

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

JACKSON DELIZ DITZ

**Desempenho de almofadas de argamassa modificada na
transferência de tensões de compressão em ligações de
concreto pré-moldado**

São Carlos
2015

JACKSON DELIZ DITZ

**Desempenho de almofadas de argamassa modificada na
transferência de tensões de compressão em ligações de
concreto pré-moldado**

Dissertação apresentada ao Departamento
de Engenharia de Estruturas da EESC-
USP como parte integrante dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia de Estruturas

Orientador: Prof. Titular Dr. Mounir Khalil El
Debs

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

São Carlos
2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

D615d Ditz, Jackson Deliz
Desempenho de almofadas de argamassa modificada na
transferência de tensões de compressão em ligações de
concreto pré-moldado / Jackson Deliz Ditz; orientador
Mounir Khalil El Debs. São Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Estruturas -- Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Almofada de apoio. 2. Almofada de argamassa. 3.
Ligações de concreto pré-moldado à compressão. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel JACKSON DELIZ DITZ.

Título da dissertação: "Desempenho de almofadas de argamassa modificada na transferência de tensões de compressão em ligações de concreto pré-moldado".

Data da defesa: 23/04/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Mounir Khalil El Debs (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Ricardo Carrazedo**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Gustavo Henrique Siqueira**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas):

Prof. Titular **Humberto Breves Coda**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Sergio Lima Segantine**

*Com amor e gratidão, aos meus pais
Luiz e Inêz, ao meu irmão Júnior e à
minha noiva Ana Paula.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me iluminar quando decisões tiveram de ser tomadas e por me guiar nos momentos difíceis.

Ao meu pai Luiz, minha mãe Inêz e meu irmão Júnior, que, com todo amor e carinho, me incentivaram e possibilitaram que eu chegasse até onde cheguei, algo que não imaginava há alguns anos atrás.

À minha noiva, companheira e amiga Ana Paula por todo seu amor e compreensão nestes sete anos juntos.

Aos meus sogros Pedro e Diva, que, mesmo distantes, deram todo o apoio nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, professor Mounir, por toda sua dedicação e paciência ao longo do mestrado.

Aos amigos Barretos, Bianca e Ellen que me auxiliaram nos trabalhos experimentais.

Aos colegas e amigos da turma do mestrado de 2013 do SET, em especial ao Serjão, Giovanni, Lara, Henrique, Karen, Thaís, Ayrton, Caio, Geovanne, Caio Acosta e Gabi. Aos demais amigos de São Carlos, tais como Matheus, Paulão, Camila, Pablo, Margot, Arthur, Ketson e aos colegas da turma de 2014. Todos foram importantes na minha estadia em São Carlos.

Aos professores do departamento de estruturas, em especial ao professor Giongo, que sempre levou descontração às horas do cafezinho.

Aos técnicos de laboratório Vareda, Jorge, Mauri, Amaury, Fabiano, Douglas, Mário, Romeu e Fernando pelo auxílio nas análises experimentais.

Aos professores e amigos da UNIPAMPA, instituição pela qual me formei e da qual tenho muito orgulho de ter feito parte.

A Saint-Gobain, em especial ao senhor Sérgio Ikai, pela doação das fibras para a continuidade das pesquisas.

Aos funcionários do departamento de estruturas, sempre dispostos a ajudar em tudo que necessário.

A CAPES, pela bolsa de mestrado.

RESUMO

DITZ, J. D. **Desempenho de almofadas de argamassa modificada na transferência de tensões de compressão em ligações de concreto pré-moldado**. 2015. 142p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

Esta pesquisa visa analisar a transferência de tensões de compressão entre elementos de concreto pré-moldado através de almofadas de argamassa modificada. A argamassa foi modificada com as adições de fibras de polipropileno, látex estireno-butadieno e vermiculita termo-expandida. A caracterização da argamassa foi realizada com ensaios de compressão, de tração por compressão diametral e de módulo de elasticidade, além de ensaios de rigidez de almofada, que medem a capacidade da peça de se deformar sob tensão de compressão uniforme. As análises de transferência de tensões foram realizadas intercalando uma almofada entre dois blocos de concreto e submetendo o corpo de prova formado a ensaios de compressão. Os parâmetros variados nesses ensaios foram: rugosidade superficial e resistência mecânica dos blocos ligados, excentricidade de carregamento, solidarização ou não da almofada ao bloco inferior de concreto e carregamento monotônico e cíclico. Em relação à massa do cimento, a argamassa das almofadas possuía 30% de agregados, dos quais 95% eram areia fina e 5% eram vermiculita, 10% de látex, 2% de taxa volumétrica de fibras de polipropileno e relação água / cimento de 0,25, além da água incorporada no látex. A argamassa apresentou resistência à compressão média de 27,65 MPa, resistência à tração de 3,62 MPa e módulo de elasticidade igual a 11,53 GPa. Os principais resultados dos ensaios de ligação foram: a) para compressão centrada, a presença da almofada aumentou a resistência em 20% para espessuras de saliências de 0,5 mm e 30% para saliências de 1,0 mm; b) ganho de efetividade da almofada à medida que se reduziu a resistência do concreto; c) em ligações excêntricas, a dispersão dos resultados não permitiu uma correta avaliação dos resultados; d) para carregamento cíclico, a almofada de apoio aumentou em 45% a resistência da ligação.

Palavras-chave: Almofada de apoio. Almofada de argamassa. Ligações de concreto pré-moldado à compressão.

ABSTRACT

DITZ, J. D. **Performance of modified mortar pads in the compression stresses transfer in precast concrete connections.** 2015. 142p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

This research aims to analyze the compressive stresses transfer between precast concrete elements by modified mortar pads. The mortar was modified with additions of polypropylene fibers, styrene-butadiene latex and heat-expanded vermiculite. Mortar characterization was performed in compression, tension and elastic modulus tests, further pad rigidity tests, that measure the pad capacity to deform under uniform compressive stress. Stress transfer analyzes were performed interleaving a bearing pad between two concrete blocks and subjecting the specimen formed in the compression tests. Varied parameters in these tests were: surface roughness and mechanical strength of the connected blocks, loading eccentricity, solidarization or not of the bearing pad to the bottom concrete block and monotonic and cyclic loading. In relation to the cement weight, the mortar of the pads showed 30% of aggregates, which 95% were fine sand and 5% were vermiculite, 10% of latex, 2% of volumetric rate of polypropylene fibers and water / cement ratio of 0,25, in addition of water incorporated into the latex. The mortar showed compression strength of 27,65 MPa, tension strength of 3,62 MPa and elastic modulus equal to 11,53 GPa. The main results of connection test were: a) for centered compression, presence of pad increased the strength in 20% for thicknesses of imperfections of 0,5 mm and 30% for imperfections of 1,0 mm; b) gain of effectiveness of the bearing pad when the concrete strength was reduced; c) in eccentrical connections, the dispersion of results did not allowed a correct evaluation of results; d) for cyclic loading, the bearing pad increased in 45% the connections strength.

