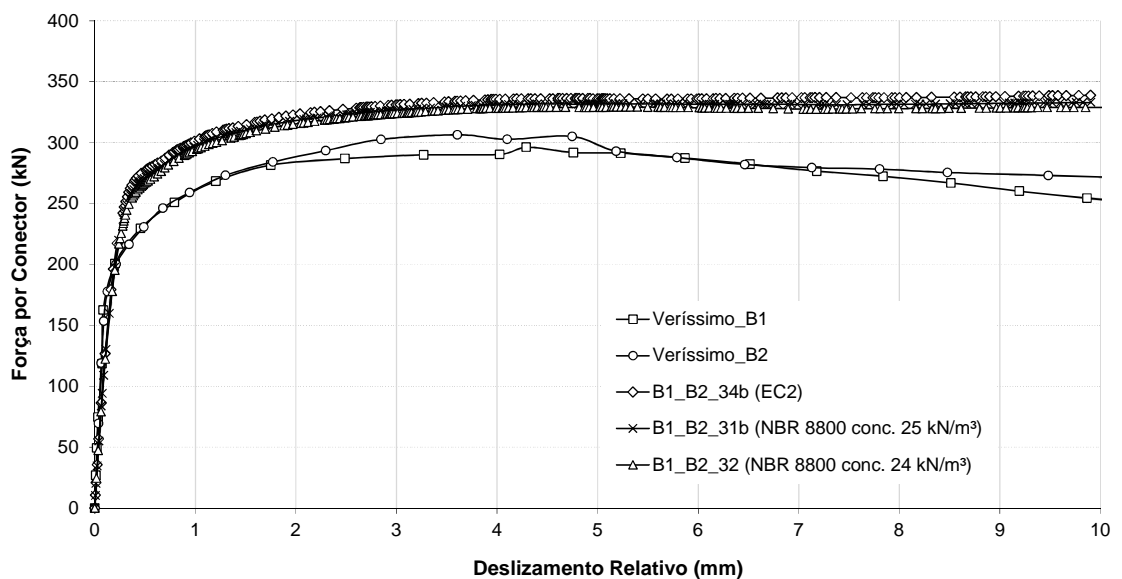


Figura 5.16 - Comparação dos resultados do modelo B1_B2 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com restrições tipo *Tie*).

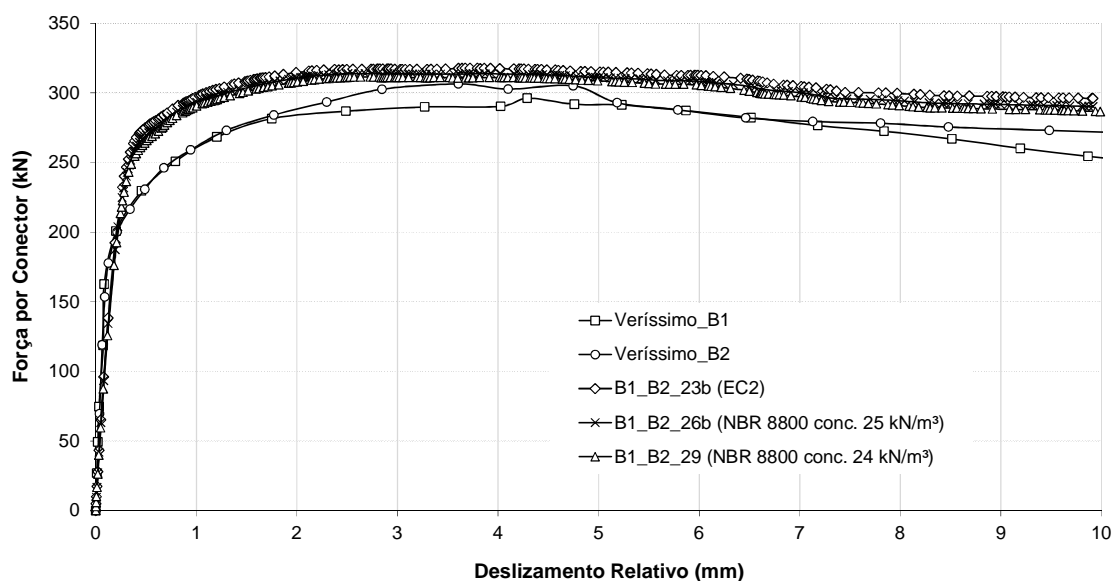


Figura 5.17 - Comparação dos resultados do modelo B1_B2 para diferentes módulos de elasticidade do concreto (simulações com interações de contato).

