

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**CONSOLOS DE CONCRETO MOLDADOS
EM DUAS ETAPAS:**

**Influência do tratamento da interface e da
adição de fibras de aço**

Edilene Muniz de Oliveira

D0059E12
GOIÂNIA
2012

Edilene Muniz de Oliveira

**CONSOLOS DE CONCRETO MOLDADOS
EM DUAS ETAPAS:
Influência do tratamento da interface e da
adição de fibras de aço**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo

D0059E12
GOIÂNIA
2012

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
GPT/BC/UFG**

Oliveira, Edilene Muniz de.
O482c Consolos de concreto moldados em duas etapas
[manuscrito] : influência do tratamento da interface e da
adição de fibras de aço / Edilene Muniz de Oliveira. - 2012.
156 f. : il., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de
Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2012.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas.

Apêndice.

1. Concreto pré-moldado – Consolo. 2. Cisalhamento –
Juntas. 3. Concreto reforçado – Fibras de aço. I. Título.

CDU: 624.012.3



Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

Consolos de Concreto Moldados em Duas Etapas: Influência do Tratamento da Interface e da Adição de Fibras de Aço

Edilene Muniz de Oliveira

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:

Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo (UFG)

Prof.ª. Dr.ª Sylvania Regina Mesquita de Almeida (UFG)

Prof. Dr. Mounir Khalil El Debs (EESC/USP)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por tamanho amor por mim, pela oportunidade a mim oferecida e por toda a força que Ele sempre me deu. Em todos os momentos, Ele sempre está ao meu lado me guiando e orientando. E toda a minha conquista não é minha, mas sim dele.

Aos meus pais, Luiz Alberto e Ana, por todo amor, paciência, apoio, dedicação, compreensão e por tudo que eles sempre me ensinaram. Pai e mãe, vocês são tudo pra mim. Amo muito vocês!

Às minhas irmãs, Elisângela e Elaine, por todo amor, apoio, paciência e compreensão com minha ausência tantas vezes. E por toda a torcida que elas sempre fazem por mim. Também amo muito vocês!

Aos meus sobrinhos, Gabriel, Matheus e Júlia, que sempre me fazem sorrir e tantas vezes ficaram ali do meu lado brincando ou desenhando pra mim enquanto eu estava trabalhando nessa pesquisa.

Ao professor Daniel que sempre foi mais que um orientador, desde a graduação. Sempre foi um conselheiro que sempre me deu força, apoio e sempre teve muita paciência. É um grande exemplo de professor e profissional dedicado que faz tudo com amor e dedicação.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil que se dedicam e lutam por esse mestrado. Em especial, aos professores com os quais eu cursei disciplinas nesse mestrado que enriqueceram meus conhecimentos.

Aos meus amigos do GECON que dividiram comigo tantas horas de estudo e tantos momentos de sofrimento e alegria nessa caminhada

Aos meus amigos Helen, Vanessa e Luiz que me ajudaram diretamente nesse trabalho de alguma forma e, principalmente, como exemplo que são para mim como pesquisadores.

A todos os meus amigos que sempre me apoiaram e compreenderam minha ausência muitas vezes.

A todos da empresa Furnas Centrais Elétricas S.A. que dedicaram muito mais que o próprio trabalho para me auxiliar nessa pesquisa. Por toda a dedicação, empenho e carinho. Vocês têm meu carinho e admiração.

Ao Paulo e ao Anderson, que me ajudaram na pesquisa experimental.

À empresa Goiás artefatos de Cimentos que doou a mão de obra, materiais (cimento, agregados, aço, fôrmas) e a estrutura da empresa para a realização dessa pesquisa.

À empresa Furnas Centrais Elétricas S.A pela cessão da estrutura e dos funcionários para a realização dessa pesquisa.

À empresa Arcelor Mittal, pela doação das fibras de aço utilizadas nessa pesquisa.

À empresa Sika do Brasil, pela doação do aditivo utilizado nessa pesquisa.

À empresa A. R. Trejor Comercial Ltda., pela doação das armaduras com luva e rosca utilizadas nessa pesquisa.

RESUMO

Os consolos de concreto estão entre os componentes das ligações mais utilizados entre os elementos pré-moldados. A produção em série é muitas vezes prejudicada pela necessidade da confecção de consolos em diferentes posições nas peças pré-moldadas. Visando reduzir esse entrave, otimizando a produção, a execução de consolos de concreto moldados em duas etapas pode ser uma boa alternativa. Essa pesquisa intencionou avaliar diferentes procedimentos de confecção de consolos de concreto moldados em duas etapas, onde molda-se primeiramente o pilar e após a desfôrma, moldam-se os consolos. Foram analisados consolos com e sem a incorporação de fibras metálicas, tanto com armadura de costura como em substituição a ela, variando o tratamento da junta e a forma da ligação do tirante do consolo ao pilar. Para tanto, foram realizadas análises experimental e analítica de consolos moldados monoliticamente e em fases distintas. Nos ensaios, foram determinadas a força, o deslocamento vertical e horizontal do consolo em relação ao pilar, a abertura de fissuras e as deformações da armadura do tirante e armadura de costura. A força última dos consolos monolíticos aumentou significativamente quando foi incorporado fibras metálicas ao concreto, inclusive quando estas foram em substituição da armadura de costura. Já nos consolos moldados em duas etapas não ocorreu esse aumento, no entanto, observou-se que as fibras metálicas poderiam substituir a armadura de costura sem prejuízo à capacidade resistente. A presença da armadura de costura elevou a força última dos consolos de concreto sem fibras, moldados em duas etapas. A abertura na interface entre o consolo e o pilar também é influenciada pela presença da armadura de costura, tanto nos consolos moldados em duas etapas quanto nos consolos monolíticos. Já as fibras metálicas adicionadas ao concreto não influenciaram a abertura da interface consolo-pilar dos consolos moldados em duas etapas, mas reduziram substancialmente nos consolos monolíticos. O tratamento da interface teve pouca significância na força última dos consolos moldados em duas etapas. Já na abertura dessa interface, verificou-se influência apenas em consolos com armadura de costura presentes.

Palavras-chave: Consolo. Concreto pré-moldado. Concreto Reforçado com fibras de aço.

ABSTRACT

Concrete corbels are among the most used components to connect precast elements. Series production is often prejudiced by the necessity of making corbels in different positions in precast elements. To reduce this obstacle and rationalize the production, execution of concrete corbels cast in two stages can be a good alternative. The research reported here intended to evaluate different procedures of making concrete corbels cast in two stages, being column cast firstly and, after removing formwork, corbels can be cast. Concrete corbels with and without steel fibers, both with horizontal stirrups and with steel fibers replacing it, with varying the treatment of joint and the shape of the connect the main steel bars to the column were analyzed. To do so, experimental and analytical analyses of concrete corbels cast monolithically and in two distinct phases were carried out. In the tests, the strength, vertical and horizontal displacements in relation to the column, the opening of cracks and strains of main steel and horizontal stirrups were determined. From these tests it was observed that the ultimate strength of monolithic corbels increased significantly when steel fibers were added to concrete, even when they replaced the horizontal stirrups, but this increase did not occur in concrete corbels cast in two stages. However, it was observed that steel fibers could replace the horizontal stirrups without damage to the bearing capacity. Besides, the presence of horizontal stirrups increased the ultimate strength of the concrete corbels without steel fibers cast in two stages. It was also observed that the opening of the joint between the corbel and the column was also influenced by the presence of horizontal stirrups for concrete corbels cast in two stages and monolithic concrete corbels. In the other hand, steel fibers added to the concrete did not affect the opening of the joint corbel-column of corbel cast in two stages, but substantially reduced this opening in monolithic corbels. Finally, it was observed that the treatment of the interface had little significance in the ultimate strength of the concrete corbels cast in two stages, but it influenced the opening of this interface, although only in concrete corbels with horizontal stirrups.

Keywords: Corbel. Precast concrete. Steel fiber reinforced concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplo de consolo no pilar para apoio de viga.....	24
Figura 2.1 - Mecanismo de ruína por flexão (TORRES, 1998)	27
Figura 2.2 - Mecanismo de ruína por fendilhamento da biela comprimida (TORRES, 1998)	28
Figura 2.3 - Mecanismo de ruína por cisalhamento (TORRES, 1998)	28
Figura 2.4 - Geometria dos consolos e detalhamento das armaduras (modificada pelo autor - CAMPIONE; LA MENDOLA; PAPIA, 2005).....	30
Figura 2.5 – Curva Força x Deflexão de consolos armados com armadura de tirante e de costura e consolos com armadura de tirante e fibras metálicas (modificada pelo autor - CAMPIONE; LA MENDOLA; PAPIA, 2005).....	30
Figura 2.6 - Dimensões dos modelos experimentais de Costa (2009) – modificado pelo autor.	33
Figura 2.7 - Diferentes arranjos nos modelos estudados por Costa (2009) – modificado pelo autor.	33
Figura 2.8 - Detalhe da armadura de costura no consolo (modificado pelo autor - COSTA, 2009).....	34
Figura 2.9 - Trajetórias de tensão em consolos (TORRES, 1998).....	36
Figura 2.10 - Modelo de análise e características geométricas de consolo curto (EL DEBS, 2000).....	37
Figura 2.11 - Modelo de biela-tirante para consolo curto (NBR 9062, 2006)	38
Figura 2.12 - Modelo de treliça adotado pelo manual do PCI (PCI, 2010).....	39
Figura 2.13 - Modelo de treliça adotado pelo EUROCODE 2 (CEN, 2004)	40
Figura 2.14 - Modelo de treliça adotado pelo EUROCODE 2 (European Concrete Platform ASBL, 2008).....	41
Figura 2.15 - Modelo de treliça equivalente: a) Treliça simples; b) treliça múltipla. (CAMPIONE; LA MENDOLA; PAPIA, 2005)	43

Figura 2.16 - Equilíbrio da seção transversal do consolo de concreto com fibras. (CAMPIONE; LA MENDOLA; PAPIA, 2005)	45
Figura 2.17 - Modelo de treliça e análise da seção (CAMPIONE, 2009)	48
Figura 2.18 - Análise da seção transversal: a) escoamento do aço; b) esmagamento do concreto (CAMPIONE, 2009).....	48
Figura 2.19 - Modelo de atrito-cisalhamento (modificado pelo autor - EL DEBS, 2000).....	52
Figura 3.1 - Dimensões dos modelos experimentais (em centímetro)	57
Figura 3.2 – Esquema de luva e rosca utilizado (Fonte: Folder A. R. Trejor Comercial Ltda.)	60
Figura 3.3 - Amostras de barras emendadas com luva após o ensaio de tração.....	61
Figura 3.4 - Fôrma dos modelos com a armadura do modelo M1.....	62
Figura 3.5 - Pilar dos modelos M4, M5 e M6 com chaves de cisalhamento concebidas na moldagem.	62
Figura 3.6 - Interface pilar-consolo com as chaves de cisalhamento no modelo M4, antes da concretagem do consolo.	63
Figura 3.7 - Interface pilar-consolo com as chaves de cisalhamento no modelo M5, com o epóxi, antes da concretagem do consolo.	63
Figura 3.8 - Interface pilar-consolo com as chaves de cisalhamento no modelo M6, antes da aplicação do epóxi para concretagem do consolo.	63
Figura 3.9 - Esquema da ligação, por meio de rosca, da armadura do tirante dos consolos moldados em duas etapas	64
Figura 3.10 - Armadura do modelo M7 posicionada na fôrma, antes da concretagem do pilar, com a armadura de costura para fora da fôrma.	65
Figura 3.11 - Complemento da armadura de costura do consolo do modelo M4 deixada na concretagem do pilar.	65
Figura 3.12 - Armadura dos modelos M1 e M2, monolíticos.	66
Figura 3.13 - Armadura do modelo M3, monolítico, sem armadura de costura.	66
Figura 3.14 - Armadura dos modelos M4, M5 e M7, moldados em duas etapas e com armadura de costura.....	66

Figura 3.15 - Armadura dos modelos M6 e M8, moldados em duas etapas e sem armadura de costura.....	67
Figura 3.16 - Armadura do modelo M9, moldado em duas etapas com aço CA-25.	68
Figura 3.17 - Concretagem e adensamento do modelo monolítico M2.....	68
Figura 3.18 - Junta entre o pilar e o consolo do modelo M7, antes da moldagem do consolo.	69
Figura 3.19 - Esquema de posicionamento das fibras na junta entre o consolo e o pilar no modelo M8.....	70
Figura 3.20 - Pilar do modelo M8 com as fibras expostas na junta entre o consolo e o pilar..	70
Figura 3.21 – Preparo e moldagem dos consolos do modelo M4, com chave de cisalhamento.	71
Figura 3.22 - Preparo e moldagem dos consolos do modelo M5, com chave de cisalhamento e epóxi.	71
Figura 3.23 - Preparo para moldagem dos consolos do modelo M6, com chave de cisalhamento e epóxi.	72
Figura 3.24 - Preparo e moldagem dos consolos do modelo M7, com superfície intencionalmente rugosa.	72
Figura 3.25 - Preparo e moldagem dos consolos do modelo M8, com fibras atravessando a interface.	73
Figura 3.26 - Preparo dos consolos do modelo M9, com armadura dobrada.	73
Figura 3.27 - Instrumentação dos modelos (dimensões em cm)	75
Figura 3.28 - Esquema de ensaio dos modelos.....	76
Figura 3.29 - Fixação dos transdutores de deslocamento para medição da abertura da junta entre o consolo e o pilar.....	77
Figura 3.30 - Transdutores de deslocamentos fixados para o ensaio.	78
Figura 3.31 - Modelo preparado para o ensaio.....	79
Figura 4.1 - Panorama de fissuração do modelo monolítico M1A.....	81
Figura 4.2 - Panorama de fissuração do modelo monolítico M1B.....	83
Figura 4.3 - Panorama de fissuração do modelo monolítico M2A.....	85

Figura 4.4 - Panorama de fissuração do modelo monolítico M2B.....	86
Figura 4.5 - Panorama de fissuração do modelo monolítico M3A.....	87
Figura 4.6 - Panorama de fissuração do modelo monolítico M3B.....	89
Figura 4.7 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M4A.....	91
Figura 4.8 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M4B.....	93
Figura 4.9 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M5A.....	94
Figura 4.10 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M5B.....	96
Figura 4.11 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M6.....	97
Figura 4.12 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M7A.....	98
Figura 4.13 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M7B.....	100
Figura 4.14 - Panorama de fissuração do modelo M8A.....	101
Figura 4.15 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M8B.....	103
Figura 4.16 - Fissuração na região do tirante próximo ao pilar do modelo em duas etapas M9A.....	104
Figura 4.17 - Armaduras do consolo do modelo em duas etapas M9.	105
Figura 4.18 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M9A.....	105
Figura 4.19 - Fissuração na região do tirante próximo ao pilar do modelo em duas etapas M9B.....	107
Figura 4.20 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M9B.....	107
Figura 4.21 - Numeração dos extensômetros dos tirantes.....	108
Figura 4.22 – Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M2 e M3.	113
Figura 4.23 - Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M4 e M7.	115
Figura 4.24 - Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M5, M6 e M8.....	116
Figura 4.25 - Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M3, M6 e M8.....	117

Figura 4.26 - Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação média na armadura do tirante para os modelos M4, M5 e M6.	119
Figura 4.27 - Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação média na armadura do tirante para os modelos M4, M7 e M8.	120
Figura 4.28 - Numeração dos transdutores de deslocamentos horizontais.	121
Figura 4.29 - Gráfico de Força <i>versus</i> Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M2 e M3.	122
Figura 4.30 - Gráfico de Força <i>versus</i> Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M5, M6 e M8.	123
Figura 4.31 - Gráfico de Força <i>versus</i> Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M7 e M8.	124
Figura 4.32 - Gráfico de Força <i>versus</i> Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M4 e M7.	125
Figura 4.33 - Gráfico de Força <i>versus</i> Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M5 e M6.	126
Figura 4.34 - Gráfico de Força <i>versus</i> Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M7 e M9.	127
Figura 4.35 – Numeração dos extensômetros das armaduras de costura.	128
Figura 4.36 - Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M1A.	129
Figura 4.37 - Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M1B.	129
Figura 4.38 - Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M2A.	130
Figura 4.39 - Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M2B.	131
Figura 4.40 - Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M4A.	131

Figura 4.41 - Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M4B.....	132
Figura 4.42 - Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M7A.....	132
Figura 4.43 - Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M7B.....	133
Figura 4.44 - Numeração dos transdutores de deslocamentos verticais.....	133
Figura 4.45 – Esquema de rotação referente ao deslocamento horizontal.	134
Figura 4.46 – Esquema de rotação referente ao deslocamento vertical.....	135
Figura 4.47 – Gráfico de Momento <i>versus</i> Rotação do consolo para os modelos monolíticos M1, M2 e M3.....	136
Figura 4.48 – Gráfico de Força <i>versus</i> Rotação do consolo para os modelos monolíticos M1, M4 e M7.	137
Figura 4.49 – Gráfico de Força <i>versus</i> Rotação do consolo para os modelos monolíticos M1, M3, M4 e M5.....	138
Figura 4.50 – Gráfico de Força <i>versus</i> Rotação do consolo para os modelos com armadura de costura M3, M5 e M6 e M8.....	139
Figura A.1 – Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M2 e M3.....	149
Figura A.2 – Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M4 e M7.	150
Figura A.3 – Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M5, M6 e M8.....	150
Figura A.4 – Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M3, M6 e M8.....	151
Figura A.5 – Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação média na armadura do tirante para os modelos M4, M5 e M6.	151
Figura A.6 – Gráfico de Força <i>versus</i> Deformação média na armadura do tirante para os modelos M4, M7 e M8.	152

Figura A.7 - Gráfico de Força <i>versus</i> Abertura média, até 1,0 mm, da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M2 e M3.	152
Figura A.8 - Gráfico de Força <i>versus</i> Abertura média, até 1,0 mm, da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M5, M6 e M8.	153
Figura A.9 - Gráfico de Força <i>versus</i> Abertura média, até 1,0 mm, da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M7 e M8.	153
Figura A.10 - Gráfico de Força <i>versus</i> Abertura média, até 1,0 mm, da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M4 e M7.	154
Figura A.11 - Gráfico de Força <i>versus</i> Abertura média, até 1,0 mm, da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M5 e M6.	154
Figura A.12 - Gráfico de Força <i>versus</i> Abertura média, até 1,0 mm, da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M7 e M9.	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coeficientes do modelo atrito-cisalhamento recomendados pelo PCI (2010)	53
Tabela 2.2 - Valores limites para a resistência ao cisalhamento da interface (ACI COMMITTEE 318, 2008)	54
Tabela 3.1 - Detalhes dos modelos ensaiados na pesquisa.....	56
Tabela 4.1 – Resultados da força de escoamento do tirante e da força última dos modelos ensaiados.....	109
Tabela 4.3 – Força última teórica.	111
Tabela 4.4 – Abertura da junta nos modelos ensaiados.....	121
Tabela 4.5 – Força de escoamento das armaduras de costura.	128
Tabela 4.6 – Deslocamento vertical nos modelos ensaiados.....	136
Tabela 4.7 – Comparação com os modelos analíticos.....	141

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI: American Concrete Institute

CEN: Comité Européen de Normalisation

PCI: Precast/Prestressed Concrete Institute

LISTA DE SÍMBOLOS

- **Símbolos romanos**

a: distância do ponto de aplicação da carga vertical do consolo com a face mais próxima do pilar.

A_{c1} : área da biela de compressão da treliça principal.

A_{c1} : área da biela de compressão da treliça secundária.

A_c^{eff} : área da seção transversal de concreto do membro tracionado da treliça

A_{cr} : área na interface da fissura potencial.

A_{cs} : área da seção transversal da biela de compressão.

A_f : área de aço da armadura do tirante.

$A_{s, cost}$: área de aço da armadura de costura.

$A_{s, tir}$: área de aço da armadura do tirante.

A_{vf} : área de aço da armadura perpendicular ao plano de fissuração.

b: largura do consolo.

d: altura útil do consolo.

c: distância entre o centro da armadura do tirante à face superior do consolo.

D: diâmetro da fibra

E_c é o módulo de elasticidade do concreto.

E_{ct} : módulo de elasticidade do concreto fibroso.

E_s : módulo de elasticidade do aço.

F: fator da fibra.

F_{bu} : força máxima admitida na biela de compressão.

f_c : resistência à compressão de cálculo do concreto.

f'_c : resistência à compressão do concreto.

f_{cd} : resistência à compressão de cálculo do concreto.

f_{cm} : resistência média à compressão do concreto.

f_{ctf} : resistência à tração do concreto fibroso.

$f_{ct,sp}$: resistência à tração indireta do concreto.

f_{cu} : resistência nos nós.

f_{pc} : resistência à tração pós-fissuração.

f'_t : resistência à tração do concreto simples

F_{ED} : força vertical de cálculo atuante no consolo

F_{nt} : força no tirante (PCI, 2010).
 f_t : resistência residual à tração do concreto fibroso.
 F_t : força no tirante
 f'_t : resistência à tração do concreto simples.
 F_u : força última.
 f_y : tensão de escoamento da armadura.
 F_y : força de escoamento do tirante.
 $F_{y\ cost1}$: força relativa ao escoamento da primeira armadura de costura.
 $F_{y\ cost2}$: força relativa ao escoamento da primeira armadura de costura.
 f_{yd} : tensão de cálculo de escoamento da armadura
 h : altura do consolo
 H_d : a força horizontal de cálculo.
 k_2 : coeficiente que leva em conta a distribuição de tensão.
 L_f : comprimento da fibra.
 N_u : força horizontal aplicada ao consolo.
 P_f : parcela de força resistente referente ao efeito das fibras.
 P_{u1} : Carga última com ruptura pelo escoamento do aço.
 P_{u2} : Carga última com ruptura por compressão da biela.
 R_1 : rigidez da treliça principal.
 R_2 : rigidez da treliça secundária.
 s : espaçamento da armadura de costura.
 V_c : força resistente referente à primeira fissura.
 V_n : resistência ao cisalhamento.
 V_{pc} : força resistente referente à pós-fissuração.
 V_y : força resistente referente ao escoamento da armadura do tirante.
 V_u : força resistente referente ao esmagamento do concreto da biela.
 V_{uf} : força cisalhante que atua no plano de fissuração.
 V_d : Força vertical de cálculo.
 x_c : altura da linha neutra.
 x_{cu} : altura da linha neutra relativa às condições de equilíbrio com o esmagamento do concreto
 x_{cy} : altura da linha neutra relativa às condições de equilíbrio com o escoamento da armadura do tirante.
 z : braço de alavanca entre a força de tração no tirante e a resultante da força de compressão.

z_1 : distância entre a fibra mais tracionada da seção transversal e a fibra na qual a tensão de tração é igual à resistência residual à tração do concreto fibroso.

z_u : braço de alavanca entre a força de tração no tirante e a resultante da força de compressão com a linha neutra igual a x_{cu} .

z_y : braço de alavanca entre a força de tração no tirante e a resultante da força de compressão com a linha neutra igual a x_{cy} .

z_{1u} : altura, na seção transversal, correspondente à área de contribuição da fibra na resistência à tração para às condições de equilíbrio com o esmagamento do concreto.

z_{1y} : altura, na seção transversal, correspondente à área de contribuição da fibra na resistência à tração para às condições de equilíbrio com o escoamento da armadura do tirante.

• Símbolos gregos

α : inclinação da biela de compressão da treliça correspondente à armadura do tirante com a horizontal.

β : inclinação da biela de compressão da treliça secundária com a horizontal.

β_n : fator que leva em conta o efeito da ancoragem de tirantes na efetiva resistência à compressão de um nó.

β_n : fator que leva em conta o efeito da ancoragem de tirantes na efetiva resistência à compressão de um nó.

β_s : fator que leva em conta o efeito da fissuração e da armadura de confinamento na efetiva resistência à compressão de uma biela.

δ : distância do centro de gravidade da armadura à face superior do consolo.

$\delta_{h\text{ serv, M1}}$: deslocamento horizontal para a carga de serviço do modelo de referência, M1.

$\delta_{h\text{ serv}}$: deslocamento horizontal para a carga de serviço do modelo.

δ_{hy} : deslocamento horizontal para a força de escoamento do tirante.

δ^c_v : deslocamento vertical relativo à primeira fissura.

δ^c_u : deslocamento vertical relativo ao esmagamento da biela de compressão.

δ^c_y : deslocamento vertical relativo ao escoamento do tirante.

δ_{vy} : deslocamento vertical para a força de escoamento do tirante.

ϵ_r : deformação média do concreto na direção perpendicular às fibras.

\emptyset : fator de redução da resistência.

μ : coeficiente de atrito-cisalhamento.

μ_e : coeficiente de atrito-cisalhamento efetivo.

η : relação entre a rigidez da treliça principal com a soma das rigidezes das treliças principal e secundária.

- ρ : relação entre a área de aço do tirante e a área da seção transversal do consolo.
- τ_{wd} : tensão de cisalhamento atuante na interface.
- τ_{wu} : tensão de cisalhamento resistente na interface.
- v : coeficiente dependente da resistência característica à compressão do concreto.
- v_f : percentual de fibras.
- v_{n1} : capacidade resistente do consolo para o caso de ruptura por escoamento do aço.
- v_{n2} : capacidade resistente do consolo para o caso de ruptura por esmagamento da biela.
- χ : redutor da resistência devido ao estado biaxial de tensões.
- ξ : coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto sem a presença de fibras.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVOS	24
1.2 JUSTIFICATIVA	25
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
2.1 MODOS DE RUPTURA DOS CONSOLOS.....	27
2.2 CONSOLOS DE CONCRETO COM FIBRAS	28
2.3 CONSOLOS DE CONCRETO MOLDADOS EM DUAS ETAPAS	32
2.4 MODELOS DE CÁLCULO DE CONSOLOS	35
2.4.1 Modelos de biela e tirante.....	36
2.4.2 Modelo atrito-cisalhamento	51
2.4.3 Modelo de viga em balanço.....	54
CAPÍTULO 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	56
3.1 INTRODUÇÃO.....	56
3.2 MATERIAIS	58
3.2.1 Concreto	58
3.2.2 Aço	60
3.3 EXECUÇÃO DOS MODELOS	61
3.3.1 Fôrma.....	61
3.3.2 Armadura	64
3.3.3 Moldagem.....	68
3.4 INSTRUMENTAÇÃO E EXECUÇÃO DOS ENSAIOS.....	75
CAPÍTULO 4 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	80
4.1 PANORAMA DE FISSURAÇÃO E FORMA DE RUPTURA.....	80

4.2	FORÇA DE ESCOAMENTO DO TIRANTE E FORÇA ÚLTIMA	108
4.2.1	Modelos Monolíticos.....	111
4.2.2	Modelos moldados em duas etapas	113
4.2.2.1	Influência da armadura de costura e das fibras.....	115
4.2.2.2	Influência do tratamento da interface	118
4.2.2.3	Influência do dobramento do tirante.....	120
4.3	ABERTURA DA JUNTA ENTRE O CONSOLO E O PILAR	120
4.4	DEFORMAÇÃO DA ARMADURA DE COSTURA.....	127
4.5	DESLOCAMENTO VERTICAL E ROTAÇÃO DA LIGAÇÃO CONSOLO-PILAR	133
4.6	COMPARAÇÃO COM MODELOS ANALÍTICOS	140
	CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES	143
	REFERÊNCIAS	147
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE TODAS AS DUPLICATAS DOS MODELOS ENSAIADOS	149

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A industrialização da construção, cada vez mais, torna-se necessária para o crescimento do país. Do ponto de vista das estruturas das edificações, a sua industrialização pode ser alcançada com o emprego de elementos pré-fabricados de concreto. Isso, devido à capacidade da pré-fabricação em atender, em tempo hábil e com alto padrão de qualidade, às necessidades do mercado, o qual se tem apresentado exigente não só em relação a prazos e custos, mas também ao desempenho e à durabilidade. O maior controle de qualidade utilizado na confecção das peças de concreto em fábricas, quando comparadas às estruturas moldadas no local, faz com que as primeiras apresentem, notadamente, maior durabilidade.

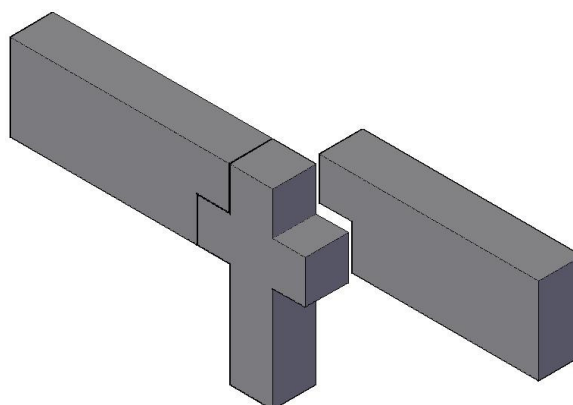
No entanto, para que a pré-fabricação acompanhe essa evolução e continue mostrando-se competitiva é necessário que as empresas invistam em inovação e otimização dos processos produtivos, a fim de minimizar ou até mesmo eliminar os entraves decorrentes do sistema.

O aspecto que se apresenta como principal obstáculo na pré-moldagem de estruturas é a necessidade das ligações entre os elementos. Elas são os pontos mais importantes das estruturas pré-moldadas, com papel relevante não só na distribuição de esforços na estrutura como também em sua estabilidade. É devido à sua notável relevância que as ligações são objetos de inúmeras pesquisas na área do concreto pré-moldado.

Dentre os componentes das ligações, destacam-se os consolos, que são os mais utilizados em diversos tipos de ligações: viga-pilar, viga-viga, laje-viga, laje-pilar e laje-parede.

Os consolos são elementos em balanço que se projetam das laterais de pilares, vigas e paredes para apoio de outro elemento (Figura 1.1). Eles tendem a tornar intrincada a produção das peças (vigas, pilares ou paredes) que o possuem. Isso ocorre tanto devido às altas taxas de armadura normalmente existentes quanto à problemática da moldagem conjunta da peça com o consolo. Quando a posição dos consolos na peça coincide com as laterais da fôrma, elas podem ser recortadas para o encaixe da fôrma do consolo, contudo essas alterações na fôrma danificam-na. Além do prejuízo à fôrma, a etapa de modificação da mesma pode retardar o processo de produção. Quando, porém, essa posição coincide com o leito da fôrma, a mudança torna-se inviável.

Figura 1.1 - Exemplo de consolo no pilar para apoio de viga



O recurso utilizado pelas empresas de estruturas pré-moldadas a fim de contornar essas dificuldades na confecção de consolos de concreto é a moldagem em duas etapas. Nesse caso, é confeccionada, primeiramente, a peça suporte (viga, pilar ou parede) e, posteriormente, o consolo é moldado sobre o concreto já endurecido, surgindo, então, uma junta de concretagem.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar, experimentalmente e analiticamente, o comportamento de consolos de concreto executados em duas etapas, de modo a validar a aplicação dos procedimentos de cálculo de consolos monolíticos a esse tipo de consolo.

Especificamente, os objetivos consistem em:

- Comparar o modo de ruptura dos consolos moldados em duas etapas com os consolos monolíticos. No caso dos consolos moldados em etapa distinta à do pilar, a ligação da armadura do tirante foi realizada por meio de barra com luva e rosca, exceto em um modelo, no qual foi utilizado tirante em aço CA-25, dobrado na concretagem do pilar e desdobrado na confecção do consolo.
- Avaliar a influência da junta fria, formada na ligação do consolo com o pilar, na capacidade resistente e na rigidez do consolo, considerando diferentes tratamentos da interface: chaves de cisalhamento, chaves de cisalhamento com epóxi e superfície rugosa.
- Verificar a possibilidade de eliminação da armadura de costura devido à adição de fibras metálicas ao concreto do consolo.

1.2 JUSTIFICATIVA

A otimização dos processo de produção é um dos objetivos das empresas de pré-fabricados para o sucesso do sistema e a moldagem dos consolos em etapa distinta à do pilar favorece a produção em série.

Algumas empresas executam esse processo dobrando a armadura do consolo (tirante e armadura de costura), em CA-25, dentro do pilar e, após a concretagem e o endurecimento do concreto, desdobram e complementam a armadura para posterior concretagem. Nesse procedimento, há a dificuldade em escarificar o concreto e desdobrar a armadura.

A atual realidade da execução desses consolos pelas empresas de pré-fabricadas de concreto é carente de fundamento teórico. Os métodos de cálculo disponíveis na NBR 9062 (ABNT, 2006) são oferecidos de acordo com a geometria do consolo, não sendo especificado nenhum modelo para consolos de concreto moldados em duas etapas.

A ligação da armadura do tirante do consolo ao pilar por meio de luva e rosca e a possibilidade de substituir a armadura de costura por fibras de aço podem ser meios práticos de produção de consolos de concreto em duas etapas, obtendo resultados satisfatórios caso a junta de concretagem não constitua um plano preferencial de ruptura.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura deste trabalho é dividida em seis capítulos. O Capítulo 1 é uma apresentação do tema desenvolvido apresentando os objetivos e a justificativa do assunto abordado.

O Capítulo 2 apresenta bases teóricas sobre o comportamento de consolos de concreto. São apresentadas teorias sobre os modos de ruptura e os modelos de cálculo recomendados pela norma NBR 9062 (ABTN, 2006), pelo PCI (PCI, 2010) e pela norma europeia EUROCODE 2 (CEN, 2004). São ainda apresentadas pesquisas sobre consolos monolíticos e consolos moldados em duas etapas.

O Capítulo 3 descreve o programa experimental utilizado na presente pesquisa. São apresentados os modelos ensaiados, os materiais utilizados e a forma de execução dos modelos e dos ensaios.

O Capítulo 4 discorre sobre os resultados obtidos nos ensaios, avaliando a influência das variáveis existentes. Neste Capítulo são avaliados o panorama de fissuração, o modo de ruptura, a força de escoamento do tirante, a força última, a abertura da junta entre o consolo e o pilar, a deformação da armadura de costura e a rotação do consolo em relação ao pilar devido ao deslocamento vertical e à abertura da junta.

No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões obtidas pelas análises feitas no Capítulo 4. São ainda apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As seções seguintes, deste capítulo, servem para esclarecer e auxiliar na compreensão dos resultados dos ensaios em consolos monolíticos e moldados em duas etapas. Discorre-se a respeito de modelos de cálculo e de ruptura de consolos, utilização de fibras de aço em consolos de concreto e comportamento de consolos de concreto moldados em duas etapas.

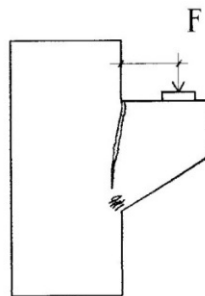
2.1 MODOS DE RUPTURA DOS CONSOLOS

De acordo com Park e Paulay (1983¹, *apud* TORRES, 1998), os principais modos de ruptura dos consolos são os descritos nas seções seguintes.

➤ Ruína por flexão

Esse tipo de ruína ocorre devido ao escoamento da armadura do tirante, formando uma fissura principal na parte superior, e com o esmagamento do concreto na parte inferior, conforme mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Mecanismo de ruína por flexão (TORRES, 1998)



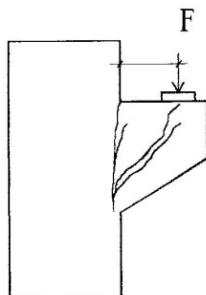
➤ Ruína por fendilhamento da biela comprimida

Esse tipo de ruína ocorre, normalmente, devido à seção insuficiente de concreto na região da biela comprimida ou por falta de armadura distribuída ao longo da altura do consolo. Essa armadura aumenta a ductilidade da peça e a capacidade resistente da biela. Isso decorre devido ao confinamento que essa armadura proporciona à biela, minimizando o efeito de fendilhamento na mesma.

¹ PARK, R., PAULAY, T. Reinforced concrete structures. New York, John Wiley & Sons, 1983. p. 690-700.

A ruína por fendilhamento da biela comprimida é caracterizada por apresentar fissuras decorrentes de flexão e fissuras na direção da biela comprimida, conforme apresentado Figura 2.2.

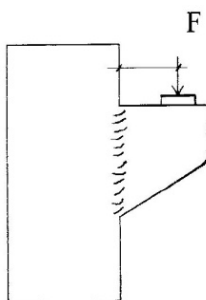
Figura 2.2 - Mecanismo de ruína por fendilhamento da biela comprimida (TORRES, 1998)



➤ Ruína por cisalhamento

Esse tipo de ruína ocorre, geralmente, em consolos muito curtos ou quando os consolos têm elevada quantidade de armadura para flexão. As fissuras apresentam-se numerosas e inclinadas na junta entre o consolo e o pilar, provocando escorregamento, como mostra a Figura 2.3.

Figura 2.3 - Mecanismo de ruína por cisalhamento (TORRES, 1998)



2.2 CONSOLOS DE CONCRETO COM FIBRAS

As fibras adicionadas ao concreto têm a função de transmitir as tensões através das fissuras e, conseqüentemente, reduzir a concentração de tensões nas suas extremidades. A adição das fibras no concreto é justificada, ainda, pelo fato de ficarem distribuídas aleatoriamente, podendo costurar as fissuras que possam surgir fora do alcance das armaduras convencionais.

Para o uso das fibras como reforço na matriz de concreto deve-se conhecer bem as propriedades das fibras (módulo de elasticidade e resistência), suas características geométricas (seção transversal, formato, comprimento e área superficial) e as propriedades do concreto a

serem melhoradas. Figueiredo (2005) recomenda que o comprimento da fibra seja maior ou igual a duas vezes o tamanho máximo do agregado.

Diversas pesquisas têm mostrado que as fibras de aço proporcionam o efeito de confinamento do concreto nas regiões das bielas de compressão dos consolos. E o concreto, quando confinado, tende a alcançar valores de resistência mais elevados.

Campione, La Mendola e Papia (2005) avaliaram, experimentalmente e analiticamente, o comportamento à flexão de consolos de concreto simples e fibroso, armados ou não com tirante e armadura de costura ou com fibras de carbono externas aos consolos. Os resultados provenientes da influência da fibra de carbono não serão expostos aqui, devido a esse tipo de reforço não ser escopo deste trabalho.

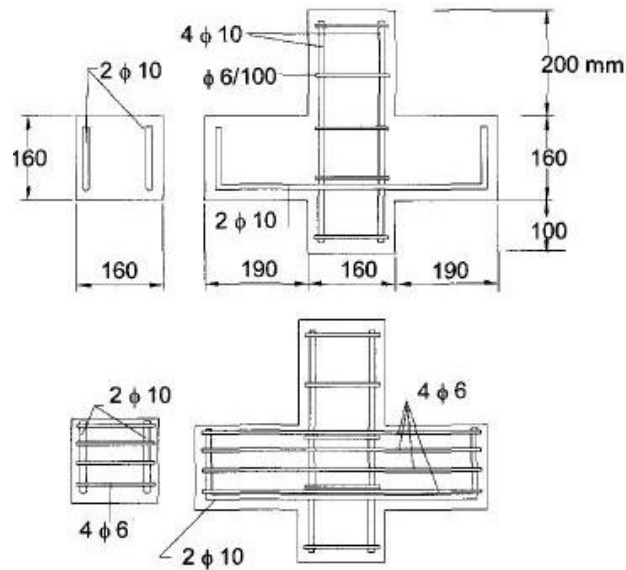
A resistência à compressão dos concretos simples e do concreto fibroso foi de, aproximadamente, 50 MPa. Foram utilizadas fibras metálicas com 30 mm de comprimento, 0,5 mm de diâmetro e resistência nominal de 1115 MPa, em um percentual de 1,0% em relação ao volume do concreto, o que correspondeu a 80 kg/m³. As fibras foram utilizadas como substituição da armadura de costura.

Foram ensaiados seis diferentes modelos de consolos, sendo que cada modelo foi duplicado, totalizando, assim, doze consolos. A relação a/d dos consolos foi mantida constante em 0,785, sendo que a é a distância entre o ponto de aplicação da força e a face do pilar e d é a altura útil do consolo. Na Figura 2.4 é mostrada a geometria e a armadura utilizada nos consolos.

Todos os modelos apresentaram comportamento elástico-linear até a fissuração, seguido do escoamento da armadura do tirante e, posteriormente, do esmagamento da biela de compressão, resultando em uma acentuada queda da capacidade de carga do consolo.

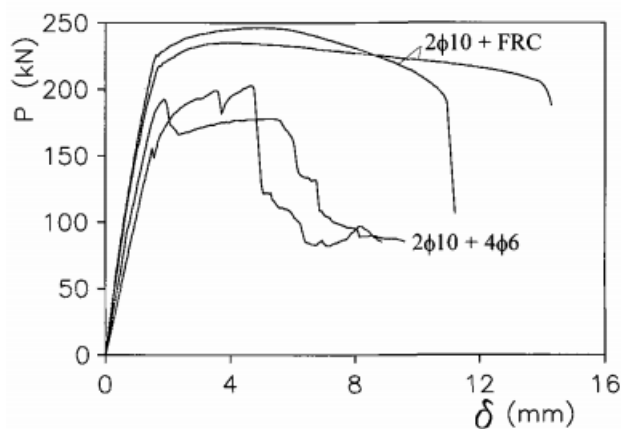
A partir dos resultados, os autores observaram que a presença da armadura de costura nos consolos aumentou a carga máxima alcançada, cerca de, 27% maior que os consolos constituídos apenas com armadura do tirante. Além disso, observaram menores aberturas de fissuras até atingir a carga máxima e maior ductilidade após atingir esta carga.