Key-words: Bearing pad. Mortar pad. Precast concrete compressive connections.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1– Ligações de concreto pré-moldado: a) Imperfeições superficiais dos elementos pré-moldados; b) Região de concentração de tensões; c) Ligação com almofada de apoio; d) Absorção das imperfeições superficiais pela almofada de apoio | 25 |
| Figura 1.2 – Exemplo de ligação viga-pilar (Adaptado de FIB, 2008) | 27 |
| Figura 1.3 – Almofada de apoio de compósito de cimento..... | 27 |
| Figura 2.1 – Transferência de tensões entre elementos pré-moldados em função das diferenças nas propriedades elásticas do concreto e do material de apoio (Adaptado de Sai et al. (2001))..... | 34 |
| Figura 2.2 – Influência da espessura da junta de argamassa nos modelos de ligação de Barboza e El Debs (2006) | 35 |
| Figura 2.3 – Ligação com material rígido (Adaptado de FIB (2008))..... | 36 |
| Figura 2.4 – Almofada de apoio de elastômero cintado | 37 |
| Figura 2.5 – a) Seção transversal da viga analisada por Bairán e Cladera (2014); b) Corte indicando a posição da viga colapsada | 39 |
| Figura 2.7 – Ligação: a) Viga-pilar; b) Pilar-pilar | 41 |
| Figura 2.8 – Tipos de rigidez em ligações em função do momento fletor (EL DEBS, 2000) | 41 |
| Figura 2.9 – Resistência à compressão das dosagens de Mehdipour et al. (2013) .. | 44 |
| Figura 2.10 – Resistência à tração das dosagens de Mehdipour et al. (2013)..... | 44 |
| Figura 2.11 – Resistência à flexão das dosagens de Mehdipour et al. (2013) | 45 |
| Figura 2.12 – Valores de abatimento nos ensaios de Kim e Park (2012)..... | 46 |
| Figura 2.13 – Resistência à compressão nos ensaios de Kim e Park (2012) | 47 |
| Figura 2.14 – Resistência à flexão nos ensaios de Kim e Park (2012) | 48 |
| Figura 2.15 – Moldagem das almofadas de Montedor (2004)..... | 50 |
| Figura 2.16 – Ensaios de ligação excêntricos de Montedor (2004)..... | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.17 – Ensaio de carregamento pontual de El Debs et al. (2006) | 53 |
| Figura 2.18 – Detalhe do bloco de concreto com quatro saliências (dimensões em mm) (EL DEBS et al., 2008): a) Vista lateral; b) Vista da face rugosa; c) Detalhe da saliência do bloco | 57 |
| Figura 2.19 – Corpo de prova formado pelo conjunto bloco-almofada-bloco (EL DEBS et al., 2008) | 58 |
| Figura 2.20 – Resistências à compressão dos conjuntos bloco-almofada-bloco para cada série de ensaio (EL DEBS et al., 2008)..... | 58 |
| Figura 2.21 – Almofada de argamassa com rugosidade superficial (BELLUCIO, 2010)..... | 60 |
| Figura 2.22 – Resultados de uma amostra da mistura 4 para carregamento cíclico em almofadas no regime de 1200 ciclos (SIQUEIRA e EL DEBS, 2012) | 63 |
| Figura 3.1 – Curva granulométrica da areia..... | 66 |
| Figura 3.2 – Curva granulométrica da vermiculita utilizada na pesquisa | 67 |
| Figura 3.3 – Fibra de polipropileno utilizada na pesquisa (BRASILIT – Saint Gobain) | 69 |
| Figura 4.1 – Corpo de prova padrão dos ensaios de ligação: a) Almofada de argamassa modificada; b) Blocos de concreto com e sem rugosidade superficial; c) Processo de ligação entre blocos de concreto sem almofada de apoio; d) Processo de ligação entre blocos de concreto com almofada de apoio; e) Ligação com almofada de apoio | 72 |
| Figura 4.2 – Argamassa modificada no estado fresco | 74 |
| Figura 4.3 – Detalhe do bloco de concreto com nove saliências (dimensões em mm) (Adaptado de El Debs et. at. (2008)): a) Vista lateral; b) Vista da face rugosa; c) Detalhe da saliência do bloco | 82 |
| Figura 4.4 – Montagem dos corpos de prova (dimensões em mm) | 83 |
| Figura 4.5 – Fôrma dos blocos de concreto: a) Caixa lateral; b) Fundo da fôrma | 83 |
| Figura 4.6 – Processo de adensamento do concreto dos blocos | 83 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.7 – a) Bloco de concreto com saliências em uma das faces; b) Bloco de concreto com saliências em destaque em uma das faces | 84 |
| Figura 4.8 – Fôrma das almofadas: a) Fôrma completa; b) Fôrma unitária..... | 84 |
| Figura 4.9 – Manta para introdução da rugosidade das almofadas..... | 85 |
| Figura 4.10 – Almofada de argamassa modificada: a) vista superior; b) Vista lateral / superior | 85 |
| Figura 4.11 – Bloco com superfície superior regularizada com massa plástica | 86 |
| Figura 4.12 – Ensaio de ligação de blocos: a) Corpo de prova; b) Detalhe do contato bloco-almofada-bloco | 87 |
| Figura 4.13 – Excentricidade e aplicação do carregamento excêntrico (dimensões em mm) | 88 |
| Figura 4.14 – Ensaio piloto de carga excêntrica | 89 |
| Figura 4.15 – Distribuição das tensões no ensaio de compressão excêntrica | 90 |
| Figura 4.16 – Ensaio de compressão excêntrica..... | 90 |
| Figura 4.17 – Configuração do regime cíclico de carregamento | 91 |
| Figura 4.18 – Ensaio cíclico com almofada de apoio e rugosidade de 1 mm de espessura..... | 92 |
| Figura 4.19 – Máquinas de ensaios utilizadas: a) ELE Autotest 2000; b) Instron 8506 | 93 |
| Figura 4.20 – Fôrma para bloco de concreto com almofada inserida antes do lançamento do concreto | 97 |
| Figura 4.21 – Detalhe do contato bloco-almofada de apoio para corpo de prova com almofada solidarizada ao bloco de concreto | 97 |
| Figura 5.1 – Resultados dos ensaios de compressão nas argamassas..... | 100 |
| Figura 5.2 – Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral nas argamassas..... | 102 |
| Figura 5.3 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade das argamassas. | 103 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.4 – a) Almofada de referência após ensaio de rigidez de almofada; b) Almofada modificada após ensaio de rigidez de almofada | 105 |
| Figura 5.5 – Carga de compressão versus variação de espessura da almofada ... | 105 |
| Figura 5.6 – Resultados dos ensaios de rigidez de almofada nas argamassas | 106 |
| Figura 5.7 – Variação de espessura da mistura <i>AM3</i> obtida pelo deslocamento do pistão da máquina de ensaios e por transdutores de deslocamento no ensaio de rigidez de almofada | 107 |
| Figura 5.8 – Relação L/C para ligações com e sem almofada de apoio para todos os níveis de saliências na face do bloco conectado | 113 |
| Figura 5.9 – Exemplo de modelo de ligação após ensaio de compressão centrada | 114 |
| Figura 5.10 – a) Almofada de apoio após ensaio de compressão; b) Almofada de apoio com marcas em destaque das saliências causadas pelos blocos | 115 |
| Figura 5.11 – Formação das fissuras no ensaio de ligação | 115 |
| Figura 5.12 – a) Ligação com saliências na face conectada e com almofada de apoio; b) Ligação com saliências na face conectada e sem almofada de apoio; c) Ligação sem saliências na face conectada e sem almofada de apoio; d) Blocos após ensaio de ligação | 117 |
| Figura 5.13 – Relação L/C para ligações com diferente número de mossas..... | 118 |
| Figura 5.14 – a) Bloco com quatro mossas na face conectada; b) Almofada de argamassa ensaiada em ligação com bloco de quatro mossas..... | 119 |
| Figura 5.15 – Relação L/C para ligações com concretos de diferentes classes de resistência..... | 120 |
| Figura 5.16 – Relação L/C para carregamentos excêntricos | 121 |
| Figura 5.17 – Relação L/C para carregamentos excêntricos com tensão máxima . | 122 |
| Figura 5.18 – Bloco fissurado após ensaio de compressão excêntrica | 123 |
| Figura 5.19 – Relação L/C para ligações à compressão centrada e excêntrica com almofada de apoio | 123 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.20 - Relação L/C para ligações à compressão centrada e excêntrica com almofada de apoio considerando tensões máximas..... | 124 |
| Figura 5.21 – Relação L/C para ligações com carregamento monotônico e cíclico | 125 |
| Figura 5.22 – Carregamento cíclico em amostra do ensaio de ligação..... | 126 |
| Figura 5.23 – Amostra de ensaio de ligação após ensaio cíclico de compressão... | 127 |
| Figura 5.24 – Bloco de concreto com almofada aderida | 128 |
| Figura 5.25 – Relação L/C para ligações com mossas de 1 mm de espessura e almofada solidarizada a um dos blocos | 128 |
| Figura 5.26 – Blocos de concreto com almofada aderida após ensaio de compressão excêntrica | 129 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Propriedades das fibras poliméricas (BENTUR e MINDESS, 1990) | 43 |
| Tabela 2.2 – Variáveis analisadas por Montedor (2004) | 50 |
| Tabela 2.3 – Traços usados por Montedor (2004) para caracterização do material . | 51 |
| Tabela 2.4 – Variáveis das dosagens de Siqueira (2007) | 54 |
| Tabela 2.5 – Ensaio realizados por Siqueira (2007) | 55 |
| Tabela 2.6 – Dosagens, em massa, adotadas por Bellucio (2010) | 59 |
| Tabela 2.7 – Traço de referência em massa de Bellucio (2010) | 59 |
| Tabela 2.8 – Variáveis utilizadas por Siqueira e El Debs (2012)..... | 61 |
| Tabela 2.9 – Resultados dos ensaios de caracterização de Siqueira e El Debs (2012) | 62 |
| Tabela 2.10 – Resultados dos ensaios rigidez de almofada de Siqueira e El Debs (2012). Valores em MPa | 63 |
| Tabela 3.1 – Características do Cimento Portland utilizado (Fonte: HOLCIM S.A.).. | 65 |
| Tabela 3.2 – Propriedades da areia utilizada na pesquisa | 66 |
| Tabela 3.3 – Propriedades do látex utilizado na pesquisa (Fonte: CONSTRUQUIL) | 68 |
| Tabela 3.4 – Propriedades das fibras de polipropileno utilizadas (Fonte: BRASILIT- Saint Gobain) | 68 |
| Tabela 3.5 – Propriedades do superplastificante utilizado (Fonte: BASF – GLENIUM 51) | 69 |
| Tabela 4.1 – Traço em massa da argamassa modificada (AM) (BELLUCIO, 2010) . | 73 |
| Tabela 4.2 – Traço em massa da argamassa AM2..... | 74 |
| Tabela 4.3 – Traço em massa da argamassa AM3..... | 75 |
| Tabela 4.4 – Traço em massa da argamassa de referência (AR) (BELLUCIO, 2010) | 76 |
| Tabela 4.5 – Resumo das dosagens utilizadas para as argamassas..... | 76 |
| Tabela 4.6 – Dosagens dos concretos utilizados | 77 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 4.7 – Séries dos ensaios de compressão em ligações | 95 |
| Tabela 5.1 – Resultados médios dos ensaios de compressão nas argamassas (6 corpos de prova) | 100 |
| Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral nas argamassas (6 corpos de prova) | 101 |
| Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade das argamassas (6 corpos de prova) | 103 |
| Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios de rigidez de almofada nas argamassas (6 corpos de prova) | 106 |
| Tabela 5.5 – Resultados médios de Bellucio (2010) e da atual pesquisa nos ensaios de caracterização | 109 |
| Tabela 5.6 – Resultados sucintos dos ensaios de ligação de blocos | 130 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 25 |
| 1.1 Preliminares | 25 |
| 1.2 Objetivos | 28 |
| 1.3 Justificativas | 28 |
| 1.4 Metodologia..... | 29 |
| 1.5 Estrutura do trabalho..... | 29 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 31 |
| 2.1 Ligações em concreto pré-moldado submetidas à compressão | 31 |
| 2.2 Argamassas modificadas | 41 |
| 2.2.1 Fibras poliméricas..... | 42 |
| 2.2.2 Látex estireno-butadieno | 45 |
| 2.2.3 Vermiculita termo-expandida | 49 |
| 2.3 Pesquisas anteriores realizadas na Escola de Engenharia de São Carlos .. | 49 |
| 3. MATERIAIS UTILIZADOS..... | 65 |
| 3.1 Cimento Portland | 65 |
| 3.2 Areia..... | 65 |
| 3.3 Vermiculita termo-expandida..... | 67 |
| 3.4 Látex estireno-butadieno..... | 68 |
| 3.5 Fibras de polipropileno | 68 |
| 3.6 Aditivo superplastificante..... | 69 |
| 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL | 71 |
| 4.1 Dosagens | 72 |
| 4.1.1 Argamassas..... | 72 |
| 4.1.2 Concretos | 76 |
| 4.2 Ensaios de caracterização | 77 |