Novamente, pode-se observar que não houve diferença significativa nos resultados, comprovando que a influência em termos de cargas máximas deve-se realmente à definição da tensão residual utilizada na curva tensão×deformação do concreto comprimido nas análises, e não ao módulo de elasticidade do concreto.

Um procedimento semelhante foi realizado para os modelos C1, D5a e D5b, que apresentaram comportamentos semelhantes, seguindo a mesma tendência dos modelos A3 e B1_B2 apresentados aqui.

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões gerais

Neste trabalho, foi apresentado um modelo numérico pelo Método dos Elementos Finitos, elaborado no *software* ABAQUS, para a simulação do comportamento dos conectores de cisalhamento *Crestbond* em ensaios tipo *push-out*. Os fenômenos que se desenvolvem nesses ensaios são bastante complexos.

A simulação tridimensional obtida no presente trabalho representa um avanço no âmbito do estudo de conectores de cisalhamento em chapa plana de aço perfurada e permite simular o comportamento de conectores de cisalhamento dessa natureza. Alguns fenômenos como escorregamentos localizados e fissuração do concreto são muito difíceis de simular de forma realista.

Nas análises realizadas, foram consideradas não-linearidade material e não-linearidade geométrica da estrutura, admitindo-se um comportamento elastoplástico perfeito para o aço e um comportamento para o concreto baseado no Modelo de Dano Plástico.

Foram realizadas diversas simulações numéricas correspondentes a cinco modelos experimentais selecionados na literatura. Para cada modelo experimental foram feitas duas simulações numéricas principais divididas em dois grupos: aquele em que se utilizou para representar a ligação conector-laje restrições do tipo *Tie*, e aquele em que se utilizou interações de contato entre superfícies.

O objetivo principal deste trabalho, que foi simular o comportamento do conector *Crestbond* em ensaios do tipo *push-out* por meio do Método dos Elementos Finitos, foi alcançado, sendo o modelo numérico capaz de representar o comportamento estrutural desse conector.

As simulações numéricas se mostraram satisfatórias, fornecendo resultados muito próximos dos obtidos em ensaios experimentais.

As estratégias adotadas para simular a ligação entre o conector e a laje de concreto no modelo numérico foram capazes de representar adequadamente os fenômenos observados nos modelos experimentais, principalmente quando se utilizaram interações de contato entre superfícies. Dessa forma, a estratégia de modelagem desenvolvida permite representar de forma satisfatória a interação entre aço e concreto através do uso de diferentes algoritmos disponíveis no ABAQUS.

Observou-se que, em todas as simulações numéricas realizadas neste trabalho, o aspecto de deformação dos conectores de cisalhamento foi muito semelhante ao observado nos modelos experimentais.

Nas simulações numéricas desenvolvidas com estratégia de representação da ligação conector-laje através de interações de contato entre superfícies pôde-se observar o comportamento estrutural dos modelos na fase pós-pico da curva força×deslizamento. Isto comprova a capacidade do modelo numérico de descrever todo o comportamento estrutural dos conectores de cisalhamento *Crestbond* em ensaios *push-out*. Portanto, recomenda-se o uso das interações de contato para novas simulações numéricas.

Observou-se também que a tensão residual utilizada na curva tensão×deformação para o modelo constitutivo do concreto tem uma grande influência nos resultados das simulações numéricas. Recomenda-se utilizar valores mais baixos para essas tensões, em torno de 25% da resistência média à compressão do concreto ($0,25 f_{cm}$), para novas simulações numéricas.