Figura 2.4 - Geometria dos consolos e detalhamento das armaduras (modificada pelo autor - CAMPIONE; LA MENDOLA; PAPIA, 2005)



Por outro lado, quando a armadura de costura foi substituída pelas fibras, os mesmos resultados favoráveis aos consolos com armadura de costura foram observados, porém com maior intensidade. A carga máxima alcançada foi, cerca de, 22% maior e os deslocamentos após esta carga foram, cerca de, 136% maior que nos consolos constituídos por armadura do tirante e armadura de costura. Além disso, a força correspondente à primeira fissura foi, cerca de, 72% maior. As curvas Força *versus* Deslocamento dos consolos com armaduras do tirante e de costura ($2\phi 10 + 4\phi 6$) e dos consolos com armadura do tirante e fibras ($2\phi 10 + \text{FRC}$) estão ilustradas na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Curva Força x Deflexão de consolos armados com armadura de tirante e de costura e consolos com armadura de tirante e fibras metálicas (modificada pelo autor - CAMPIONE; LA MENDOLA; PAPIA, 2005)



Campione, La Mendola e Mangiavillano (2007) analisaram, experimentalmente e analiticamente, a influência do grau de resistência do concreto, do percentual de fibras e do percentual da armadura do tirante no comportamento à flexão dos consolos de concreto.

Foram ensaiados doze diferentes modelos de consolos, sendo que cada modelo foi duplicado, totalizando, assim, vinte e quatro consolos. Somados a esses modelos, foram introduzidos na pesquisa os resultados obtidos por Campione, La Mendola e Papia (2005), citados anteriormente. As dimensões e o arranjo das armaduras, mostrados na Figura 2.4, são iguais em ambas as pesquisas. No entanto, nesse estudo, além de consolos de concreto com armadura do tirante de 10 mm de diâmetro foi também utilizada armadura do tirante de 16 mm de diâmetro e houve variação no percentual das fibras de aço (0,5% e 1,0%).

A resistência à compressão do concreto foi de, aproximadamente, 80 MPa tanto para o concreto com fibras quanto para o concreto sem fibras. Foram utilizadas fibras metálicas com 30 mm de comprimento, 0,5 mm de diâmetro e resistência nominal de 1115 MPa. Nessa pesquisa, as fibras foram utilizadas tanto como substituição da armadura de costura como complementar a ela.

Os autores observaram que um mesmo percentual de fibras adicionadas ao concreto dos consolos gera efeitos diferentes quando se varia a resistência à compressão do concreto e a taxa de armadura do tirante. Essa conclusão foi obtida quando utilizados os resultados da pesquisa feita por Campione, La Mendola e Papia (2005).

Nos consolos sem fibras, de resistência à compressão de 80 MPa, taxa de armadura do tirante de 0,61%, equivalente a 2 ϕ 10, e sem armadura de costura, o modo de fratura foi caracterizado pelo escoamento da armadura do tirante seguido do esmagamento da biela de compressão. Quando foi adicionado 0,5% de fibras, foi observado um incremento de cerca de 28% na força de escoamento do tirante e na força última. Já a adição de 1,0% de fibras aumentou em cerca de 64% a força de escoamento do tirante e a força última com relação ao consolo sem fibras.

Nos consolos sem fibras, de resistência à compressão de 80 MPa, taxa de armadura do tirante de 1,57%, equivalente a 2 ϕ 16, e sem armadura de costura, o modo de fratura foi devido ao esmagamento do concreto da biela de compressão sem a ocorrência do escoamento do aço. Quando foi adicionado 0,5% de fibras, não foi observada significativa diferença na resistência

última dos consolos. Entretanto, com a adição de 1,0% de fibras foi observado um aumento de 37% na força de escoamento do tirante e na força última.

Nos consolos sem fibras, de resistência à compressão de 80 MPa, tirante de 2 ϕ 10 e com a presença da armadura de costura, o modo de fratura foi caracterizado pelo escoamento da armadura do tirante seguido do esmagamento da biela de compressão. Quando foi adicionado 0,5% de fibras, foi observado um incremento de cerca de 13% na força de escoamento do tirante e na força última. Já a adição de 1,0% de fibras aumentou em cerca de 23% a força de escoamento do tirante e a força última.

E, analisando a influência da armadura de costura, nos consolos sem fibras, de resistência à compressão de 80 MPa e tirante de 2 ϕ 10, há um aumento de cerca de 58% na força de escoamento do tirante e na força última.

2.3 CONSOLOS DE CONCRETO MOLDADOS EM DUAS ETAPAS

Costa (2009) desenvolveu um programa experimental para estudar o comportamento de consolos de concreto moldados em duas etapas com relação a/d igual a 0,75 e dimensões mostradas na Figura 2.6. Para tanto, foram ensaiados 7 modelos diferentes de consolos em duplicata, totalizando 14 consolos. Em 6 modelos, moldados em duas etapas, foram incorporadas 2% de fibras de aço com gancho ao concreto do consolo e variada a taxa de armadura do tirante, entre 0,5% (2 ϕ 12.5) e 2,7% (4 ϕ 20), e o arranjo das mesmas, como exposto na Figura 2.7. Em alguns modelos foi utilizada uma armadura de costura alternativa que não dificultasse o encaixe do consolo ao pilar, como apresentado na Figura 2.8. O concreto do modelo de referência não possuía fibras e o arranjo das armaduras utilizado foi o convencional.

Figura 2.6 - Dimensões dos modelos experimentais de Costa (2009) – modificado pelo autor.

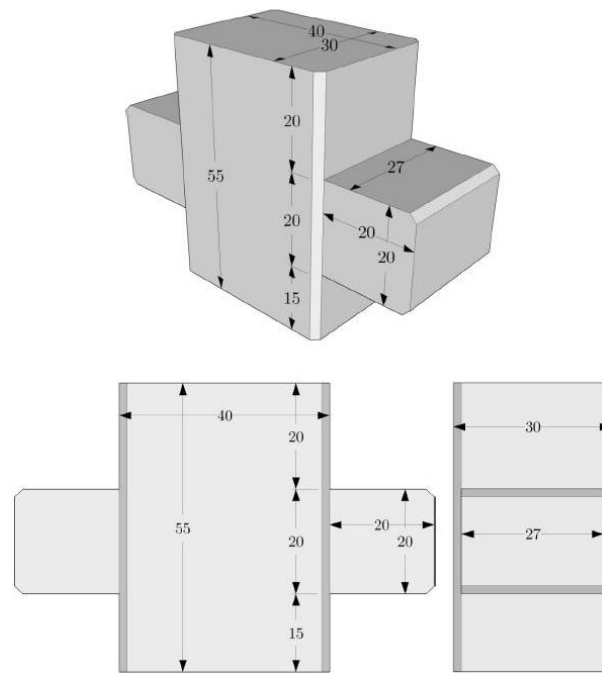


Figura 2.7 - Diferentes arranjos nos modelos estudados por Costa (2009) – modificado pelo autor.

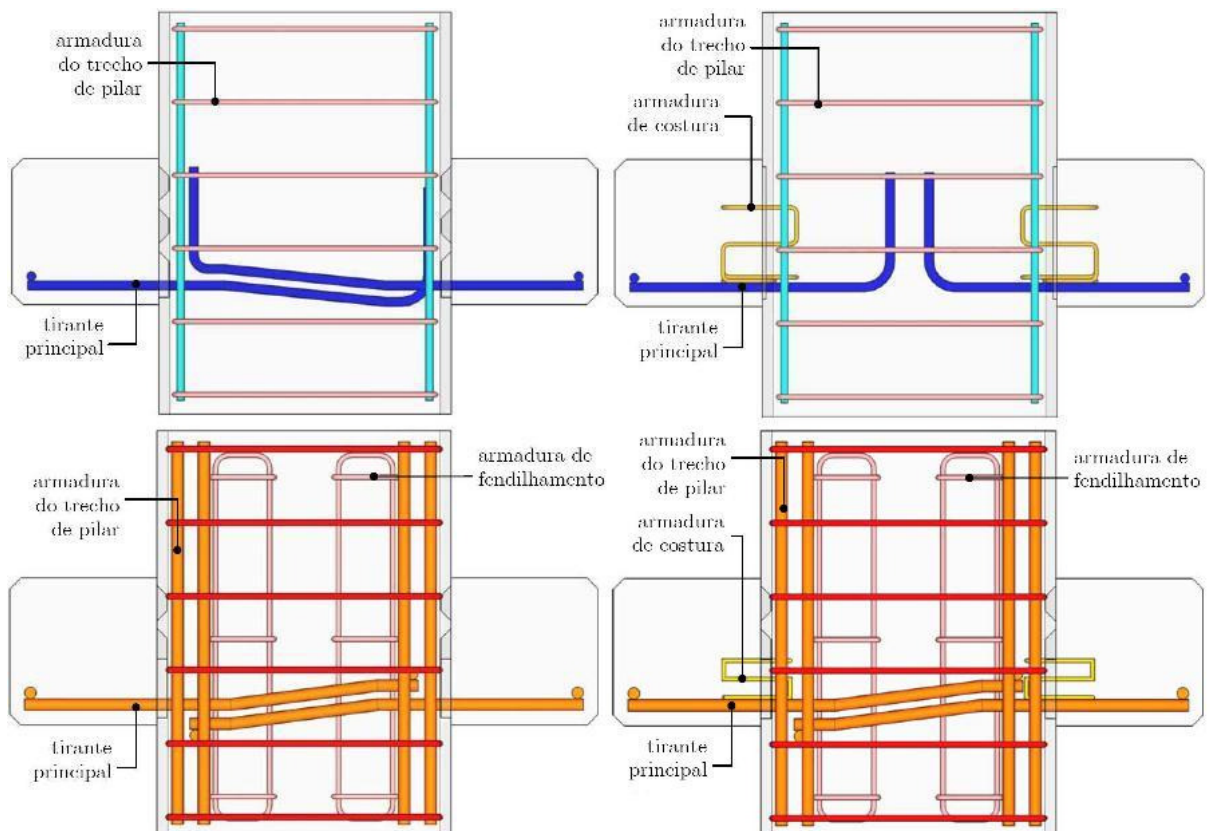
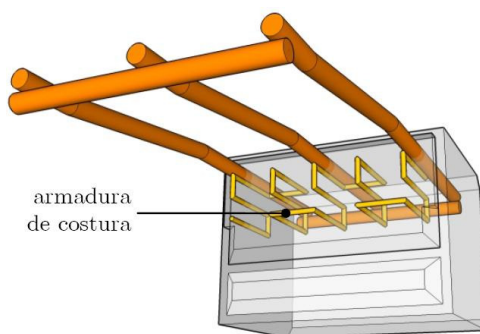


Figura 2.8 - Detalhe da armadura de costura no consolo (modificado pelo autor - COSTA, 2009).



A resistência à compressão média do concreto sem fibras do modelo monolítico e dos pilares dos modelos moldados em duas etapas variou de 48 MPa a 72 MPa, enquanto nos consolos, com fibras, a resistência à compressão média do concreto variou de 44 MPa a 92 MPa.

Para comparação com valores teóricos, Costa (2009) adotou o critério de comparação da força máxima alcançada com o menor dos valores entre a força de escoamento do tirante e a força para a ruptura da biela de compressão. O escoamento do tirante foi observado na junta entre o consolo e o pilar de todos os modelos, exceto no modelo moldado em duas etapas e que possuía maior taxa de armadura do tirante (4 ϕ 20). Nesse caso, a ruptura se deu pela ruína da biela de compressão e foi adotada como força máxima teórica a força para a ruptura da biela de compressão.

Os consolos do modelo de referência (monolíticos) alcançaram uma força máxima, no ensaio, 20% superior ao valor previsto teoricamente pelo modelo de bielas e tirantes da NBR 9062 (ABNT, 2006). Já os modelos moldados em duas etapas apresentaram uma força máxima entre 31% e 38% maior que o valor previsto teoricamente.

Confrontando os resultados dos consolos do modelo de referência com os consolos moldados em duas etapas e que possuíam a mesma armadura do tirante, observou-se que a força máxima destes, no ensaio, foi 8% maior que o modelo de referência devido à presença das fibras.

A vantagem da presença das fibras no concreto do consolo, no entanto, fica evidenciada pelo aumento significativo na ductilidade, o que foi observado, inclusive, nos consolos que possuíam baixa taxa de armadura do tirante.

Com relação à abertura de fissuras na junta entre o consolo e o pilar, observou-se que, para os consolos moldados em duas etapas e que possuíam a mesma armadura do tirante do modelo de referência e fibras adicionadas ao concreto do consolo, essa abertura foi 33% maior.

O quadro de fissuração dos consolos moldados em duas etapas foi semelhante ao modelo de treliça exposto por Leonhardt e Mönning (1978) constituído por uma barra tracionada e por uma diagonal comprimida.

2.4 MODELOS DE CÁLCULO DE CONSOLOS

O comportamento estrutural dos consolos não respeita a hipótese de manutenção das seções transversais planas depois da ocorrência da flexão, característica da Teoria de Vigas de Navier, por não terem a capacidade de dissiparem as perturbações localizadas, devido ao comprimento do elemento não ser suficientemente longo. Assim, para a análise dos consolos pode-se utilizar modelos lineares ou não, modelos de biela e tirante ou modelos de atrito cisalhamento, de acordo com a NBR6118 (ABNT, 2003).

Franz e Niedenhoff (1963², *apud* LEONHARDT; MONNING, 1978) estudaram consolos carregados apenas com carga vertical e com relação $a/d = 0,5$. Nesse estudo, eles observaram que (Figura 2.9):

- As tensões de tração na face superior do consolo apresentam-se constantes do ponto de aplicação da carga até a face do pilar;
- Surgem tensões de compressão do ponto de aplicação da carga até a base do consolo;
- Praticamente não existem tensões na parte inferior dos consolos retangulares, podendo-se utilizar consolos com altura variável.

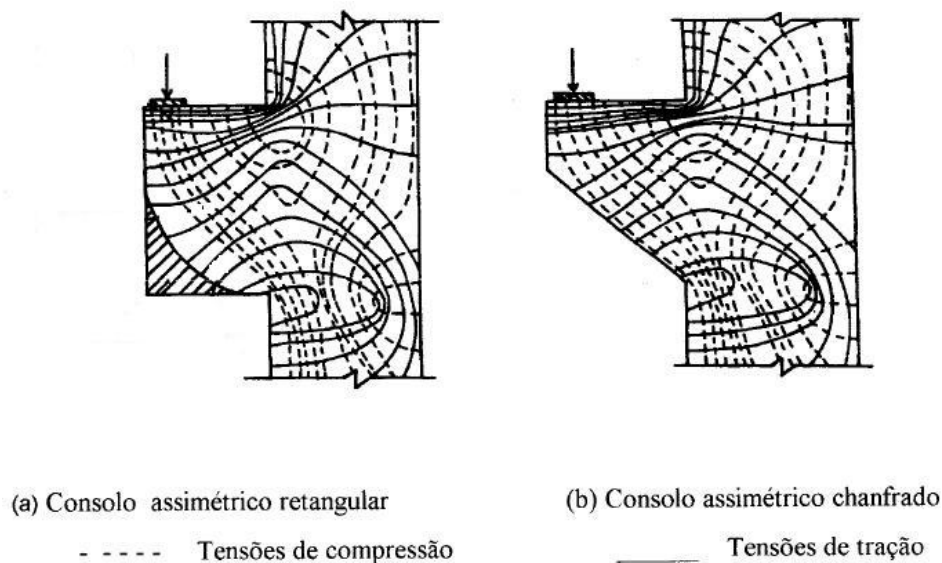
De acordo com a NBR 9062 (ABNT, 2006) o modelo de cálculo para os consolos é definido de acordo com a relação a/d , conforme apresentado a seguir:

- Para os consolos com relação $1,0 < a/d \leq 2,0$, o dimensionamento deve ser feito como viga em balanço como disposto na NBR 6118 (ABNT, 2003);

² FRANZ, G.; NIEDENHOFF, H. Die Bewehrung von konsolen and gedrungenen balken. Beton –und Stahlbetonbau, v.58, n. 5, p. 112-120, 1963

- Para os consolos com relação $0,5 < a/d \leq 1,0$ (consolos curtos), o dimensionamento deve ser feito conforme o modelo matemático de uma treliça de duas barras, uma tracionada (tirante) e outra comprimida (biela);
- Para os consolos com relação $a/d \leq 0,5$ (consolos muito curtos), o dimensionamento deve ser feito supondo a ruptura ao longo do plano de ligação do consolo com seu suporte, podendo-se considerar o efeito favorável do engrenamento dos agregados desde que a interface seja atravessada por barras de aço perpendiculares à mesma.

Figura 2.9 - Trajetórias de tensão em consolos (TORRES, 1998).



2.4.1 Modelos de biela e tirante

O modelo de biela e tirante consiste em um modelo de representação da peça na ruptura, no qual se idealiza uma treliça que represente o fluxo de tensões existentes no consolo. Nessa treliça, os tirantes localizam-se nas regiões de tensões de tração e sua resistência depende da área de aço adotada e da resistência ao escoamento do mesmo. As bielas situam-se nas regiões de tensões de compressão e sua resistência depende da resistência à compressão do concreto e da área da seção transversal da biela. Os nós são as regiões de união entre tirantes e bielas, pontos de aplicação de forças ou de reação de apoio. Para que o consolo tenha um comportamento dúctil é indispensável que os tirantes cheguem à ruína antes das bielas ou das regiões nodais.

A configuração da treliça utilizada depende do nível de refinamento dos resultados esperados e das condições de apoio que se dispõe. De acordo com Souza (2004), a escolha de um modelo de treliça apropriado pode ser feita baseando-se em:

- Modelos disponíveis em normas;
- Trajetória das tensões;
- Análises elásticas utilizando o Método dos Elementos Finitos;
- Análises não-lineares que considerem a fissuração do concreto;
- Ensaaios experimentais;
- Processos de otimização.

Leonhardt e Monning (1978) propuseram uma treliça com uma biela e um tirante para o dimensionamento de consolos curtos. A Figura 2.10 ilustra o modelo proposto e o cálculo da largura da biela, h_{bic} .

A NBR 9062 (2006) também adota o mesmo modelo de treliça, no entanto a largura da biela é obtida de forma distinta (Figura 2.11). No item 4.2 serão aplicadas ambas propostas.

Figura 2.10 - Modelo de análise e características geométricas de consolo curto (EL DEBS, 2000)

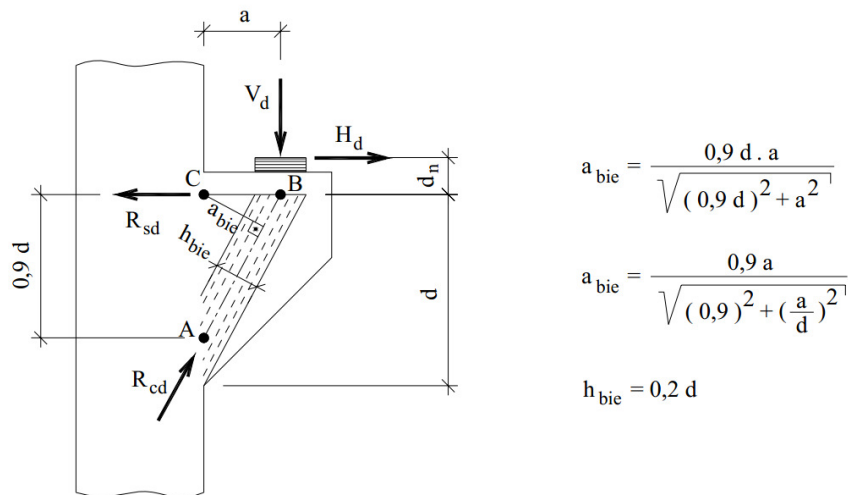
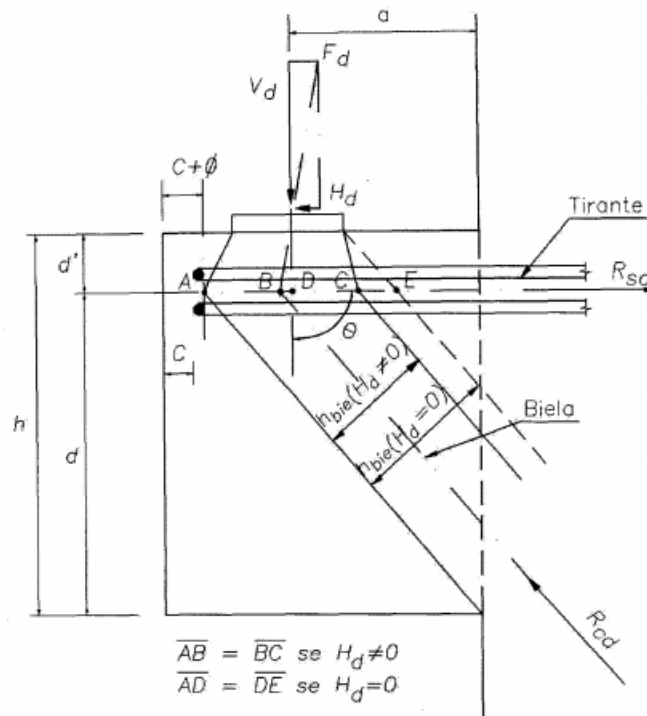


Figura 2.11 - Modelo de biela-tirante para consolo curto (NBR 9062, 2006)



No modelo de biela e tirante, ainda deveriam ser verificadas as tensões nos nós, contudo a NBR 9062 (ABNT, 2006) não exige essa verificação.

De acordo com a NBR 9062 (ABNT, 2006), a tensão de compressão na biela em consolos curtos, σ_{cd} , deve ser limitada em:

- f_{cd} para carga direta;
- $0,85 f_{cd}$ para carga indireta.

Sendo que f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão do concreto.

A armadura total do tirante, $A_{s,tir}$, de consolos curtos é avaliada, segundo a NBR 9062 (ABNT, 2006), por:

$$A_{s,tir} = \left(0,1 + \frac{a}{d}\right) \frac{V_d}{f_{yd}} + \frac{H_d}{f_{yd}} \quad (2.1)$$

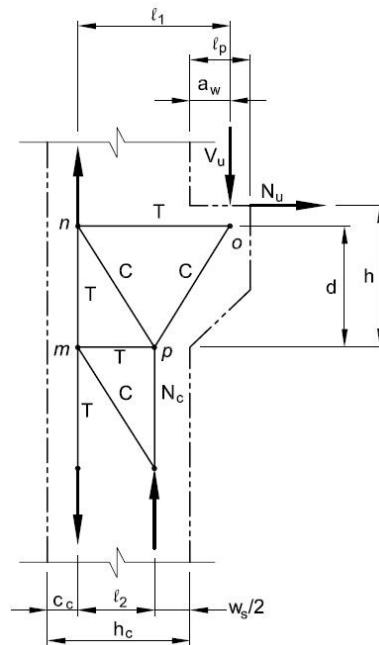
Sendo que V_d é a força vertical de cálculo; f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço; e H_d é a força horizontal de cálculo.

A armadura de costura de consolos curtos deve ser distribuída em 2/3 da altura de cálculo do consolo (d) adjacentes à armadura do tirante. A área de aço necessária para a armadura de costura é avaliada por:

$$(A_s / s)_{\text{cost}} = \frac{0,4}{d} \left(0,1 + \frac{a}{d} \right) \frac{V_d}{f_{yd}} \quad (2.2)$$

O manual do PCI (PCI, 2010) sugere a treliça ilustrada na Figura 2.12, a qual é formada por quatro nós (m, n, o, p) localizados de acordo com o fluxo de tensões do consolo.

Figura 2.12 - Modelo de treliça adotado pelo manual do PCI (PCI, 2010)



O projeto de consolos de concreto, nesse caso, abrange, além da verificação das tensões nas bielas e nos tirantes, também a verificação nos nós.

As tensões nos nós, f_{cu} , devem ser limitadas aos valores resultantes da equação (2.3):

$$f_{cu} = 0,85 \beta_n f_c \quad (2.3)$$

Sendo que f_c é a resistência à compressão de cálculo do concreto; $\beta_n = 1,0$, nos nós localizados nos pontos de aplicação das cargas; $\beta_n = 0,8$, nos nós onde está ligado um tirante; $\beta_n = 0,6$, nos nós onde estão ligados dois ou mais tirantes.

A máxima força, F_{bu} , permitida na biela de compressão é:

$$F_{bu} = \phi 0,85 \beta_s f_c A_{cs} \quad (2.4)$$

Sendo que ϕ é o fator de redução da resistência, igual a 0,75; $\beta_s = 0,6 \lambda$, com λ sendo igual a 1,0 para concreto de peso normal e igual a 0,75 para concreto leve; A_{cs} é a área da seção transversal da biela de compressão.

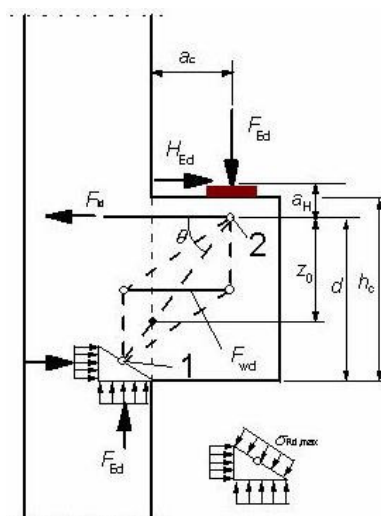
As armaduras dos tirantes 'NO' e 'MP' são calculadas por:

$$A_{s,tir} = \frac{F_{nt}}{\phi f_y} \quad (2.5)$$

Sendo que F_{nt} é a força no tirante; f_y é a resistência ao escoamento do aço do tirante, limitada a 420 MPa.

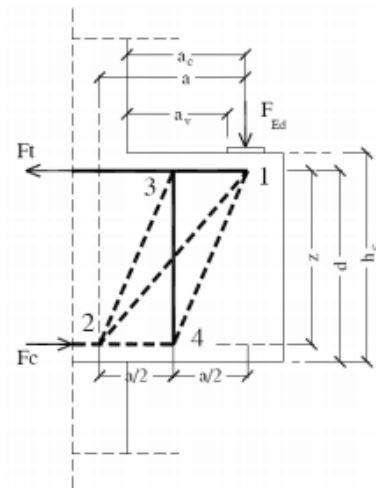
O EUROCODE 2 (CEN, 2004), sugere a treliça mostrada na Figura 2.13 para o cálculo dos esforços no tirante e na biela de compressão. Esse modelo aplica-se a consolos de concreto com inclinação da biela de compressão no intervalo de $1,0 \leq \text{tg } \theta \leq 2,5$. Para tanto, a distância do ponto de aplicação da carga no consolo até a face do pilar (a) deve ser menor que a distância entre a resultante da armadura do tirante e a intersecção da biela de compressão com a face do pilar.

Figura 2.13 - Modelo de treliça adotado pelo EUROCODE 2 (CEN, 2004)



Para consolos com $a > h/2$ a publicação European Concrete Platform ASBL (2008) sugere o modelo de treliça da Figura 2.14.

Figura 2.14 - Modelo de treliça adotado pelo EUROCODE 2 (European Concrete Platform ASBL, 2008)



As tensões nos nós, $\sigma_{Rd,máx}$, devem ser limitadas aos valores resultantes da equação (2.6):

$$f_{cu} = k \nu f_{cd} \quad (2.6)$$

Sendo que k equivale a 1,0 para nós em que não são ancorados tirantes, 0,85 para nós em que é ancorando apenas um tirante e 0,75 para nós em que são ancorados mais de um tirante; f_{cd} é a resistência de à compressão do concreto; e ν pode ser obtido pela equação (2.7):

$$\nu = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (2.7)$$

A tensão de compressão na biela deve ser limitada em:

- f_{cd} para bielas de compressão que tenham tensões transversais de compressão ou nenhuma tensão transversal;
- $0,6\nu f_{cd}$ para bielas de compressão que tenham tensões transversais de tração.

A área de aço do tirante, $A_{s,tir}$ principal é dada por:

$$A_{s,tir} = \frac{F_t}{f_{yd}} \quad (2.8)$$

Sendo que F_t é a força vertical de cálculo; e f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço.

Para consolos com $a/h < 0,5$, deve-se ter armadura de costura com área total, $A_{s,cost}$, pelo menos igual a:

$$A_{s,cost} = 0,5 A_{s,tir} \quad (2.9)$$

Para consolos com $a/h > 0,5$, deve-se adicionar estribos verticais, $A_{s,est}$, com área total de:

$$A_{s,est} = k_2 \frac{F_{ed}}{f_{yd}} \quad (2.10)$$

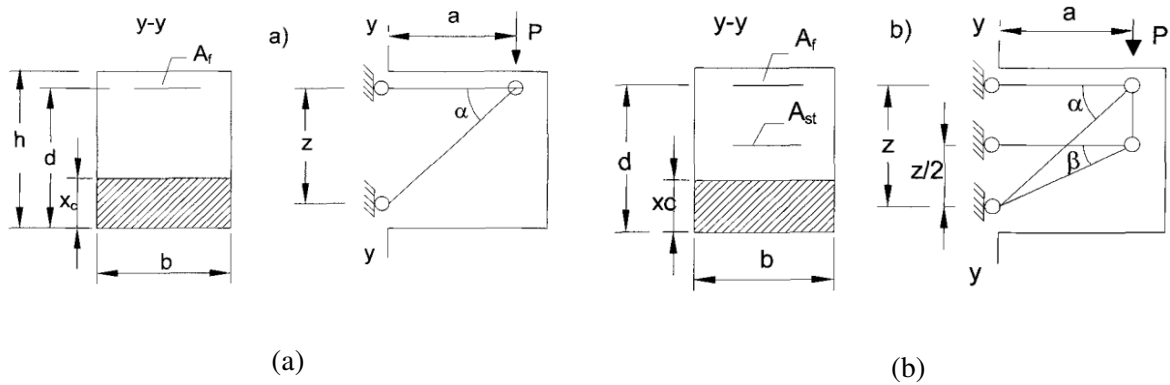
Sendo que F_{Ed} é a força vertical de cálculo atuante no consolo; k_2 é recomendado pelo EUROCODE 2 ser igual a 0,5; e f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço.

Além dos modelos de treliça recomendados nas normas e regulamentos, alguns pesquisadores sugerem outros modelos de treliça para representar as bielas e os tirantes em consolos de concreto.

Campione, La Mendola e Papia (2005) propuseram modelos de biela e tirante baseados nas treliças ilustradas na Figura 2.15. A treliça simples da Figura 2.15a refere-se a consolos de concreto simples ou fibroso sem armadura de costura, enquanto a treliça múltipla da Figura 2.15b refere-se a consolos de concreto simples com armadura de costura ou com fibra de carbono externa.

O modelo, aplicável a todos os modos de ruptura observados no estudo (escoamento do aço, esmagamento do concreto, perda da aderência da fibra de carbono e arrancamento das fibras de aço), apresentou bons resultados quando comparados com os dados experimentais.

Figura 2.15 - Modelo de treliça equivalente: a) Treliça simples; b) treliça múltipla. (CAMPIONE; LA MENDOLA; PAPIA, 2005)



No caso da treliça simples, tem-se:

- Para o caso de ruptura pelo escoamento do aço, a carga última, P_{u1} , é avaliada por:

$$P_{u1} = f_y A_f \operatorname{tg} \alpha \tag{2.11}$$

Sendo que A_f é a armadura do tirante; f_y é a resistência ao escoamento do aço; e α é o ângulo de inclinação da biela de compressão com a horizontal.

- Para o caso de ruptura por compressão da biela, a carga última, P_{u2} , é avaliada por:

$$P_{u2} = \xi f'_c b x_c \cos \alpha \operatorname{sen} \alpha \tag{2.12}$$

Sendo que f'_c é a resistência à compressão do concreto; b é a largura do consolo; x_c é a altura da linha neutra; e ξ é o coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto sem a presença de fibras dado por:

$$\xi = \frac{5,8}{\sqrt{f'_c}} \frac{1}{\sqrt{1 + 400 \varepsilon_r}} \leq \frac{0,9}{\sqrt{1 + 400 \varepsilon_r}} \tag{2.13}$$

Sendo que ε_r é a deformação média na direção perpendicular às fissuras principais, que pode ser considerada igual à deformação específica do aço no escoamento para o caso da ruptura da biela de compressão após o escoamento do tirante, segundo Hwang e Lee (2002).

- No caso de concreto fibroso (Figura 2.16), deve-se adicionar a parcela referente ao efeito das fibras (P_f) às outras parcelas (P_{u1} e P_{u2}), calculada a partir da equação (2.14):

$$P_f = \frac{f_r z_1 b}{\text{sen}\alpha \cos\alpha} \quad (2.14)$$

Sendo que f_r é a resistência do concreto fibroso, admitida constante na altura z_1 ; z_1 é dada pela equação (2.15):

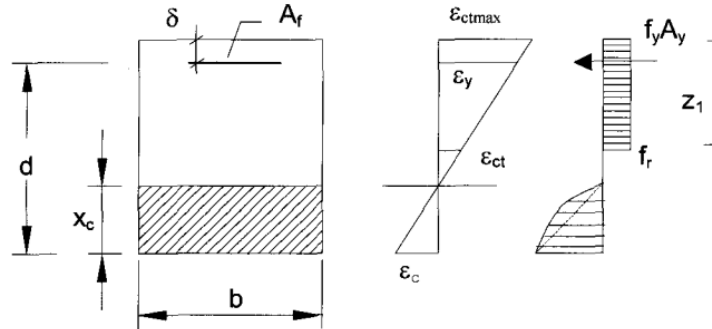
$$z_1 = (d - x_c) \left(1 - \frac{f_{ctf}}{f_y} \frac{E_s}{E_{ct}} \right) + \delta \quad (2.15)$$

Sendo que E_{ct} é o módulo de elasticidade do concreto fibroso; E_s é o módulo de elasticidade do aço; δ é a distância do centro da armadura do tirante à face superior do consolo; f_y é a resistência ao escoamento do aço; e f_{ctf} é a resistência à tração do concreto fibroso dada pela equação (2.16):

$$f_{ctf} = f_t' (1 - v_f) + \alpha_1 \alpha_2 \tau v_f \frac{L_f}{D} \quad (2.16)$$

Sendo que f_t' é a resistência à tração do concreto simples; v_f é o percentual de fibras; α_1 é o coeficiente que representa a fração da mobilização da aderência à matriz fissurada, que é igual a 0,1 para fator de forma igual a 100; α_2 é o fator de eficiência de orientação da fibra no estado não fissurado, que é igual a 0,5 para fator de forma igual a 100; τ é a resistência média de aderência da interface fibra-matriz, que é igual a $2f_{ct}$ para fator de forma igual a 100; L_f é o comprimento da fibra; e D é o diâmetro da fibra;

Figura 2.16 - Equilíbrio da seção transversal do consolo de concreto com fibras. (CAMPIONE; LA MENDOLA; PAPIA, 2005)



No caso da treliça múltipla, tem-se:

- Para o caso de ruptura pelo escoamento do aço, a carga última, P_{ul} , é avaliada por:

$$P_{ul} = \frac{1}{\eta} f_y A_f \operatorname{tg} \alpha \quad (2.17)$$

Onde

$$\eta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} < 1 \quad (2.18)$$

$$R_1 = \frac{1}{\frac{a}{E_s A_{f1} \operatorname{tg}^2 \alpha} + \frac{\sqrt{a^2 + z^2}}{E_c A_{c1} \operatorname{sen}^2 \alpha}} \quad (2.19)$$

$$R_2 = \frac{1}{\frac{a}{E_s A_{f2} \operatorname{tg}^2 \beta} + \frac{\sqrt{a^2 + (z/2)^2}}{E_c A_{c2} \operatorname{sen}^2 \beta}} \quad (2.20)$$

$$A_{c1} = b x_c \cos \alpha \quad (2.21)$$

$$A_{c2} = b x_c \cos \beta \quad (2.22)$$

Nas equações (2.18), (2.19), (2.20), (2.21) e (2.22), R_1 e R_2 são as rigidezes das treliças principal e secundária, respectivamente; $z/2$ é a distância entre as resultantes das armaduras do tirante e costura; E_c é o módulo de elasticidade do concreto; A_{f1} é a área de

ação da armadura do tirante; A_{f2} é a área de aço da armadura de costura; A_{c1} e A_{c2} são as áreas equivalentes das bielas de compressão das treliças principal e secundária, respectivamente.

- Para o caso de ruptura por compressão da biela, a carga última, P_{u2} , é avaliada por:

$$P_{u2} = \frac{\xi f'_c b x_c \text{sen} \alpha \cos \alpha}{1 - \eta} \quad (2.23)$$

Campione, La Mendola e Mangiavillano (2007) propuseram um modelo de biela e tirante baseado na treliça da Figura 2.15b. O modelo visa determinar a capacidade resistente de consolos de concreto com ou sem fibras, com armadura do tirante e com ou sem armadura de costura. O modelo apresentou bons resultados para todos os casos. No entanto, os autores evidenciaram a eficiência do modelo em consolos de concreto com fibras, armados com tirante e sem armadura de costura. Os resultados foram mais satisfatórios, inclusive, do que os resultados prescritos pelo ACI 318 (ACI COMMITTEE 318, 2008).

A resistência dos consolos de concreto fibroso com tirante e sem armadura de costura pode ser considerada como o menor dos dois valores obtidos nas equações (2.24) e (2.25). Nessas expressões, v_{n1} é a resistência do consolo para o caso de ruptura por escoamento do aço e v_{n2} para o caso de ruptura por esmagamento do concreto da biela.

$$v_{n1} = \rho f_y \frac{d}{a} \left(1 - \frac{k}{2} \right) + \frac{0,2 \sqrt{f'_c} F}{\text{sen} \alpha \cos \alpha} \left[(1 - k) \left(1 - \frac{f_{ctf}}{f_y} \frac{E_s}{E_{ct}} \right) + \frac{c}{d} \right] \quad (2.24)$$

$$v_{n2} = \chi f'_c k \text{sen} \alpha \cos \alpha + \frac{0,2 \sqrt{f'_c} F}{\text{sen} \alpha \cos \alpha} \left[(1 - k) \left(1 - \frac{f_{ctf}}{f_y} \frac{E_s}{E_{ct}} \right) + \frac{c}{d} \right] \quad (2.25)$$

Onde:

$$k = \frac{x_c}{d} \quad (2.26)$$

$$\left[\frac{1}{2} \frac{E_c f_y}{E_s} b + f_r b \left(\frac{\epsilon_{ct} - \epsilon_y}{\epsilon_y} \right) \right] x_c^2 + (f_r b c + f_y A_s) x_c + \left(f_r b d^2 \frac{\epsilon_{ct}}{\epsilon_y} - f_r b h d - f_y d A_s \right) = 0 \quad (2.27)$$

$$f_r = 0,2\sqrt{f'_c} F \quad (2.28)$$

$$\chi = 0,74\left(\frac{f'_c}{105}\right)^3 - 1,28\left(\frac{f'_c}{105}\right)^2 + 0,22\left(\frac{f'_c}{105}\right) + 0,87 \quad (2.29)$$

$$F = v_f L_f \frac{\lambda}{D} \quad (2.30)$$

Nas equações (2.24), (2.25), (2.26), (2.27), (2.28), (2.29) e (2.30), c é a distância do centro da armadura do tirante à face superior do consolo; F é o fator da fibra; χ é um coeficiente de redução da resistência devido ao estado biaxial de tensões; h é a altura do consolo no esmagamento; f_r é a resistência à tração residual do concreto fibroso; e λ é igual a 1 para fibras com gancho e 0,5 para fibras sem gancho.

A resistência dos consolos de concreto fibroso com tirante e armadura de costura pode ser considerada como o menor dos quatro valores obtidos nas equações (2.31), (2.32), (2.33) e (2.34). Nessas equações, v_{n1} é a resistência do consolo para o caso de ruptura por escoamento da armadura do tirante, v_{n2} para o caso de ruptura por esmagamento do concreto da biela da treliça principal, v_{n3} para o caso de ruptura por escoamento da armadura de costura e v_{n4} para o caso de ruptura por esmagamento do concreto da biela da treliça secundária.

$$v_{n1} = \frac{1}{\eta} \rho_f f_y \frac{d}{a} \left(1 - \frac{k}{3}\right) + \frac{0,2\sqrt{f'_c} F}{\text{sen } \alpha \cos \alpha} \left[(1-k) \left(1 - \frac{f_{ctf}}{f_y} \frac{E_s}{E_{ct}}\right) + \frac{c}{d} \right] \quad (2.31)$$

$$v_{n2} = \frac{1}{\eta} \chi f'_c k \text{sen } \alpha \cos \alpha + \frac{0,2\sqrt{f'_c} F}{\text{sen } \alpha \cos \alpha} \left[(1-k) \left(1 - \frac{f_{ctf}}{f_y} \frac{E_s}{E_{ct}}\right) + \frac{c}{d} \right] \quad (2.32)$$

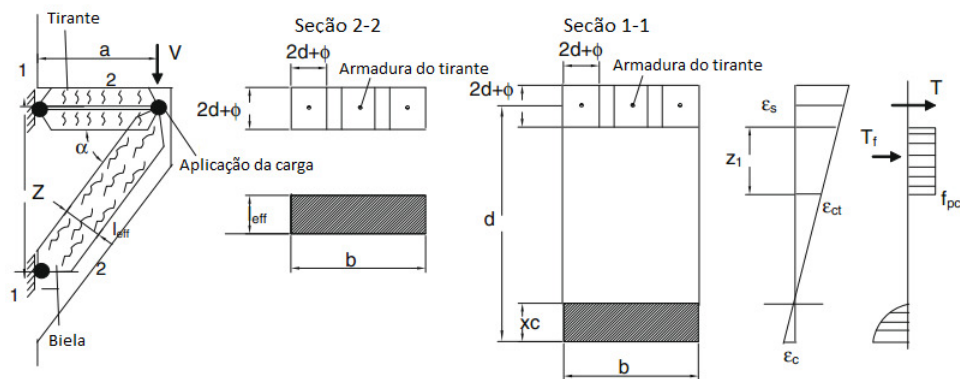
$$v_{n3} = \frac{1}{1-\eta} \rho_{st} f_{yst} \frac{d}{a} \left(1 - \frac{k}{3}\right) + \frac{0,2\sqrt{f'_c} F}{\text{sen } \beta \cos \beta} \left[(1-k) \left(1 - \frac{f_{ctf}}{f_y} \frac{E_s}{E_{ct}}\right) + \frac{c}{d} \right] \quad (2.33)$$

$$v_{n4} = \frac{1}{1-\eta} \chi f'_c k \text{sen } \beta \cos \beta + \frac{0,2\sqrt{f'_c} F}{\text{sen } \beta \cos \beta} \left[(1-k) \left(1 - \frac{f_{ctf}}{f_y} \frac{E_s}{E_{ct}}\right) + \frac{c}{d} \right] \quad (2.34)$$

Nas equações (2.33) e (2.34) ρ_{st} é a taxa de armadura de costura e f_{yst} é a resistência ao escoamento da armadura de costura.