| | | |
|----------------|---|------------|
| 4.2.1 | Ensaio de compressão axial | 78 |
| 4.2.2 | Ensaio de tração por compressão diametral | 78 |
| 4.2.3 | Módulo de elasticidade | 78 |
| 4.2.4 | Rigidez de almofada | 79 |
| 4.3 | Montagem das amostras para ensaios de ligação de blocos | 80 |
| 4.4 | Ensaio de compressão em ligações | 86 |
| 5. | ANÁLISE DOS RESULTADOS | 99 |
| 5.1 | Ensaio de caracterização..... | 99 |
| 5.1.1 | Ensaio de compressão axial | 99 |
| 5.1.2 | Resistência à tração por compressão diametral | 101 |
| 5.1.3 | Módulo de elasticidade | 102 |
| 5.1.4 | Rigidez de almofada | 104 |
| 5.1.5 | Comparação com os resultados de Bellucio (2010)..... | 108 |
| 5.1.6 | Argamassa modificada utilizada nos ensaios de ligação | 110 |
| 5.2 | Ensaio de compressão em ligações | 110 |
| 5.2.1 | Influência da espessura das saliências no bloco de concreto..... | 112 |
| 5.2.2 | Influência da quantidade de saliências no bloco de concreto | 118 |
| 5.2.3 | Influência da variação de resistência dos blocos de concreto..... | 119 |
| 5.2.4 | Ensaio de compressão excêntrica..... | 120 |
| 5.2.5 | Ensaio com carregamento cíclico..... | 125 |
| 5.2.6 | Ligações com almofada aderida ao bloco inferior | 127 |
| 5.2.7 | Resumo das relações L/C para todas as séries analisadas..... | 129 |
| 6. | CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES | 131 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 135 |
| ANEXO A | | 139 |
| ANEXO B | | 141 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Preliminares

As ligações entre elementos de concreto pré-moldados submetidos à compressão são parte importante no projeto desse tipo de estrutura. Nas juntas, em função das imperfeições existentes nos elementos pré-fabricados, podem ocorrer concentração de tensões, reduzindo a vida útil da estrutura. Uma possibilidade de contornar esse problema é a utilização de uma almofada de apoio entre as peças ligadas, que distribuem uniformemente as tensões de compressão e proporcionam certa liberdade de deslocamentos horizontais e rotações.

A Figura 1.1a apresenta um exemplo de ligação com imperfeições na face ligada. Na Figura 1.1b tem-se a região de concentração de tensões e nas Figuras 1.1c e 1.1d são apresentadas ligações com almofada de apoio e a capacidade que esta tem de absorver as imperfeições.