Conclui-se que o modelo numérico desenvolvido é adequado para a simulação do comportamento estrutural dos conectores *Crestbond* em ensaios *push-out*, visto que o mesmo foi capaz de representar a interação entre aço e concreto, caracterizar a carga máxima dos modelos e caracterizar as deformações do conector.

Por fim, acredita-se que os resultados obtidos neste trabalho podem contribuir com o estudo, desenvolvimento e a aplicação dos conectores *Crestbond* e novas variações do

mesmo em outras aplicações, além dos ensaios *push-out* estudados, tais como seu uso em vigas mistas, pilares mistos, dentre outros.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Após a realização deste trabalho, uma série de sugestões pode ser levantada, o que torna necessário outras investigações, dentre as quais se podem citar as seguintes:

- simulação de modelos em que constam armaduras passantes nos furos dos conectores de cisalhamento, de forma a estudar a contribuição das mesmas na resistência da conexão;
- realização de um estudo paramétrico, variando-se espessura, tamanho e forma dos conectores, além da variação da resistência à compressão do concreto utilizado nas lajes;
- melhoramento da modelagem de ensaios *push-out* em que as lajes de concreto possuam grande resistência à compressão;
- simulação de modelos usando outros tipos de conectores de cisalhamento formados a partir de chapas planas, tomando como base este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, NBR 8800. *Projeto e Execução de Estruturas de Edifícios*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1986.

AL-DARZI, S. Y. K.; CHEN, A. R.; LIU, Y. Q. Finite Element Simulation and Parametric Studies of Perfobond Rib Connector. *American Journal of Applied Sciences*, 4 (3): 122-127, 2007.

BONILLA, J. *Estudio del comportamiento de conectores tipo perno de estructuras compuestas de hormigón y acero mediante modelación numérica*. Tesis de Doctorado. Unpublished Ph. Dr., UCLV, Santa Clara, Cuba, 2008.

CHEN, A. R.; AL-DARZI, S. Y. K. New Perfobond Rib Connector Shapes. *Asian Journal of Applied Sciences*, 2 (4): 385-393, 2009.

CHROMIAK, P.; STUDNICKA, J. Computer model of perfobond connector. *Stability and Ductility of Steel Structures*. D. Camotim *et al.* (Eds.). Lisbon, Portugal, September 6-8, 2006.

DAVIES, C.; Tests on half-scale steel-concrete composite beams with welded stud connectors. *Structural Engineer*, Vol. 47 (1), 29-40, 1969.

EL-LOBODY, E.; LAM, D. Finite Element Analysis of Steel-Concrete Composite Girders. *Advances in Structural Engineering* Vol. 6 No. 4 2003.

EL-LOBODY, E.; YOUNG, B. Performance of shear connection in composite beams with profiled steel sheeting. *Journal of Constructional Steel Research* 62: 682–694, 2006.

EN 1992-1-1:2004 - EUROCODE 2. *Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, Brussels: European Committee for Standardization, April, 2004.

EN 1994-1-1:2004 – EUROCODE 4. *Design of composite steel and concrete structures*. European Committee for Standardization (CEN), 2004.

FINK, J; PETRASCHEK, T; ONDRIS. *Push-out Test Parametric Simulation Study of a New Sheet-Type Shear Connector*. Austria, 2006.

GALJAARD, H.; WALRAVEN, J.C.; *Static tests on various types of shear connectors for composite structures*, In: International Symposium on Connections Between Steel and Concrete, University of Stuttgart, Vol.2, pp. 1313-1322, 2001.

HIBBITT, KARLSSON e SORENSEN. *ABAQUS Theory Manual*. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, EUA; 2009.

JEONG, Y. J.; KIM, H. Y.; KOO, H. B.; KIM, S. T. Steel-Concrete Interface Behavior and Analysis for Push-Out. *Journal of Civil Engineering - KSCE*. Vol. 9, N° 2, pp. 119-124, 2005.

JOHNSON, R. P. *Composite Structures of Steel and Concrete – Beams, Slabs, Columns, and Frames for Buildings*. 3rd edition, Oxford (UK): Blackwell Science Ltd., 2004. Vol. 1.