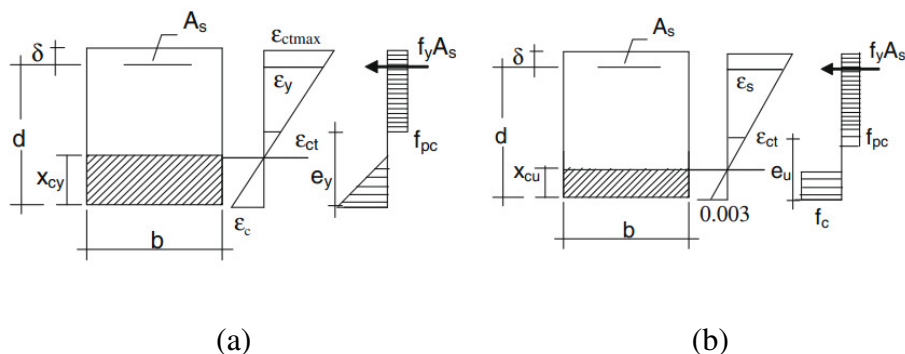
Campione (2009) propôs um novo modelo de biela e tirante, que tem a treliça ilustrada na Figura 2.17. Esse modelo é específico para consolos de concreto com fibras metálicas com gancho e armadura do tirante, que tenham a relação a/d entre 0,4 e 1,0, sujeitos à carga vertical. Segundo o autor, esse modelo permite prever o comportamento à flexão em função da Gráfico de Força *versus* deslocamento. Dependendo da relação a/d e da resistência do concreto seria possível indicar uma combinação entre a armadura do tirante e o volume percentual de fibras a ser adotado para que o comportamento estrutural seja regido pelo escoamento da armadura do tirante, em vez do esmagamento concreto.

Figura 2.17 - Modelo de treliça e análise da seção (CAMPIONE, 2009)



A treliça consiste em um membro representando a biela de compressão e outro membro representando a armadura do tirante envolta por uma região de concreto. O equilíbrio da seção é apresentado na Figura 2.18, tanto para a ruptura pelo escoamento do aço quanto para a ruptura pelo esmagamento do concreto.

Figura 2.18 - Análise da seção transversal: a) escoamento do aço; b) esmagamento do concreto (CAMPIONE, 2009)



Os valores de forças relativas à primeira fissura (V_c), à pós-fissuração (V_{pc}), ao escoamento do aço (V_y) e ao esmagamento do concreto da biela (V_u) são obtidas das equações (2.35), (2.36), (2.37) e (2.38), respectivamente. E os deslocamentos correspondentes às forças relativas à primeira fissura (δ_v^c), ao escoamento do aço (δ_v^y) e ao esmagamento do concreto da biela (δ_v^u) são mostrados nas equações (2.39), (2.40) e (2.41).

$$V_c = \left(A_c^{eff} + \frac{E_s}{E_c} A_s \right) f_{ctf} \operatorname{tg} \alpha \quad (2.35)$$

$$V_{pc} = \left(A_c^{eff} f_{pc} + f_{ctf} \frac{E_s}{E_{ct}} A_s \right) f_{ctf} \operatorname{tg} \alpha \quad (2.36)$$

$$V_y = \left(A_c^{eff} f_{pc} + f_y A_s \right) \operatorname{tg} \alpha + f_{pc} b z_{1y} \frac{2}{\operatorname{sen} 2\alpha} \quad (2.37)$$

$$V_u = \frac{1}{2} \xi_u f_c' b x_{cu} \operatorname{sen} 2\alpha + f_{pc} b z_{1u} \frac{2}{\operatorname{sen} 2\alpha} \quad (2.38)$$

$$\delta_v^c = \left[\frac{1}{R_c} \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + \frac{\sqrt{a^2 + z^2}}{E_c b x_c \cos \alpha \operatorname{sen}^2 \alpha} \right] V_c \quad (2.39)$$

$$\delta_v^y = \left[\frac{1}{R_y} \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + \frac{\sqrt{a^2 + z^2}}{E_c^y b x_c \cos \alpha \operatorname{sen}^2 \alpha} \right] V_y \quad (2.40)$$

$$\delta_v^u = \left[\frac{a \left(\frac{V_u}{A_s \operatorname{tg} \alpha} - f_y \right)}{\operatorname{tg} \alpha E_h} + \frac{\delta_v^y}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{V_u \sqrt{a^2 + z^2}}{E_c^u b x_c \cos \alpha \operatorname{sen}^2 \alpha} \right] V_y \quad (2.41)$$

Onde:

$$A_c^{eff} = n (2 \delta + \phi)^2 \quad (2.42)$$

$$f_{ctf} = f_{ct} (1 - v_f) + 0,033 F \sqrt{f_c'} \cong f_t \quad (2.43)$$

$$f_{pc} = 0,2\sqrt{f_c} F \quad (2.44)$$

$$z_{1y} = \left(d - \frac{\phi}{2} - x_{cy} \right) \left(1 - \frac{f_{ct}}{f_y} \frac{E_f}{E_{ct}} \right) - \delta \quad (2.45)$$

$$z_{1u} = \left(d - \frac{\phi}{2} - x_{cu} \right) \left(1 - \frac{f_{ct}}{f_y} \frac{E_f}{E_{ct}} \right) - \delta \quad (2.46)$$

$$\xi_u = \frac{1}{1 + 0,66 \left(\frac{a}{z_u} \right)^2} \quad (2.47)$$

$$\left[\frac{1}{2} \frac{E_c f_y}{E_s} b + f_{pc} b \left(\frac{\varepsilon_{ct} - \varepsilon_y}{\varepsilon_y} \right) \right] x_{cy}^2 + (f_{pc} b \delta + f_y A_s) x_{cy} + \left(f_{pc} b d^2 \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_y} - f_{pc} b h d - f_y d A_s \right) = 0 \quad (2.48)$$

$$\frac{x_{cu}}{d} = \frac{1}{\alpha} \frac{\rho f_y + f_{pc} \frac{h}{d}}{0,85 f_c + f_{pc} \frac{f_{ct}/E_{ct} + 0,003}{\alpha 0,003}} \quad (2.49)$$

$$R_c = \frac{A_s E_s}{a} \left(1 + \frac{E_{ct}}{E_s} \frac{A_c^{eff}}{A_s} \right) \quad (2.50)$$

$$R_y = \frac{A_s E_h}{a} \left(1 + \frac{E_{ctr}}{E_h} \frac{A_c^{eff}}{A_s} \right) \quad (2.51)$$

$$E_h = \frac{f_u - f_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_y} \quad (2.52)$$

$$z_y = d - 0,4 x_{cy} \quad (2.53)$$

$$z_u = d - 0,4 x_{cu} \quad (2.54)$$

$$E_c^y = \frac{\xi_y f_c}{\varepsilon_{c0}} \quad (2.55)$$

$$E_c^u = \frac{\xi_u f_c}{\varepsilon_{c0}} \quad (2.56)$$

Nas equações (2.42) a (2.56), E_{ct} é o módulo de elasticidade do concreto na tração, igual à metade do módulo de elasticidade do concreto na compressão; A_c^{eff} é a área de concreto que envolve a armadura do tirante; f_{ctf} é a resistência à tração do concreto fibroso; f_{pc} é a máxima resistência a tração do concreto fibroso pós-fissurado; z_I é a zona de tração com contribuição das fibras tanto na ruptura por escoamento do aço como na ruptura por esmagamento do concreto da biela, dadas, respectivamente, por z_{Iy} e z_{Iu} ; ξ_u é o fator de eficiência adotado nos modelos de biela e tirante, levando em conta o estado biaxial de tensões; z é a distância do centro da armadura do tirante à zona de compressão tanto na ruptura por escoamento do aço como na ruptura por esmagamento do concreto da biela, dadas, respectivamente, por z_y e z_u ; E_c^y é o módulo de elasticidade tangente do concreto na ruptura por escoamento do aço; E_c^u é o módulo de elasticidade tangente do concreto na ruptura por esmagamento do concreto da biela; n é o número de barras do tirante; δ é a distância do centro da armadura do tirante com a face superior do consolo; ϕ é o diâmetro da armadura do tirante; f_{ct} é a resistência à tração do concreto simples, podendo ser assumido como $0,7\sqrt{f_c}$; x_c é a altura da linha neutra tanto na ruptura por escoamento do aço como na ruptura por esmagamento do concreto da biela, dadas, respectivamente, por x_{cy} e x_{cu} ; e E_f é o módulo de elasticidade da fibra.

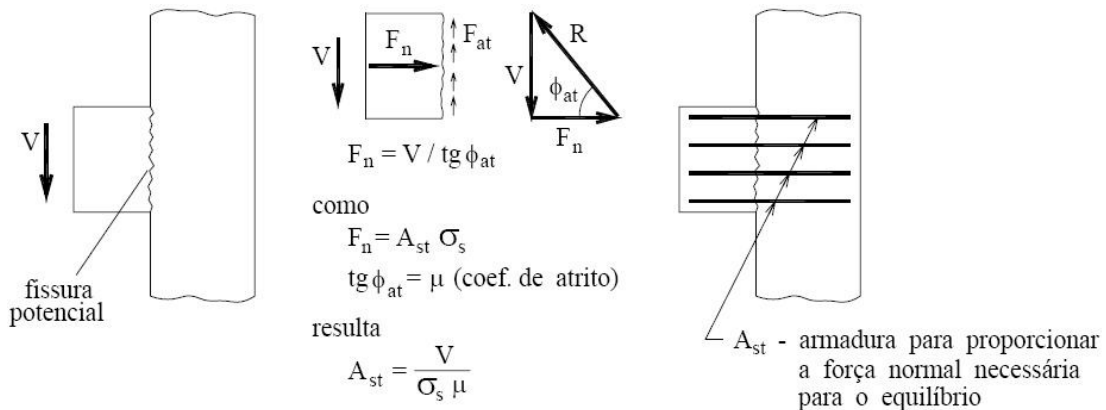
Outras modelos de treliça podem ser utilizadas para representar o comportamento estrutural do consolo pelo método de bielas e tirantes. Segundo Campos Filho (1996), diferentes condições de apoio do consolo podem originar diferentes modelos de treliça. Contudo, os modelos não normativos devem ser validados por meio de diversos ensaios laboratoriais e estudos computacionais.

2.4.2 Modelo atrito-cisalhamento

O ACI 318 (ACI COMMITTEE 318, 2008) afirma que, para situações de fissura potencial, interface entre materiais diferentes ou entre materiais moldados em diferentes idades, deve-se utilizar o modelo de atrito-cisalhamento para avaliar a resistência ao cisalhamento da ligação. Esse modelo consiste em considerar a ocorrência de uma fissura potencial ao longo do plano de cisalhamento considerado, que no caso do consolo moldado em duas etapas é a interface entre a peça suporte (pilar, viga ou parede) e o consolo. Para o equilíbrio, é colocada uma

armadura transversal ao plano de cisalhamento, atuando como uma força normal a esse plano, de modo a mobilizar a resistência ao escorregamento entre as partes. Essa armadura deve atravessar o plano de fissuração e ser devidamente ancorada em ambos os lados por ganchos ou solda. O mecanismo desse modelo é ilustrado na Figura 2.19.

Figura 2.19 - Modelo de atrito-cisalhamento (modificado pelo autor - EL DEBS, 2000)



A NBR 9062 (ABNT, 2006) recomenda o modelo de atrito-cisalhamento para o cálculo de consolos muito curtos.

A armadura total do tirante é avaliada por:

$$A_{s.\text{tir}} = \frac{0,8V_d}{f_{yd} \mu} + \frac{H_d}{f_{yd}} \quad (2.57)$$

Sendo que μ é o coeficiente de atrito efetivo dado por:

- $\mu=1,4$ para concreto lançado monoliticamente;
- $\mu=1,0$ para concreto lançado sobre concreto endurecido com superfície intencionalmente áspera com rugosidade mínima de 0,5 cm em 3,0 cm;
- $\mu=0,6$ para concreto lançado sobre concreto endurecido com interface lisa.

A tensão de cisalhamento na interface deve ser limitada em:

$$\tau_{wd} \leq \tau_{wu} = 3,0 + 0,9 \rho f_y \leq 0,27 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} \leq 8 \text{ MPa} \quad (2.58)$$

Sendo que τ_{wu} é a tensão tangencial de referência; e f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto.

De acordo com o manual do PCI (PCI, 2010), a armadura perpendicular ao plano de fissuração, A_{vf} , é avaliada por:

$$A_{vf} = \frac{V_u}{\phi f_y \mu_e} \quad (2.59)$$

Onde:

$$\mu_e = \frac{6894 \lambda A_{cr} \mu}{V_u} \quad (2.60)$$

Nas equações (2.59) e (2.60), V_u é a força cisalhante que atua no plano de fissuração; μ_e é o coeficiente de atrito-cisalhamento efetivo, dado pela equação (2.58), observado os limites dados na Tabela 2.1; λ é o fator modificador que representa a redução nas propriedades mecânicas do concreto, sendo igual a 1,0 para concreto de peso normal e igual a 0,75 para concreto leve; A_{cr} é a área na interface da fissura potencial, dada em m²; e μ é o coeficiente de atrito-cisalhamento dado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Coeficientes do modelo atrito-cisalhamento recomendados pelo PCI (2010)

Tipos de interface	μ recomendado	Máximo μ_e
Concreto moldado monoliticamente	1,4 λ	3,4
Concreto moldado contra concreto endurecido com superfície intencionalmente rugosa, com ranhuras de profundidade de, aproximadamente 6 mm	1,0 λ	2,9
Concreto moldado contra concreto endurecido com superfície lisa	0,6 λ	2,2
Concreto ligado a estrutura em aço	0,7 λ	2,4

Quando houver uma força normal atuando no plano cisalhante, uma armadura adicional deve ser acrescentada:

$$A_n = \frac{N_u}{\phi f_y} \quad (2.61)$$

Na equação (2.61), N_u é a força horizontal aplicada.

A força cisalhante que atua no plano de fissuração deve, ainda, ser limitada a:

$$V_u \leq \phi V_n \quad (2.62)$$

A resistência ao cisalhamento, V_n , é limitada pelo ACI 318 (ACI COMMITTEE 318, 2008) aos valores indicados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Valores limites para a resistência ao cisalhamento da interface (ACI COMMITTEE 318, 2008)

Tipos de interface	V_n máximo
Concreto moldado monoliticamente	$0,2 f'_c A_c$ $(3,3 + 0,08 f'_c) A_c$ $11 A_c$
Concreto moldado contra concreto endurecido com superfície intencionalmente rugosa, com ranhuras de profundidade de, aproximadamente 6 mm	$0,2 f'_c A_c$ $(3,3 + 0,08 f'_c) A_c$ $11 A_c$
Concreto moldado contra concreto endurecido com superfície lisa	$0,2 f'_c A_c$ $5,5 A_c$
Concreto ligado a estrutura em aço	$0,2 f'_c A_c$ $5,5 A_c$

2.4.3 Modelo de viga em balanço

O modelo de viga em balanço prescrito no ACI 318 (ACI COMMITTEE 318, 2008) para cálculo de consolos, também adotado pelo manual do PCI (PCI, 2010), pode ser utilizado quando:

- $a/d \leq 1$
- $N_u \leq V_u$
- $\phi = 0,75$ para todos os cálculos.
- A ancoragem do tirante na extremidade do consolo deve ser feita por meio de solda ou outro sistema de ancoragem mecânica.

A armadura do tirante deve ser o maior dos resultados dentre as equações (2.63) e (2.64):

$$A_{s,tir} = \frac{1}{\phi f_y} \left[V_u \left(\frac{a}{d} \right) + N_u \left(\frac{h}{d} \right) \right] \quad (2.63)$$

$$A_{s,ir} = \frac{1}{\phi f_y} \left[\frac{2V_u}{3\mu_e} + N_u \right] \quad (2.64)$$

A força atuante V_u no consolo é limitada pelos valores de V_n da Tabela 2.2.

CAPÍTULO 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada no programa experimental, isto é, os modelos ensaiados e suas variáveis, a instrumentação para obtenção dos resultados, as armaduras utilizadas e os procedimentos para execução dos ensaios. Os ensaios foram realizados no laboratório de Furnas Centrais Elétricas S.A., na cidade de Aparecida de Goiânia, GO. Os modelos com fibras de aço adicionadas ao concreto foram concretados em Furnas e os modelos sem fibras foram concretados na fábrica da empresa Goiás Artefatos de Cimento (Goiarte).

3.1 INTRODUÇÃO

O programa experimental consistiu no estudo de nove modelos, apresentados na Tabela 3.1. Para cada modelo foram moldados dois exemplares, resultando em um total de dezoito ensaios, todos com relação a/d de 0,62.

Tabela 3.1 - Detalhes dos modelos ensaiados na pesquisa

Modelo	Tipo do consolo	Armadura do tirante	Tratamento da junta entre o consolo e o pilar	Armadura de costura e estribos no consolo	Volume de fibras de aço
M1	Monolítico	Contínua	Sem junta	Sim	-
M2				Sim	1%
M3				Não	1%
M4	Moldado em duas etapas ⁽¹⁾	Ligado ao pilar por meio de rosca ⁽²⁾	Chaves de cisalhamento e junta seca	Sim	-
M5			Chaves de cisalhamento com epóxi	Não	-
M6			Chaves de cisalhamento com epóxi	Não	1%
M7			Com superfície rugosa	Sim	-
M8		Com superfície rugosa	Não	1% ⁽⁴⁾	
M9		Contínua ⁽³⁾	Com superfície rugosa	Sim	-

(1) Nesses modelos, a armadura de costura, quando presente, é em aço CA-50, exceto o modelo 9 que é em CA-25.
 (2) Armadura do tirante ligada ao consolo por meio de rosca.
 (3) Tirante e armadura de costura do consolo, em aço CA-25, dobrado na moldagem do pilar e desdobrado após a sua desfôrma.
 (4) Nesse modelo, além das fibras dispersas no concreto, são dispostas fibras alinhadas interceptando a junta entre o consolo e o pilar.

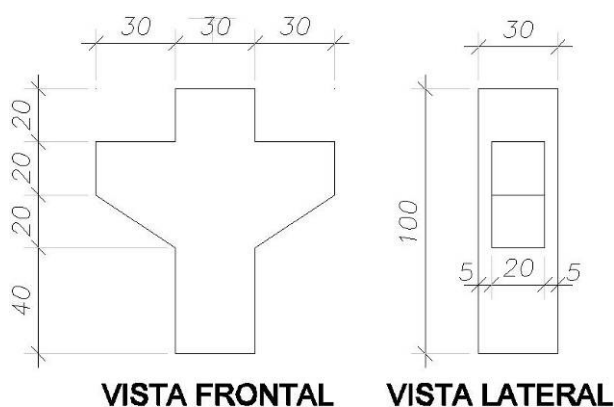
As variáveis estudadas no programa experimental foram o tratamento da junta entre o consolo e o pilar e a presença de 1% de fibras de aço adicionadas ao concreto em substituição à

armadura de costura. Esse volume de fibras foi adotado baseando-se em Oliveira (2007), em que fez-se uma análise de variância, para avaliar a significância da incorporação de fibras de aço ao concreto, na resistência à compressão da matriz, com e sem adições minerais. Foi variado o fator de forma, adotando as fibras Dramix[®] RC 80/60 BN e Dramix[®] RC 65/60 BN e o volume de fibras, 0,75%, 1,00% e 1,25%. Para as matrizes com adições minerais, concluiu que os resultados não foram estaticamente diferentes, independente da relação de aspecto das fibras.

Os modelos sem fibras, com seus respectivos corpos de prova para caracterização do concreto endurecido, foram fornecidos pela empresa Goiarte, parceira desta pesquisa. O fornecimento incluiu o material (concreto, aço e fôrmas), a mão de obra e o transporte dos modelos e dos corpos de prova ao local de ensaio. Já os modelos com fibras foram moldados nas dependências da empresa Furnas Centrais Elétricas S.A. Para isso, todo o material necessário para a moldagem desses modelos, bem como as fôrmas, foi transportado pela própria Goiarte para o local de concretagem.

Todos os modelos tinham as dimensões apresentadas na Figura 3.1. A seção transversal do pilar era de 30 cm x 30 cm, com altura de 100 cm. Os consolos tinham largura de 20 cm, altura no engastamento de 40 cm, altura na face externa de 20 cm e comprimento de 30 cm.

Figura 3.1 - Dimensões dos modelos experimentais (em centímetro)



Como alternativa para o aumento da resistência da junta, nos modelos M7, M8 e M9 foi adotada superfície rugosa. No modelo M7 a rugosidade foi garantida pelo apicoamento do concreto após a desmoldagem da lateral da fôrma do pilar. No modelo M9 a rugosidade foi obtida com a escarificação da superfície do pilar para o desdobramento da armadura do consolo. No modelo M8 a rugosidade foi garantida por meio de ranhuras feitas no isopor

posicionado na lateral da fôrma antes da concretagem do pilar. Esses tratamentos serão melhor detalhados no item 3.1.5.

Nos modelos M4, M5 e M6 havia a presença de chaves de cisalhamento, sendo que nos modelos M5 e M6 foi, ainda, utilizado adesivo à base epóxi aplicado na face do pilar antes da concretagem do consolo.

O concreto utilizado na pesquisa foi de densidade normal com resistência média à compressão pretendida de 35 MPa.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Concreto

O material empregado foi o mesmo para todos os modelos ensaiados. Foi utilizado o cimento portland composto (CP II-Z). As principais características dos agregados são expostas na Tabela 3.2. O aditivo utilizado foi o Viscocrete 5700. As fibras de aço utilizadas foram Dramix[®] RC 80/60 BN com 60 mm de comprimento, 0,75 mm de diâmetro e resistência nominal de 1100 MPa. Foi previsto a relação água/cimento (a/c) do concreto sem fibras de 0,35 e do concreto com fibras de 0,50.

Tabela 3.2 - Principais características dos agregados

Características	Areia artificial	Areia natural	Brita 9,5	Brita 19,0
Diâmetro máximo	4,75	2,34	9,50	19,00
Módulo de finura	2,10	2,78	5,36	6,75
Massa específica seca	2,54	2,59	2,69	2,79
Massa específica do agregado saturado com superfície seca	2,55	2,60	2,65	2,76
Massa específica aparente	2,56	2,63	2,62	2,74

A composição do concreto sem fibras foi desenvolvida no laboratório da empresa Goiarte. A composição do concreto com fibras foi desenvolvida no laboratório de Furnas Centrais Elétricas S.A..

A quantidade de material, por metro cúbico, utilizada no concreto com fibras é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Quantidade de material por metro cúbico do concreto com fibras

Material	Quantidade (kg)
Cimento	380
Sílica ativa	14,2
Areia artificial	178,5
Areia natural	728
Brita 9,5	291,5
Brita 19,0	303,6
Fibras	78,5
Aditivo	3,2

Foram realizados, no laboratório de Furnas Centrais Elétricas S.A., os seguintes ensaios de caracterização do concreto no estado endurecido: resistência à compressão segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 2007), módulo de elasticidade segundo a norma NBR 8522 (ABNT, 2008) e resistência à tração por compressão diametral segundo a norma NBR 7222 (ABNT, 1994).

A resistência média à compressão do concreto (f_{cm}) foi obtida pela ruptura de corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. O módulo de elasticidade (E_{cm}) e a resistência à tração indireta do concreto ($f_{ctm,sp}$) foram obtidos pela ruptura de corpos-de-prova cilíndricos de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 3.4 e 3.5, para os modelos com concreto sem fibras e para os modelos com concreto com fibras, respectivamente .

Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas dos concretos sem fibras dos modelos ensaiados.

Modelo	Peça moldada	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (MPa)	$f_{ctm,sp}$ (MPa)
M1A	Consolo e Pilar	26,52	22,41	2,58
M1B		33,95	23,30	3,06
M4A	Pilar	45,86	25,57	4,10
	Consolo	46,72	26,07	4,03
M4B	Pilar	39,33	23,31	3,85
	Consolo	46,72	26,07	4,03
M5A	Pilar	44,77	26,30	4,16
	Consolo	41,20	28,20	4,02
M5B	Pilar	_(1)	_(1)	_(1)
	Consolo	41,20	28,20	4,02
M7A	Pilar	36,53	_(2)	_(2)
	Consolo	32,50	22,94	3,30
M7B	Pilar	36,74	21,06	3,59
	Consolo	32,50	22,94	3,30
M9A	Pilar	26,30	25,07	2,42
	Consolo	20,84	25,65	2,18
M9B	Pilar	28,17	26,81	2,65
	Consolo	20,84	25,65	2,18
(1) Neste modelo não foram moldados corpos de prova para os ensaios de caracterização do concreto endurecido do pilar.				
(2) Neste modelo não foram moldados corpos de prova para os ensaios de módulo de elasticidade e de tração por compressão diametral do concreto do pilar.				

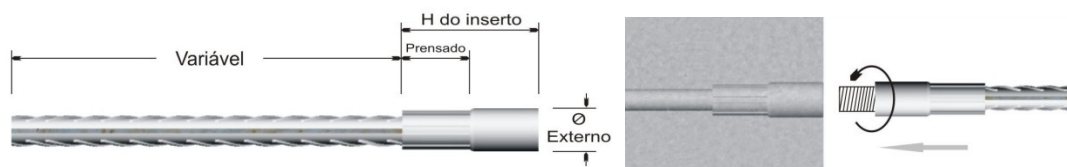
Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas dos concretos com fibras dos modelos ensaiados

Modelo	Peça moldada	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (MPa)	$f_{ctm,sp}$ (MPa)
M2A	Consolo e Pilar	41,13	27,03	6,04
M2B		42,45	25,87	5,18
M3A	Consolo e Pilar	42,23	34,93	5,76
M3B		42,23	34,93	5,76
M6A	Pilar	39,45	24,52	4,84
	Consolo	38,97	25,00	5,08
M6B	Pilar	39,45	24,52	4,84
	Consolo	38,97	25,00	5,08
M8A	Pilar	47,08	23,00	5,75
	Consolo	32,05	29,07	4,51
M8B	Pilar	37,08	23,00	5,75
	Consolo	32,05	29,07	4,51

3.2.2 Aço

Foram ensaiados à tração três amostras, com 50 cm de comprimento, da armadura do tirante utilizada nos modelos monolíticos (12,5 mm, CA-50 - grupo 1), uma amostra, com 50 cm de comprimento, da armadura de costura (6,3 mm, CA-50 - grupo 2) e três amostras, com 50 cm de comprimento, da armadura do tirante utilizada nos modelos moldados em duas etapas (12,5 mm, CA-50 - grupo 3). Além disso, foram ensaiadas, também, outras três amostras do grupo 3, com 70 cm de comprimento e uma emenda na metade do seu comprimento, para conferir onde se daria a ruptura. A emenda utilizada foi com luvas prensadas na extremidade das barras, as quais eram unidas por meio de um pino com rosca, em aço CA-50, com diâmetro de 12,7 mm. Na Figura 3.2, H do inserto é 70 mm, o comprimento prensado é 35 mm e o ϕ externos é 22,2 mm. O aço utilizado nas armaduras dos tirantes ligadas ao pilar por meio de luva e rosca foi doado pela empresa A. R. Trejor Comercial Ltda..

Figura 3.2 – Esquema de luva e rosca utilizado (Fonte: Folder A. R. Trejor Comercial Ltda.)



Na Tabela 3.6 são apresentados os resultados da tensão de escoamento das amostras ensaiadas. Em todas as amostras foi observado nítido patamar de escoamento, caracterizando esses aços como tipo CA-50. O módulo de elasticidade do aço foi adotado igual a 210 GPa. O aço utilizado no consolo do modelo M9, tipo CA-25, não foi submetido a ensaio, sendo então adotado como tensão de escoamento 250 MPa.

Tabela 3.6 – Propriedades dos aços utilizados.

Grupo	Modelos utilizados	Amostra	Diâmetro (mm)	Tensão de escoamento (MPa)
1	M1, M2 e M3	1	12,5	574
		2		578
		3		574
2	M1, M2, M4 e M7	1	6,3	591
3	M4, M5, M6, M7 e M8	1	12,5	549
		2		557

Na Figura 3.3 são mostradas as barras emendadas com luva após o ensaio de tração. Observa-se que em duas amostras a ruptura do aço ocorreu fora da região da luva. Na terceira amostra a ruptura também aconteceu na barra de 12,5 mm, porém junto à luva prensada.

Figura 3.3 - Amostras de barras emendadas com luva após o ensaio de tração.

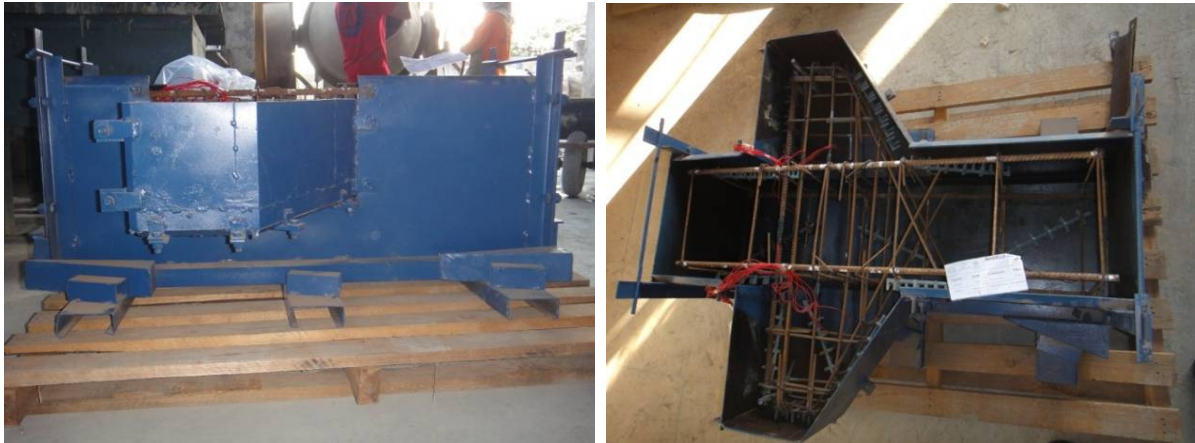


3.3 Execução dos modelos

3.3.1 Fôrma

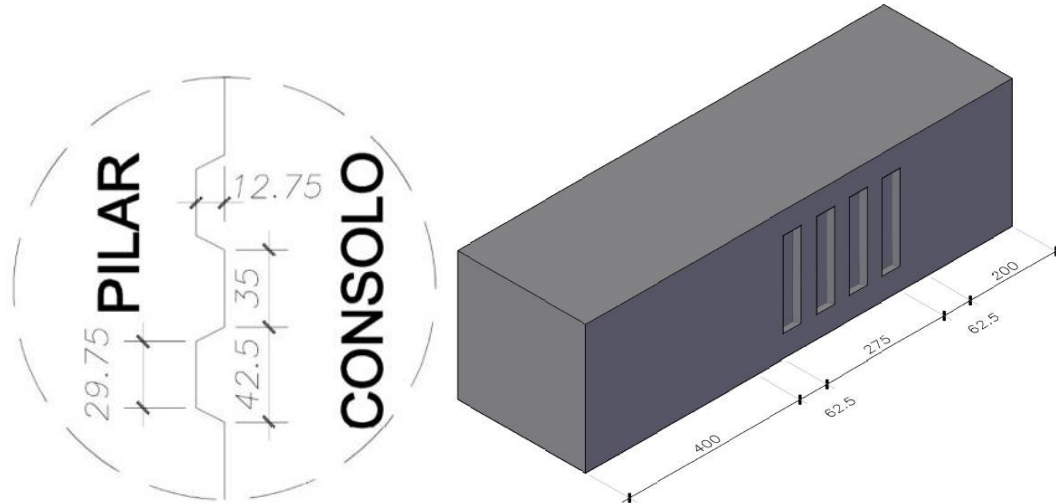
A fôrma utilizada para todos os modelos foi confeccionada e cedida pela empresa Goiarte. Foram executadas duas fôrmas para que fosse possível a moldagem dos dois exemplares de cada modelo no mesmo dia. Na Figura 3.4 são apresentadas fotos da fôrma com a armadura do modelo M1.

Figura 3.4 - Fôrma dos modelos com a armadura do modelo M1.



Nos modelos M4, M5 e M6 havia chaves de cisalhamento na face do pilar com as dimensões apresentadas na Figura 3.5. Essas chaves foram confeccionadas em uma fôrma metálica que fazia o fechamento da fôrma do pilar, de modo que após a concretagem do pilar se formavam chaves de cisalhamento na interface pilar-consolo, como mostrado nas Figuras 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8.

Figura 3.5 - Pilar dos modelos M4, M5 e M6 com chaves de cisalhamento concebidas na moldagem.



(a) Tamanho das chaves de cisalhamento na interface entre o consolo e o pilar (dimensões em mm).

(b) Chaves de cisalhamento na face do pilar (em centímetro).

Figura 3.6 - Interface pilar-consolo com as chaves de cisalhamento no modelo M4, antes da concretagem do consolo.



Figura 3.7 - Interface pilar-consolo com as chaves de cisalhamento no modelo M5, com o epóxi, antes da concretagem do consolo.



Figura 3.8 - Interface pilar-consolo com as chaves de cisalhamento no modelo M6, antes da aplicação do epóxi para concretagem do consolo.



3.3.2 Armadura

A armadura do tirante dos consolos foi dimensionada para que a ruptura ocorresse pelo escoamento da mesma e, posteriormente, pelo esmagamento da biela de compressão. Em todos os modelos, a ancoragem do tirante, na extremidade dos consolos, foi garantida com barra transversal soldada, como sugere o item 22.3.1.4.1 da NBR 6118 (ABNT, 2003).

A armadura de costura foi dimensionada utilizando a equação (2.2) e adotando o espaçamento máximo indicado no item 7.3.3.12 da NBR 9062 (ABNT, 2006).

Os estribos verticais, construtivos, foram utilizados apenas nos consolos que possuíam armadura de costura.

Nos pilares foram utilizadas 4 barras de 12,5 mm de diâmetro como armadura longitudinal e estribos de 5 mm a cada 20 cm.

Os modelos M4, M5, M6, M7 e M8 possuíam o tirante do consolo ligado ao pilar por meio de luva e rosca, como mostrado na Figura 3.9. Nesse caso, a armadura de costura utilizada nos modelos M4 e M7 foi posicionada como barras retas, antes da concretagem dos pilares, conforme mostrado na Figura 3.10, através de furos nas laterais das fôrmas. Após a desmoldagem dos pilares, essa armadura foi complementada com armaduras em forma de U, como ilustrado na Figura 3.11.

Figura 3.9 - Esquema da ligação, por meio de rosca, da armadura do tirante dos consolos moldados em duas etapas

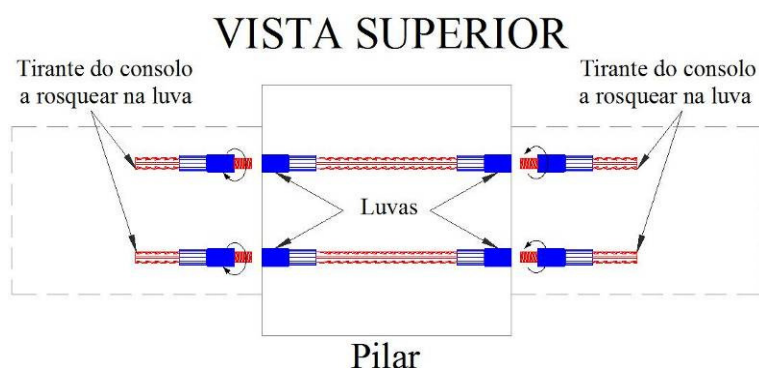


Figura 3.10 - Armadura do modelo M7 posicionada na fôrma, antes da concretagem do pilar, com a armadura de costura para fora da fôrma.



Figura 3.11 - Complemento da armadura de costura do consolo do modelo M4 deixada na concretagem do pilar.



O detalhamento da armadura dos modelos monolíticos M1 e M2 é mostrado na Figura 3.12.

O detalhamento da armadura do monolítico M3, sem armadura de costura, é mostrado na Figura 3.13.

O detalhamento da armadura dos modelos M4, M5 e M7, moldados em duas etapas e com armadura de costura, é mostrado na Figura 3.14.

Figura 3.12 - Armadura dos modelos M1 e M2, monolíticos.

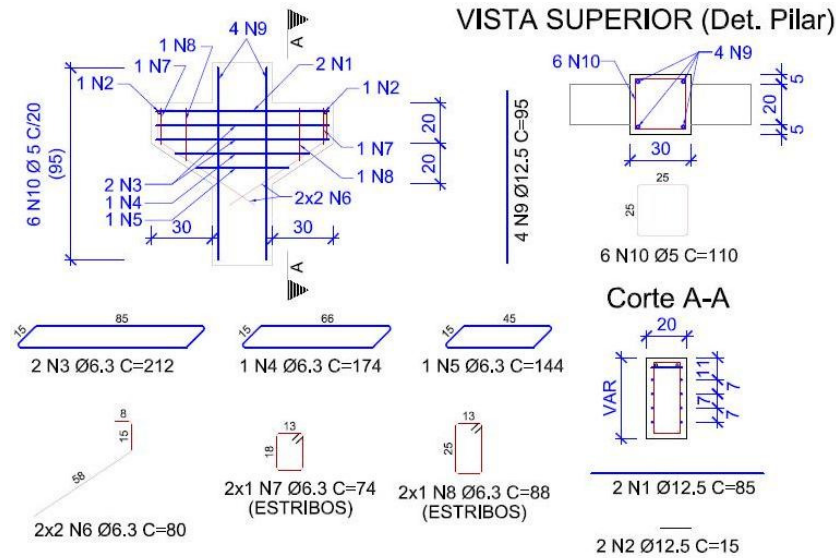


Figura 3.13 - Armadura do modelo M3, monolítico, sem armadura de costura.