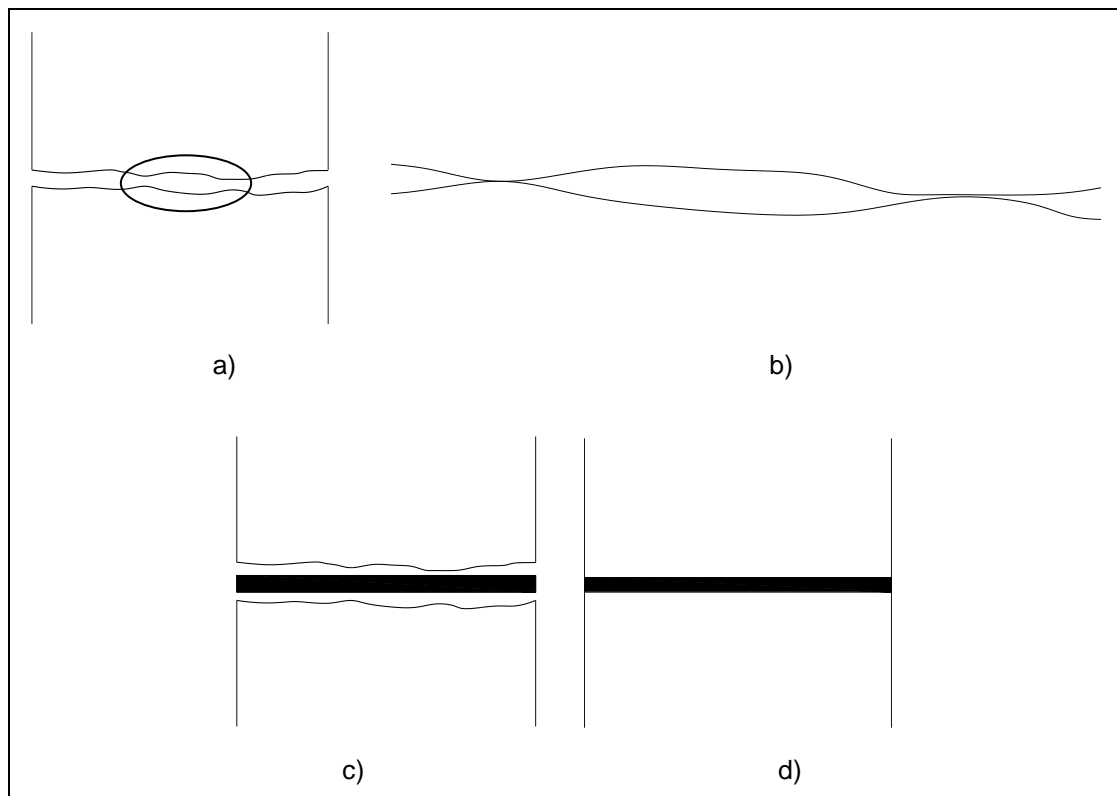


Figura 1.1– Ligações de concreto pré-moldado: a) Imperfeições superficiais dos elementos pré-moldados; b) Região de concentração de tensões; c) Ligação com almofada de apoio; d) Absorção das imperfeições superficiais pela almofada de apoio

As ligações com juntas a seco – sem elemento de apoio – necessitam de bom acabamento nas peças, boa resistência mecânica e qualidade de montagem. Alguns elementos tradicionais que podem ser usados como almofada de apoio são chapas chumbadas nas peças de concreto, argamassa moldada no local e as amplamente utilizadas almofadas de elastômeros.

Os principais fatores que influenciam na escolha por um sistema de ligação em uma estrutura de concreto pré-moldado são o custo, a disponibilidade e facilidade de instalação de determinado elemento de apoio, a intensidade do carregamento e as dimensões e resistência mecânica dos elementos ligados. Além desses, outro fator importante na escolha de um modelo de ligação é conhecer se há transmissão de momento fletor ou somente esforço normal.

Um exemplo de ligação à compressão excêntrica em estrutura pré-moldada de concreto é apresentado na Figura 1.2. Nele, utilizam-se almofada de apoio e chumbador metálico.

O desenvolvimento de uma argamassa modificada com a inclusão de adições especiais como látex estireno-butadieno, fibras curtas de polipropileno e vermiculita termo-expandida, que atribuem à mistura baixo módulo de elasticidade, boa resistência mecânica e alto poder de tenacidade, possibilitou a criação de um novo tipo de almofada de apoio, como as que estão mostradas na Figura 1.3. As pesquisas referentes a esse tema se concentram na Escola de Engenharia de São Carlos e vêm ocorrendo desde o final da década de noventa.

As primeiras pesquisas trataram de verificar as vantagens e desvantagens da aplicação da argamassa modificada como almofada de apoio, além de caracterizá-la e de analisar possíveis dosagens. Na sequência dos trabalhos, ocorreram estudos mais minuciosos sobre o emprego de novas variáveis e sobre o comportamento da ligação mediante este elemento de apoio.

As almofadas de apoio de compósito de cimento, em relação às almofadas de policloropreno, podem possuir custo inferior, rigidez pouco superior, maior resistência mecânica e melhor durabilidade.

Uma alternativa é incorporar a almofada de apoio a um dos elementos de concreto ligados, já no momento da moldagem deste bloco. Neste caso, a peça de concreto e a almofada de argamassa ficam solidarizadas a partir da desfôrma do concreto. Quando empregado em grande escala, esse processo pode agilizar a montagem das estruturas pré-fabricadas.

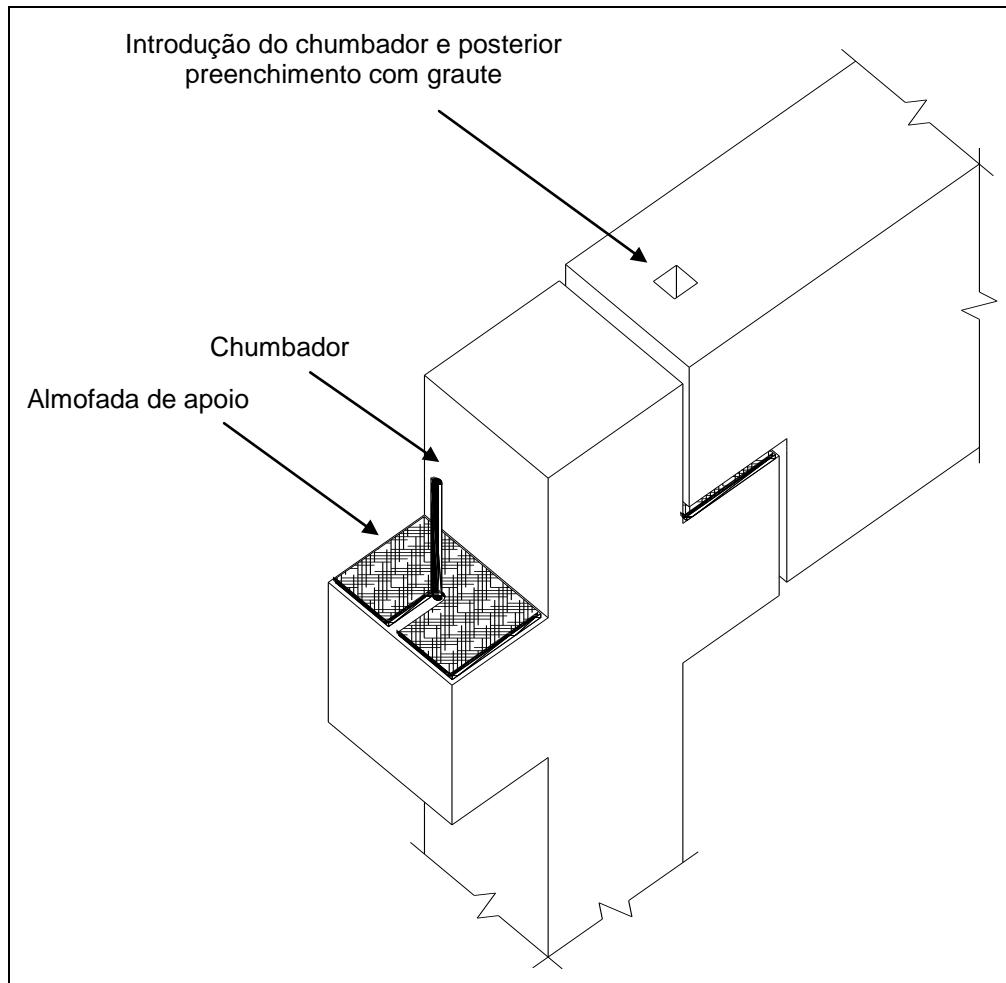


Figura 1.2 – Exemplo de ligação viga-pilar (Adaptado de FIB, 2008)



Figura 1.3 – Almofada de apoio de compósito de cimento

1.2 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o desempenho da almofada de argamassa modificada na transferência de tensões de compressão entre elementos pré-moldados de concreto ligados utilizando almofada de argamassa modificada.