KALFAS, C.; PAVLIDIS, P.; GALOUSSIS, E. Inelastic behaviour of shear connection by a method based on FEM. *Journal of Construction Steel Research*, v.44, p.107-114, 1997.

KIM, B.; WRIGHT, H. D.; CAIRNS, R. The behaviour of through deck welded shear connectors: an experimental and numerical study. *Journal of Constructional Steel Research* 57: 1359–1380, 2001.

KIM, H. Y.; JEONG, Y. J. Experimental investigation on behaviour of steel–concrete composite bridge decks with perfobond ribs. *Journal of Constructional Steel Research* 62: 463–471, 2006.

- KIM, S. H.; AHN, J. H.; CHOI, K. T.; JUNG, C. Y. Experimental Evaluation of the Shear Resistance of Corrugated Perfobond Rib Shear Connections. *Advances in Structural Engineering*. Vol. 14 N° 2, 2011.
- KIRCHHOF, L.D.; NETO, J.M.; MALITE, M.; GONÇALVES, R.M. Análise da resposta de modelos numéricos de vigas mistas aço-concreto. *Mecânica Computacional*, v.23. Argentina, 2003.
- KLAIBER, F. W.; WIPF, T. J. An Alternate Shear Connector for Composite Action. In: *Mid-Continent Transportation Symposium Proceedings*, p. 115-120, 2000.
- LAM, D.; ELLIOTT, K. S.; NETHERCOT, D. A. Parametric study on composite steel beams with precast concrete hollow core floor slabs. *Journal of Constructional Steel Research*. v.54, p. 283-304, 2000.
- LAM, D.; EL-LOBODY, E. Behavior of Headed Stud Shear Connectors in Composite Beam. *Journal of Structural Engineering – ASCE*. Vol. 131, N° 1, pp. 96-107, 2005.
- LEE, J.; FENVES, G. L. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 124, N° 8, pp. 892-900, 1998.
- LEONHARDT, F.; ANDRÄ, W.; ANDRÄ, H.P.; HARRE, W. Neues vorteilhaftes verbundmittel für stahlverbund-tragwerk mit höher dauerfestigkeit (New Improved Shear Connector With High Fatigue Strength for Composite Structures). *Beton und Stahlbetonbau*, Berlim, No. 12, pp. 325-331, 1987.
- LORENC, W.; IGNATOWICZ, R.; KUBICA, E.; SEIDL, G. *Numerical model of shear connection by concrete dowels*. Recent Developments in Structural Engineering Mechanics and Computation. Millpress, Rotterdam, Netherlands, 2007.
- LOURENÇO, P.B. *Métodos Computacionais da mecânica dos sólidos não-linear*. Portugal: 1999.
- LUBLINER, J; OLIVER, J; OLLER, S; OÑATE, E. A Plastic-Damage Model for Concrete. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 25, N° 3, p. 299-326, 1989.

LUCCIONI, B. *Apuntes de Mecánica de Daño Continuo*. Departamento de Resistencia de los Materiales y Estructuras a la Ingeniería, Universidade Politècnica de Catalunya. Diciembre, 2003.

MALITE, M. *Sobre o cálculo de vigas mistas aço-concreto: ênfase em edifícios*. São Carlos. 144p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1990.

MALM, R. *Predicting shear type crack initiation and growth in concrete with non-linear finite element method*. Ph.D. thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2009.

MIRZA, O.; UY, B. *Effect of strain profiles on the behavior of shear connectors for composite steel-concrete beams*. International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete, 2008.

MIRZA, O.; UY, B. Finite element model for the long-term behavior of composite steel-concrete push tests. *Steel and Composite Structures*, Vol. 10, Nº 1, p. 45-67, 2010.

NISHIDO, T.; FUJII, K.; ARIYOSHI, T. Slip behavior of Perfobond rib shear connectors and its treatment in FEM. In: Conference Composite Construction in Steel and Concrete IV, *Proceedings of the Conference Composite Construction in Steel and Concrete IV*, Banff, Alberta, Canada, 2000, pp. 379-390.