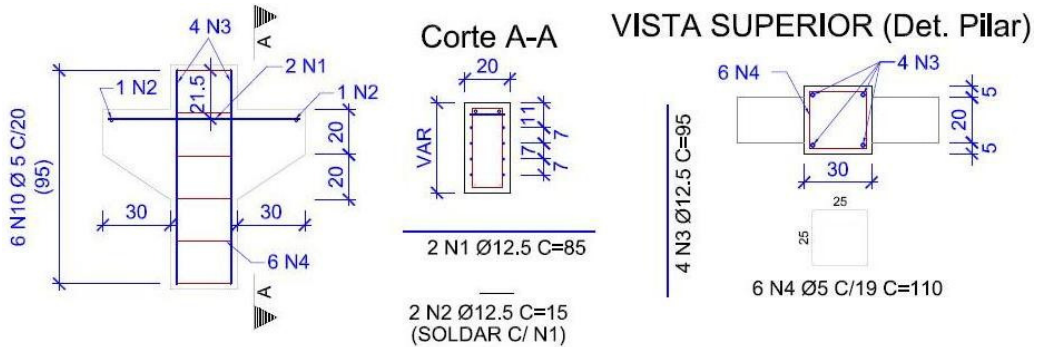
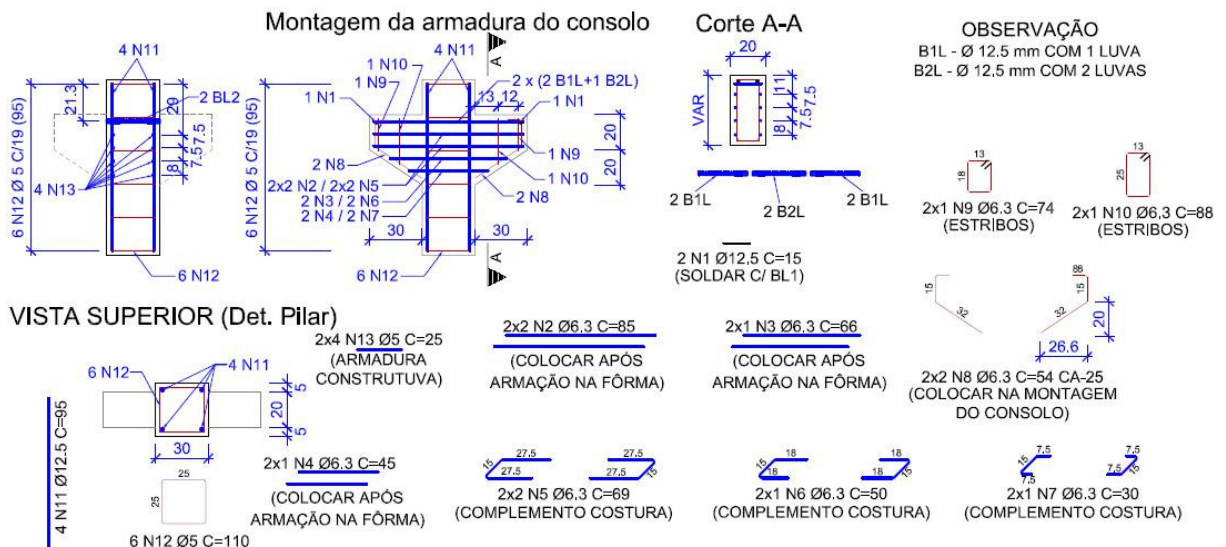
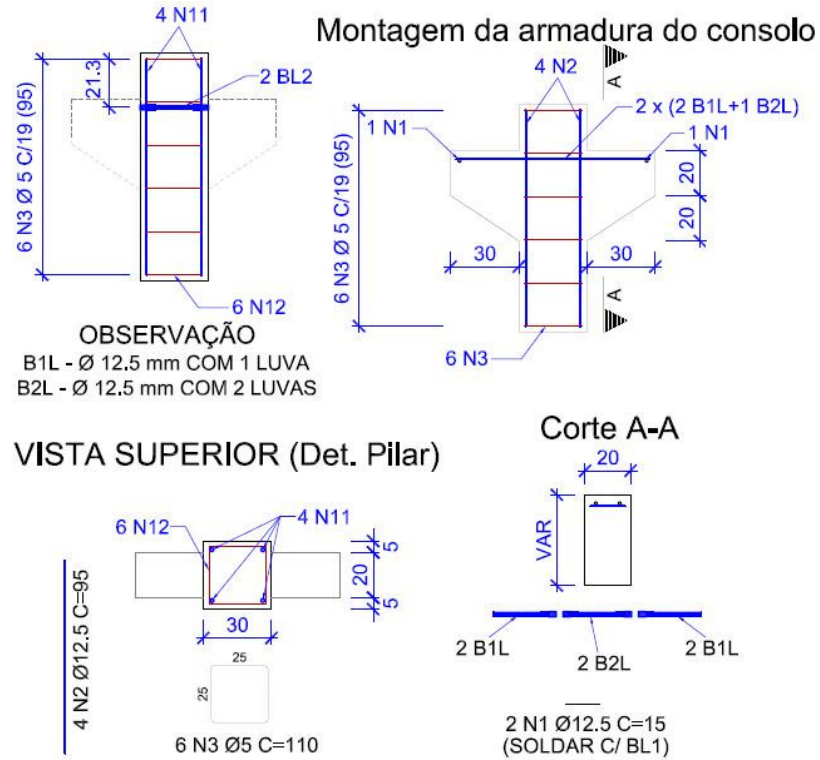


Figura 3.14 - Armadura dos modelos M4, M5 e M7, moldados em duas etapas e com armadura de costura.



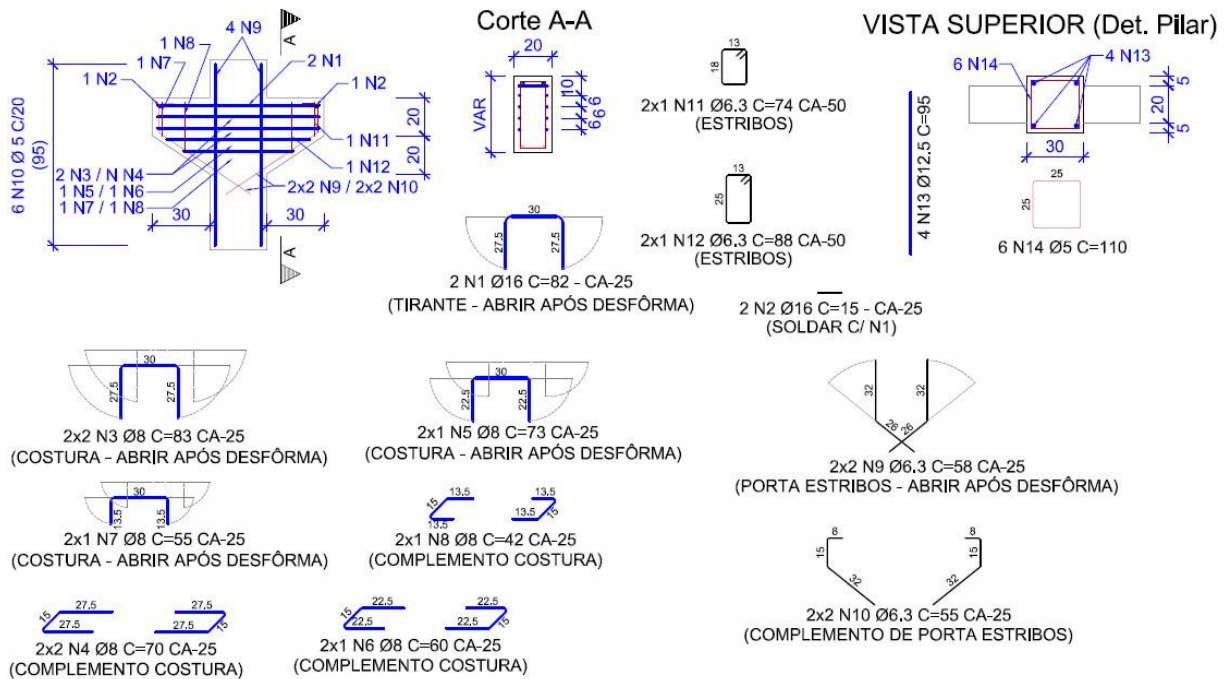
O detalhamento da armadura dos modelos M6 e M8, moldados em duas etapas e sem armadura de costura, é mostrado na Figura 3.15.

Figura 3.15 - Armadura dos modelos M6 e M8, moldados em duas etapas e sem armadura de costura.



O detalhamento da armadura do modelo M9, reforçado em aço CA-25 e moldado em duas etapas com a armadura dobrada por dentro do pilar, é mostrado na Figura 3.16.

Figura 3.16 - Armadura do modelo M9, moldado em duas etapas com aço CA-25.



3.3.3 Moldagem

Os modelos monolíticos M1, M2 e M3 foram moldados em uma única etapa. Após passar desmoldante na fôrma, a armação foi posicionada utilizando espaçadores de 2,5 cm. Os modelos foram concretados e adensados utilizando vibrador de agulha, como mostrado na Figura 3.17.

Figura 3.17 - Concretagem e adensamento do modelo monolítico M2.



Os demais modelos foram concretados em duas etapas. Inicialmente, a armação do pilar foi posicionada na fôrma já preparada com o desmoldante. Utilizaram-se espaçadores de 2,5 cm para garantir o cobrimento da armadura. O pilar foi concretado e adensado com vibrador de agulha. Depois de endurecido o concreto do pilar, a lateral da fôrma na região da posição do consolo foi retirada.

O preparo da interface dos modelos M4, M5 e M6, com chave de cisalhamento na interface, foi descrito no item 3.1.3.

No modelo M7, com interface intencionalmente rugosa, a junta entre o consolo e o pilar teve a rugosidade garantida através do apicoamento do concreto, como mostrado na Figura 3.18.

Figura 3.18 - Junta entre o pilar e o consolo do modelo M7, antes da moldagem do consolo.



No modelo M8, antes da concretagem dos pilares, foi posicionada uma placa de isopor de 30 mm de espessura dentro da fôrma e na região de ligação com o consolo. A essa placa foram fixadas fibras de aço, de modo que metade do seu comprimento ficasse imersa no concreto do pilar (Figura 3.19). Por meio dessa placa de isopor, pôde-se também garantir a rugosidade da interface por meio de ranhuras de 5 mm de profundidade espaçadas a cada 30 mm.

Depois de retiradas as laterais da fôrma no modelo M8, as placas de isopor foram também retiradas, fazendo com que as fibras ficassem com metade do seu comprimento expostas para a concretagem do consolo, como apresentado na Figura 3.20.

Figura 3.19 - Esquema de posicionamento das fibras na junta entre o consolo e o pilar no modelo M8.

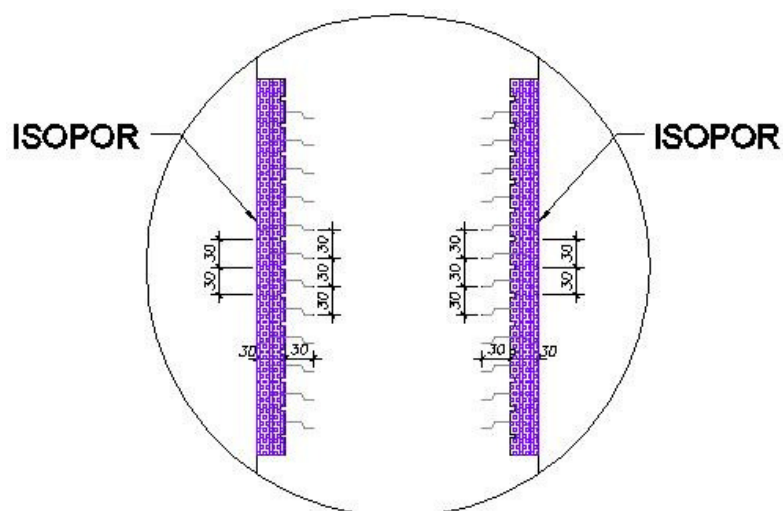


Figura 3.20 - Pilar do modelo M8 com as fibras expostas na junta entre o consolo e o pilar



No modelo M9, com armadura dobrada, a interface entre o consolo e o pilar foi escarificada e a armadura de espera dos consolos foi desdobrada, conforme mostrado na Figura 3.26.

Em todos os modelos moldados em duas etapas, a junta entre o consolo e o pilar foi limpa e umedecida. Montou-se o complemento da armação dos consolos e soldou-se a barra na extremidade dos tirantes para garantir a ancoragem dos mesmos. Montou-se a fôrma devidamente preparada com desmoldante e os consolos foram concretados e vibrados com vibrador de agulha. As Figuras 3.21 a 3.26 ilustram a etapa de preparo e concretagem dos consolos.

Figura 3.21 – Preparo e moldagem dos consolos do modelo M4, com chave de cisalhamento.



Figura 3.22 - Preparo e moldagem dos consolos do modelo M5, com chave de cisalhamento e epóxi.



Figura 3.23 - Preparo para moldagem dos consolos do modelo M6, com chave de cisalhamento e epóxi.



Figura 3.24 - Preparo e moldagem dos consolos do modelo M7, com superfície intencionalmente rugosa.



Figura 3.25 - Preparo e moldagem dos consolos do modelo M8, com fibras atravessando a interface.



Figura 3.26 - Preparo dos consolos do modelo M9, com armadura dobrada.



Após a concretagem, os modelos sem fibras foram submetidos à cura úmida por 2 dias, sendo mantidos pelo mesmo período sob lona plástica. Após esse período, os modelos foram desmoldados e mantidos ao ar livre até serem encaminhados a Furnas, onde foram conservados em câmara úmida até o data do ensaio. Já os modelos com fibras foram concretados e colocados em câmara úmida no mesmo dia, sendo mantidos nessa condição até a data do ensaio.

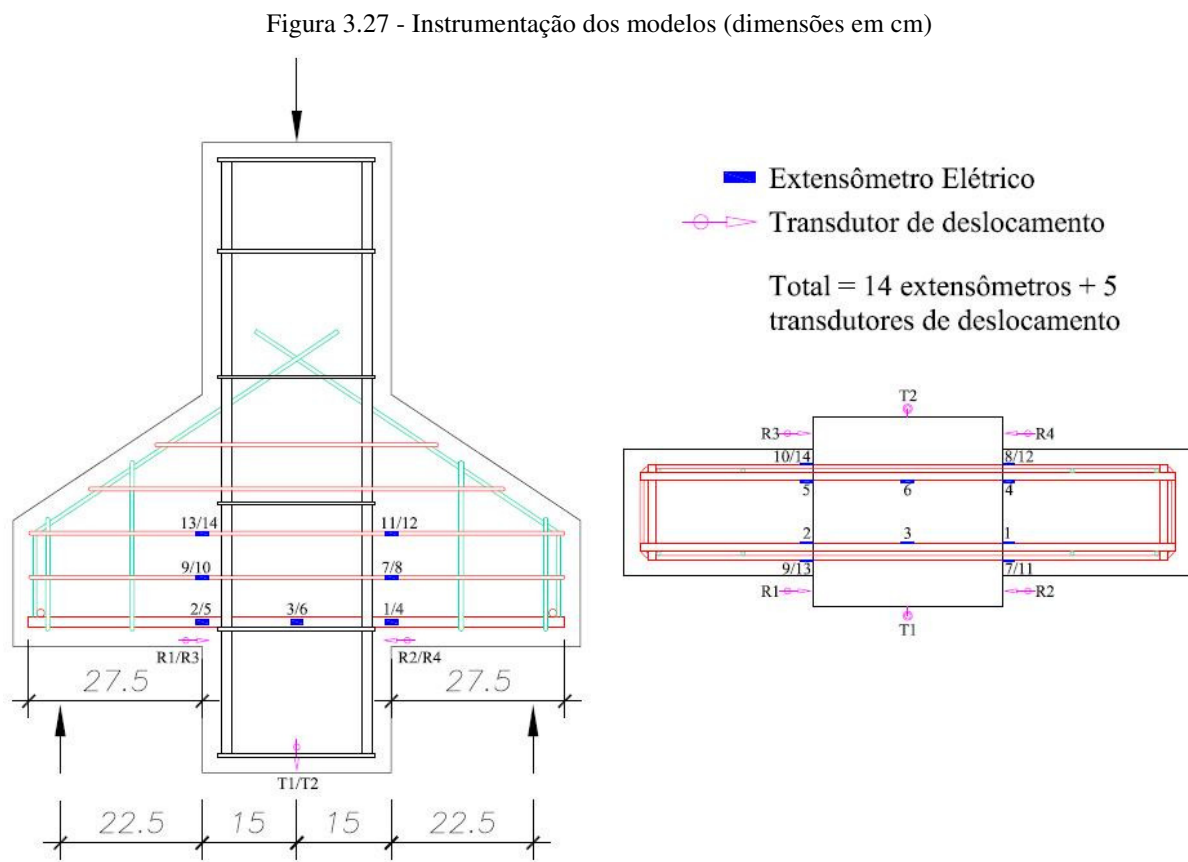
O cronograma de moldagem e ensaio de todos os modelos é apresentado na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Cronograma de moldagem dos modelos.

Modelo		Data de moldagem	Data do ensaio dos corpos de prova e do modelo	Idade
M1A	Monolítico	06/jun	18/jul	42
M1B	Monolítico	08/jun	04/ago	57
M2A	Monolítico	10/ago	03/out	54
M2B	Monolítico	10/ago	07/out	58
M3A	Monolítico	02/ago	15/set	44
M3B	Monolítico	02/ago	13/set	42
M4A	Pilar	20/out	18/nov	29
	Consolo	21/out		28
M4B	Pilar	19/out	29/nov	41
	Consolo	21/out		39
M5A	Pilar	06/out	17/nov	42
	Consolo	11/out		37
M5B	Pilar	05/out	17/nov	43
	Consolo	11/out		37
M6A	Pilar	27/set	09/nov	43
	Consolo	30/set		40
M6B	Pilar	27/set	11/nov	45
	Consolo	30/set		42
M7A	Pilar	27/out	30/nov	34
	Consolo	28/out		33
M7B	Pilar	27/out	01/dez	35
	Consolo	28/out		34
M8A	Pilar	24/ago	18/out	55
	Consolo	01/set		47
M8B	Pilar	24/ago	08/nov	76
	Consolo	01/set		68
M9A	Pilar	09/jun	26/jul	47
	Consolo	14/jun		42
M9B	Pilar	09/jun	05/ago	57
	Consolo	14/jun		52

3.4 INSTRUMENTAÇÃO E EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Nos ensaios foram medidas as deformações na armadura dos consolos (tirante e armadura de costura), os deslocamentos verticais dos modelos, a abertura das juntas entre o consolo e o pilar e força resistida pelos modelos. Para a obtenção desses dados, foi utilizada a instrumentação apresentada na Figura 3.27, composta por extensômetros elétricos fixados nos tirantes e nas duas primeiras camadas da armadura de costura e por transdutores de deslocamento fixados, externamente à peça, nas posições indicadas.

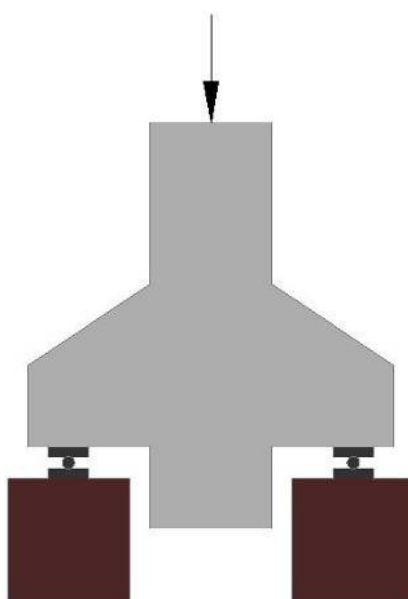


Os extensômetros colados nos tirantes, nas posições 1, 2, 4 e 5, junto à seção de engastamento do consolo, tiveram como objetivo medir a deformação da armadura onde se previa o início da fissuração. Assim, foi possível obter a força correspondente ao início de escoamento do tirante em cada modelo. Os extensômetros colados nos tirantes, nas posições 3 e 6, dentro dos pilares, tiveram como objetivo avaliar a distribuição de tensões ao longo da barra na região de ancoragem nos pilares.

Os extensômetros colocados na armadura de costura, nas posições 7 a 14, junto à seção de engastamento do consolo, tiveram como objetivo medir as deformações da armadura de costura e determinar a influência dela na capacidade resistente do modelo.

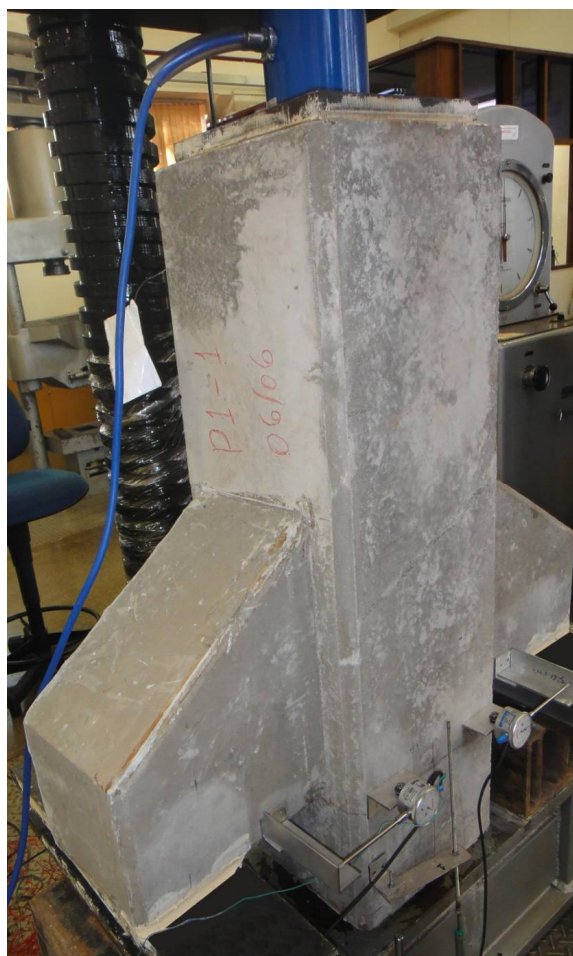
Para a realização dos ensaios, os modelos foram posicionados invertidos na máquina de ensaio. Sob cada consolo foi colocado um conjunto de apoio. Cada conjunto era composto de um bloco metálico, duas chapas metálicas e um rolete metálico proporcionando livre rotação ao modelo. A Figura 3.28 ilustra o esquema de ensaio.

Figura 3.28 - Esquema de ensaio dos modelos.



Os transdutores de deslocamento, R1 a R4 com resolução de 0,001 mm, tiveram como objetivo medir a abertura da junta entre o consolo e o pilar. Eles foram fixados em cantoneiras metálicas coladas ao pilar. Com hastes prolongadoras, eles se apoiavam em cantoneiras coladas no consolo. A Figura 3.29 mostra os transdutores de deslocamento antes e durante o ensaio.

Figura 3.29 - Fixação dos transdutores de deslocamento para medição da abertura da junta entre o consolo e o pilar.



Os transdutores de deslocamento, T1 e T2, T2, com resolução de 0,01 mm, tiveram como objetivo medir o deslocamento vertical e, juntamente com os resultados dos transdutores de deslocamentos R1 a R4, obter os valores de giro dos consolos em relação ao pilar. A Figura 3.30 mostra um dos transdutores fixados para o ensaio.

Figura 3.30 - Transdutores de deslocamentos fixados para o ensaio.



Os ensaios foram realizados com controle de força, utilizando uma célula de carga com capacidade máxima calibrada de 100 tf. Ela foi posicionada sobre uma chapa metálica sobre o pilar, no centro do mesmo. Sobre a célula de carga foi colocada uma chapa metálica para melhor nivelamento da força aplicada. A Figura 3.31 mostra o modelo preparado para o ensaio.

Figura 3.31 - Modelo preparado para o ensaio.



A força foi aplicada continuamente até a ruína do modelo, isto é, até que o mesmo não suportasse incrementos de força. Em alguns casos, o ensaio foi interrompido prematuramente, entretanto sempre depois do tirante ter atingido a deformação de escoamento do aço. Durante o ensaio foram observadas e marcadas as fissuras que surgiram no modelo.

CAPÍTULO 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos no programa experimental. A análise é feita observando o panorama de fissuração, a forma de ruptura dos modelos, as forças de escoamento do tirante e última, a abertura da junta entre o consolo e o pilar, a deformação da armadura de costura, o deslocamento vertical, a rotação do modelo e a comparação dos resultados com modelos analíticos.

4.1 PANORAMA DE FISSURAÇÃO E FORMA DE RUPTURA

A seguir são descritos e ilustrados o panorama de fissuração e a forma de ruptura dos consolos. Em todos os modelos a ruptura foi caracterizada após alcançada a força última, ou seja, todos os ensaios só foram interrompidos após o pico da força, quando a queda da força resistente tornou-se mais intensa.

O modelo monolítico M1A iniciou a fissuração na região de engastamento do consolo com o pilar. Em seguida, apareceram fissuras na biela de compressão do consolo que aumentaram em quantidade e comprimento juntamente com o aumento da força aplicada. No consolo 1 apareceram fissuras no pilar e houve o esmagamento do concreto no canto superior, culminando na ruptura do modelo. Aparentemente, os dois consolos do modelo não romperam de forma uniforme, sendo que o consolo 1 apresentou fissuras no canto superior do consolo e maior fissuração da biela de compressão que o consolo 2. A Figura 4.1 ilustra o panorama de fissuração do modelo monolítico M1A.

Figura 4.1 - Panorama de fissuração do modelo monolítico M1A.



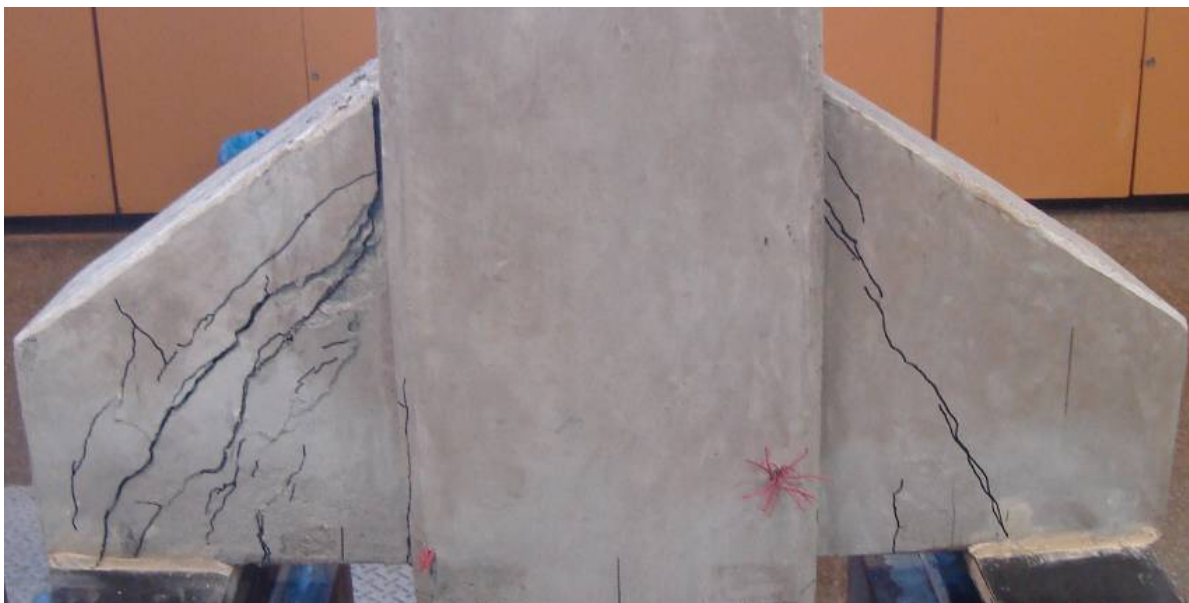
(a) Consolo 1

(b) Consolo 2



(c) Esmagamento do concreto no canto superior do consolo ao final do ensaio

Figura 4.1 - Panorama de fissuração do modelo monolítico M1A (continuação).



(d) Esmagamento da biela no consolo 1 ao final do ensaio.

O modelo monolítico M1B iniciou a fissuração na região de engastamento do consolo com o pilar. Visualmente, essas fissuras apareceram no consolo 1 com 50% da força de escoamento do tirante e no consolo 2 com 60% da mesma força. Em seguida, apareceram fissuras na biela de compressão do consolo 1 com 89% da força de escoamento do tirante e no consolo 2 com 97% da mesma força, as quais aumentaram juntamente com o aumento da força aplicada. No consolo 1 apareceram fissuras no pilar com uma força 19% acima da força de escoamento do tirante e em ambos os consolos houve o esmagamento do concreto no canto superior, culminando na ruptura do modelo. Aparentemente, os dois consolos do modelo romperam de forma uniforme, apesar do consolo 1 apresentar maior fissuração da biela que o consolo 2. A Figura 4.2 ilustra o panorama de fissuração do modelo monolítico M1B.

Figura 4.2 - Panorama de fissuração do modelo monolítico M1B.



(a) Consolo 1



(b) Consolo 2



(c) Esmagamento da biela no consolo 1 ao final do ensaio



(d) Esmagamento da biela no consolo 2 ao final do ensaio

Figura 4.2 - Panorama de fissuração do modelo monolítico M1B (continuação).

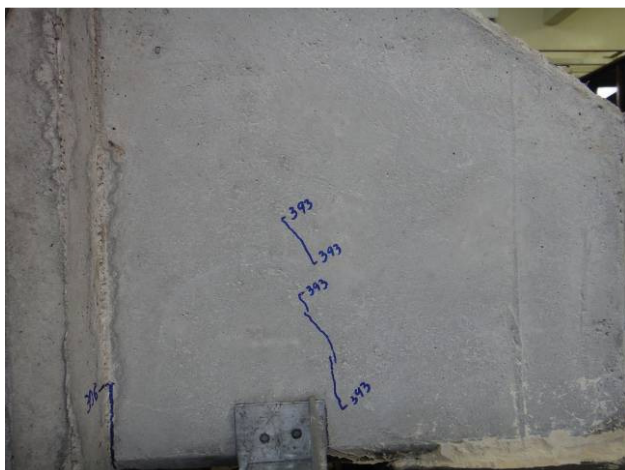


(e) Esmagamento do concreto no canto superior do consolo 1 ao final do ensaio

(f) Esmagamento do concreto no canto superior do consolo 2 ao final do ensaio

O modelo monolítico M2A, com armadura de costura e reforçado com 1% de fibras de aço, iniciou a fissuração na região de engastamento do consolo com o pilar. Visualmente, essas fissuras apareceram no consolo 2 com 43% da força de escoamento do tirante e no consolo 1 com 54% da mesma força. Em seguida, apareceram fissuras na biela de compressão do consolo 1 com 69% da força de escoamento do tirante. Já no consolo 2, a fissuração visível da biela de compressão ocorreu para uma força 20% acima da força de escoamento do tirante. No consolo 1 houve o esmagamento do concreto no canto superior, culminando na ruptura do modelo (Figura 4.3 **Erro! Autoreferência de indicador não válida.**e). Aparentemente, os dois consolos do modelo não romperam de forma uniforme, sendo que o consolo 1 apresentou fissuras no canto superior do consolo e maior fissuração da biela de compressão que o consolo 2. A Figura 4.3 ilustra o panorama de fissuração do modelo M2A.

Figura 4.3 - Panorama de fissuração do modelo monolítico M2A.



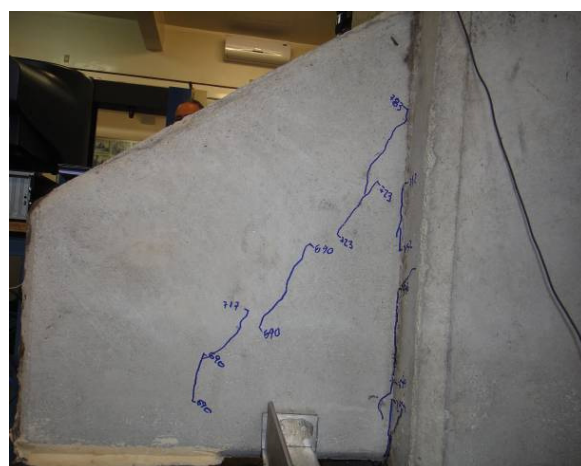
(a) Consolo 1



(b) Consolo 2



(c) Esmagamento da biela no consolo 1 ao final do ensaio



(d) Esmagamento da biela no consolo 2 ao final do ensaio



(e) Esmagamento do concreto no canto superior do consolo 1 ao final do ensaio

O modelo monolítico M3A, sem armadura de costura e reforçado com 1% de fibras de aço, iniciou a fissuração no consolo 2, na região de engastamento do consolo. Já no consolo 1, a fissuração iniciou-se com fissuras na biela de compressão. Visualmente, elas apareceram no consolo 2 com 56% da força de escoamento do tirante e no consolo 1 com 61% da mesma força. Em seguida, apareceram fissuras na região de engastamento do consolo 1 com 69% da força de escoamento do tirante e na biela de compressão do consolo 2 com 78% da mesma força, as quais aumentaram juntamente com o aumento da força aplicada. Foi verificado que a inclinação da biela de compressão nesse modelo foi maior que no modelo de referência, aparecendo fissuras no consolo mais próximas ao pilar. Aparentemente, os dois consolos do modelo não romperam de forma uniforme, sendo que o consolo 1 apresentou fissuras no canto superior do consolo e maior fissuração da biela de compressão que o consolo 2. A Figura 4.5 ilustra o panorama de fissuração do modelo M3A.

Figura 4.5 - Panorama de fissuração do modelo monolítico M3A.



(a) Consolo 1

(b) Consolo 2



(c) Esmagamento do concreto no canto superior do consolo 1 ao final do ensaio

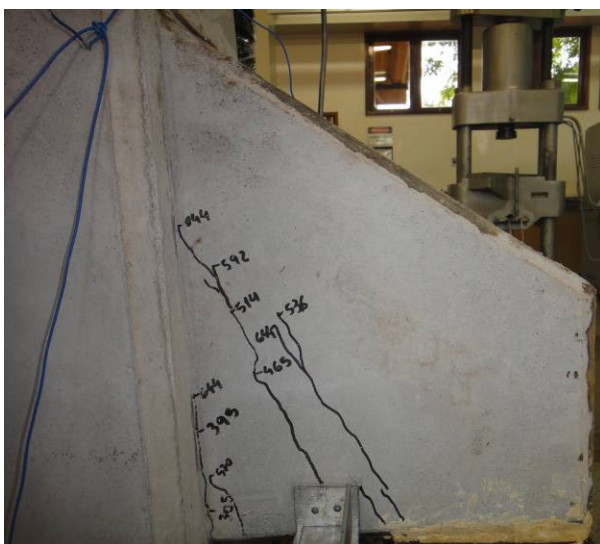
Figura 4.6 - Panorama de fissuração do modelo monolítico M3B



(a) Consolo 1



(b) Consolo 2



(c) Esmagamento da biela no consolo 1 ao final do ensaio



(d) Esmagamento da biela no consolo 2 ao final do ensaio

Figura 4.6 - Panorama de fissuração do modelo monolítico M3B (continuação)



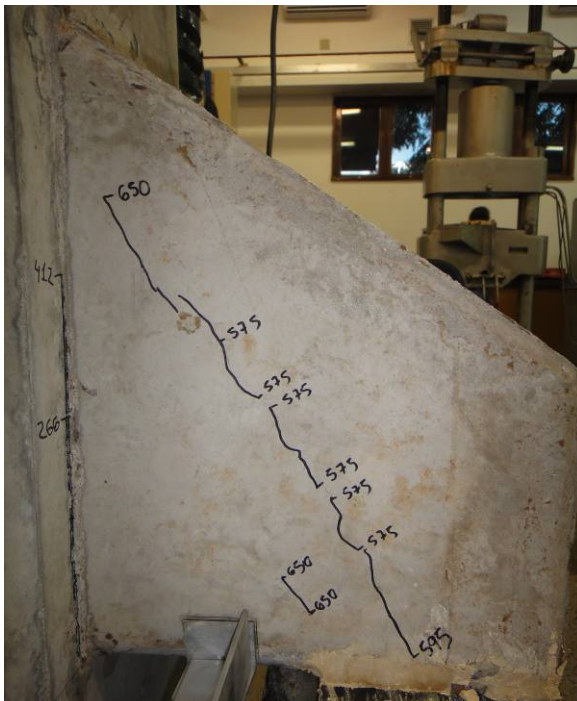
(e) Esmagamento do concreto no canto superior do consolo 2 ao final do ensaio

O modelo M4A, moldado em duas etapas e com chave de cisalhamento na interface, iniciou a fissuração na junta entre o consolo e o pilar. Visualmente, as fissuras iniciaram no consolo 1 com 47% da força de escoamento do tirante e no consolo 2 com 70% da mesma força. No consolo 2, observou-se que a fissuração iniciou-se no contorno da junta, como mostrado na Figura 4.7a. Em seguida, apareceram fissuras na biela de compressão do consolo 1 quando o tirante entrou em escoamento e no consolo 2 com uma força 33% superior à força relativa ao escoamento do tirante. Essas fissuras aumentaram juntamente com o aumento da força aplicada. Aparentemente, os dois consolos do modelo romperam de forma uniforme, com uma abertura de junta expressiva do consolo 2, como mostrado na Figura 4.7e. A Figura 4.7 ilustra o panorama de fissuração do modelo M4A.

Figura 4.7 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M4A.



(a) Início da fissuração do modelo M4A no contorno das chaves de cisalhamento.

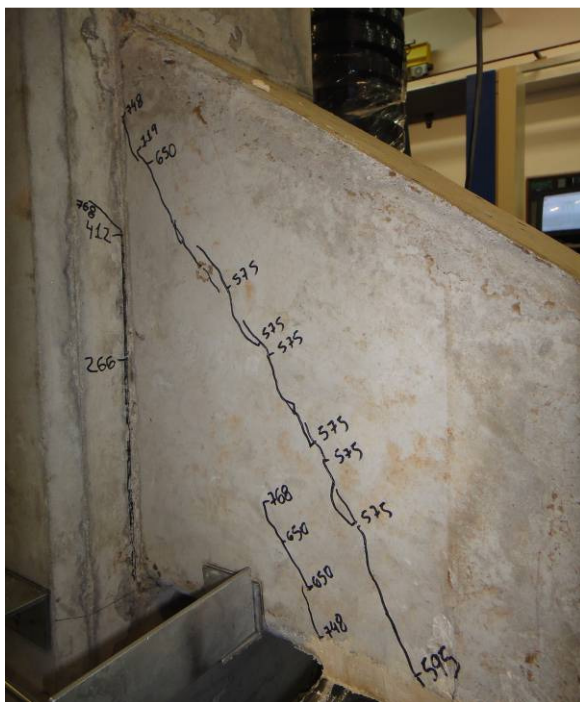


(b) Consolo 1

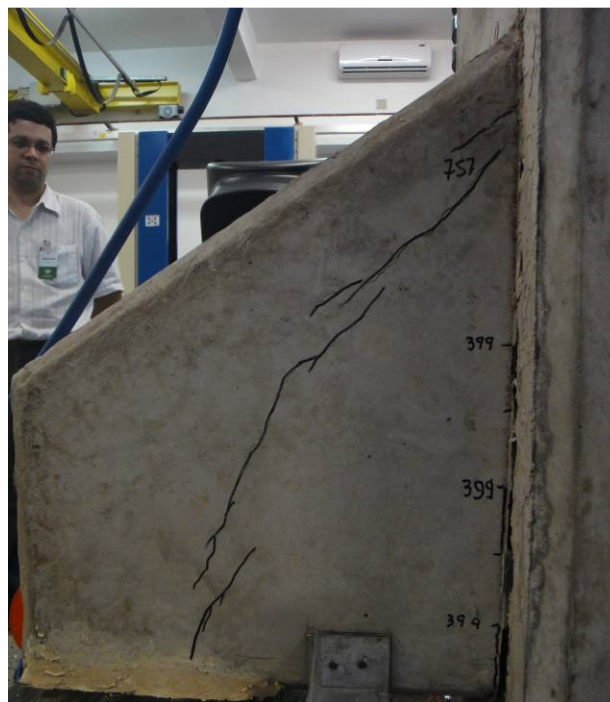


(c) Consolo 2

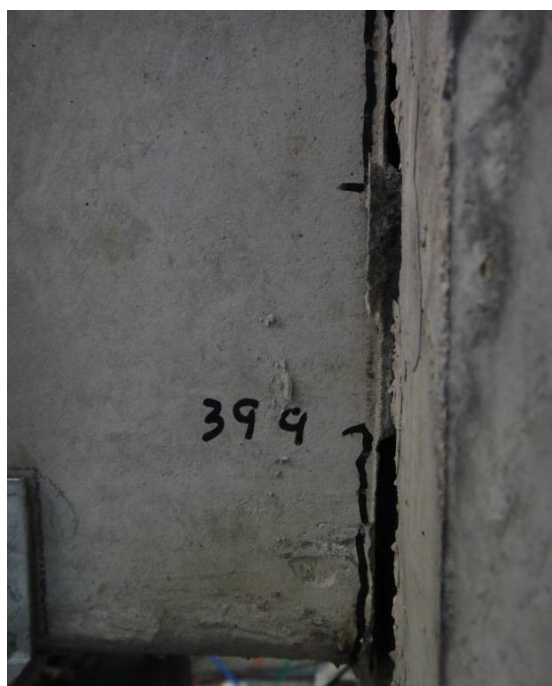
Figura 4.7 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M4A (continuação).