Os objetivos específicos são:

- Verificar a diferença na resistência à compressão centrada e excêntrica quando da utilização ou não das almofadas de apoio no contato entre os elementos de concreto;
- Avaliar a influência de imperfeições superficiais nos blocos de concreto ligados no comportamento da almofada;
- Avaliar o comportamento da almofada de apoio para carregamentos de compressão em regime monotônico e cíclico;
- Verificar o desempenho da almofada de argamassa perante esforços de compressão quando esta for previamente solidarizada à face de contato do elemento inferior de concreto ligado;
- Analisar o comportamento da almofada de argamassa modificada mediante a utilização de blocos de concreto de diferentes classes de resistência mecânica.

1.3 Justificativas

Visando dar continuidade a trabalhos anteriores, a atual pesquisa tem como motivação os seguintes aspectos:

- Os estudos sobre almofadas de apoio de argamassa modificada são escassos, concentrando-se no Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos;
- As pesquisas, principalmente, de Montedor (2004), Siqueira (2007), El Debs et al. (2008) e Bellucio (2010) revelaram que o material tem capacidade de ser usado como elemento de apoio em ligações de concreto pré-moldado por apresentar, sobretudo, boa resistência à compressão e baixo módulo de elasticidade;
- A presença de rugosidades superficiais nos blocos conectados e de cargas de compressão excêntricas no conjunto foi pouco estudada;

- As análises sob regime cíclico ocorreram somente para as almofadas consideradas isoladas. Esse esforço de compressão para a ligação com almofada de apoio ainda não foi estudado;
- O comportamento da ligação para blocos de concreto de diferentes resistências mecânicas ainda é desconhecido;

1.4 Metodologia

Para o sucesso deste trabalho, prosseguiu-se a realização dos seguintes itens:

- Definição concreta do tema e dos objetivos da pesquisa;
- Leitura de ampla revisão bibliográfica dos temas referentes ao estudo em questão, partindo da ideia de dar continuidade a uma linha de pesquisa que já vem sendo desenvolvida no Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos desde o final da década de noventa. As leituras incluíram temas como ligações em estruturas de concreto pré-moldado, almofadas de apoio existentes no mercado, argamassas modificadas e seus agentes modificadores de propriedades, além de pesquisas anteriores desenvolvidas no instituto de ensino citado;
- Análise das propriedades dos materiais utilizados.
- Ensaio de caracterização dos agregados e das argamassas utilizadas, seguindo padronizações já existentes;
- Ensaio em modelos de ligação que simularam estruturas pré-fabricadas de concreto submetidas à carregamentos de compressão centrada e excêntrica com e sem almofada de apoio;
- Análise estatística dos resultados e apresentação das conclusões obtidas a partir das análises experimentais e estatísticas.

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho está organizado em função de sete capítulos e dois anexos, como segue:

- Capítulo 1: Introdução do tema da pesquisa, bem como seus objetivos, justificativas, metodologia e estrutura de apresentação;

- Capítulo 2: Apresentação de revisão bibliográfica sobre os temas pertinentes a este estudo;
- Capítulo 3: Apresentação e caracterização dos materiais utilizados nas análises experimentais;
- Capítulo 4: Proposta de programa experimental para a determinação das propriedades previamente não conhecidas de alguns agregados, bem como caracterização, mediante vários aspectos, das argamassas utilizadas e da confecção e execução dos modelos empregados nos ensaios de ligação;
- Capítulo 5: Apresentação e discussão dos resultados experimentais de caracterização das argamassas e ensaios de ligação em amostras de concreto;
- Capítulo 6: Descrição das conclusões obtidas nos ensaios de caracterização e ensaios de ligação, além de sugestões para trabalhos futuros;
- Capítulo 7: Apresentação das referências utilizadas durante a pesquisa;
- Anexos A e B: Tabelas com apresentação sucinta dos resultados dos ensaios de ligação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo que segue apresenta informações existentes na literatura sobre as ligações de concreto pré-moldado submetidas à compressão e sobre as adições especiais incorporadas à argamassa, além de apresentar conclusões obtidas em pesquisas anteriores semelhantes.

2.1 Ligações em concreto pré-moldado submetidas à compressão

As ligações entre os elementos de concreto pré-moldado são parte importante no projeto e na execução quando se opta por este tipo de solução estrutural. No dimensionamento dessas ligações, segundo o CEB (1990), os seguintes princípios devem ser garantidos:

- As articulações devem ser capazes de acomodar pequenos deslocamentos relativos;
- As ligações devem resistir aos carregamentos globais e locais;
- A estrutura deve apresentar robustez e estabilidade perante as tensões e deformações nas articulações;
- Devem ser previstas tolerâncias dimensionais de fabricação e montagem.

A transferência de tensões entre elementos de concreto pré-moldado pode ser com ou sem a inserção de material entre as partes ligadas. O código CEB (1990) afirma que o segundo caso somente pode ser realizado se houver grande controle e precisão de montagem na execução das peças. Nesse caso, raramente utilizado devido ao comportamento frágil do concreto, as tensões de compressão devem ser baixas. As imperfeições de produção existentes nas faces conectadas dos elementos pré-moldados geram concentração de tensões e/ou excentricidades não desejadas.

Ainda com relação às ligações com juntas a seco, a NBR 9062 – Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-moldado – (ABNT, 2006) recomenda que a tensão em casos onde o apoio está sujeito à rotação não deve ultrapassar 4,2% da resistência característica do concreto em contato ou 1 MPa. Já em peças onde for

assegurada a não rotação do apoio, o valor máximo de tensão que se permite haver nas juntas é 6% da resistência característica ou 1,5 MPa, o que for menor.

O FIB Bulletin 43 – Structural connections for precast concrete buildings: guide to good practice – (FIB, 2008) afirma que ligações com juntas a seco podem ser usadas em lajes, onde a tensão de compressão deve ser limitada a aproximadamente 0,2 ou 0,3 MPa.

O Precast Concrete Institute (PCI Design Handbook, 2010) atesta o uso de almofadas de apoio entre os elementos de concreto pré-moldado de modo a distribuir as cargas concentradas sobre a área de contato das partes e permitir pequenos deslocamentos horizontais e rotações, promovendo certo alívio de tensões. Além disso, o PCI Design Handbook (2010) recomenda ainda que a espessura mínima da almofada de apoio deva ser de $\frac{3}{8}$ " (9,52 mm), exceto para ligação com lajes maciças e alveolares.

As almofadas de apoio dispostas nas juntas de concreto pré-moldado, de acordo com o FIB Bulletin 43 (FIB, 2008), devem:

- Distribuir corretamente as cargas verticais;
- Evitar qualquer tipo de contato entre os elementos de concreto pré-moldado;
- Ser instaladas mantendo distância entre as bordas das peças ligadas;
- Transmitir esforços horizontais.

O preenchimento com argamassa moldada no local nas juntas dos elementos de concreto pré-moldado é uma alternativa, entretanto apresenta os inconvenientes de se restringir a baixos valores de tensão de compressão e exigir trabalhos adicionais. Nesse caso, a NBR 9062 (ABNT, 2006) deixa claro que a tensão de contato entre os elementos não deve ser superior a 5 MPa e que a resistência média da argamassa à compressão deve ser maior ou igual a 30 MPa.

Vambersky (1990) afirma que em juntas de argamassa de concreto pré-moldado a ruína pode se dar por esmagamento da argamassa ou por fraturamento (estilhaçamento) do concreto adjacente. Além disso, Vambersky (1990) aponta que a capacidade resistente da ligação de concretos de alta resistência pode não ser completamente utilizada devido ao limite de resistência mecânica da argamassa utilizada na junta.