NGUYEN, H. T.; KIM, S. E. Finite element modeling of push-out tests for large stud shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research* 65:1909-1920, 2009.

OGUEJIOFOR, E. C. *Behaviour of Perfobond rib shear connectors in composite beams: full-size tests*. M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1990.

OGUEJIOFOR, E. C. *Perfobond rib shear connectors for composite beams*. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1994.

OGUEJIOFOR, E.C.; HOUSAIN, M.U. Numerical analysis of push-out specimens with perfobond rib connectors. *Computers & Structures*, v.62, p.617-624, 1997.

OLIVEIRA, A. F. N. *Análise do Comportamento de um Conector de Cisalhamento em Chapa Dentada para Sistemas de Pisos Mistos com Pré-Laje de Concreto*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

QUDDUSI, F. *Behaviour of slotted and flexible Perfobond rib shear connectors*. M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1994.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; MATA, L. A. C. *Elementos das Estruturas Mistas Aço – Concreto*. Belo Horizonte: Editora O Lutador, 2001.

QUEIROZ, F. D.; VELLASCO, P. C. G. S.; NETHERCOT, D. A. Finite element modelling of composite beams with full and partial shear connection. *Journal of Constructional Steel Research* 63: 505–521, 2007.

QURESHI, J.; LAM, D.; YE, J. Effect of shear connector spacing and layout on the shear connector capacity in composite beams. *Journal of Constructional Steel Research* 67: 706–719, 2011a.

QURESHI, J.; LAM, D.; YE, J. The influence of profiled sheeting thickness and shear connector's position on strength and ductility of headed shear connector. *Engineering Structures* 33: 1643–1656, 2011b.

RODRIGUES, J. P. C.; LAÍM, L. Behaviour of Perfobond shear connectors at high temperatures. *Engineering Structures* 33: 2744–2753, 2011.

SEBASTIAN, W. M.; MCCONNELL, R. E. Nonlinear FE analysis of steel-concrete composite structures. *Journal of Structural Engineering – ASCE*. V.126, N.6, P.662-674, 2000.

SHIM, C. S. Experiments on Limit State Design of Large Stud Shear Connectors. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 8, N° 3, pp. 313-318, 2004.

STUDNICKA, J.; MACHACEK, J.; KRPATA, A.; SVITAKOVA, M. “Perforated shear connector for composite steel and concrete beams”, Proceedings of the Conference Composite Construction in Steel and Concrete IV, Banff, Alberta, Canada, pp. 367-378, 2000.

TRISTÃO, G.A. *Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numérica*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

VALENTE, I.; CRUZ, P. J. S. Experimental analysis of Perfobond shear connection between steel and lightweight concrete. *Journal of Constructional Steel Research* 60: 465–479, 2004.

VELDANDA, M. R. *Behavior of Perfobond rib connectors: push-out tests*. Master Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1991.

VERÍSSIMO, G. S.; VALENTE, I.; PAES, J. L. R.; CRUZ, P. J. S., FAKURY, R.H. *Programa Experimental para estudo do comportamento de um conector de cisalhamento em chapa de aço dentada para estruturas mistas de aço e concreto*, Relatório Técnico, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, 2005.

VERÍSSIMO, G. S.; VALENTE, I.; PAES, J. L. R.; CRUZ, P. J. S., FAKURY, R.H. *Análise Experimental de um conector de cisalhamento em chapa de aço endentada para estruturas mistas de aço e concreto*, XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, UNICAMP, 2006.

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.

VIANNA, J. C.; COSTA-NEVES, L. F.; VELLASCO, P. C. G. S.; ANDRADE, S. A. L. Structural behaviour of T-Perfobond shear connectors in composite girders: An experimental approach. *Engineering Structures* 30: 2381-2391, 2008.

ZELLNER, W. Recent designs of composite bridges and a new type of shear connectors. *Proceedings of the IABSE/ASCE Engineering Foundation Conference on Composite Construction*, Henniker, N.H., 1987. pp.240-252.