(d) Esmagamento da biela no consolo 1 ao final do ensaio



(e) Esmagamento da biela no consolo 2 ao final do ensaio

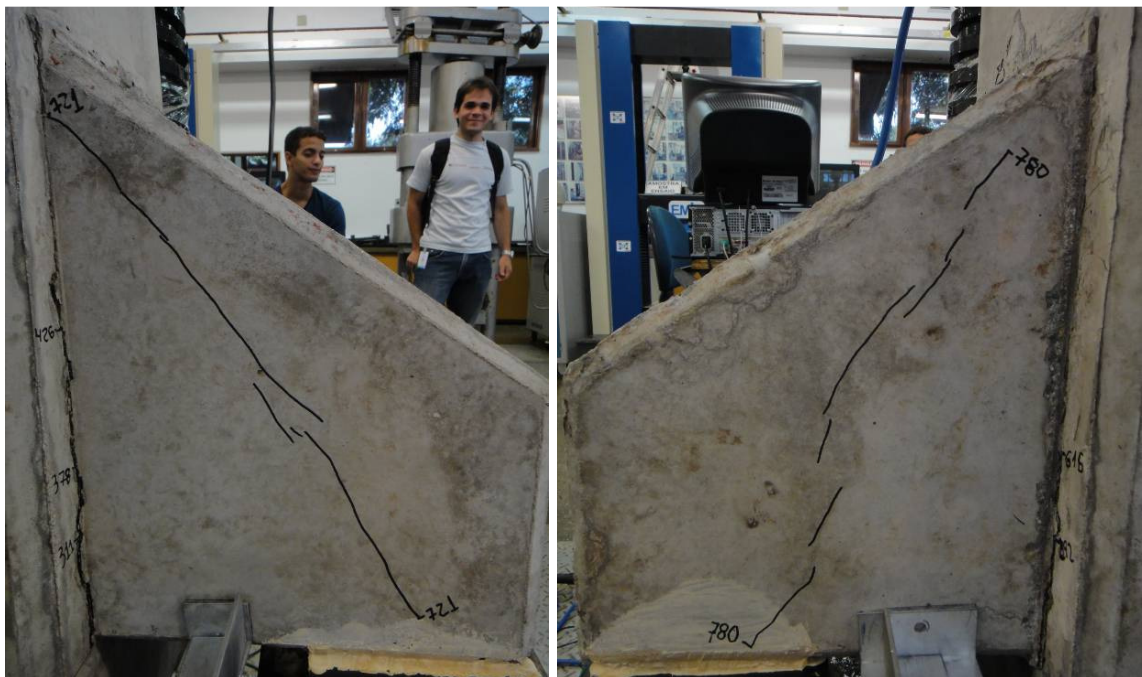


(f) Abertura de junta do consolo 2 ao final do ensaio

O modelo M4B, também moldado em duas etapas e com chave de cisalhamento na interface, iniciou a fissuração na junta entre o consolo e o pilar. Visualmente, essas fissuras apareceram no consolo 2 com 59% da força de escoamento do tirante e no consolo 1 com 62% da mesma força. Em seguida, apareceram fissuras na biela de compressão do consolo 1 para uma força

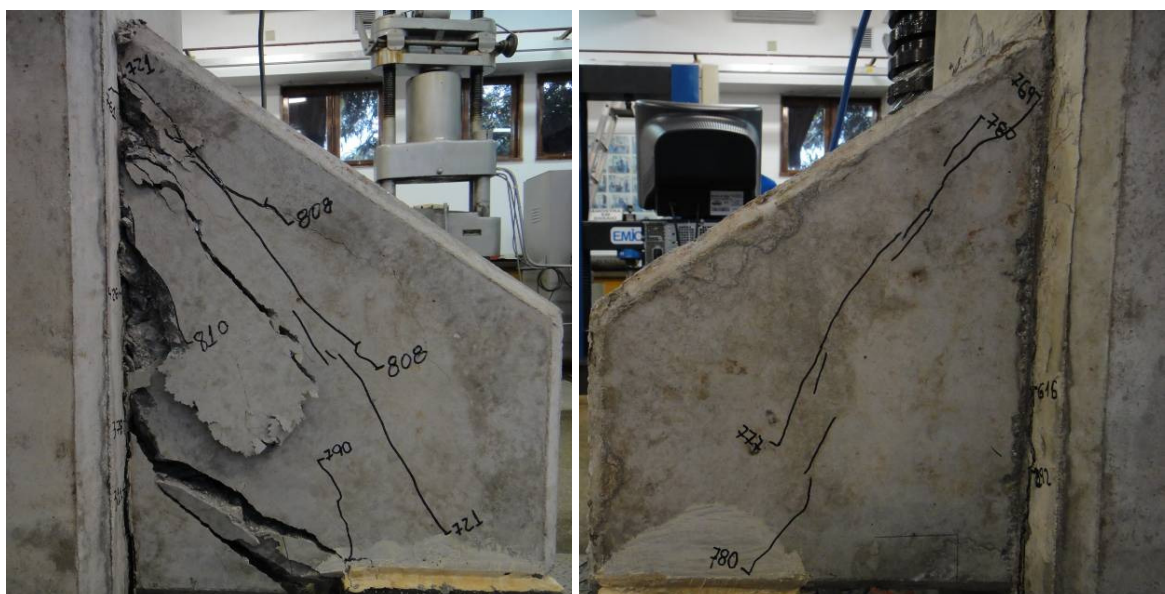
44% acima da força de escoamento do tirante e no consolo 2 para uma força 56% acima dessa força. No consolo 1 houve o esmagamento do concreto no canto superior, culminando na ruptura do modelo. Aparentemente, os dois consolos do modelo não romperam de forma uniforme, sendo que o consolo 1 apresentou fissuras no canto superior do consolo e maior fissuração da biela de compressão que o consolo 2. A Figura 4.8 ilustra o panorama de fissuração do modelo M4B.

Figura 4.8 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M4B.



(a) Consolo 1

(b) Consolo 2

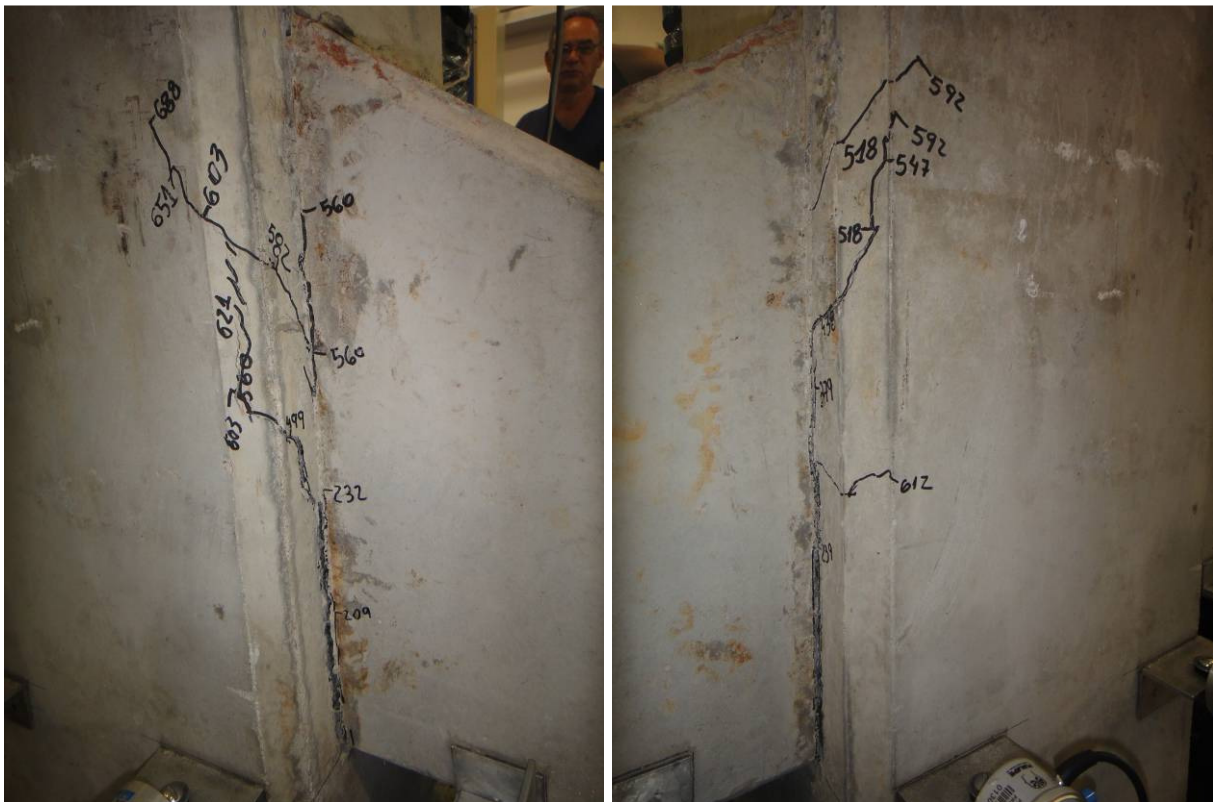


(c) Esmagamento da biela no consolo 1 ao final do ensaio

(d) Fissuração do consolo 2 ao final do ensaio

O modelo M5A, moldado em duas etapas com chave de cisalhamento na interface e sem armadura de costura, iniciou a fissuração na junta entre o consolo e o pilar. Visualmente, essas fissuras apareceram no consolo 1 com 45% da força de escoamento do tirante e no consolo 2 com 54% da mesma força. Em seguida, apareceram fissuras no pilar do lado do consolo 1 para uma força 21% acima da força de escoamento do tirante e do lado do consolo 2 para uma força 26% acima da mesma força. Quando apareceu a primeira fissura na biela de compressão no consolo 2, ocorreu uma ruptura brusca devido à falta da armadura de costura. Aparentemente, os dois consolos do modelo romperam de forma uniforme. A Figura 4.9 ilustra o panorama de fissuração do modelo M5A.

Figura 4.9 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M5A.



(a) Consolo 1

(b) Consolo 2

Figura 4.9 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M5A (continuação).



(c) Fissuração do consolo 1 ao final do ensaio

(d) Esmagamento da biela no consolo 2 ao final do ensaio

O modelo M5B, também moldado em duas etapas com chave de cisalhamento na interface e sem armadura de costura, iniciou a fissuração na junta entre o consolo e o pilar. Visualmente, essas fissuras apareceram no consolo 2 com 47% da força de escoamento do tirante e no consolo 1 para uma força igual a 58% da mesma força. Em seguida, apareceram fissuras no pilar do lado do consolo 2 para uma força 86% da força de escoamento do tirante e do lado do consolo 1 com 4% acima da mesma força. Quando apareceu a primeira fissura na biela de compressão no consolo 2 ocorreu uma ruptura brusca devido à falta da armadura de costura. Aparentemente, os dois consolos do modelo romperam de forma uniforme. A **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** ilustra o panorama de fissuração do modelo M5B.

Figura 4.10 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M5B.



(a) Consolo 1

(b) Consolo 2



(c) Esmagamento da biela no consolo 1 ao final do ensaio

(d) Esmagamento da biela no consolo 2 ao final do ensaio

As fissuras do modelo M6, moldado em duas etapas com chave de cisalhamento na interface e sem armadura de costura e reforçado com 1% de fibras de aço, concentraram-se apenas na junta entre o consolo e o pilar. Visualmente, essas fissuras apareceram no consolo 2 para uma força 50% da força de escoamento do tirante e no consolo 1 com 54% da mesma força. Essas fissuras aumentaram juntamente com o aumento da força aplicada até a ruptura do modelo,

que se deu por corte direto na interface do consolo 2 com o pilar. A Figura 4.11 ilustra o panorama de fissuração do modelo M6.

Figura 4.11 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M6.



(a) Fissuração no consolo 1 ao final do ensaio

(b) Fissuração no consolo 2 ao final do ensaio



(c) Consolo 2 rompido por corte direto

O modelo M7A, moldado em duas etapas com interface naturalmente rugosa e com armadura de costura, iniciou a fissuração na junta entre o consolo e o pilar. Visualmente, essas fissuras apareceram no consolo 1 com 60% da força de escoamento do tirante e no consolo 2 com 69% da mesma força. Em seguida, apareceram fissuras na biela de compressão do consolo 2 para uma força 34% acima da força de escoamento do tirante e no consolo 1 para uma força 41% acima da mesma força. No consolo 1 houve o esmagamento do concreto no canto superior, culminando na ruptura do modelo. Aparentemente, os dois consolos do modelo não romperam de forma uniforme, sendo que o consolo 1 apresentou fissuras no canto superior do consolo e maior fissuração na biela de compressão que o consolo 2. A Figura 4.12 ilustra o panorama de fissuração do modelo M7A.

Figura 4.12 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M7A.



(a) Consolo 1

(b) Consolo 2

Figura 4.12 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M7A (continuação).



(c) Esmagamento da biela no consolo 1 ao final do ensaio

(d) Fissuração no consolo 2 ao final do ensaio

O modelo M7B, também moldado em duas etapas com interface naturalmente rugosa e com armadura de costura, apresentou comportamento semelhante ao modelo M7A. Visualmente, as fissuras na junta entre o consolo e o pilar apareceram, no consolo 2, para uma força de 56% da força de escoamento do tirante e, no consolo 1, para uma força de 62% da mesma força. Em seguida, apareceram fissuras na biela de compressão do consolo 2 para uma força 25% superior à força de escoamento do tirante e no consolo 1 para uma força 30% acima da mesma força. No consolo 2 houve o esmagamento do concreto no canto superior, culminando na ruptura do modelo. Aparentemente, os dois consolos do modelo não romperam de forma uniforme, sendo que o consolo 2 apresentou fissuras no canto superior do consolo e maior fissuração na biela de compressão que o consolo 1.

Não foi observada influência do tratamento da interface na forma de ruptura do modelo, isto é, a forma de ruptura dos modelos com chave de cisalhamento foi muito parecida com a forma de ruptura dos modelos com superfície naturalmente rugosa. A Figura 4.13 ilustra o panorama de fissuração do modelo M7B.

Figura 4.13 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M7B.



(a) Consolo 1

(b) Consolo 2



(c) Fissuração no consolo 1 ao final do ensaio

(d) Esmagamento da biela no consolo 2 ao final do ensaio

O modelo M8A, moldado em duas etapas com chave de cisalhamento única, sem armadura de costura e reforçado com 1% de fibras de aço, iniciou a fissuração na junta entre o consolo e o pilar. Observou-se que a fissuração iniciou-se no contorno das chaves de cisalhamento do consolo 2, o que pode ser visto na Figura 4.14. Visualmente, essas fissuras apareceram no consolo 2 com 8% da força de escoamento do tirante e no consolo 1 com 10% da mesma

força. Apesar desse baixo nível de força, essas fissuras não parecem ter interferido na forma de ruptura do modelo. Com 90% da força de escoamento do tirante começaram a aparecer fissuras no pilar, do lado do consolo 2. Essas fissuras também surgiram no consolo 1 para uma força 9% maior que a mesma força. Tanto estas fissuras quanto aquelas na junta entre consolo e pilar aumentaram juntamente com o aumento da força aplicada. No consolo 1 foi observada excessiva abertura da junta e ruptura do tirante. Aparentemente, os dois consolos do modelo romperam de forma uniforme. Em ambos os consolos foram observadas fissuras no canto superior do consolo, entretanto não foi observada ruptura da biela de compressão ao longo do consolo devido, provavelmente, à presença das fibras de aço no concreto do consolo. A Figura 4.14 ilustra o panorama de fissuração do modelo M8A.

Figura 4.14 - Panorama de fissuração do modelo M8A.

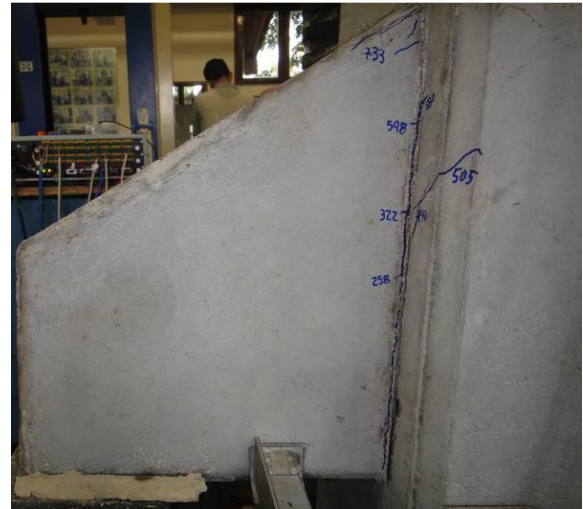


(a) Início da fissuração do modelo M8A no contorno das chaves de cisalhamento.

Figura 4.14 - Panorama de fissuração do modelo M8A (continuação).



(b) Ruína do consolo 1 com abertura excessiva da junta e, conseqüentemente, ruptura do tirante.



(c) Ruína do consolo 2 com esmagamento no canto superior do consolo.



(d) Ruptura do tirante do consolo 1

O modelo M8B, também moldado em duas etapas com chave de cisalhamento única, sem armadura de costura e reforçado com 1% de fibras de aço, iniciou a fissuração na junta entre o consolo e o pilar. Visualmente, essas fissuras apareceram no consolo 1 com 55% da força de escoamento do tirante e no consolo 2 com 66% da força mesma força. Para uma força 20% acima da força de escoamento do tirante foram observadas fissuras no pilar do lado do consolo 1. Tanto estas fissuras quanto aquelas na junta entre consolo e pilar aumentaram juntamente com o aumento da força aplicada. No consolo 1 observou-se excessiva abertura da junta e esmagamento do concreto no canto superior, culminando na ruptura do modelo. Também nesse modelo não foi observada a ruína da biela de compressão ao longo do consolo devido à presença das fibras de aço. Nesse caso, assim como nos demais modelos em que a ruína da biela de compressão não foi observada, a força última do consolo foi atingida devido à ruína localizada do concreto no canto superior do consolo. Isso provavelmente aconteceu

devido ao giro do consolo, com redução da área comprimida acima da fissura que se formou na interface e conseqüente esmagamento do concreto comprimido (Figura 4.15).

Aparentemente, os dois consolos do modelo não romperam de forma uniforme, sendo que apenas o consolo 1 apresentou fissuras no canto superior. A Figura 4.15 ilustra o panorama de fissuração do modelo M8B.

Figura 4.15 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M8B.



(a) Ruína do consolo 1 com abertura excessiva da junta.

(b) Fissuração do consolo ao final do ensaio.



(c) Esmagamento do concreto no canto superior do consolo

O modelo M9A, moldado em duas etapas com armadura do tirante e armadura de costura contínuas, iniciou a fissuração na junta entre o consolo e o pilar. Visualmente, essas fissuras apareceram nos dois consolos com a força de 70 kN. Em seguida, apareceram fissuras na região do tirante do consolo 1, próximo ao pilar, para uma força de 178 kN. No consolo 2 essa mesma fissura apareceu para um força de 190 kN, como mostrado na Figura 4.16. Essas fissuras podem ter ocorrido devido a um problema intrínseco ao processo de produção desse modelo. Como as armaduras do consolo, em CA-25, são dobradas na execução do pilar e desdobradas na confecção do consolo, o tirante não fica perfeitamente reto nessa região, como ilustrado na Figura 4.17.

As fissuras na biela de compressão do consolo 2 começaram a aparecer para uma força de 220 kN e, para o consolo 1, para uma força de 260 kN. No consolo 1 houve o esmagamento do concreto no canto superior, culminando na ruptura do modelo. Foi observada, também no consolo 1, a expulsão do cobrimento da armadura de costura, como mostrado na Figura 4.18. Isto provavelmente ocorreu devido a uma falha na execução que resultou a um menor cobrimento da armadura de costura nesse modelo. Aparentemente, os dois consolos do modelo não romperam de forma uniforme, sendo que o consolo 1 apresentou fissuras no canto superior do consolo e maior fissuração na biela de compressão que o consolo 2. A Figura 4.18 ilustra o panorama de fissuração do modelo M9A.

Figura 4.16 - Fissuração na região do tirante próximo ao pilar do modelo em duas etapas M9A.



(a) Consolo 1

(b) Consolo 2

Figura 4.17 - Armaduras do consolo do modelo em duas etapas M9.

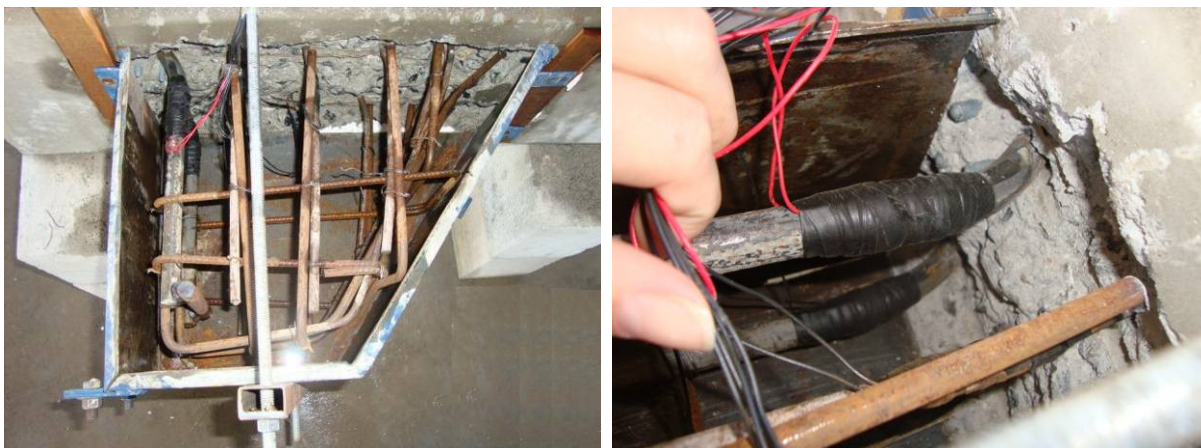


Figura 4.18 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M9A.



(a) Consolo 1

(b) Consolo 2



(c) Esmagamento da biela no consolo 1 ao final do ensaio



(d) Fissuração no consolo 2 ao final do ensaio

Figura 4.18 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M9A.



(e) Expulsão do cobrimento da armadura de costura do consolo

O modelo M9B, também moldado em duas etapas com armadura do tirante e armaduras de costura contínuas iniciou a fissuração na região da junta entre o consolo e o pilar. Visualmente, essas fissuras apareceram primeiramente no consolo 1 com uma força de 73 kN e no consolo 2 com uma força de 89 kN. Em seguida, apareceram fissuras na região do tirante próximo ao pilar em ambos os consolos, como mostrado na Figura 4.19 e visto também no modelo M9A. As fissuras na biela de compressão apareceram inicialmente no consolo 2 e com uma força de 200 kN. No consolo 2 houve o esmagamento do concreto nas bielas de compressão ao longo do consolo, enquanto no consolo 1 a fissura se prolongou até o canto superior, culminando na ruptura do modelo, pelo esmagamento do concreto. Foi observada, também no consolo 1, a expulsão do cobrimento da armadura de costura, assim como verificado no modelo M9A. Aparentemente, os dois consolos do modelo romperam de forma uniforme. A Figura 4.20 ilustra o panorama de fissuração do modelo M9B.

Figura 4.19 - Fissuração na região do tirante próximo ao pilar do modelo em duas etapas M9B.

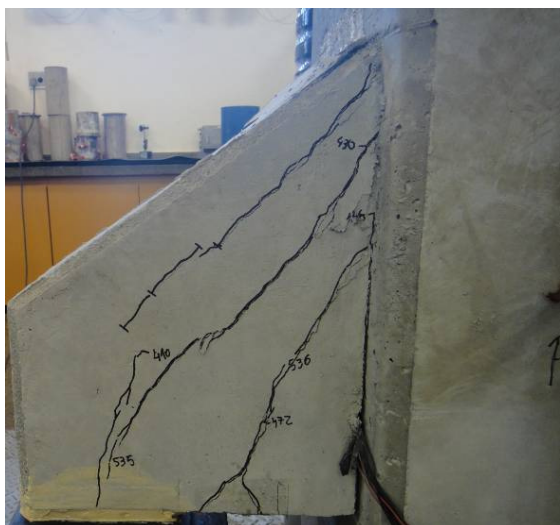


Figura 4.20 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M9B.



(a) Consolo 1

(b) Consolo 2



(c) Esmagamento da biela no consolo 1 ao final do ensaio



(d) Esmagamento da biela no consolo 2 ao final do ensaio

Figura 4.20 - Panorama de fissuração do modelo em duas etapas M9B (continuação).



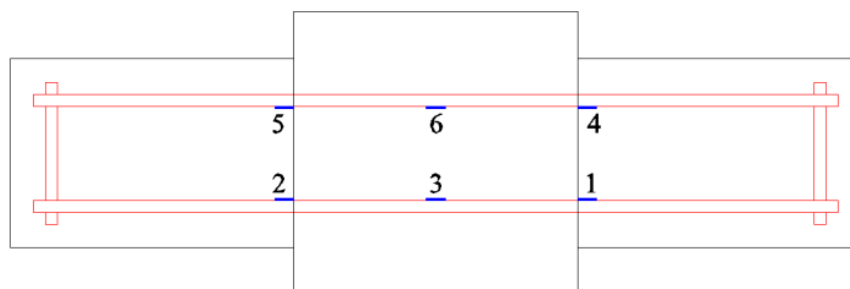
(e) Expulsão do cobrimento da armadura de costura do consolo

4.2 FORÇA DE ESCOAMENTO DO TIRANTE E FORÇA ÚLTIMA

Todos os consolos ensaiados na presente pesquisa tiveram a relação a/d igual a 0,5, o que classifica-os como consolos curtos, segundo a NBR 9062 (ABTN, 2006).

A partir da média dos resultados dos extensômetros 1, 2, 4 e 5 (Figura 4.21) de cada modelo, determinou-se a força de escoamento do tirante ($F_{y,exp}$) e a força última ($F_{u,exp}$). A força última foi definida como aquela relativa à ruína do consolo, isto é, a máxima força registrada durante o ensaio. A força de escoamento do tirante foi influenciada pelo comportamento não simétrico dos consolos, uma vez que os tirantes não entraram em escoamento com a mesma força. Isso fez com que, a força de escoamento do tirante de um modelo ficasse inferior à da sua duplicata. Entretanto, essa diferença foi pequena, o que justifica o critério adotado.

Figura 4.21 - Numeração dos extensômetros dos tirantes.



Os resultados são apresentados na Tabela 4.1 juntamente com o resumo do modo de ruptura de cada modelo. A força indicada encontra-se dividida por dois, que é o número de consolos no modelo.

Para subsidiar a análise dos resultados dos ensaios, foi calculada a força teórica para cada modelo seguindo os modelos de cálculo recomendados pela norma NBR 9062 (ABTN, 2006), pelo PCI (PCI, 2010) e pela norma europeia EUROCODE 2 (CEN, 2004).

Tabela 4.1 – Resultados da força de escoamento do tirante e da força última dos modelos ensaiados

Modelo	f_c do consolo (MPa)	f_c do pilar (MPa)	$F_{y,exp}$ (kN)	$F_{u,exp}$ (kN)	Modo de ruptura
M1A	26,52	26,52	222,50	331,17	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida
M1B	33,95	33,95	246,00	366,86	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida
M2A	41,13	41,13	285,50	442,15	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida
M2B	42,45	42,45	285,50	431,73	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida
M3A	42,23	42,23	302,50	329,00	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida
M3B	42,23	42,23	265,50	326,18	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida
M4A	46,72	45,86	285,00	409,80	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida
M4B	46,72	39,33	249,50	405,01	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida
M5A	41,20	44,77	206,00	354,66	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida
M5B	41,20	-(1)	206,50	334,67	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida
M6	38,97	39,45	217,00	274,29	Ruptura por cisalhamento
M7A	32,50	36,53	252,50	379,63	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida
M7B	32,50	36,74	232,50	358,61	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida
M8A	32,05	47,08	243,50	379,60	Ruptura por flexão
M8B	32,05	37,08	231,50	287,64	Ruptura por flexão
M9A	20,84	26,30	-(2)	260,04	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida
M9B	20,84	28,17	-(2)	271,32	Ruptura por fendilhamento da biela comprimida

(1) Não foram moldados corpos de prova para os ensaios de caracterização do concreto endurecido do pilar.
(2) Devido à forma de execução do modelo na qual a armadura do tirante é dobrada na execução do pilar e desdobrada na confecção do consolo, o tirante não fica perfeitamente reto (Figura 4.17) fazendo com que os resultados dos extensômetros dos tirantes fossem descartados.

Na Tabela 4.2 encontram-se os resultados da força teórica do escoamento do tirante ($F_{y,teor}$) e as relações entre as forças teóricas de cada norma aqui aplicada e a força experimental de cada modelo. Fez-se também a média das relações entre Força Teórica e Força Experimental dos modelos monolíticos e dos modelos moldados em duas etapas.

Apesar dos modelos M6 e M8 terem rompido por corte direto e flexão, respectivamente, as forças de escoamento do tirante teóricas, oriundas do modelo de biela e tirante serão aplicadas.

Tabela 4.2 – Força última teórica

Modelo	$F_{y,teor}$ (kN)			$\frac{F_{y,teor}}{F_{y,exp}}$ (NBR 9062)	$\frac{F_{y,teor}}{F_{y,exp}}$ (PCI)	$\frac{F_{y,teor}}{F_{y,exp}}$ EUROCODE
	NBR 9062 Eq. (2.1)	PCI Eq. (2.5)	EUROCODE 2			
M1A	196,69	228,20	137,20	0,88	1,03	0,62
M1B	196,69	228,20	138,73	0,80	0,93	0,56
M2A	196,69	228,20	139,71	0,69	0,80	0,49
M2B	196,69	228,20	139,85	0,69	0,80	0,49
M3A	196,69	228,20	139,83	0,65	0,75	0,46
M3B	196,69	228,20	139,83	0,74	0,86	0,53
Média				0,74	0,86	0,52
M4A	188,94	219,20	134,87	0,66	0,77	0,47
M4B	188,94	219,20	134,23	0,76	0,88	0,54
M5A	188,94	219,20	134,78	0,92	1,06	0,65
M5B	188,94	-(1)	-(1)	0,91	-	-
M6	188,94	219,20	134,24	0,87	1,01	0,62
M7A	188,94	219,20	133,89	0,75	0,87	0,53
M7B	188,94	219,20	133,91	0,81	0,94	0,58
M8A	188,94	219,20	134,97	0,78	0,90	0,55
M8B	188,94	219,20	133,96	0,82	0,95	0,58
Média				0,81	0,82	0,50
(1) Como não foram moldados corpos de prova para os ensaios de caracterização do concreto endurecido do pilar, não foi possível encontrar a resistência última teórica, por esta depender da verificação de tensões nos nós da treliça internos ao pilar.						

Os modelos de bielas e tirantes recomendados pelo PCI (PCI, 2010) e pela norma europeia EUROCODE 2 (CEN, 2004) são definidos pelo equilíbrio da treliça, sendo verificadas as tensões nos nós e nas bielas de compressão para a obtenção da armadura necessária nos tirantes. Ou seja, a força última, correspondente à ruptura do concreto nesses modelos é sempre igual ou menor que a força de escoamento do tirante.

Na Tabela 4.3 encontram-se os resultados da força última teórica ($F_{u,teor}$) de cada modelo, definida pela força que provocaria o esmagamento do concreto da biela comprimida, adotando os limites de tensão de compressão na biela inclinada, descrito na NBR 9062 (ABTN, 2006). Foi ainda calculado a força última, $F_{u,LM}$, adotando a largura da biela recomendada por Leonhardt e Monning (1978), $0,2d$. A largura da biela comprimida dos modelos M1 a M8, calculada de acordo com o critério da NBR 9062 (ABTN, 2006), é de 6,07 cm e do modelo

M9 é de 5,53 cm. Adotando o critério de Leonhardt e Monning (1978) a largura da biela comprimida dos modelos M1 a M8 é de 7,25 cm e do modelo M9 é de 7,18 cm.

Tabela 4.3 – Força última teórica.

Modelo	$F_{u,teor}$ (kN)	$\frac{F_{u,teor}}{F_{u,exp}}$	$F_{u,LM}$ (kN)	$\frac{F_{u,LM}}{F_{u,exp}}$
	NBR 9062		Leonhardt e Monning	
M1A	260,93	0,79	311,40	0,94
M1B	334,04	0,91	398,64	1,09
M2A	404,68	0,92	482,95	1,09
M2B	417,67	0,97	498,45	1,15
M3A	415,51	1,26	495,86	1,51
M3B	415,51	1,27	495,86	1,52
M4A	459,69	1,12	548,59	1,34
M4B	459,69	1,13	548,59	1,35
M5A	405,37	1,14	483,77	1,36
M5B	405,37	1,21	483,77	1,45
M6	383,43	1,40	457,59	1,67
M7A	319,77	0,84	381,61	1,01
M7B	319,77	0,89	381,61	1,06
M8A	315,35	0,83	376,33	0,99
M8B	315,35	1,10	376,33	1,31
M9A	187,62	0,72	243,49	0,94
M9B	187,62	0,69	243,49	0,90

4.2.1 Modelos Monolíticos

Os modelos monolíticos M1A e M1B, de referência, apresentaram valores experimentais superiores aos valores teóricos do modelo de biela e tirante proposto na norma NBR 9062 (ABNT, 2006). A força de escoamento do tirante ficou entre 13% e 25% maior e a força última ficou entre 35% e 55% maior. O modelo de biela e tirante do PCI (PCI, 2010) apresentou uma força de escoamento do tirante teórica mais próxima dos resultados experimentais, sendo que estes ficaram entre 3% abaixo e 8% acima do valor teórico.

Comparando os modelos M1 e M2, observou-se um aumento da força de escoamento do tirante, entre 16% e 28%, do modelo M2 (reforçado com 1% de fibras) em relação ao modelo M1 (sem fibras). Já a comparação direta da força última entre os modelos ficou prejudicada tendo em vista que a resistência à compressão do concreto do modelo M1 foi inferior à resistência do concreto do modelo M2.

Comparando o modelo M2 com a força de escoamento do tirante teórica avaliada pela norma NBR 9062, observa-se que a força de escoamento do tirante experimental foi cerca de 45% maior que a teórica. Já a força última do modelo M2 ficou entre 27% e 34% maior que a força última teórica avaliada pela norma NBR 9062. Este resultado mostraria uma redução da força última do modelo M2 se comparado ao modelo M1, que apresentou resistência até 55% maior que o valor teórico. Isso se deve, provavelmente, à mudança de inclinação da biela comprimida e à redução da largura da biela no modelo M2, como visto no item 4.1.

Para o modelo M2, o modelo de biela e tirante do PCI (PCI, 2010) também foi o que apresentou uma força de escoamento do tirante teórica mais próxima dos resultados experimentais, porém, estes ainda foram cerca de 25% maiores que os valores teóricos.

Do ensaio, observou-se que o modelo M3B não rompeu igualmente dos dois lados, isto é, a deformação no tirante apresentou-se diferente nos dois consolos desse modelo. Isso pode ter influenciado no fato da força de escoamento do tirante desse modelo ser 14% menor que a do modelo M3A. Ainda assim, esse modelo apresentou uma força experimental 35% maior que a força teórica prevista pela NBR 9062, enquanto o modelo M3A apresentou uma força experimental 54% maior que a força teórica prevista pela NBR 9062.

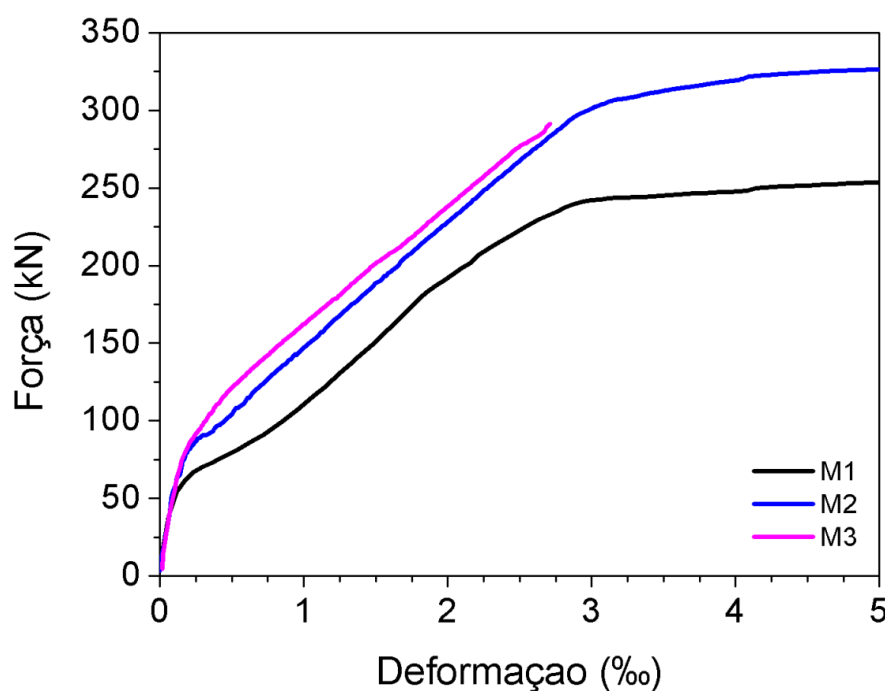
Novamente, o modelo de biela e tirante do PCI (PCI, 2010) foi o que apresentou uma força de escoamento do tirante teórica mais próxima dos resultados experimentais do modelo M3, sendo entre 16% e 33% maiores que os valores teóricos.

Comparando os valores médios de força de escoamento do tirante dos modelos monolíticos M2 e M3, observou-se que a ausência da armadura de costura nos modelos M3A e M3B, reforçados com 1% de fibras, teve pouca influência na força de escoamento do tirante do consolo, que foi entre 6% maior e 7% menor que a força de escoamento do tirante do modelo M2 com armadura de costura. Com relação à força última, entretanto, notou-se uma redução de cerca de 24% do modelo M3 para o modelo M2 devido à ausência da armadura de costura, o que mostra que a armadura de costura foi mais eficiente que as fibras de aço no confinamento da biela comprimida do consolo. Isso pôde ser notado no item anterior, que mostrou uma tendência de maior tensão de compressão na biela do modelo M3 sem a armadura de costura. Nesse caso, a comparação direta entre os modelos M2 e M3 é possível, já que a resistência à compressão do concreto de ambos os modelos foi praticamente igual.

Apesar da redução da força última no modelo M3, sem armadura de costura, este ainda apresentou uma força experimental cerca de 3% maior que a força teórica avaliada pela norma NBR 9062. Isso sugere que as fibras ainda podem ser uma boa opção para a substituição da armadura de costura do consolo, desde que a resistência da biela comprimida seja calculada sem levar em conta a presença das fibras, isto é, considerando apenas a resistência à compressão do concreto, que é pouco afetada pela presença das fibras.

A Figura 4.22 ilustra o gráfico de Força *versus* Deformação média da armadura do tirante dos modelos monolíticos M1, M2 e M3. Observa-se desse gráfico o nítido aumento da força relativa ao escoamento da armadura do tirante devido à adição das fibras de aço. Entretanto, nota-se pouca influência das fibras na rigidez e na força relativa à formação da primeira fissura, momento em que há uma mudança da inclinação do trecho inicial da curva.

Figura 4.22 – Gráfico de Força *versus* Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M2 e M3.



4.2.2 Modelos moldados em duas etapas

Dentre os modelos moldados em duas etapas, têm-se os modelos M4 e M7 com a presença da armadura de costura. O modelo M4B não apresentou comportamento simétrico entre os dois consolos, o que influenciou no fato da sua força de escoamento do tirante ser 12% menor que a do modelo M4A. Ainda assim, esse modelo apresentou uma força experimental 32% maior que a força teórica avaliada pela norma NBR 9062. Já o modelo M4A apresentou uma força

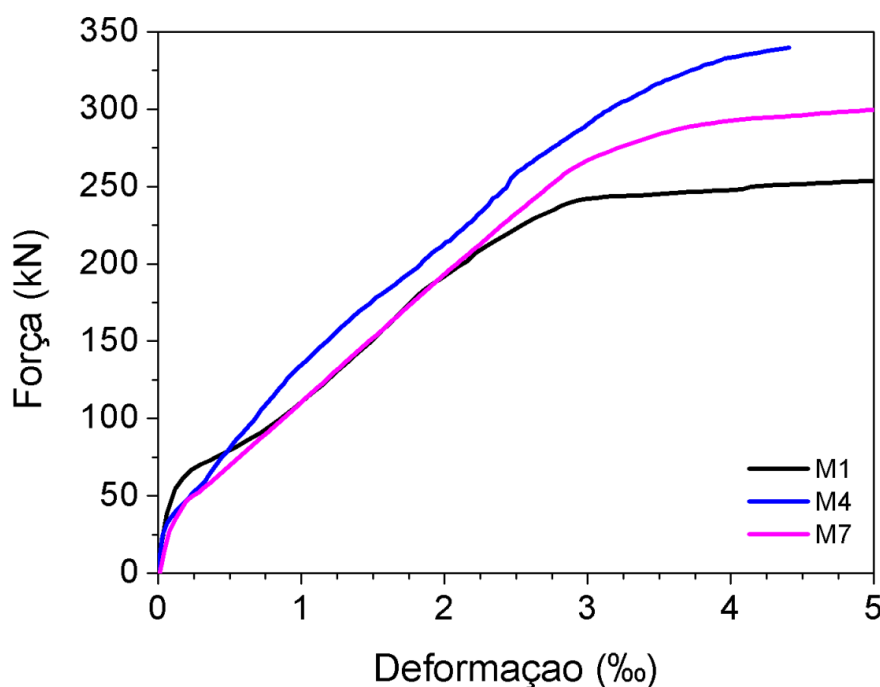
experimental 51% maior que a força teórica avaliada pela norma NBR 9062. Os modelos M7A e M7B, com a interface consolo-pilar naturalmente rugosa, apresentaram, respectivamente, força experimental 34% e 23% maiores que a força teórica avaliada pela norma NBR 9062. O modelo de biela e tirante do PCI (PCI, 2010) foi o que apresentou uma força de escoamento do tirante teórica mais próxima dos resultados experimentais, sendo que a diferença observada entre os resultados experimentais e os resultados teóricos variou de 14% a 30% para o modelo M4 e de 6% a 15% para o modelo M7.

Comparando a força média de escoamento do tirante dos modelos M1 e M4, observa-se que a força experimental do modelo M4 foi 14% maior que a do modelo de referência, monolítico. Essa diferença é pequena para se concluir que o modelo M4, moldado em duas etapas, apresentou maior resistência, porém pode-se concluir que o fato do modelo ser moldado em duas etapas, com armadura de costura atravessando a interface, não reduziu a sua resistência quando comparado ao modelo monolítico.

O modelo M7 apresentou uma força de escoamento do tirante média 3% maior que a força média do modelo de referência, monolítico. Com relação à força última média, a do modelo M7 foi 6% maior que a força última média do modelo M1. Neste caso, essa comparação é válida, uma vez que a resistência à compressão do concreto em ambos os modelos foi semelhante, bem como a forma de ruína observada ao final do ensaio. Esse resultado mostra que o modelo M7, apesar de moldado em duas etapas, também apresentou comportamento estrutural semelhante ao modelo M1, monolítico.

A Figura 4.23 ilustra o gráfico de Força *versus* Deformação média do tirante dos modelos M1, M4 e M7. Observa-se desse gráfico um leve aumento da força relativa ao escoamento da armadura do tirante para o modelo M4 com chave de cisalhamento na interface, o que poderia sugerir que parte do carregamento no consolo foi transferida diretamente ao pilar por meio das chaves de cisalhamento.

Figura 4.23 - Gráfico de Força versus Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M4 e M7.



4.2.2.1 Influência da armadura de costura e das fibras

Dentre os modelos moldados em duas etapas, têm-se os modelos M5, M6 e M8 que não possuíam armadura de costura. Desses, nos modelos M6 e M8 foram adicionadas 1% de fibras de aço ao concreto do consolo. Além disso, o modelo M8 possuía, também, fibras atravessando a interface.