Baseado nesses princípios, Vambersky (1990) propôs uma atualização para uma equação que avalia a capacidade resistente de juntas de argamassa em ligações de concreto pré-moldado (β_f) e que é apresentada na Equação 2.1.

$$\beta_f = \eta_0 * \alpha * \beta_p \quad (\text{Equação 2.1})$$

onde:

β_p = Menor resistência à compressão dos elementos adjacentes de concreto;

η_0 = Fator de redução relacionado à área da junta;

α = Fator de eficiência da junta (Equação 2.2):

$$\alpha = K * \frac{5(1 - K) + \delta^2}{5(1 - K) + K * \delta^2} \quad (\text{Equação 2.2})$$

onde:

δ = Razão entre a menor largura da junta de compressão e sua espessura;

K = Razão entre resistência à compressão da argamassa da junta e a menor resistência à compressão do concreto adjacente, modificado pelo fator η_m , como segue na Equação 2.3:

$$K = \frac{\eta_m * \beta_m}{\beta_p} \quad (\text{Equação 2.3})$$

onde:

β_m = Resistência à compressão da junta da argamassa;

η_m = Fator de redução proposto por Vambersky (1990) e que leva em consideração a qualidade da argamassa utilizada na junta. É igual a:

- 0,75, se a qualidade da argamassa é avaliada através de confecção de corpos de prova moldados no local da obra, mantidos em condições ambientais controladas e ensaiados aos 28 dias;
- 1,0, se a qualidade da argamassa é avaliada através de ensaios em amostras extraídas da junta.

Para o fator η_0 , Vambersky (1990) propôs três classificações, como segue:

- $\eta_0 = 0,9$ para argamassa fluida inserida na junta após a moldagem dos elementos pré-moldados;

- $\eta_0 = 0,7$ para argamassa seca inserida na junta após a moldagem dos elementos pré-moldados;
- $\eta_0 = 0,3$ para elemento pré-moldado colocado sobre argamassa já existente.

Para Sai et al. (2001), os compósitos cimentícios que podem ser usados como elemento de apoio em juntas de concreto pré-moldado são as argamassas, os grautes e os concretos finos. Para argamassas e grautes, as espessuras das juntas devem ser de cerca de 10 a 30 mm e para os concretos com agregados de granulometria fina essas espessuras devem ser de 30 a 50 mm.

Predominantemente em juntas cimentícias muito espessas, Sai et al. (2001) aponta que possíveis diferenças entre as propriedades elásticas do concreto e do material de apoio podem reduzir a capacidade portante da ligação. Isso pode conduzir a geração de tensões e deformações elevadas e indesejadas no sistema de ligação. A Figura 2.1 relata esse problema.

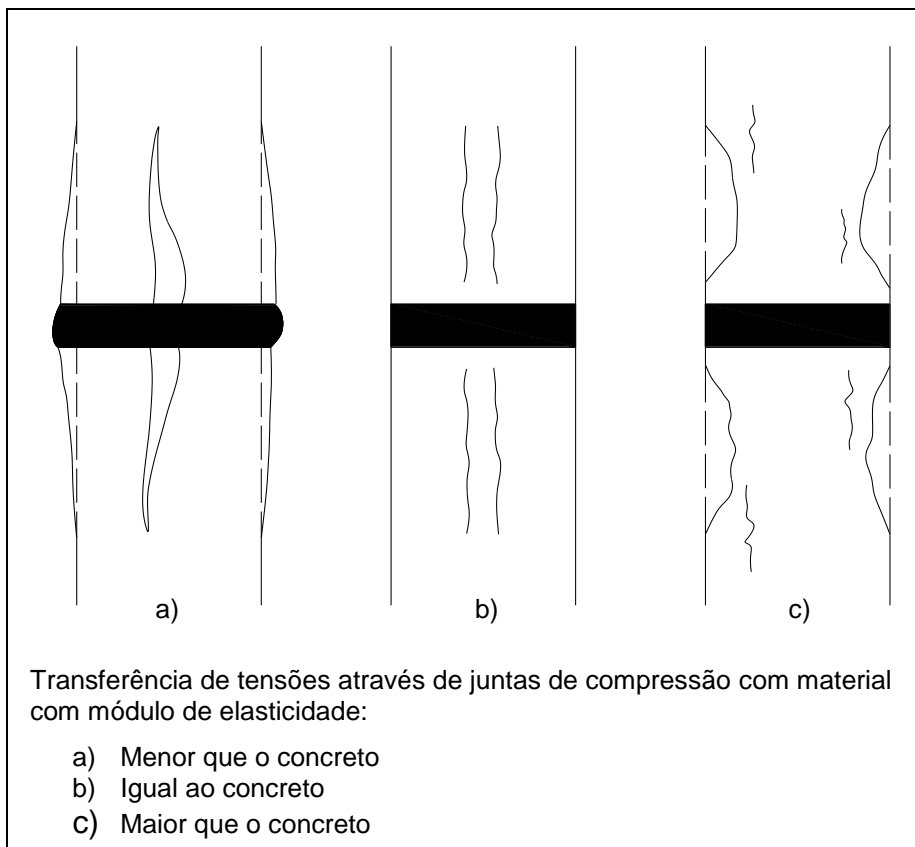


Figura 2.1 – Transferência de tensões entre elementos pré-moldados em função das diferenças nas propriedades elásticas do concreto e do material de apoio (Adaptado de Sai et al. (2001))

Barboza e El Debs (2006) investigaram o comportamento de ligações em elementos de concreto pré-moldado através do emprego de argamassa moldada no

local. Os pesquisadores moldaram blocos de concreto simulando estruturas de concreto pré-moldado. Entre os blocos foram lançadas as argamassas. As variáveis utilizadas foram, entre outros, o tipo de material de preenchimento (três tipos de graute, argamassa seca e sem material algum), a espessura da camada de argamassa (15 mm, 22,5 mm e 30 mm), a relação resistência da argamassa (f_m) / resistência do concreto (f_c) ($f_m < f_c$, $f_m = f_c$ e $f_m > f_c$) e a resistência à compressão do concreto (35 MPa e 60 MPa). Os blocos de concreto possuíam seção transversal quadrada de 175 mm x 175 mm e os corpos de prova (bloco-argamassa-bloco) foram carregados à compressão.

Ao final dos experimentos, Barboza e El Debs (2006) concluíram que a presença da argamassa lançada *in loco* aumentou a resistência final do conjunto. A espessura de junta que apresentou melhor desempenho, de 22,5 mm, proporcionou um aumento de cerca de 55% na resistência à compressão do corpo de prova. Segundo os autores, a espessura de 15 mm torna difícil o lançamento e compactação da mistura no estado fresco e o surgimento de bolhas de ar são prováveis, o que acaba por diminuir a resistência dessa junta. Na Figura 2.2 pode ser vista a influência da espessura da junta de argamassa no comportamento do modelo após ensaio de compressão.

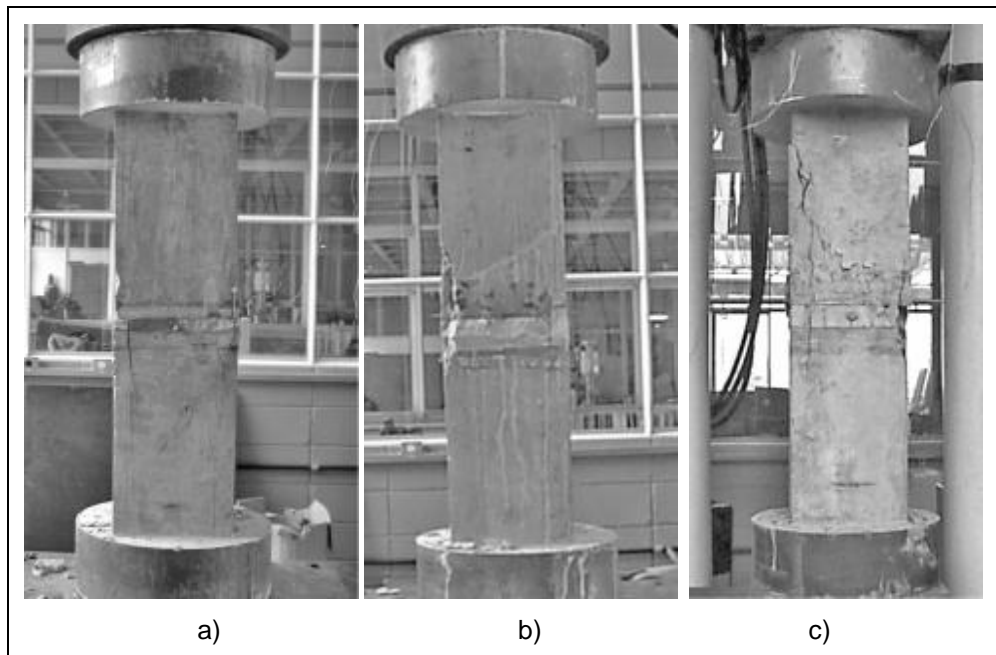


Figura 2.2 – Influência da espessura da junta de argamassa nos modelos de ligação de Barboza e El Debs (2006)