Analisando a força de escoamento do tirante desses três modelos, nota-se que não houve grandes diferenças entre os valores obtidos no ensaio, com uma diferença máxima de 18% entre as forças médias dos modelos M8 e M5. Comparando ao modelo de referência M1, monolítico, também se observa pequena diferença entre os resultados, com uma variação entre 16% a menos e 9% a mais com relação à força de escoamento do tirante do modelo M1. Dessa comparação, pode-se concluir que a retirada da armadura de costura nos modelos moldados em duas etapas teve pouca influência na força de escoamento do tirante quando comparada ao consolo monolítico.

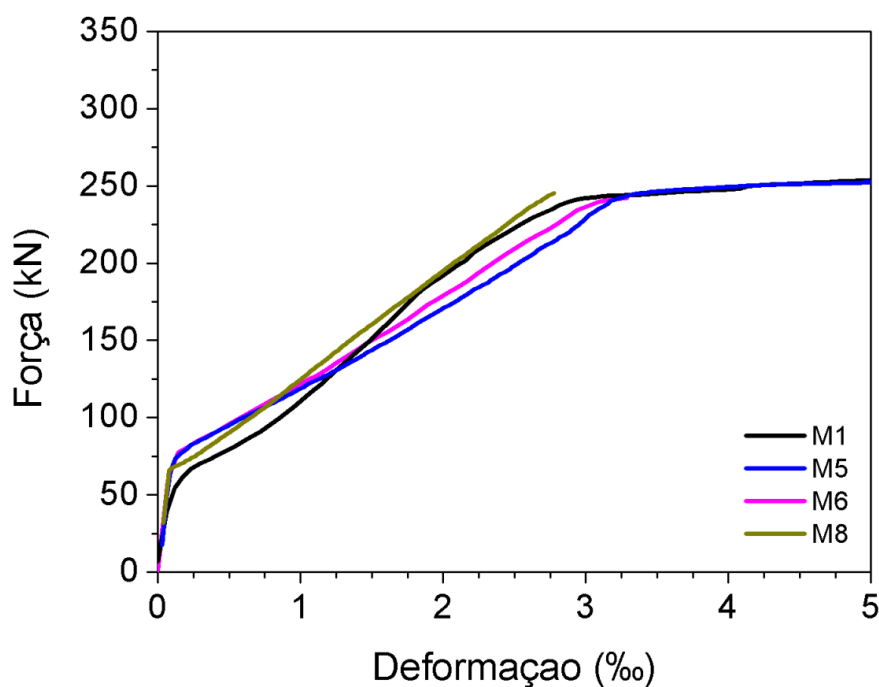
Analisando a força última desses três consolos, é possível fazer uma comparação direta de resultados apenas entre os modelos M1 e M8, que possuíam concretos com resistência à compressão semelhantes. Neste caso, nota-se que a diferença entre as forças médias desses consolos foi de apenas 21%. Entretanto, eles apresentaram forma de ruptura bastante distinta,

sendo que o modelo M1 rompeu por esmagamento da biela de compressão e o modelo M8 rompeu por flexão. Isso sugere que, do ponto de vista de resistência, o modelo M8, com fibras e sem armadura de costura, é equivalente ao modelo de referência M1, monolítico.

Ao se comparar os modelos M5 e M6, que possuíam concretos com resistência à compressão semelhantes, observa-se que as fibras não influenciaram a força última alcançada pelo consolo. Entretanto, elas influenciaram a forma de ruptura, que passou de ruptura brusca da biela de compressão no modelo M5, sem fibras, para uma ruptura mais dúctil no modelo M6, com fibras. Nesse caso, não houve fissuração do consolo no modelo M6, e a ruína se deu pela ruptura do tirante, o que definiu a força última desse modelo. Dessa forma, pode-se concluir que, de fato, a adição de fibras aumentou a resistência das bielas de compressão no consolo, entretanto a ruína passou a ser controlada por outros mecanismos, o que reduziu a sua influência na resistência final do consolo.

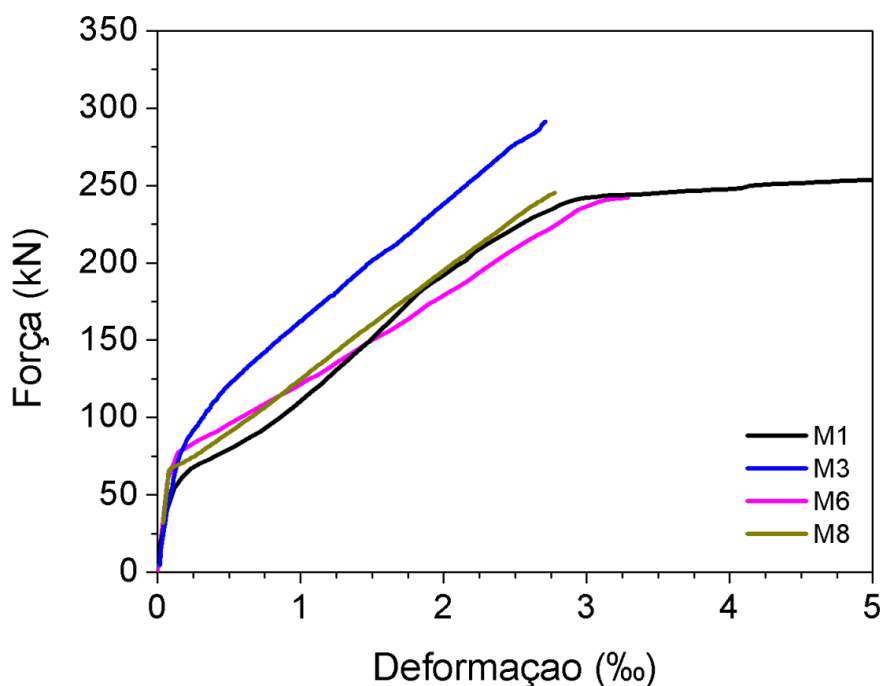
A Figura 4.24 ilustra o gráfico de Força *versus* Deformação média dos tirantes nos modelos M1, M5, M6 e M8. Nota-se que as curvas são quase todas coincidentes, o que reforça a conclusão de que os modelos sem armadura de costura se comportaram de forma semelhante ao modelo monolítico até o momento de escoamento do tirante.

Figura 4.24 - Gráfico de Força *versus* Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M5, M6 e M8.



Pode-se, também, comparar os modelos M6 e M8 ao modelo M3 para identificar a influência das fibras. Neste caso, o modelo M3 era monolítico, porém sem armadura de costura e reforçado com fibras. Conclui-se que, do ponto de vista de força de escoamento do tirante, as fibras foram mais eficientes no modelo monolítico que nos modelos em duas etapas, sendo que a força média dos modelos em duas etapas foi de 16% a 24% inferior à força do modelo M3. Isso ocorreu mesmo no modelo M8, que possuía fibras atravessando a interface, o que mostra que esse procedimento ainda não foi suficiente para superar a contribuição das fibras dispersas no concreto monolítico. Tal conclusão pode ser visualizada na Figura 4.25 que ilustra o gráfico de Força *versus* Deformação média do tirante nos modelos M1, M3, M6 e M8.

Figura 4.25 - Gráfico de Força *versus* Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M3, M6 e M8.



Por outro lado, do ponto de vista de força última, não houve diferença significativa entre os modelos M3, M6 e M8. Apesar disso, a forma de ruptura foi distinta, havendo a ruptura da biela no modelo monolítico, enquanto nos modelos em duas etapas não houve fissuração do consolo, sendo a ruína controlada por outros mecanismos, em especial pelo arrancamento e/ou ruptura do tirante devido ao elevado giro do consolo.

Quando se comparam os modelos M5, M6 e M8 com as forças teóricas previstas pela norma NBR 9062, nota-se que todos eles apresentaram força de escoamento do tirante maior que a prevista por essa norma (os valores variaram de 9% a 26% maiores). A melhor aproximação

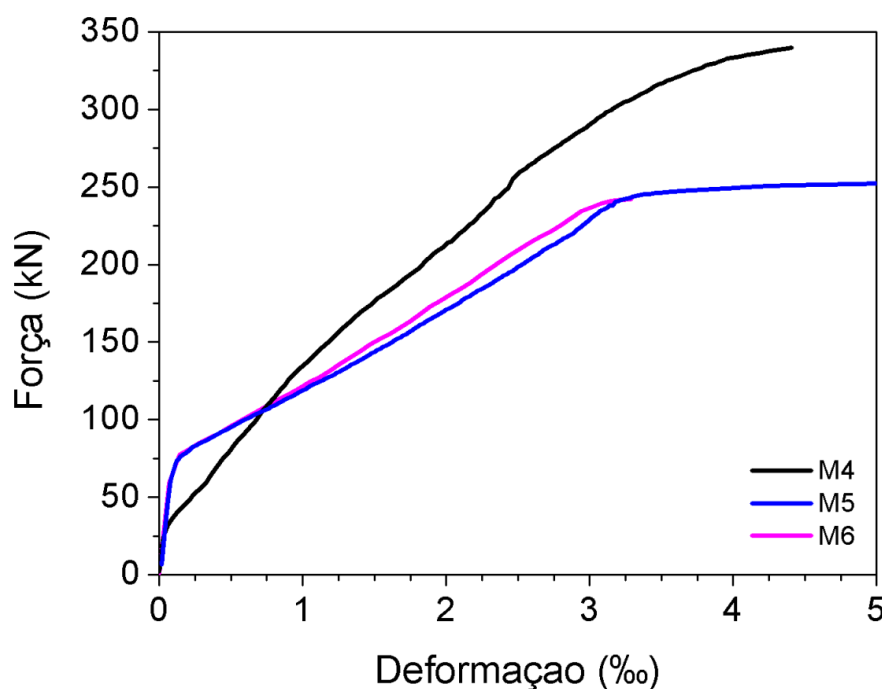
com as estimativas teóricas se deu com o modelo proposto pelo PCI (PCI, 2010), onde os valores experimentais foram de 6% menores a 8% maiores que os previstos por essa norma.

Do ponto de vista de força última, a comparação dos valores experimentais com o previsto pela norma NBR 9062 não é válida para os modelos M6 e M8, já que a ruptura desses modelos não se deu na biela comprimida. Para o modelo M5, que rompeu na biela, a força última experimental foi apenas 7% maior que a prevista por essa norma. Isso sugere que, mesmo no consolo moldado em duas etapas, desde que não haja a ruptura prematura do tirante, forma-se um modelo de biela e tirante semelhante ao previsto na norma NBR 9062.

4.2.2.2 Influência do tratamento da interface

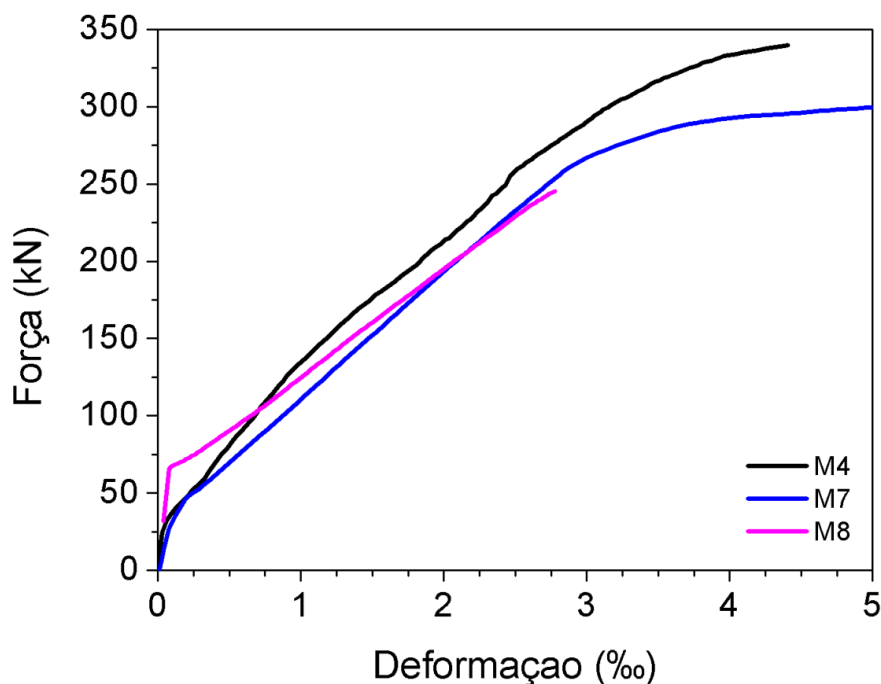
Outra variável analisada foi o tratamento da interface nos modelos moldados em duas etapas. De certa forma, essa variável, já foi analisada nos itens anteriores, portanto aqui será feita uma análise mais resumida dessa variável tomando como base apenas a força última resistida pelo consolo.

Ao se comparar os modelos M4, M5 e M6, todos com chave de cisalhamento, pode-se identificar a influência da aplicação da resina epóxi na superfície do pilar antes da concretagem do consolo. Em média, a força de escoamento do tirante do modelo M4, sem aplicação da resina epóxi, foi 27% maior que a média da força dos modelos M5 e M6, com aplicação da resina epóxi. Isso poderia sugerir que a aplicação da resina epóxi reduziu a resistência do consolo moldado em duas etapas. Entretanto, o modelo M4 possuía armadura de costura e os modelos M5 e M6 não, o que pode ter mais influência que a aplicação da resina epóxi. A Figura 4.26 ilustra o gráfico de Força *versus* Deformação média do tirante nos modelos M4, M5 e M6.

Figura 4.26 - Gráfico de Força *versus* Deformação média na armadura do tirante para os modelos M4, M5 e M6.

Ao se comparar os modelos M4 e M7, ambos com armadura de costura, conclui-se que, em média, a força de escoamento do tirante do modelo M4, com chave de cisalhamento, foi apenas 10% maior que a força do modelo M7, com superfície naturalmente rugosa. Essa pequena diferença sugere que a alteração do tipo de acabamento da interface consolo-pilar teve pouca influência, com uma tendência de maior resistência no caso do emprego de chave de cisalhamento na interface.

A mesma conclusão pode ser obtida quando se comparam os modelos M4 e M8. Nesse caso, a força média de escoamento do tirante do modelo M4, com chave de cisalhamento, foi apenas 13% maior que a força do modelo M8, com superfície rugosa e fibras atravessando a interface. Novamente, percebe-se pequena influência do tratamento da interface, com tendência de maior resistência para o tratamento com chaves de cisalhamento. A Figura 4.27 ilustra o gráfico de Força *versus* Deformação média do tirante nos modelos M4, M7 e M8.

Figura 4.27 - Gráfico de Força *versus* Deformação média na armadura do tirante para os modelos M4, M7 e M8.

4.2.2.3 Influência do dobramento do tirante

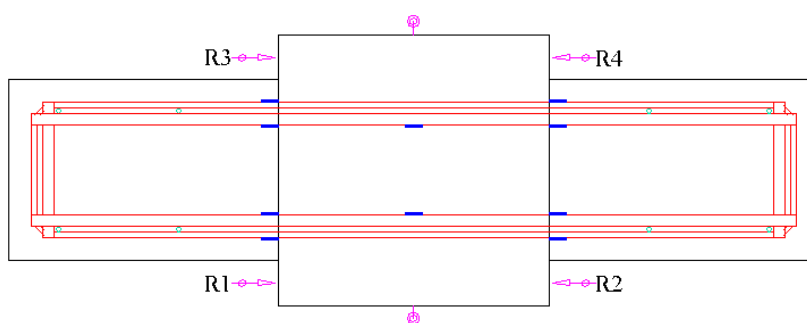
O modelo M9 foi executado em duas etapas, porém com a armadura do tirante e a armadura de costura dobradas dentro do pilar. Para isso, foi empregado o aço CA-25. Depois de concretado o pilar, o tirante foi desdobrado e foi executado o consolo. Esse método de execução prejudicou a leitura dos extensômetros já que a armadura do tirante não ficou reta após ser desdobrada (Figura 4.17) e tenderia a ficar retilínea quando solicitada.

Ao se comparar os resultados obtidos do modelo M9 com os avaliados pela NBR 9062, conclui-se que a força última foi entre 52% e 59% maior que a prevista por essa norma para a ruptura da biela de compressão.

4.3 ABERTURA DA JUNTA ENTRE O CONSOLO E O PILAR

Para cada modelo ensaiado foi traçada a curva média de abertura da junta entre o consolo e o pilar a partir da leitura dos 4 transdutores de deslocamentos, R1 a R4, fixados nos modelos, como mostrado na Figura 4.28.

Figura 4.28 - Numeração dos transdutores de deslocamentos horizontais.



Na Tabela 4.4 são apresentados os valores médios da abertura da junta entre o consolo e o pilar para a força de escoamento do tirante ($\delta_{h,y}$), e para a força de serviço ($\delta_{h, serv}$). Além disso, é apresentada a abertura média da junta de cada modelo para a força de serviço do modelo M1 ($\delta_{h, serv, M1}$), de referência. Considerou-se neste trabalho como força de serviço aquela equivalente à metade da força de escoamento do tirante (F_y) alcançada pelo modelo.

Tabela 4.4 – Abertura da junta nos modelos ensaiados.

Modelo	F_y (kN)	$\delta_{h, serv, M1}$ (mm)	$\delta_{h, serv}$ (mm)	$\delta_{h, y}$ (mm)
M1A	222,50	0,26	0,26	0,77
M1B	246,00	0,21	0,21	0,83
M2A	285,50	0,11	0,18	0,57
M2B	285,50	0,07	0,12	0,57
M3A	302,50	0,07	0,11	0,36
M3B	265,50	0,07	0,11	0,85
M4A	285,00	0,23	0,30	0,77
M4B	249,50	0,24	0,26	0,66
M5A	206,00	0,28	0,22	0,72
M5B	206,50	0,31	0,23	1,14
M6A	217,00	0,32	0,26	0,98
M7A	252,50	0,33	0,36	0,87
M7B	232,50	0,35	0,35	0,89
M8A	243,50	0,35	0,38	1,21
M8B	231,50	0,36	0,35	1,16
M9A	-(1)	0,44	-(1)	-(1)
M9B	-(1)	0,50	-(1)	-(1)

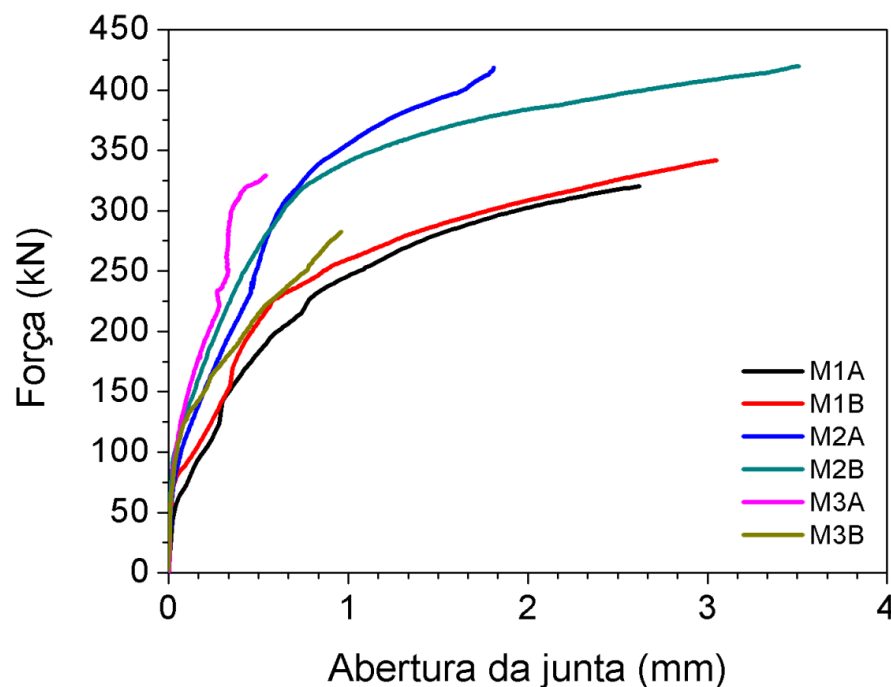
(1) Não foi definida uma força de escoamento do tirante para esse modelo.

A Figura 4.29 e a Figura A.7 do Apêndice A apresentam o gráfico de Força *versus* Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para os modelos monolíticos M1, M2 e M3. Vale ressaltar que, nos modelos monolíticos, não há uma junta definida. Logo, nesse caso, trata-se da medida do alongamento do tirante. Entretanto, como visto no item 4.1, na maioria das vezes surgiu apenas uma única fissura nesse trecho, de modo que essa abertura pode ser

entendida como a abertura da fissura na região de engastamento do consolo no pilar. Nota-se, nos gráficos, que a adição das fibras metálicas reduziu a abertura média da fissura nos consolos monolíticos. Para a força em serviço de 234 kN, a abertura média dos modelos M2 e M3, com fibras, foi 66% menor que a abertura média do modelo M1, sem fibras. Nesse caso, a abertura observada foi de até 0,11 mm para os modelos com fibras e de até 0,26 mm para os modelos sem fibras. Observa-se, ainda, que não houve influência da armadura de costura na abertura da fissura.

Caso seja tomada a abertura de fissura no momento do escoamento do tirante, ainda assim a abertura das fissuras nos modelos com fibras foi menor que nos modelos sem fibras. Nesse caso, a abertura média dos modelos M2 e M3, com fibras, foi 73% menor que a abertura média do modelo M1, sem fibras. A mesma conclusão vale se for analisada a abertura de fissuras relativa à metade da capacidade resistente de cada consolo (δ_{serv}), sendo que, nesse caso, a abertura média de fissuras nos consolos com fibras foi inferior a 0,20 mm. Esses resultados mostram a influência positiva das fibras no controle da fissuração, até mesmo próximo à capacidade resistente do consolo.

Figura 4.29 - Gráfico de Força versus Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M2 e M3.

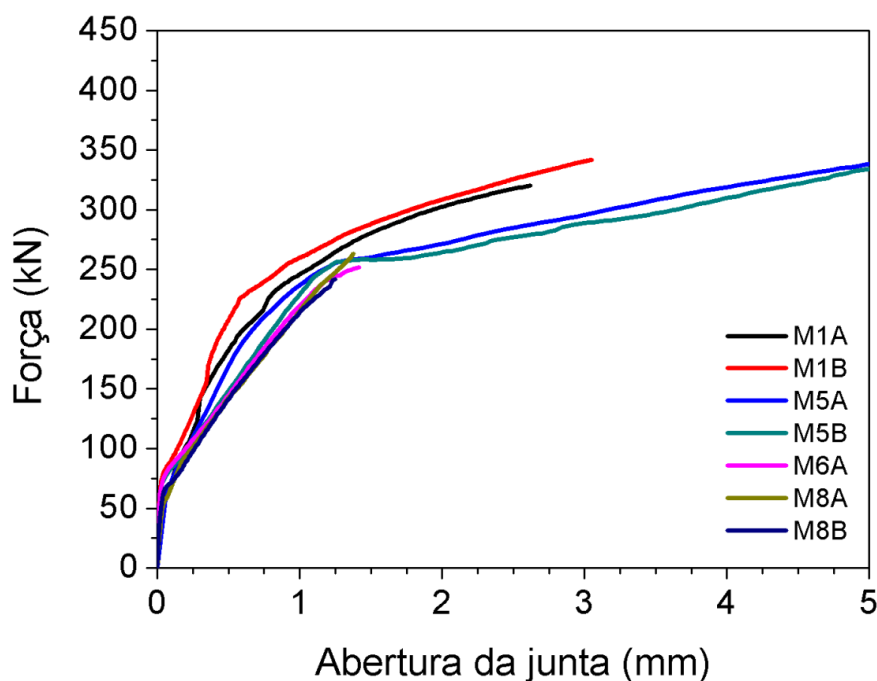


A Figura 4.30 e a Figura A.8 do Apêndice A apresentam o gráfico de Força versus Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, monolítico, e M5, M6 e M8, moldados em duas etapas e sem armadura de costura. Observa-se que os modelos moldados

em duas etapas apresentaram, praticamente, a mesma abertura de junta durante todo o carregamento. Isso mostra que não houve influência do tratamento da interface (com chave de cisalhamento ou naturalmente rugosa) na abertura da junta. Para a força em serviço de 117 kN, a abertura média dos modelos M5, M6 e M8 foi 38% maior que a abertura média do modelo M1, monolítico. Nesse caso, a abertura observada foi de até 0,36 mm para os modelos moldados em duas etapas e de até 0,26 mm para os modelos monolíticos.

Caso seja tomada a abertura da junta no momento do escoamento do tirante, a abertura média dos modelos M5, M6 e M8, moldados em duas etapas, foi 31% maior que a abertura média do modelo M1, monolítico. Nesse caso, os modelos moldados em duas etapas apresentaram abertura de junta de até 1,21 mm.

Figura 4.30 - Gráfico de Força *versus* Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M5, M6 e M8.

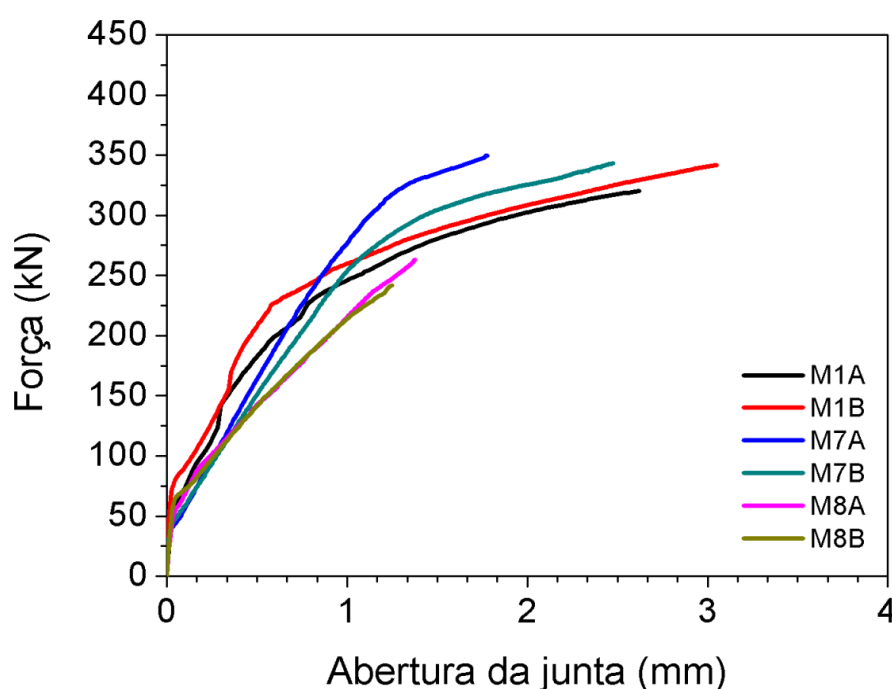


A Figura 4.31 e a Figura A.9 do Apêndice A apresentam o gráfico de Força *versus* Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para o modelo M1, monolítico, e os modelos M7 e M8, moldados em duas etapas. Observa-se que os modelos moldados em duas etapas apresentaram, depois do início da solicitação do tirante, abertura de junta maior que a do modelo monolítico. Porém, o modelo M7 apresentou, para níveis de força mais elevados, abertura de junta menor que a do modelo M8, sem armadura de costura. Isso mostra que a armadura de costura foi mais eficiente que as fibras atravessando a interface no modelo M8

para limitar a abertura da junta. Isso ocorre porque no modelo M8 a junta se formou na face do pilar, portanto, depois do término da ancoragem das fibras no concreto do consolo.

Para a força em serviço de 117 kN, as aberturas médias dos modelos M7 e M8 foram muito próximas e 48% maiores que a abertura média do modelo M1, monolítico. Caso seja tomada a abertura da junta no momento do escoamento do tirante, a abertura média do modelo M7, com armadura de costura, foi apenas 10% maior que a abertura média do modelo M1, monolítico. Nesse caso, a abertura média da junta no modelo M7 atingiu até 0,89 mm.

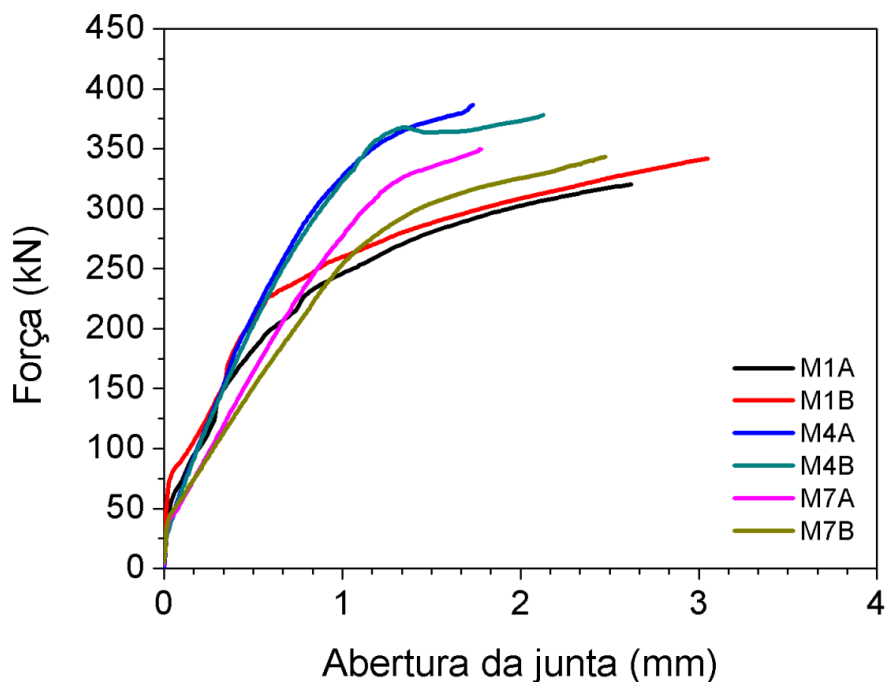
Figura 4.31 - Gráfico de Força *versus* Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M7 e M8.



A Figura 4.32 e a Figura A.10 do Apêndice A apresentam o gráfico de Força *versus* Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para o modelo M1, monolítico, e os modelos M4 e M7, moldados em duas etapas e com armadura de costura. Observa-se que o modelo M4, com chave de cisalhamento na interface, apresentou menor abertura de junta que o modelo M7, com interface naturalmente rugosa. Além disso, a abertura de junta do modelo M4 praticamente foi igual à abertura de junta registrada no modelo M1, monolítico, durante todo o carregamento. Isso mostra que a associação da armadura de costura com chaves de cisalhamento na interface dos modelos moldados em duas etapas foi suficiente para simular a abertura da junta observada no modelo monolítico, sem fibras.

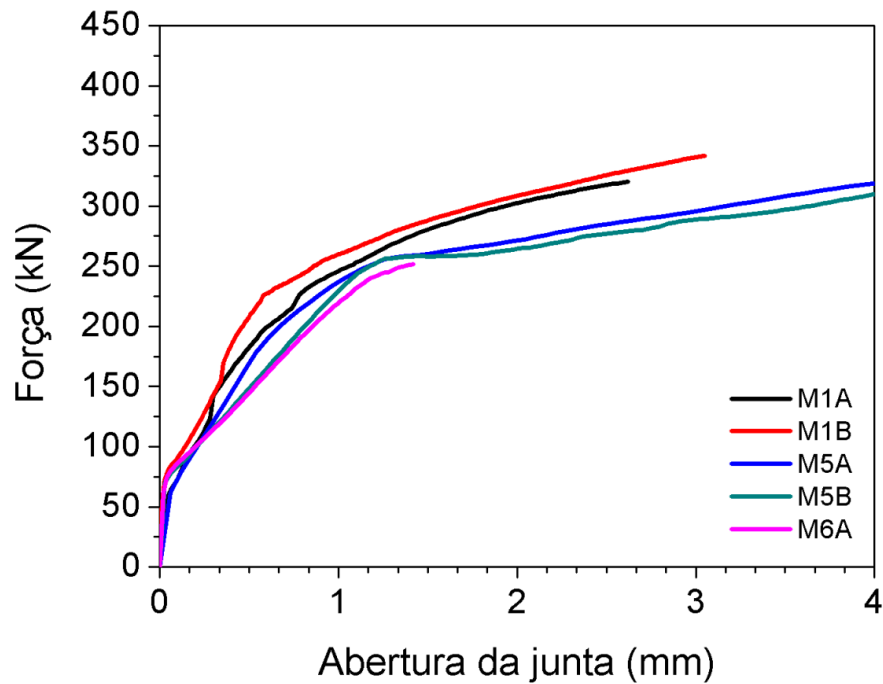
Para a força em serviço de 117 kN, a abertura média do modelo M4 (de 0,24 mm) foi igual à abertura média do modelo M1, monolítico (de 0,24 mm). Caso seja tomada a abertura da junta no momento do escoamento do tirante, a abertura média do modelo M4 (de 0,72 mm) também foi 11% inferior à abertura média do modelo M1 (de 0,80 mm).

Figura 4.32 - Gráfico de Força *versus* Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M4 e M7.



A Figura 4.33 e a Figura A.11 do Apêndice A apresentam o gráfico de Força *versus* Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para o modelo M1, monolítico, e os modelos M5 e M6, moldados em duas etapas. Observa-se que os modelos moldados em duas etapas apresentaram, praticamente, a mesma abertura de junta durante todo o carregamento. Isso mostra que não houve influência na abertura da junta da adição de fibras de aço ao concreto do consolo, já que, nesse caso, as fibras não cruzavam a junta formada entre o consolo e o pilar.

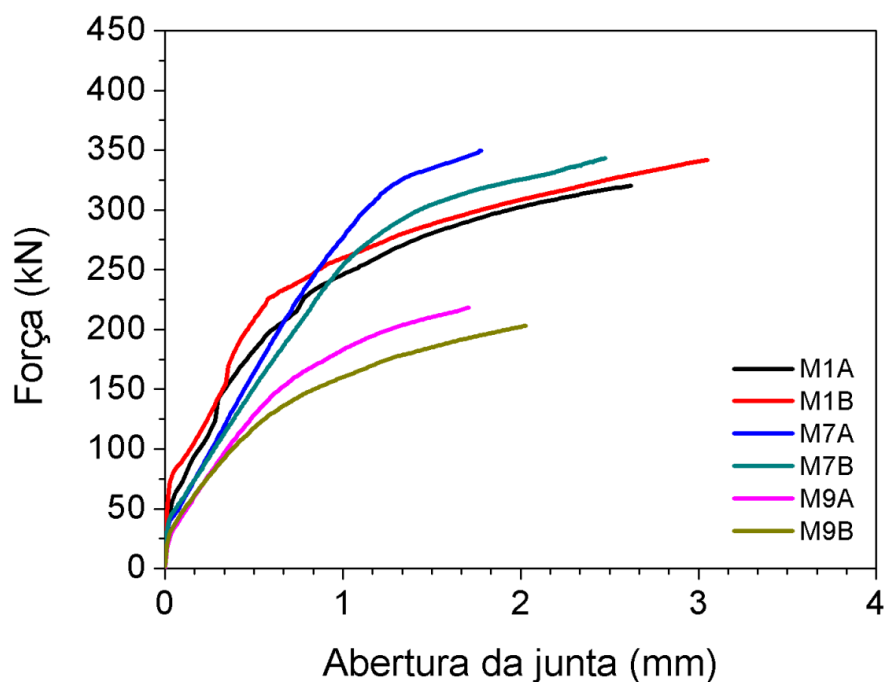
Figura 4.33 - Gráfico de Força versus Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M5 e M6.



A Figura 4.34 e a Figura A.12 do Apêndice A apresentam o gráfico de Força versus Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para o modelo M1, monolítico, e os modelos M7 e M9, moldados em duas etapas e com interface naturalmente rugosa. Observa-se que o modelo M9 iniciou a abertura de junta para um carregamento inferior ao do modelo M7 e apresentou maior abertura na junta durante todo o carregamento.

Para a força em serviço de 117 kN, a abertura média do modelo M9 (de 0,47 mm) foi 38% maior que a abertura média do modelo M7 (de 0,34 mm) e 100% maior que a abertura média do modelo M1, monolítico (de 0,24 mm). Entre todos os modelos, o modelo M9 foi o que apresentou a maior abertura de junta.

Figura 4.34 - Gráfico de Força versus Abertura média da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M7 e M9.



4.4 DEFORMAÇÃO DA ARMADURA DE COSTURA

Foi registrada a deformação da armadura de costura durante o ensaio. Os extensômetros 7 a 10 estavam fixados na armadura de costura 1, mais próxima do tirante. Já os extensômetros 11 a 14 estavam fixados na armadura de costura 2, que era a segunda camada de armadura de costura, como mostrado na Figura 4.35. Para cada camada de armadura fez-se a média dos resultados dos quatro extensômetros presentes na camada.

Na Tabela 4.5 são apresentadas as forças de escoamento das armaduras de costura, sendo $F_{y,cost1}$ a força média referente ao escoamento da armadura de costura 1 (resultado dos extensômetros 7, 8, 9 e 10) e $F_{y,cost2}$ a força média referente ao escoamento da armadura de costura 2 (resultado dos extensômetros 11, 12, 13 e 14).

Figura 4.35 – Numeração dos extensômetros das armaduras de costura.

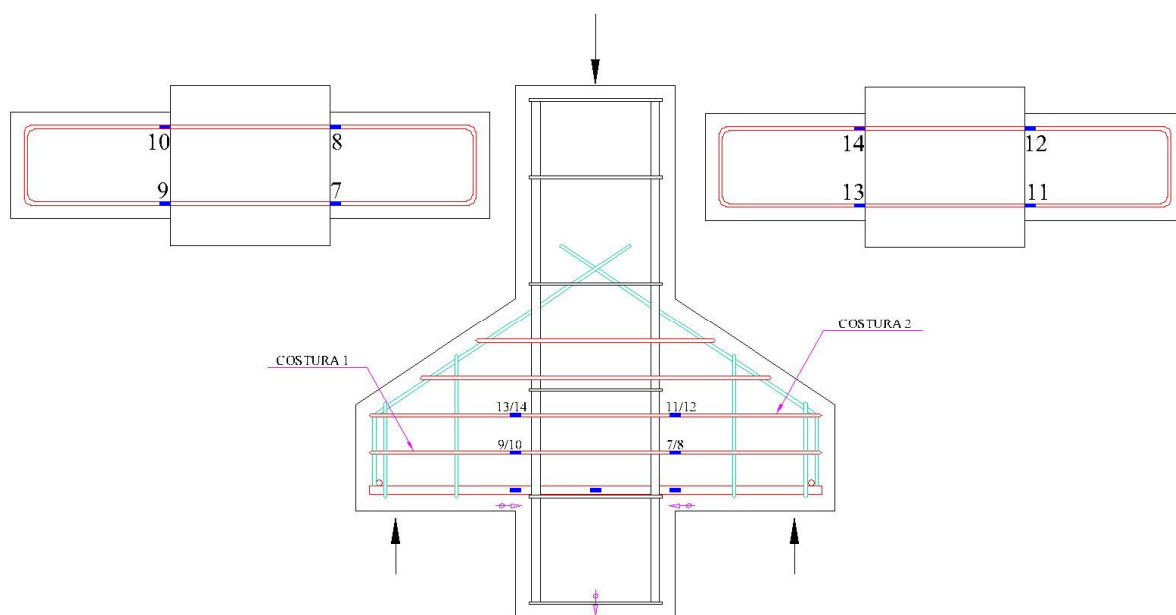
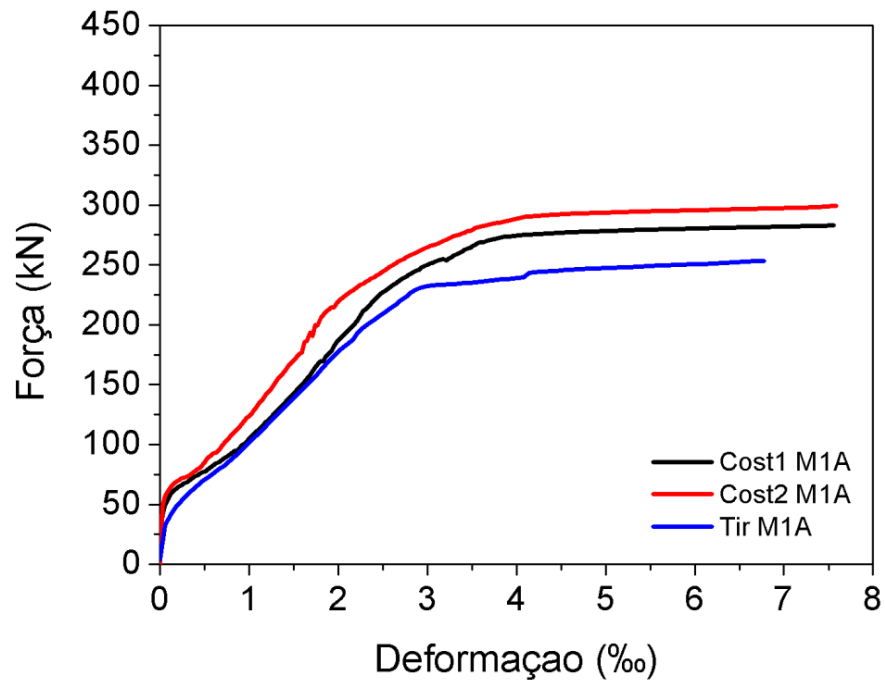


Tabela 4.5 – Força de escoamento das armaduras de costura.