Os ensaios apontaram também que a resistência final do conjunto foi proporcional ao aumento da relação resistência à compressão da argamassa / resistência à compressão do concreto. Já a resistência do concreto interferiu no rendimento da amostra mesmo quando a relação f_m / f_c é baixa (0,7), pois o ensaio com o concreto de 60 MPa proporcionou um ganho de mais de 26% da resistência final em relação ao concreto de 35 MPa.

Barboza e El Debs (2006) descobriram também que a argamassa seca, ou Dry Pack, proporcionou um aumento de quase 25% em relação ao graute, testado para mesma espessura, mesma razão f_m / f_c e mesma resistência do concreto.

Outro tipo de ligação, atestada pela FIB (2008), é através do emprego de placas de aço, configurando uma ligação com material rígido. Nesse sistema, há o embutimento de uma chapa de aço, de dimensões a e b , nas faces das peças de concreto pré-moldado que são ligadas. Entre as peças apoia-se outra almofada rígida de aço, de dimensões a_0 e b_0 . Segundo a FIB (2008), não há estudos suficientes que indicam as dimensões das chapas que devem ser utilizadas, entretanto a publicação destaca que a e b devem ser superiores a a_0 e b_0 e que a dimensão de a_0 e b_0 no sentido da rotação não deve ser maior que 150 mm. A Figura 2.3 retrata esse tipo de ligação.

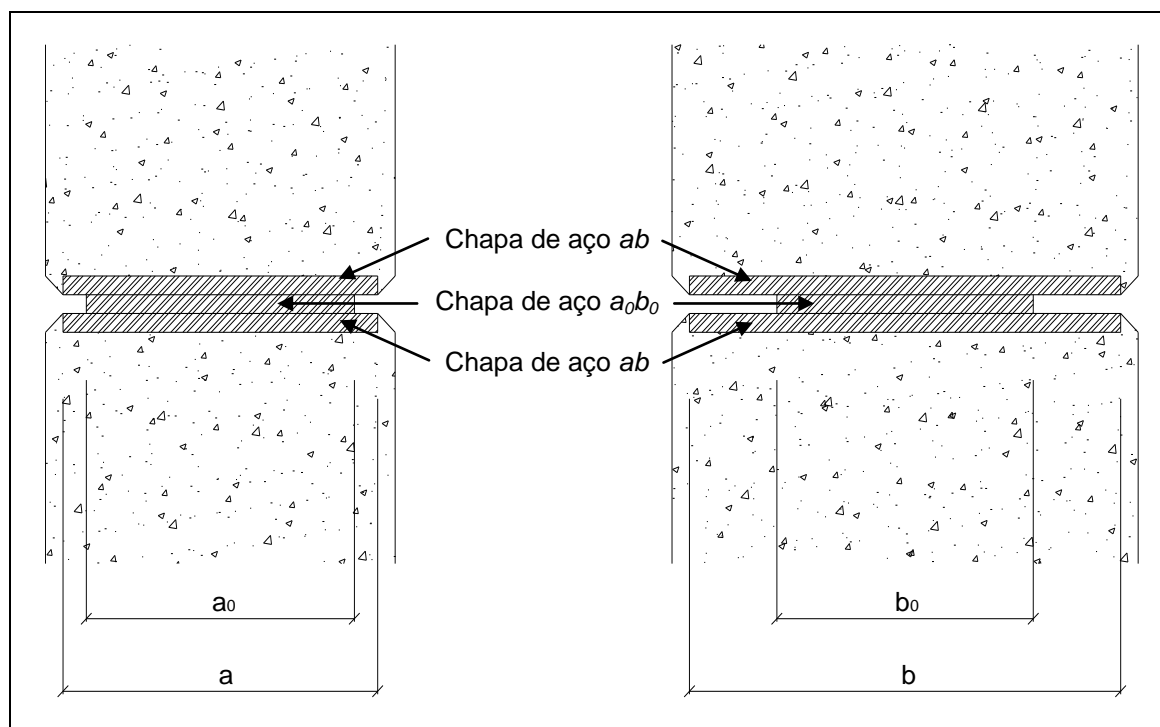


Figura 2.3 – Ligação com material rígido (Adaptado de FIB (2008))

A FIB (2008) informa ainda que o uso de chapas de aço como almofada de apoio é limitado em função do alto custo, baixa capacidade de absorver rotações e alto coeficiente de atrito. São especialmente usados quando se deseja uma pequena área de apoio.

Atualmente, o meio mais utilizado é a inclusão de um material flexível à base de policloropreno, conhecido comercialmente como neoprene. Esse tipo de almofada de apoio apresenta, segundo El Debs (2000), módulo de elasticidade muito baixo (da ordem de 0,0001 vezes o do concreto), o que é fundamental a um material nestas condições, pois deve apresentar boa capacidade de deformar-se sem romper. Além disso, proporciona certa liberdade de deslocamentos horizontais e rotações, possibilitando alívio de tensões na região em contato. Entretanto, a almofada de apoio de policloropreno tem como desvantagens durabilidade inferior a do concreto e baixa resistência à compressão e a altas temperaturas.

Um sistema empregado quando há grandes tensões de compressão e se deseja aumentar a rigidez axial, diminuindo a deformação lateral do elemento de apoio, é a almofada de apoio de elastômero cintado, ou seja, o neoprene enrijecido com chapas de aço. O elemento de apoio pode ser composto de várias camadas formadas por almofadas de policloropreno e chapas de aço intercaladas entre si, como mostra a Figura 2.4.

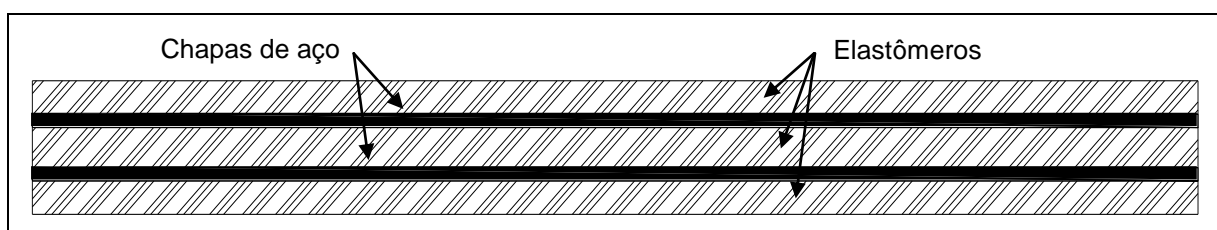


Figura 2.4 – Almofada de apoio de elastômero cintado

De acordo o PCI Design Handbook (2010), outra forma de reforçar, aumentando a resistência à compressão e diminuindo a expansão lateral do neoprene, é através do emprego de fibras misturadas aleatoriamente ao policloropreno. Nesse sistema, há, entretanto, redução da capacidade de absorção de rotações e de deslocamentos horizontais, além da perda de isotropia da almofada de apoio.

Outra alternativa de reforço aos elastômeros de policloropreno submetidos à grandes carregamentos de compressão, segundo o PCI Design Handbook (2010), é

com um material conhecido como Cotton Duck – um tecido com elevada massa específica e feito a partir de fibras de algodão.