Modelo	F_y (kN)	$F_{y\ cost1}$ (kN)	$F_{y\ cost2}$ (kN)
M1A	222,50	242,50	258,00
M1B	246,00	253,00	262,00
M2A	285,50	294,00	341,00
M2B	285,50	285,50	344,00
M4A	285,00	179,00	340,50
M4B	249,50	284,50	232,00
M7A	252,50	179,00	262,50
M7B	232,50	218,50	274,00

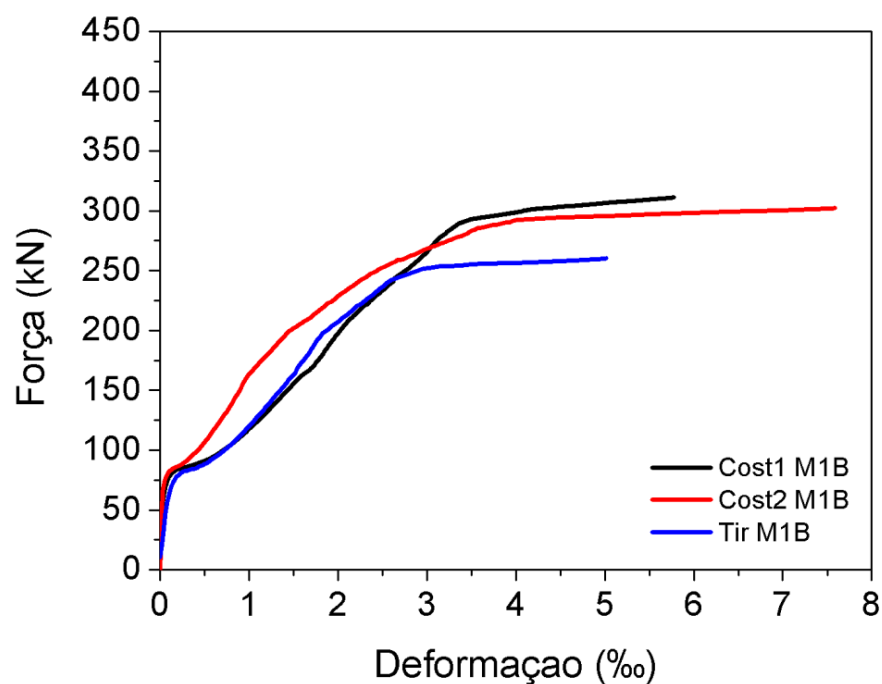
No modelo monolítico M1A, a armadura de costura 1 e a armadura de costura 2 atingiram o escoamento do aço depois de atingida a força de escoamento do tirante desse modelo, como ilustrado na Figura 4.36. Nessa figura é mostrada, também, a deformação do tirante obtida da média de deformação dos dois consolos do modelo. A armadura de costura 1 escoou com uma força cerca de 8% maior e a armadura de costura 2, com uma força cerca de 16% maior que a força de escoamento do tirante do modelo.

Figura 4.36 - Gráfico de Força versus Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M1A.



O mesmo comportamento foi observado no modelo monolítico M1B, com a armadura de costura 1 e a armadura de costura 2 escoando depois de atingida a força de escoamento do tirante do modelo, como ilustrado na Figura 4.37. Nesse caso, a armadura de costura 1, com uma força cerca de 3% maior e a armadura de costura 2, com uma força cerca de 7% maior que a força de escoamento do tirante do modelo.

Figura 4.37 - Gráfico de Força versus Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M1B.



Nos modelos monolíticos M2A e M2B, com adição de fibras, a armadura de costura 1 e a armadura de costura 2 também atingiram o escoamento do aço depois de atingida a força de escoamento do tirante desse modelo, como ilustrado na Figura 4.38 e na Figura 4.39. Nesse caso, entretanto, nota-se que a armadura de costura 1, mais próxima ao tirante, apresentou menor deformação que no modelo M1 para níveis de força inferiores à força de escoamento do tirante do modelo. Isso, provavelmente, se deve à contribuição das fibras na região do tirante, o que proporcionou um aumento da força de escoamento do tirante desse modelo.

Figura 4.38 - Gráfico de Força *versus* Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M2A.

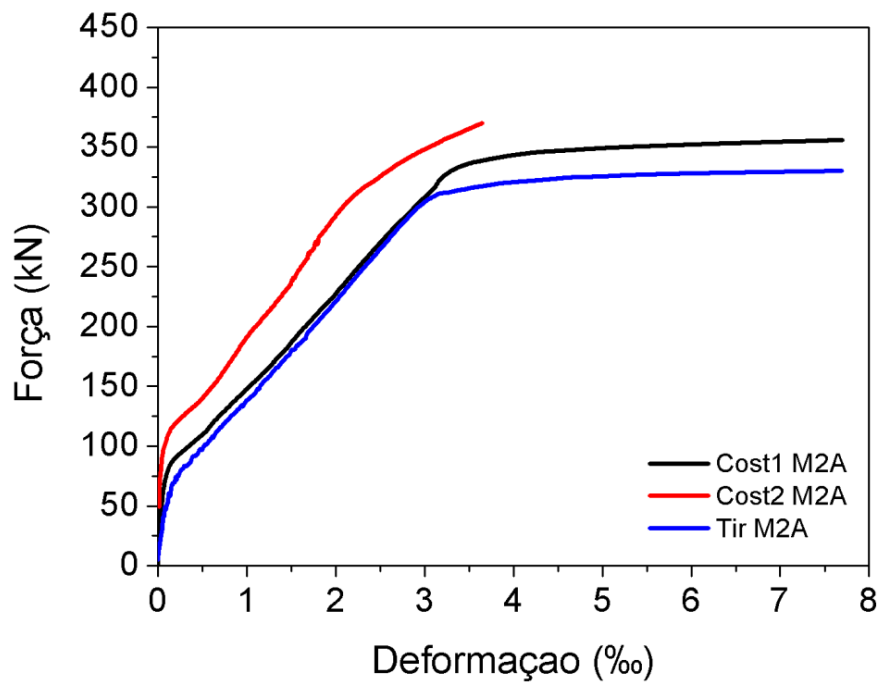
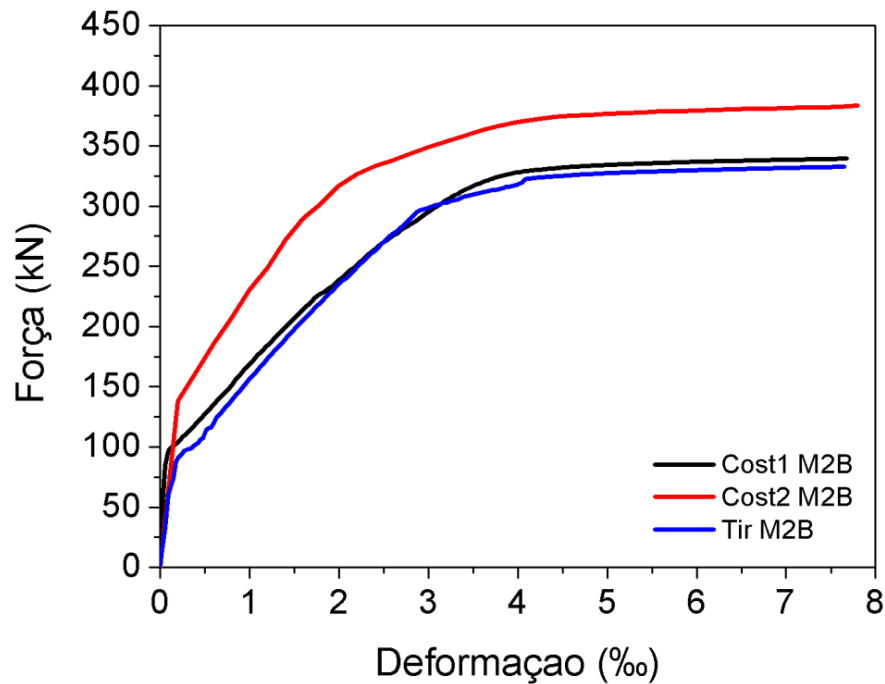


Figura 4.39 - Gráfico de Força *versus* Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M2B.

Nos modelos moldados em duas etapas M4A, M4B, M7A e M7B (Figura 4.40, Figura 4.41, Figura 4.42 e Figura 4.43), observa-se que a armadura de costura é mais solicitada que no modelo monolítico, chegando, em alguns casos, a escoar antes do tirante do modelo. Isso se justifica pelos panoramas de fissuração desses modelos, nos quais a altura de abertura da junta é maior que a altura da fissura formada na interface consolo-pilar do modelo monolítico.

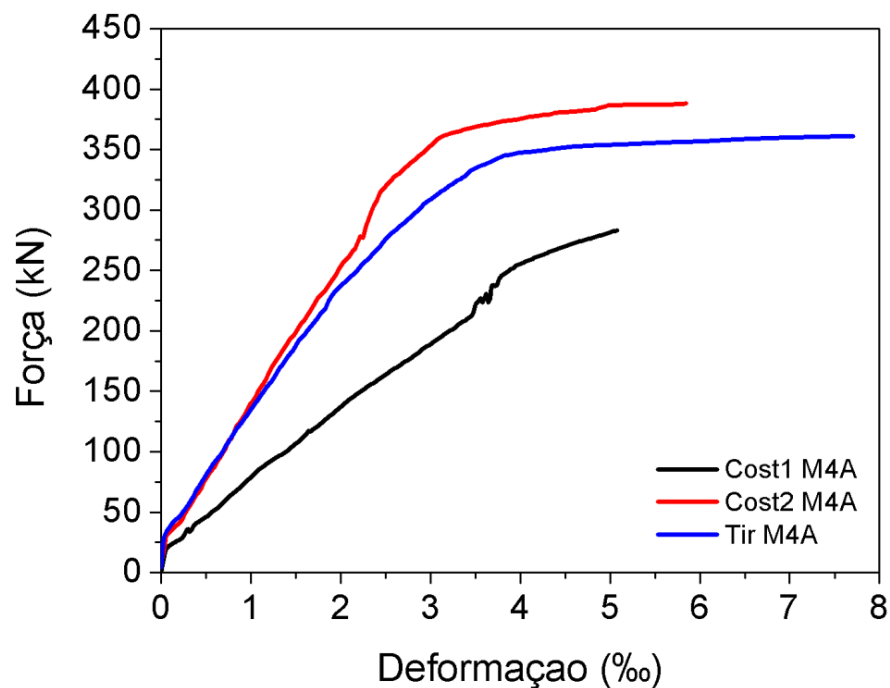
Figura 4.40 - Gráfico de Força *versus* Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M4A.

Figura 4.41 - Gráfico de Força versus Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M4B.

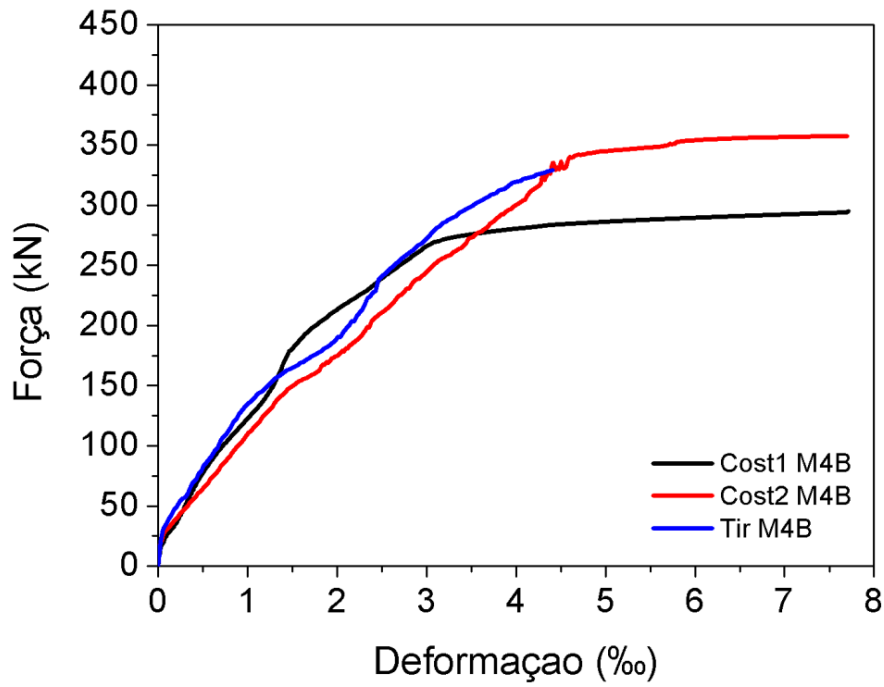


Figura 4.42 - Gráfico de Força versus Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M7A.

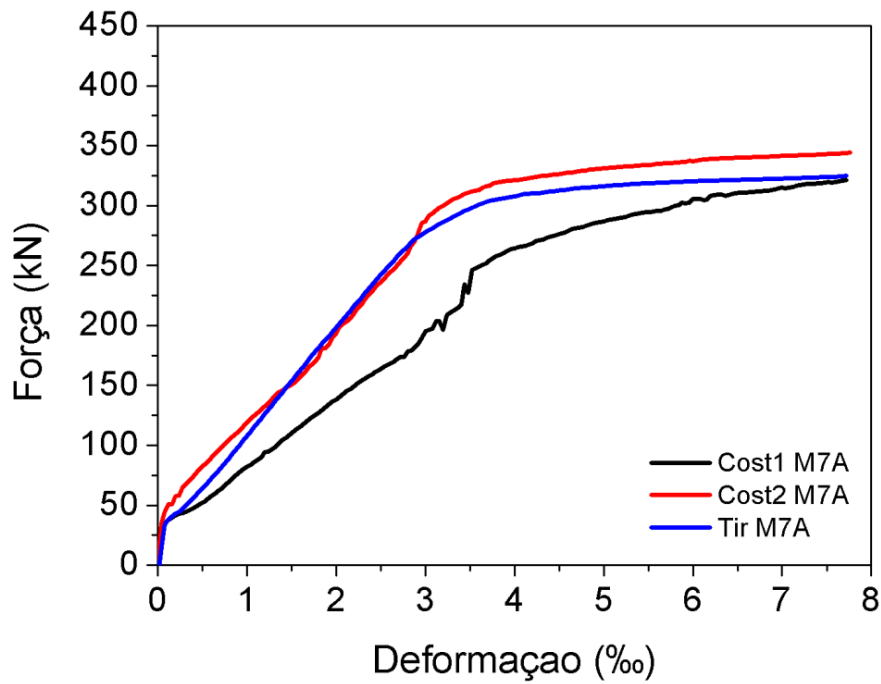
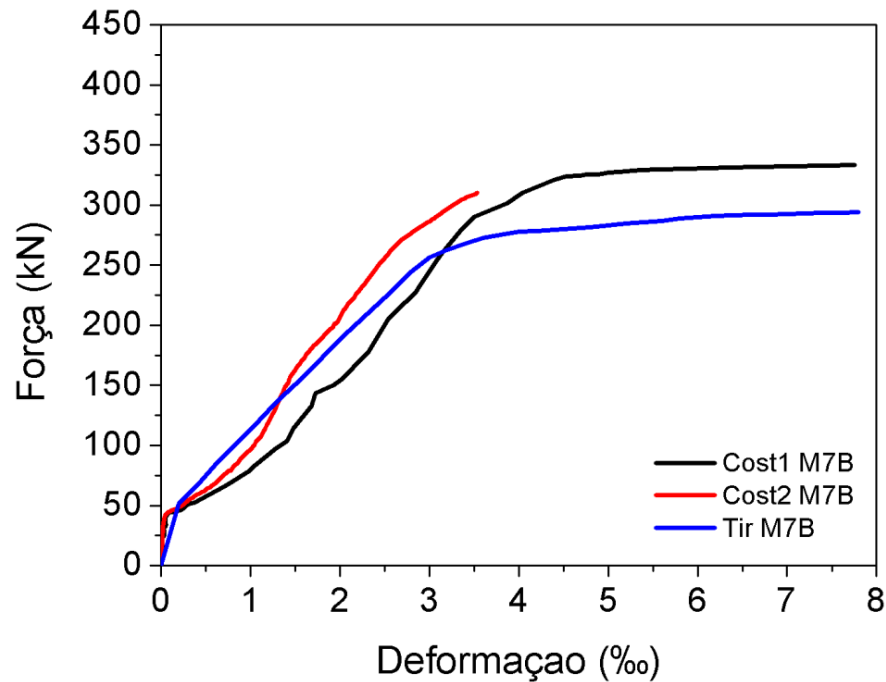


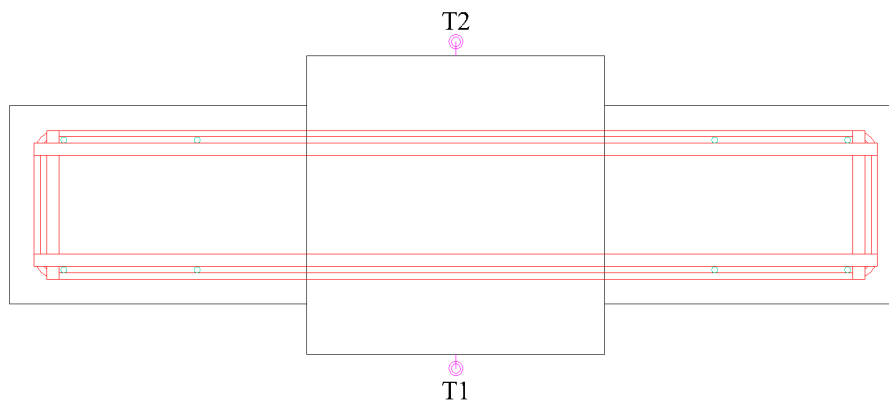
Figura 4.43 - Gráfico de Força versus Deformação da armadura de costura e do tirante do modelo M7B.



4.5 DESLOCAMENTO VERTICAL E ROTAÇÃO DA LIGAÇÃO CONSOLO-PILAR

Para cada modelo ensaiado foi traçada a curva média do deslocamento vertical a partir da leitura dos dois transdutores de deslocamentos, T1 e T2, fixados nos modelos, como mostrado na Figura 4.44. A partir da leitura desses transdutores e daqueles fixados para registrar a abertura da junta na ligação consolo-pilar, foi determinada a rotação da ligação consolo-pilar.

Figura 4.44 - Numeração dos transdutores de deslocamentos verticais.



A rotação da ligação consolo-pilar, ϕ , foi estimada por meio da equação (4.1):

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (4.1)$$

Sendo ϕ_1 (Figura 4.45) a rotação equivalente à abertura da junta entre o consolo e o pilar, ou seja:

$$\phi_1 = \frac{\delta_h}{h} \quad (4.2)$$

Onde δ_h é a abertura da junta entre o consolo e o pilar nos consolos moldados em duas etapas e a abertura da fissura na região de engastamento do consolo com o pilar nos consolos monolíticos; e h é a altura do consolo. Os valores de δ_h foram mostrados no item 4.3.

Já ϕ_2 (Figura 4.46) é a rotação equivalente ao deslocamento vertical do consolo em relação ao pilar, ou seja:

$$\phi_2 = \frac{\delta_v}{a} \quad (4.3)$$

Onde δ_v é o deslocamento vertical do consolo em relação ao pilar; e a é a distância do ponto de aplicação da força no consolo à face do pilar.

Figura 4.45 – Esquema de rotação referente ao deslocamento horizontal.

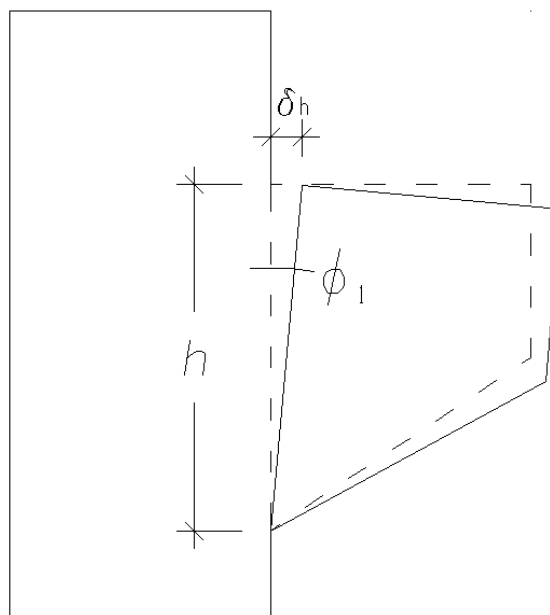
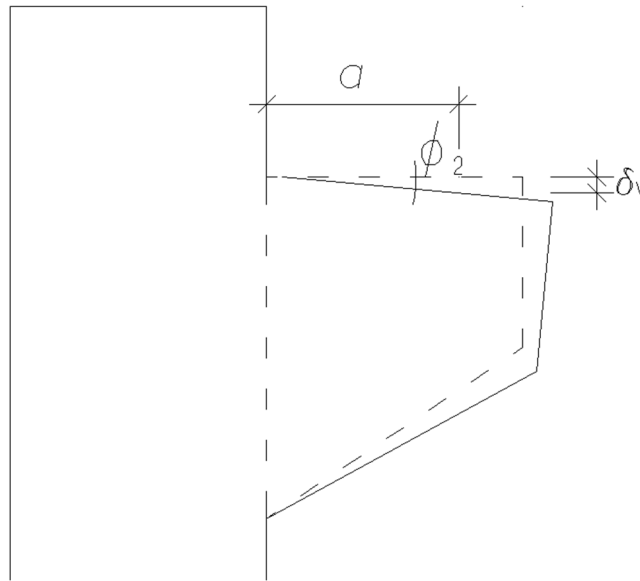


Figura 4.46 – Esquema de rotação referente ao deslocamento vertical.



Obtida a rotação da ligação consolo-pilar, pode-se determinar a rigidez secante da ligação definida pela relação M/ϕ , onde M é dado pela equação (4.4):

$$M = Fa \quad (4.4)$$

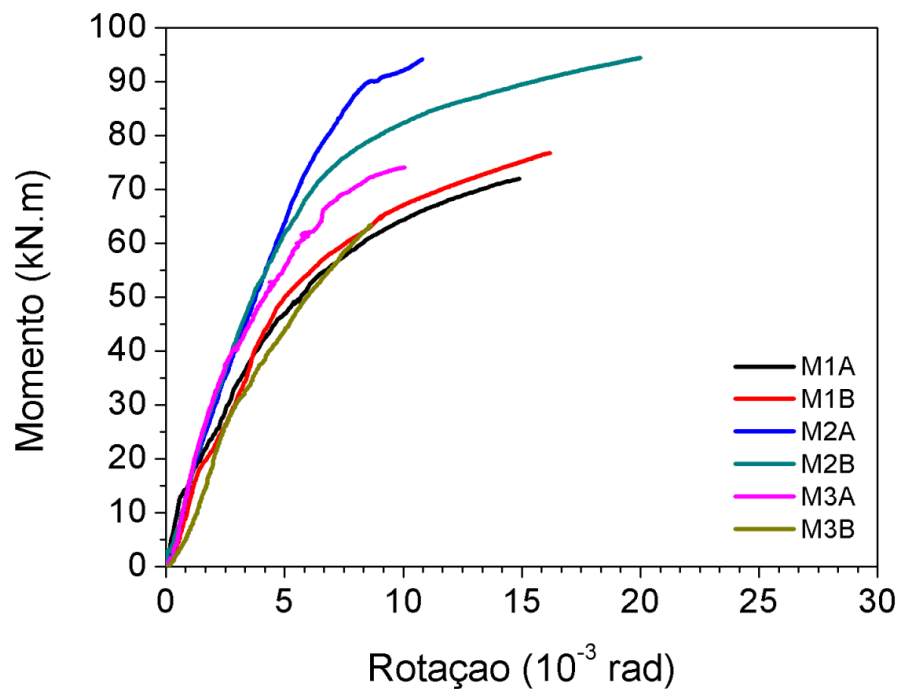
Sendo F a força aplicada ao consolo e a a distância entre o ponto de aplicação da carga no consolo e o pilar.

Na Tabela 4.6 são apresentados os valores médios dos deslocamentos horizontal (δ_{hy}) e vertical dos modelos (δ_{vy}) no momento do escoamento do tirante, bem como a rotação da ligação (ϕ_y) e a rigidez secante da ligação nesse instante.

A Figura 4.47 apresenta o gráfico Momento *versus* Rotação para os modelos monolíticos M1, M2 e M3. As fibras no modelo M2, monolítico com armadura de costura, aumentam a rigidez da ligação consolo-pilar com relação ao modelo M1 de referência, inclusive para a força de escoamento do tirante. Já no modelo M3, monolítico sem armadura de costura, as fibras aumentaram a rigidez para valores de força até 75% da força de escoamento do tirante (equivalente a 215 kN), aproximadamente. Acima dessa força, a rotação do consolo aumentou de forma que a rigidez aproximou-se da rigidez do consolo do modelo M1, monolítico de referência.

Tabela 4.6 – Deslocamento vertical nos modelos ensaiados.

Modelo	F_y (kN)	δ_{hy} (mm)	δ_{vy} (mm)	ϕ_u (rad)	M_y/ϕ_y
M1A	222,50	0,77	0,98	0,00628	8,80
M1B	246,00	0,83	0,94	0,00625	8,91
M2A	285,50	0,57	0,85	0,00520	12,73
M2B	285,50	0,57	0,89	0,00538	11,91
M3A	302,50	0,36	1,41	0,00717	9,51
M3B	265,50	0,85	1,28	0,00781	7,66
M4A	285,00	0,77	1,06	0,00664	9,62
M4B	249,50	0,66	0,96	0,00592	9,50
M5A	206,00	0,72	0,72	0,00500	9,27
M5B	206,50	1,14	0,83	0,00581	7,99
M6A	217,00	0,98	0,84	0,00618	8,26
M7A	252,50	0,87	0,99	0,00657	8,64
M7B	232,50	0,89	0,98	0,00656	7,95
M8A	243,50	1,21	1,06	0,00774	7,08
M8B	231,50	1,16	1,12	0,00788	6,60

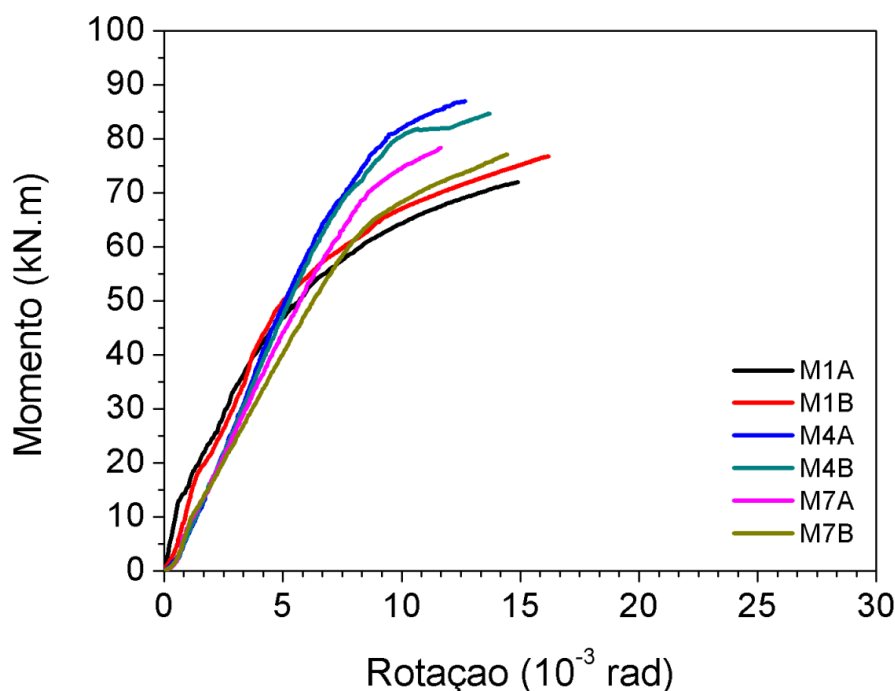
Figura 4.47 – Gráfico de Momento *versus* Rotação do consolo para os modelos monolíticos M1, M2 e M3.

A Figura 4.48 apresenta o gráfico Momento *versus* Rotação para os modelos M1, M4 e M7. Comparando o modelo M4, moldado em duas etapas, com o modelo M1, monolítico, ambos sem fibras e com armadura de costura, nota-se que o consolo do modelo M1 foi mais rígido para valores de força até 75% da força de escoamento do tirante do modelo M4 (equivalente a 200 kN), aproximadamente. Para as respectivas forças de escoamento do tirante de cada modelo, o consolo do modelo M4 apresentou uma rigidez cerca de 14% maior que a rigidez

do consolo do modelo monolítico M1. Isso mostrou que, apesar do modelo ser moldado em duas etapas, o consolo pode ter a mesma rigidez do consolo monolítico.

A influência do tratamento da interface pode ser constatada ao se comparar os modelos M4 e M7, com chave de cisalhamento e superfície naturalmente rugosa, respectivamente. Observa-se que as rigidezes foram iguais para valores de força até 30% da força de escoamento do tirante do modelo M7 (equivalente a 76 kN), aproximadamente. Acima dessa força, a rotação desse consolo aumentou mais que a rotação do consolo do modelo M4, mostrando que o tratamento na interface influenciou a ligação, aumentando a rotação, no caso da superfície rugosa. Comparando o modelo M7 com o modelo monolítico de referência, M1, observa-se que, para as respectivas forças de escoamento do tirante de cada modelo, as rigidezes dos consolos são praticamente iguais.

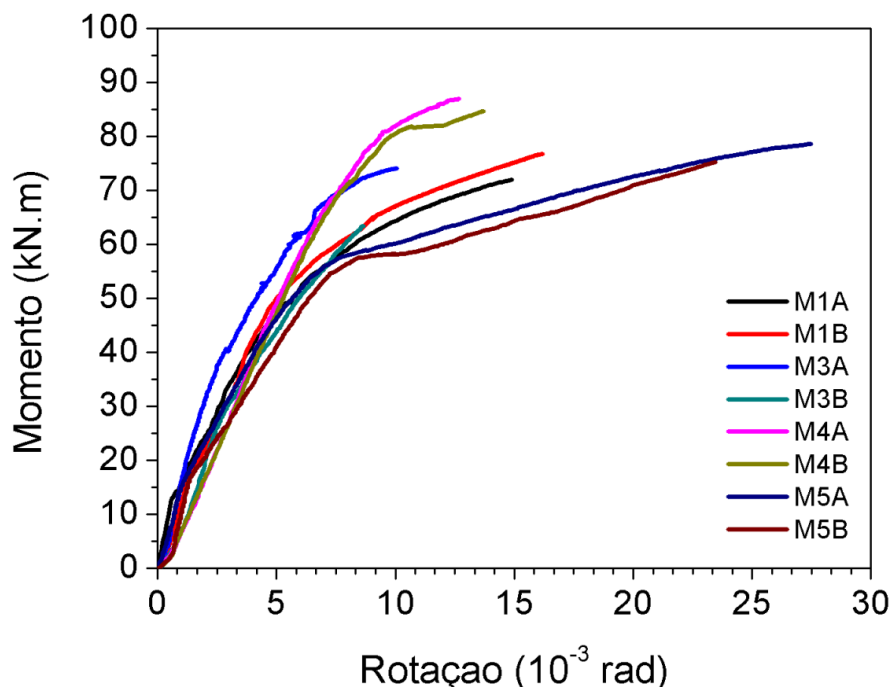
Figura 4.48 – Gráfico de Força *versus* Rotação do consolo para os modelos monolíticos M1, M4 e M7.



A Figura 4.49 apresenta o gráfico Momento *versus* Rotação para os modelos monolíticos M1, M3, M4 e M5. Comparando o modelo M5, moldado em duas etapas sem armadura de costura, com o modelo M1, monolítico com armadura de costura, ambos sem fibras, nota-se que a rigidezes dos consolos foram iguais para valores de força até 55% da força de escoamento do tirante do modelo M5 (equivalente a 115 kN), aproximadamente. Comparando a rigidez dos modelos para as respectivas forças de escoamento do tirante de cada modelo, encontra-se, no consolo do modelo M1, uma rigidez cerca de 3% maior que a rigidez do consolo do modelo

M5. Isso mostra que a armadura de costura teve pouca influência na rigidez do consolo, apesar de ter apresentado forte influência na redução da abertura da junta.

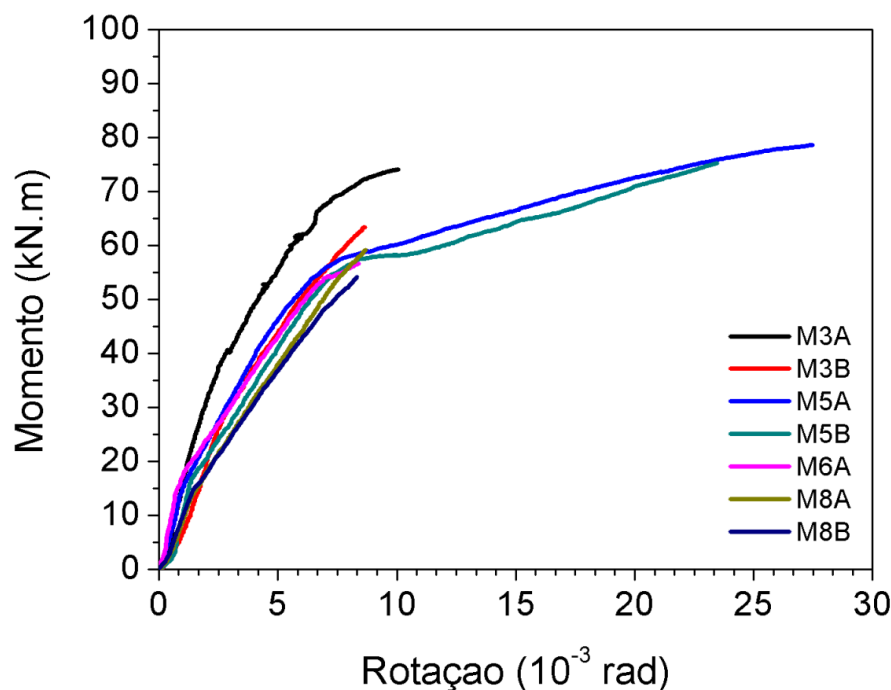
Figura 4.49 – Gráfico de Força *versus* Rotação do consolo para os modelos monolíticos M1, M3, M4 e M5.



A Figura 4.50 apresenta o gráfico Momento *versus* Rotação para os modelos monolíticos M3, M5, M6 e M8. Nos modelos moldados em duas etapas, também não foi verificada influência das fibras na rotação dos consolos. O modelo com fibras, M6, apresentou rotação muito próxima do modelo sem fibras, M5, durante quase todo o carregamento. Para as respectivas forças de escoamento do tirante de cada modelo, verifica-se, no consolo do modelo M5, uma rigidez cerca de 9% maior que a rigidez do consolo do modelo M6. Já o modelo com fibras, M8, apresentou uma rigidez ligeiramente inferior à desses dois modelos, sendo que, para a força de escoamento do tirante, a rigidez do consolo desse modelo foi, em média, 21% inferior à rigidez dos consolos dos modelos M5 e M6. Isso indica que o tratamento da interface teve mais influência na rotação do consolo que a presença de fibras de aço.

Em comparação com o modelo monolítico, M3, o modelo M6 apresentou rigidez ligeiramente superior para valores de força até 45% da força de escoamento do tirante (equivalente a 100 kN), aproximadamente. Para as respectivas forças de escoamento do tirante de cada modelo, verifica-se, no consolo do modelo M6, uma rigidez cerca de 8% menor que a rigidez do consolo do modelo M3.

Figura 4.50 – Gráfico de Força *versus* Rotação do consolo para os modelos com armadura de costura M3, M5 e M6 e M8.



O modelo M9, com armadura dobrada, apresentou rigidez bem inferior à dos modelos M1 e M7, o primeiro monolítico e o segundo moldado em duas etapas. Isso mostra que a prática usual de utilizar tirante em aço CA25 dobrado em consolos moldados em duas etapas pode introduzir rotações significativas na ligação, reduzindo a sua rigidez final e afetando os deslocamentos horizontais da estrutura.

Em termos gerais, os resultados mostram que o uso de consolos moldados em duas etapas não afeta a rigidez da ligação viga-pilar, uma vez que a rotação desses consolos é semelhante à dos consolos monolíticos com armadura de costura. Se for tomada a rigidez secante da ligação consolo-pilar no momento do escoamento do tirante e forem excluídos os modelos M2 e M3 (monolíticos com fibras), além do modelo M9 (com tirante em aço CA25), a maior diferença de rigidez observada entre os consolos moldados em duas etapas e a rigidez média do consolo monolítico de referência (M1) foi de apenas 16%. Esse valor é pequeno, comprovando que, nesse caso, não haveria necessidade de modificação dos modelos de cálculo usualmente empregados em ligações viga-pilar semi-rígidas com consolos monolíticos.

4.6 COMPARAÇÃO COM MODELOS ANALÍTICOS

Os resultados obtidos nos ensaios foram comparados com os modelos propostos por Campione, La Mendola e Papia (2005) e por Campione, La Mendola e Mangiavillano (2007), os quais foram apresentados no Capítulo 2. Intencionou-se avaliar a aplicabilidade desses modelos analíticos aos consolos ensaiados no presente trabalho.

No modelo apresentado por Campione, La Mendola e Papia (2005), P_{u1} é a força última relativa à ruptura do tirante da treliça e P_{u2} é a força última relativa à ruptura da biela de compressão da treliça. Esse modelo é direcionado para consolos monolíticos com armadura de costura. No entanto, é aqui comparado, também, com os consolos moldados em duas etapas.

No modelo apresentado por Campione, La Mendola e Mangiavillano (2007), P_{u1} e P_{u2} são, respectivamente, a força relativa à ruptura do tirante da treliça principal proposta e a força relativa à ruptura da biela de compressão da treliça principal proposta. P_{u3} e P_{u4} são, respectivamente, a força relativa à ruptura do tirante da treliça secundária proposta e a força relativa à ruptura da biela de compressão da treliça secundária proposta. O cálculo das forças resistentes P_{u1} , P_{u2} , P_{u3} , e P_{u4} considera que as duas treliças (principal e secundária) estão resistindo à força aplicada, ou seja, parte da carga é absorvida por cada treliça. As forças relativas à treliça secundária foram determinadas apenas para os consolos que possuíam armadura de costura.

Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados obtidos do ensaio dos consolos e os resultados obtidos da aplicação dos modelos analíticos.

Tabela 4.7 – Comparação com os modelos analíticos.

Modelo	x_c	CAMPIONE; LA MENDOLA; PAPIA, 2005		CAMPIONE; LA MENDOLA; MANGIAVILLANO, 2007			
		P_{u1}	P_{u2}	P_{u1}	P_{u2}	P_{u3}	P_{u4}
M1A	8,64	309,62	408,35	309,62	195,20	337,63	580,28
M1B	8,50	309,51	515,69	309,50	245,13	339,40	713,38
M2A	9,24	445,54	1309,34	423,47	532,25	478,51	1082,43
M2B	9,44	447,33	1370,73	425,63	554,54	478,95	1125,60
M3A	8,34	360,40	476,54	343,42	394,17	-	-
M3B	8,34	360,40	476,54	343,42	394,17	-	-
M4A	8,09	296,97	649,98	296,97	303,982	344,566	886,46
M4B	8,09	296,97	649,98	296,97	303,98	344,56	886,46
M5A	7,82	202,89	186,97	202,89	186,97	-	-
M5B	7,82	202,89	186,97	202,89	186,97	-	-
M6A	9,56	341,36	488,57	319,71	402,17	-	-
M7A	8,55	297,36	501,55	297,36	238,95	338,69	690,56
M7B	8,55	297,36	501,55	297,36	238,95	338,69	690,56
M8A	8,90	330,63	394,71	314,72	336,15	-	-
M8B	8,90	330,63	394,71	314,72	336,15	-	-

Comparando os modelos analíticos utilizados com os valores teóricos das normas avaliadas neste trabalho, observou-se que, em poucos casos, os modelos analíticos apresentaram valores próximos dos resultados experimentais.

Com relação à força de escoamento do tirante, os modelos propostos por Campione, La Mendola e Papia (2005) e Campione, La Mendola e Mangiavillano (2007) apresentaram resultados mais próximos dos experimentais (entre 2% e 16%) nos modelos M4 e M7. Isto pode ter ocorrido devido ao fato desses modelos serem moldados em duas etapas com a presença da armadura de costura. Sendo assim, a consideração da armadura de costura no modelo de treliça adotado torna-se mais significativa em modelos moldados em duas etapas, possivelmente, devido a essa armadura ser mais solicitada com maiores aberturas da junta do que nos modelos monolíticos.

Com relação à força última, o modelo proposto por Campione, La Mendola e Papia (2005) apresentou resultados entre 19% e 29% abaixo das forças alcançadas pelos modelos M1 e M7. Já o modelo proposto por Campione (2009) apresentou resultados entre 17% e 23% inferiores às forças última alcançadas pelo modelo M2. Esses foram os casos em que as formulações dos modelos analíticos obtiveram valores mais próximos dos valores experimentais do que os modelos de norma. Isso indica que, a presença da armadura de costura, bem como as fibras

incorporadas ao concreto, devem ser levadas em conta para o cálculo da resistência da biela de compressão.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões alcançadas sobre a presente pesquisa referente a consolos moldados em duas etapas com tratamento na interface e adição de fibras de aço ao concreto. Foi avaliado o panorama de fissuração, o modo de ruptura, a capacidade resistente, a abertura da junta entre o consolo e o pilar, a rotação da ligação consolo-pilar e a aplicabilidade de modelos analíticos propostos para consolos monolíticos.

A adição de fibras de aço altera o modo de ruptura dos consolos. No caso dos consolos monolíticos, as fibras modificaram a inclinação da biela de compressão. No entanto, essa modificação é mais significativa em consolos moldados em duas etapas e sem armadura de costura. Estes consolos, sem fibras, romperam bruscamente quando se formou a primeira fissura de tração paralela à biela de compressão. Já nos consolos moldados em duas etapas com fibras, de forma geral não houve a ruptura na biela de compressão. Neste caso, a ruína se deu por flexão com abertura da junta entre o consolo e o pilar, seguido do esmagamento do concreto na base do consolo.

Com relação à resistência do consolo definida pelo escoamento do tirante, as fibras foram mais eficientes nos consolos monolíticos que nos consolos moldados em duas etapas. Isso porque foi observado um aumento de até 22% na resistência do consolo monolítico devido à adição das fibras de aço. Esse ganho foi observado mesmo quando as fibras estiveram como substituição da armadura de costura. Quanto aos consolos moldados em duas etapas, não houve um aumento na resistência do consolo quando se utilizaram fibras de aço em substituição à armadura de costura, como foi verificado no consolo monolítico. No entanto, a resistência manteve-se a mesma do consolo monolítico com fibras, indicando as fibras como boa opção para substituição da armadura de costura.

Em todos os consolos, a força de escoamento do tirante determinada no momento de escoamento do tirante foi superior às forças teóricas obtidas pelos modelos de cálculo recomendados pela norma NBR 9062 (ABTN, 2006), pelo PCI (PCI, 2010) e pela norma europeia EUROCODE 2 (CEN, 2004).

Com relação à força última, a adição de fibras ao concreto conferindo um confinamento da biela de compressão pode ser uma boa opção como substituição da armadura de costura. Isso porque a diferença de força observada entre o modelo monolítico de referência e o modelo monolítico sem armadura de costura, com fibras, foi de apenas 7%. Não houve diferença significativa na força última alcançada no modelo monolítico de referência e nos modelos moldados em duas etapas com fibras, especialmente aqueles que tinham fibras atravessando a junta entre o consolo e o pilar. Isto, mesmo com os diferentes mecanismos de ruptura observados nos consolos monolíticos (ruptura da biela comprimida) e nos consolos moldados em duas etapas (ruptura por flexão do consolo e ruptura por cisalhamento).

As fibras reduziram, significativamente, a abertura de fissuras na interface consolo-pilar dos modelos monolíticos. Inclusive, pôde-se observar menor deformação na armadura de costura dos consolos monolíticos que tiveram fibras adicionadas ao concreto.

Já nos consolos moldados em duas etapas, as fibras não ofereceram benefícios com relação à abertura da junta entre o consolo e o pilar, nem mesmo no modelo que tinha fibras atravessando a junta.

Nos modelos monolíticos, as fibras de aço aumentaram a rigidez da ligação consolo-pilar. Já nos modelos moldados em duas etapas, as fibras não influenciaram essa rigidez. Caso sejam utilizadas fibras de aço em consolos monolíticos, sugerem-se mais estudos no sentido de definir modelos de cálculo para avaliação da rigidez secante da ligação viga-pilar com esse tipo de consolo.

Com relação à resistência do consolo, definida pelo escoamento do tirante, a existência da junta fria não influenciou significativamente, já que a resistência dos consolos moldados em duas etapas ficou entre 12% abaixo e 14% acima da resistência do modelo monolítico de referência. Nem mesmo o tratamento da interface teve significativa influência na rigidez, pois, comparando os modelos moldados em duas etapas, com armadura de costura e sem fibras, com o modelo de referência, observou-se uma diferença de 14% para o modelo com chaves de cisalhamento na interface e de 4% para o modelo com superfície intencionalmente rugosa.

Com relação à força última, devido aos diferentes valores na resistência média à compressão do concreto, uma comparação direta com o modelo monolítico somente pôde ser feita com dois modelos. O modelo moldado em duas etapas sem fibras, com armadura de costura e com a junta em superfície rugosa alcançou uma força última cerca de 6% superior à força última

do modelo monolítico, de referência. Já o modelo moldado em duas etapas com fibras (inclusive atravessando a junta), sem armadura de costura e com chave de cisalhamento única alcançou uma força última cerca de 4% inferior à do consolo monolítico, de referência.

A existência da junta entre o consolo e o pilar influenciou positivamente na abertura de fissuras na região da junta nos consolos com armadura de costura e chaves de cisalhamento na interface. A abertura média da junta nesse caso foi igual à do modelo monolítico de referência (0,24 mm). Já os consolos que possuíam armadura de costura, mas que tinham a junta com superfície naturalmente rugosa, apresentaram abertura média da junta de 0,36 mm, 51% acima do modelo monolítico de referência. Os modelos moldados em duas etapas com armadura em CA25 foram os que apresentaram maiores aberturas de fissuras, cerca de 10% superior às aberturas de fissuras do modelo monolítico de referência (0,47 mm).

A existência da junta afeta significativamente a deformação da armadura de costura, independente do tratamento utilizado nessa interface, sendo que, nos modelos moldados em duas etapas foi notado que a armadura de costura foi mais solicitada que no modelo monolítico.

Na rotação e na perda da rigidez secante da ligação consolo-pilar dos modelos em duas etapas, a existência da junta não afeta significativamente. No entanto o modelo com fibras atravessando a interface entre o consolo e o pilar apresentou dispersantes dos resultados dos outros modelos e do modelo monolítico de referência. Excetuando o modelo citado, os modelos moldados em duas etapas apresentaram rotação máxima do consolo em relação ao pilar de 13%, comparando ao modelo de referência. Já a perda da rigidez da ligação consolo-pilar foi de, no máximo 8%.

Observou-se que em todos os resultados obtidos, o modelo moldado em duas etapas, com chave de cisalhamento na interface e a presença da armadura de costura apresentou os melhores resultados, sendo por vezes melhores que os resultados do modelo de referência.

Contudo, com a necessidade de melhoria na execução de consolos de concreto moldados em duas etapas, um dos objetivos deste foi a verificação da possibilidade de eliminação da armadura de costura com a adição de fibras metálicas ao concreto. Dessa forma verificou-se que a utilização desse consolo permitiu alcançar uma força última próxima da força última teórica. Além disso, os resultados de rotação e perda da rigidez da ligação consolo pilar indicaram serem esses consolos uma alternativa proposta.

Intencionando manter as pesquisas sobre o tema são apresentadas sugestões para trabalhos futuros:

Estudar os modelos moldados em duas etapas por modelagem computacional.

Estudar a forma de ruptura do modelo moldado em duas etapas, sem armadura de costura e com chaves de cisalhamento na interface e, ainda, avaliar a aplicabilidade das equações indicadas nas normas para o mesmo.

Estudar diferentes dimensões das chaves de cisalhamento no modelo moldado em duas etapas.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003, 170 p.
- _____, **NBR 9062**: Projeto e execução de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2006, 41 p.
- _____, **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2007, 9 p.
- _____, **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação e da curva tensão versus deformação. Rio de Janeiro, 2008, 16 p.
- _____, **NBR 7222**: Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994, 3 p.
- ACI COMMITTEE 318. **ACI 318-08**: Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills, MI, 2008.
- CAMPIONE, G. Flexural response of FRC corbels. **Cement & Concrete Composites**. Itália, v. 31, p. 204-210, 2009.
- CAMPIONE, G., LA MENDOLA, L., MANGIAVILLANO, M. L. Steel fiber-reinforced concrete corbels: Experimental behavior and shear strength prediction. **ACI Structural Journal**. v. 104, nº 5, p. 570-579, 2007.
- CAMPIONE, G., LA MENDOLA, L., PAPIA, M. Flexural behavior of concrete corbels containing steel fibers or wrapped with FRP sheets. **Materials and Structures**. Itália, v. 38, p. 617-625, 2005.
- CAMPOS FILHO, A. **Detalhamento das estruturas de concreto pelo método das bielas e dos tirantes**. 25 f. Caderno de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- CEN- **Eurocode 2**, “Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings,” Technical Committee CEN/TC250, CEN Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2004.
- CON – European Concrete Platform ASBL, **Eurocode 2 – Worked Examples**, Jean- Pierre Jacobs, Brussels, Belgium.
- COSTA, J. B. A. **Estudo experimental de consolos de concreto com fibras moldados em etapas distintas dos pilares**. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado**: Fundamentos e aplicações. 1. ed. São Carlos: EESC-USP, 2000, 441 p.
- FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**. In: ISAIA, G. C. (Editor). Concreto – Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, p. 1195-1225.
- HWANG, S., LEE, H. Strength Prediction for Discontinuity Regions by Softened Strut-and-Tie Model. **Journal of Structural Engineering**. Taiwan, v. 128, p. 1519-1526, 2002.

LEONHARDT, F., MÖNNIG, E. **Construções de concreto: Casos especiais de dimensionamento de estruturas de concreto armado.** Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 1978, v. 2, 161 p.

OLIVEIRA JÚNIOR, L. A. O., **A influência das fibras de aço e das adições minerais no enrijecimento à tração do concreto armado: análise experimental,** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007, 288f.

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE – PCI. **PCI Design Handbook.** 6th Edition, 736 p., 2004.

RILEM DRAFT RECOMMENDATION, TC 50-FMC Committee Fracture Mechanics of Concrete, Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. **Matériaux et Constructions.** v. 18, n. 106, 1985, p. 285-290.

SOUZA, R. A. **Concreto estrutural: Análise e dimensionamento de elementos com descontinuidades.** 413 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

TORRES, F. M. **Análise teórico-experimental de consolos de concreto armado.** 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

APÊNDICE A – GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE TODAS AS DUPLICATAS DOS MODELOS ENSAIADOS

Este apêndice apresenta os gráficos que representam as comparações abordadas nos itens 4.2, e 4.3. Do item 4.2 são apresentados os gráficos comparativos dos diferentes modelos com os resultados de cada duplicata. Do item 4.3, destacou-se as aberturas da junta entre o consolo e o pilar até 1,0 mm.

Figura A.1 – Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M2 e M3.

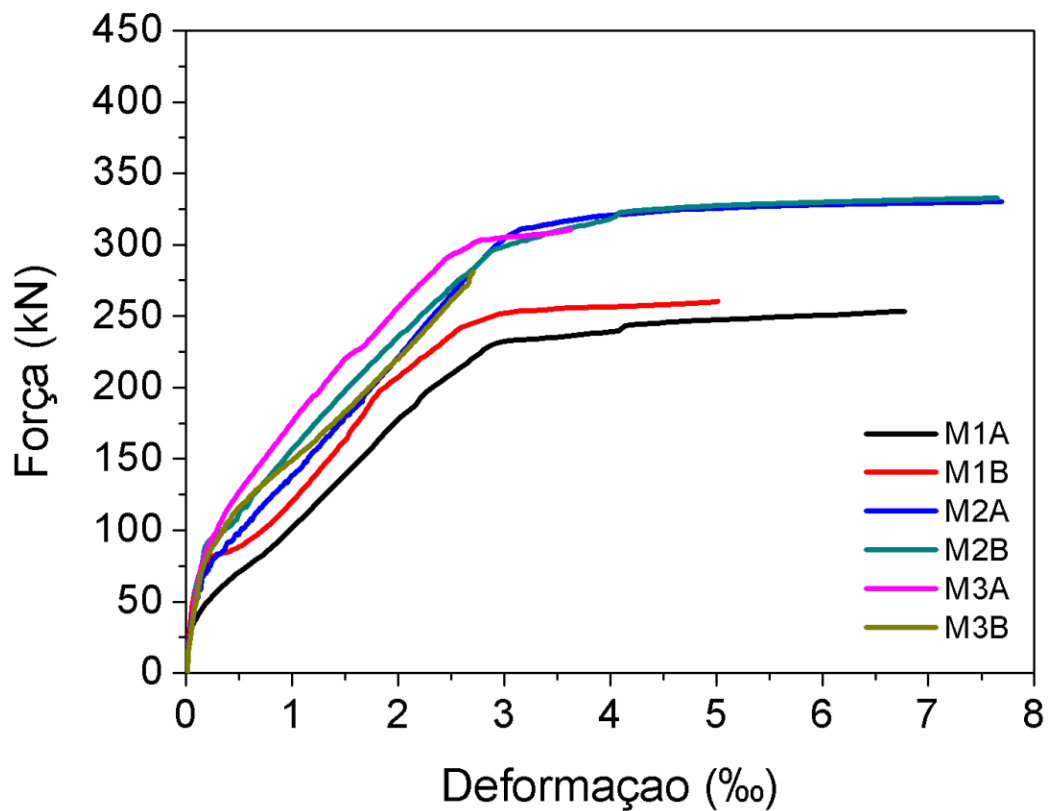


Figura A.2 – Gráfico de Força versus Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M4 e M7.

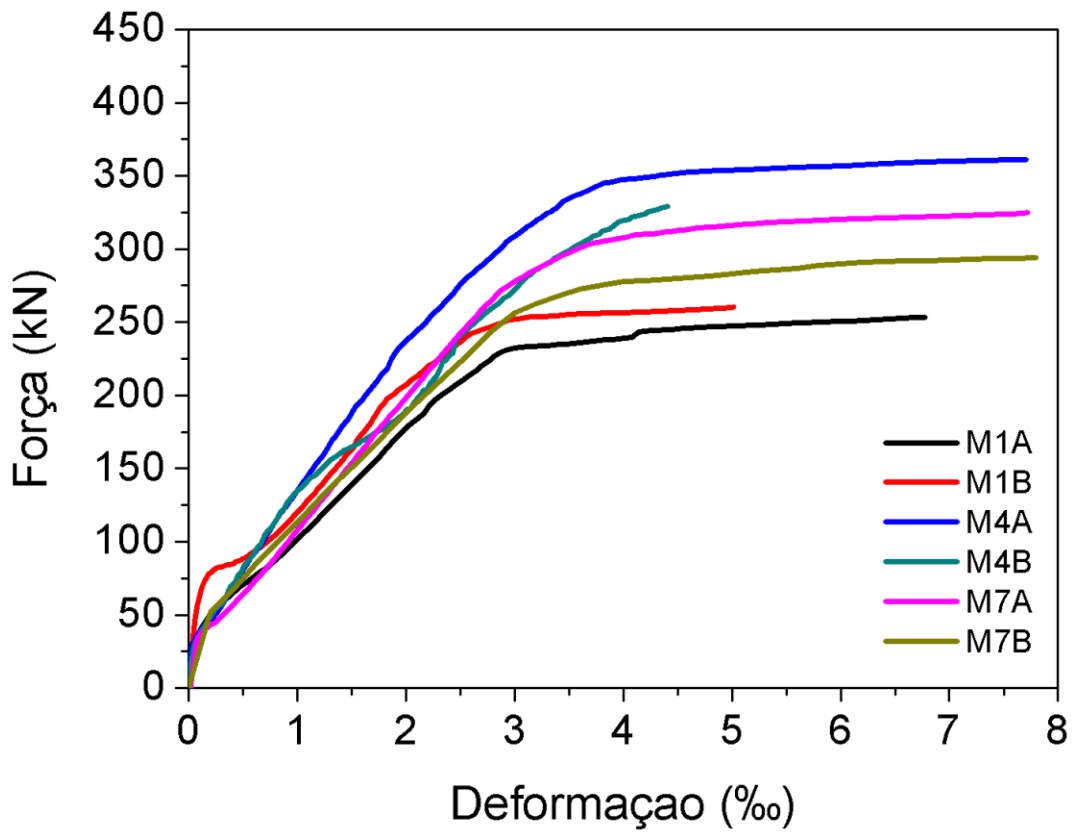


Figura A.3 – Gráfico de Força versus Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M5, M6 e M8.

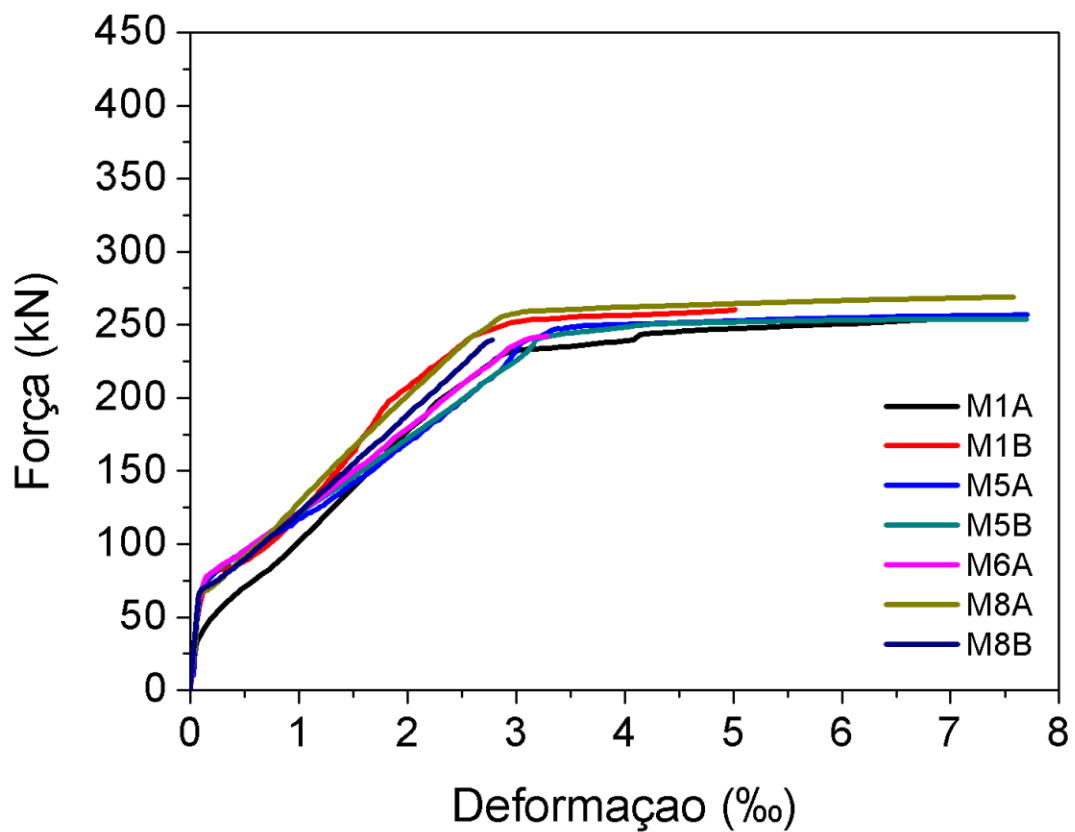


Figura A.4 – Gráfico de Força versus Deformação média na armadura do tirante para os modelos M1, M3, M6 e M8.

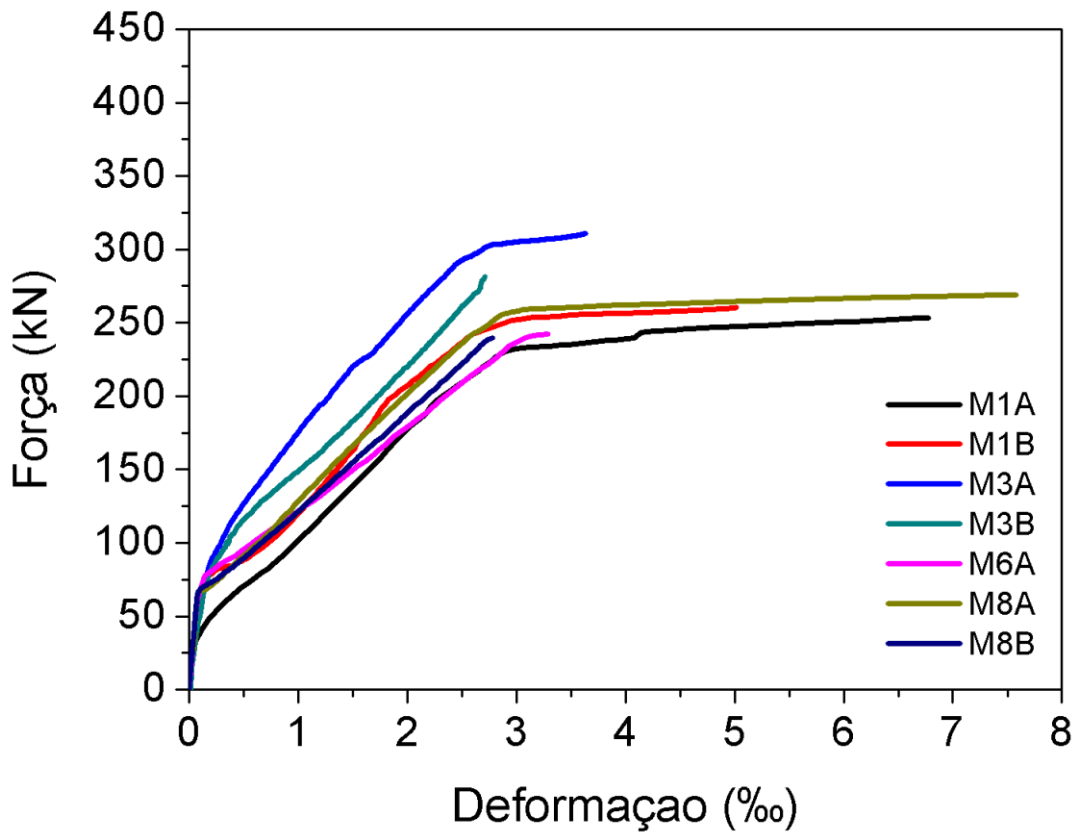


Figura A.5 – Gráfico de Força versus Deformação média na armadura do tirante para os modelos M4, M5 e M6.

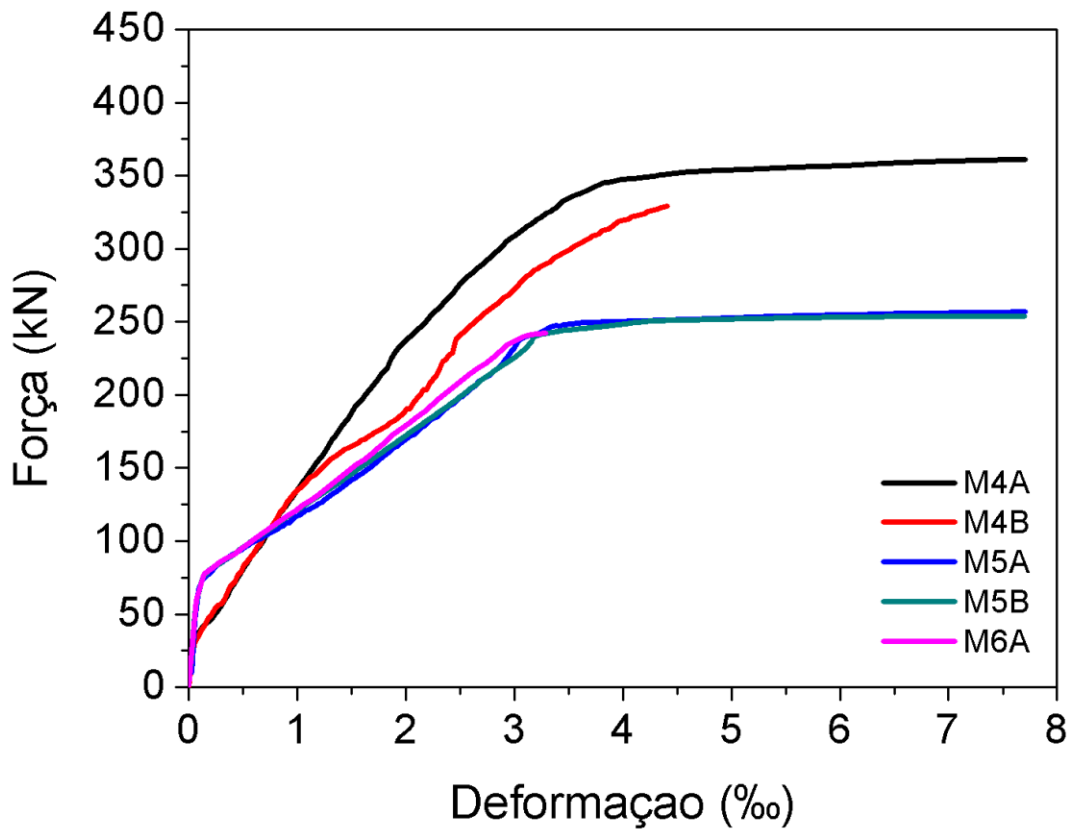


Figura A.6 – Gráfico de Força versus Deformação média na armadura do tirante para os modelos M4, M7 e M8.

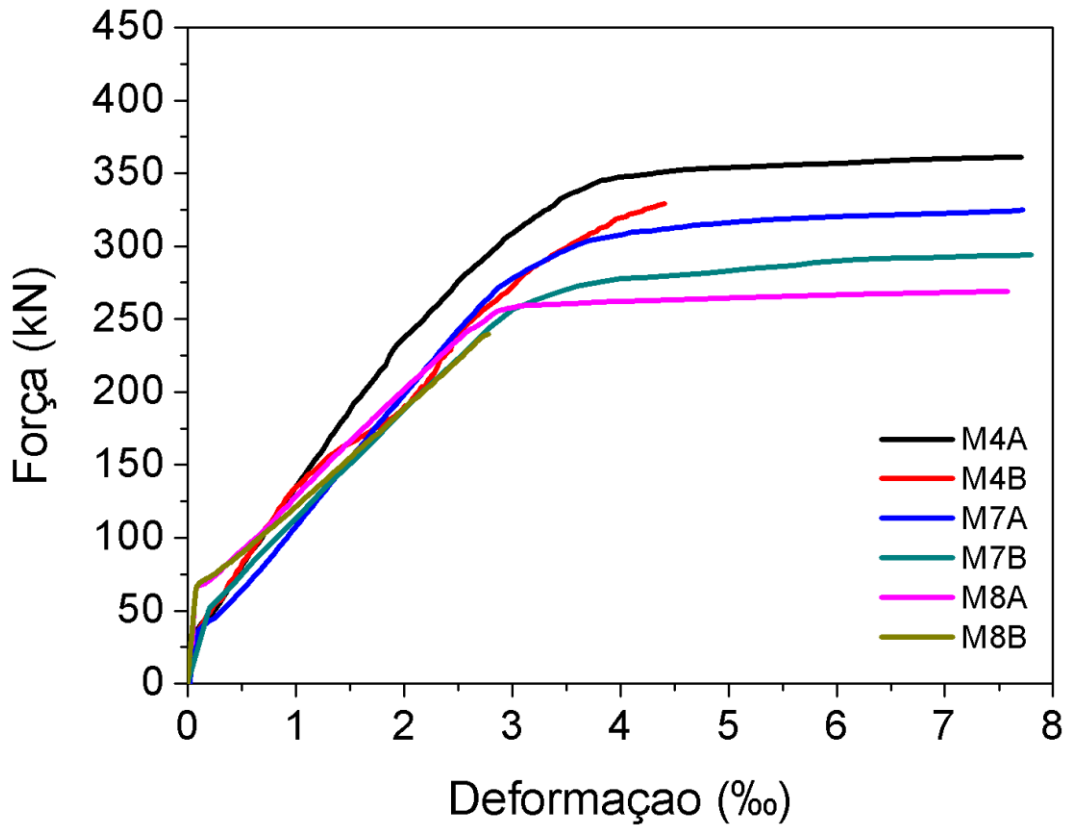


Figura A.7 - Gráfico de Força versus Abertura média, até 1,0 mm, da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M2 e M3.

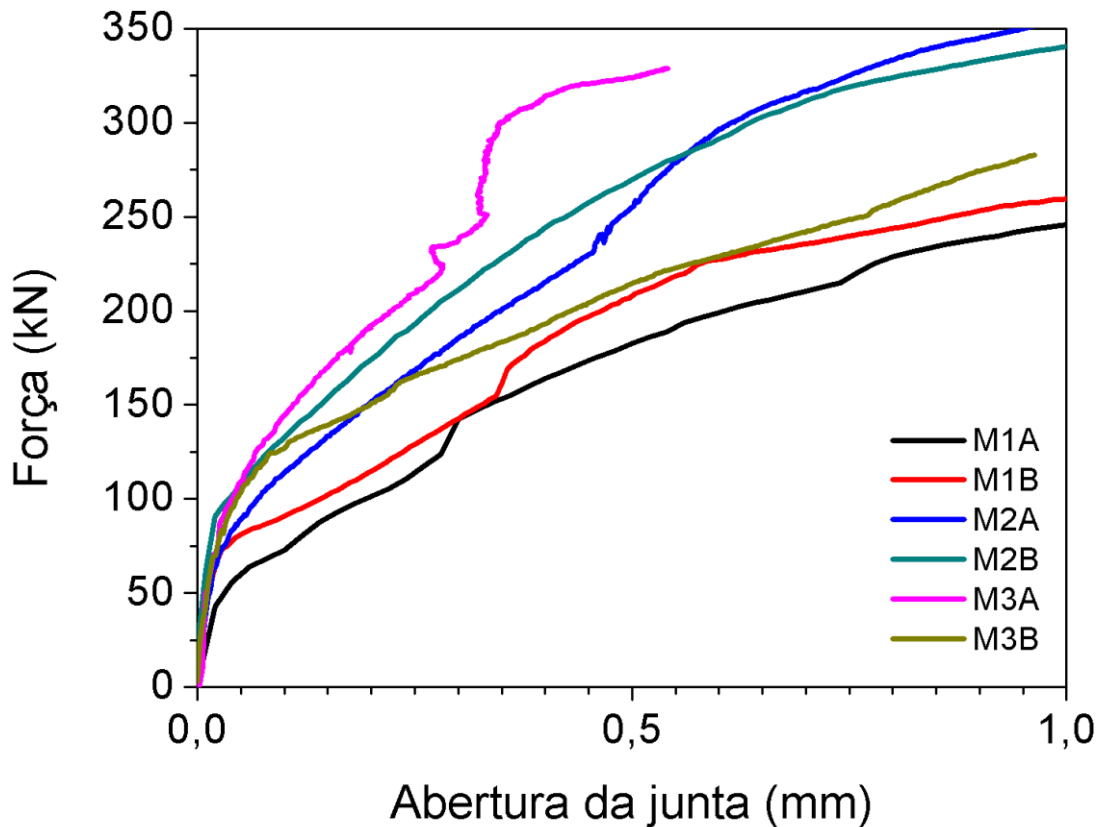


Figura A.8 - Gráfico de Força versus Abertura média, até 1,0 mm, da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M5, M6 e M8.

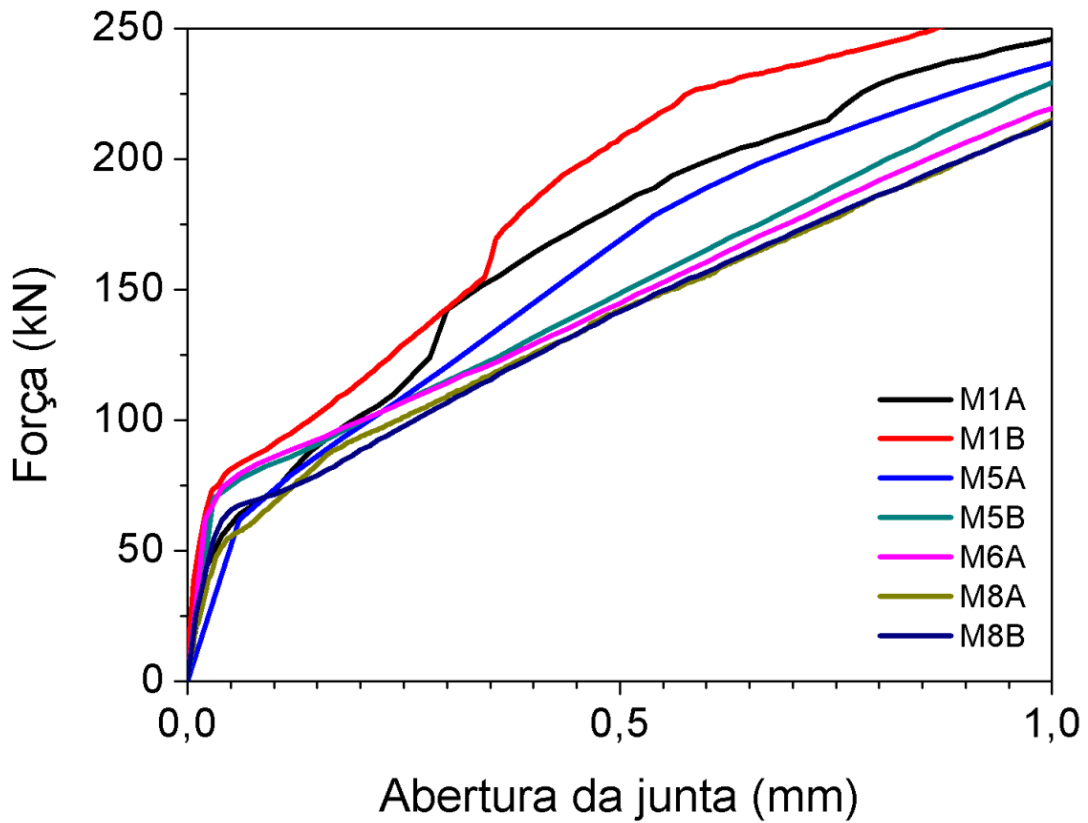


Figura A.9 - Gráfico de Força versus Abertura média, até 1,0 mm, da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M7 e M8.

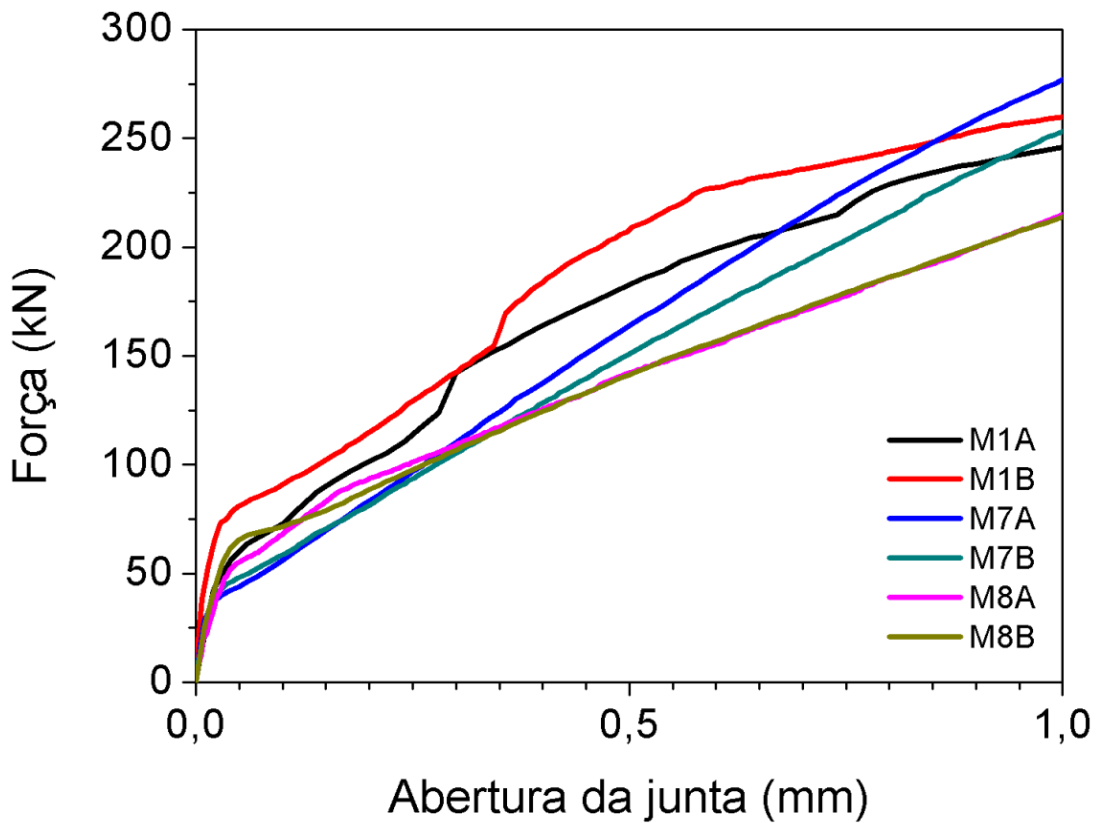


Figura A.10 - Gráfico de Força versus Abertura média, até 1,0 mm, da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M4 e M7.

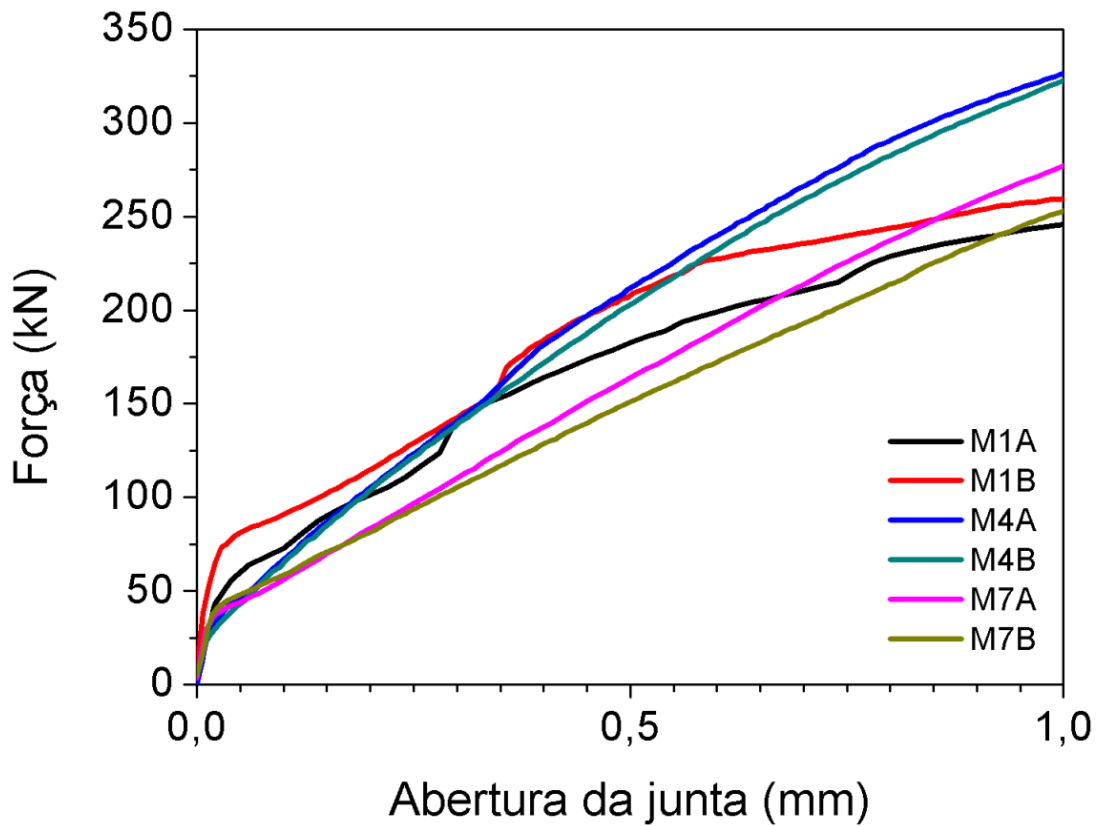


Figura A.11 - Gráfico de Força versus Abertura média, até 1,0 mm, da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M5 e M6.

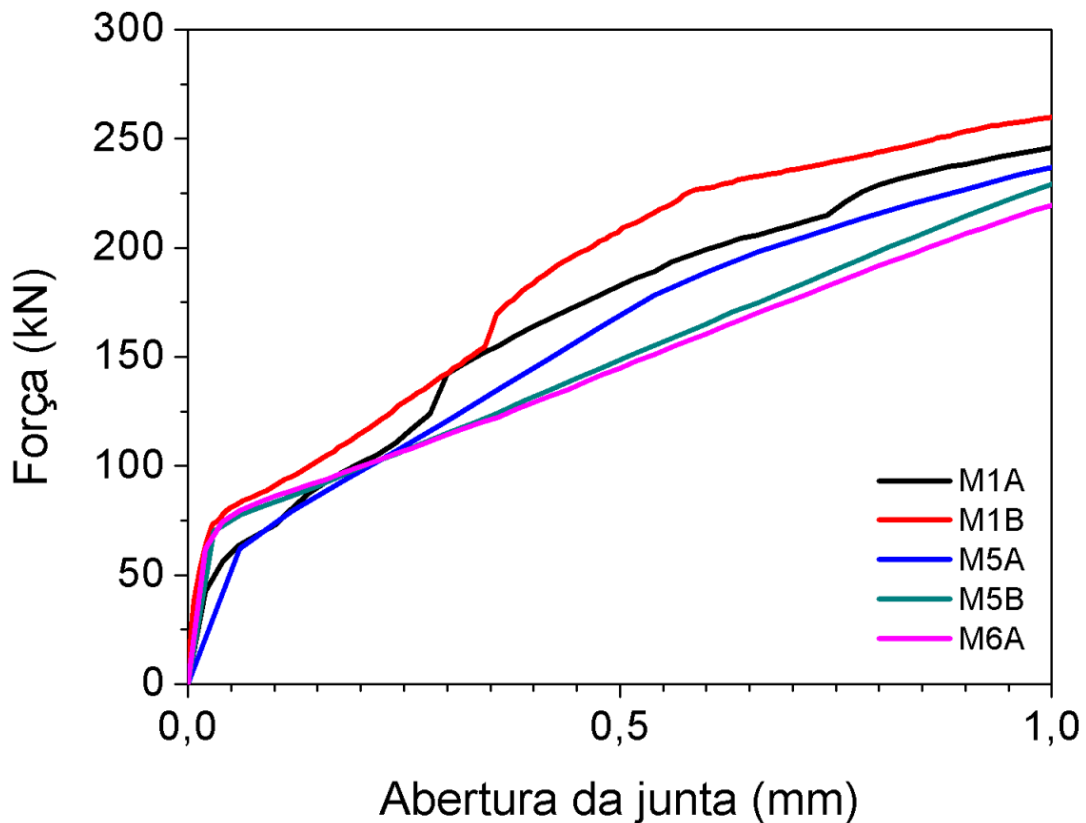


Figura A.12 - Gráfico de Força versus Abertura média, até 1,0 mm, da junta entre o consolo e o pilar para os modelos M1, M7 e M9.