Variando a geometria das almofadas e intercalando camadas de Cotton Duck ao neoprene, Lehman et. al. (2003) verificaram que o módulo de elasticidade da almofada foi de, no máximo, sete vezes superior à sua resistência à compressão (que variou de 48 a 138 MPa), apresentando relativamente boa resistência mecânica e alta deformabilidade. Entretanto, para carregamentos de longa duração, que levaram em consideração a fluência da almofada, essa relação sobe para quase dezessete.

Nos países de clima frio são utilizadas também almofadas de apoio de borracha natural (poliisopreno), que, segundo Yura et al. (2001), possuem temperatura de cristalização inferior ao neoprene ($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o poliisopreno e $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o policloropreno). Após a temperatura ambiente atingir ou se aproximar destes valores, o material passa a ter um comportamento frágil, o que não é desejável para as almofadas de apoio.

Bairán e Cladera (2014) realizaram uma investigação a respeito do colapso de uma viga pré-fabricada de seção Y durante a construção de um ginásio de esportes. Elastômeros de policloropreno foram utilizados como elemento de apoio para as vigas pré-moldadas e, visando aumentar a rigidez lateral destas, foram instaladas ancoragens na parte inferior das peças. A Figura 2.5 apresenta a seção transversal da viga e um corte que indica a disposição dos elementos estruturais.

As almofadas de policloropreno possuíam largura no sentido transversal ao carregamento de 150 mm e no sentido longitudinal ao carregamento de 220 mm; a espessura era de 15 mm.

Uma análise realizada antes da execução indicou um coeficiente de segurança global igual a 2,67, mas que não levava em consideração os efeitos de segunda ordem.

Sobre os banzos das vigas Y era apoiada a cobertura do ginásio. Momentos após realizar o apoio da abóboda de cobertura sobre a flange b da seção da viga e logo após um operário subir até o topo do elemento, a mesma veio a ruína completa, tombando em direção a região da excentricidade e partindo-se em duas. A cobertura no banzo a ainda não havia sido instalada. Não havia carga considerável de vento, então essa hipótese foi descartada como causa do colapso da estrutura.

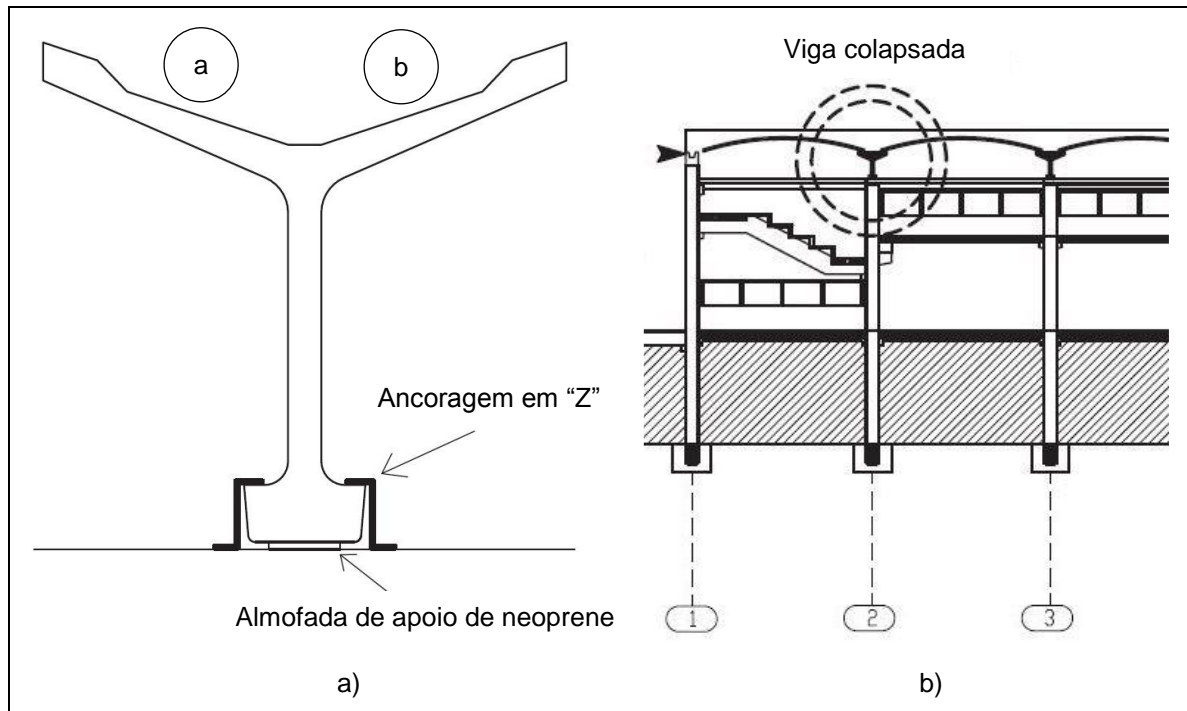


Figura 2.5 – a) Seção transversal da viga analisada por Bairán e Cladera (2014); b) Corte indicando a posição da viga colapsada

Segundo Bairán e Cladera (2014), a incorreta instalação dos elastômeros de neoprene foi a causa da origem dos esforços de torção e conseqüentemente da ruína da estrutura.

A ancoragem em forma de Z na extremidade inferior da viga pode não ter sido adequada. Entretanto, os autores do estudo de caso afirmam veementemente que a principal causa do colapso da viga foi a falta de resistência à rotação lateral causada pelo emprego incorreto da almofada de apoio. Essa baixa rigidez é atribuída a erros no projeto ou na execução da ligação.

Como no caso da análise de Bairán e Cladera (2014), esses efeitos de segundo ordem podem não ser previstos no coeficiente de segurança adotado. De acordo com os pesquisadores, dever-se-ia tentar aumentar a rigidez lateral da viga, utilizando almofadas de apoio mais rígidas.

O desenvolvimento de um novo material à base de argamassa de cimento e areia modificada com a adição de látex estireno-butadieno, fibras de polipropileno e vermiculita (agregado leve) para ser usado como almofada de apoio entre elementos de concreto pré-moldado já vem sendo realizado há alguns anos no Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos. Nesse

material, em função da presença de fibras dispostas aleatoriamente em meio ao compósito, a isotropia também não é garantida.

El Debs et al. (2003) classificam as conexões entre elementos de concreto pré-moldado em dois grupos, o que pode interferir na escolha por um tipo de material de apoio, como segue:

- Grupo 1: Elementos que não transmitem grandes esforços de compressão, apresentam momento fletor e necessitam permitir pequena rotação do apoio. São exemplos desse tipo de ligação: viga-pilar, laje-viga e laje-parede (Figura 2.7a);
- Grupo 2: Elementos que transmitem grandes esforços de compressão, não transmitem momento fletor e não necessitam apresentar condições de rotação nas vinculações. São exemplos: pilar-pilar, parede-parede, pilar-fundação (Figura 2.7b).

Em elementos onde há transmissão de momento fletor (Grupo 1), a opção por determinado tipo de elemento de apoio pode levar em consideração também a rigidez da ligação. Publicações como a FIB (2008) e a NBR 9062 (ABNT, 2006) classificam essas conexões, respectivamente com maior e menor capacidade de absorver rotações, em flexíveis, semirrígidas e rígidas, como indicado por El Debs (2000) na Figura 2.8, onde “M” indica o momento fletor transferido e “ Φ ” a rotação relativa.

Para valores de momento fletor igual a zero, tem-se uma articulação perfeita e para valores de rotação igual a zero, tem-se um caso de ligação perfeitamente rígida. Os dois casos intermediários, retratados pelas curvas em destaque do gráfico da Figura 2.8, representam as ligações semirrígidas, onde somente parte do momento fletor é absorvido pela ligação. Em casos de ligação com fraca rigidez inicial há, segundo El Debs (2000), a acomodação inicial de alguns elementos constituintes do sistema de apoio, como parafusos ou pinos não ajustados e/ou elastômeros ou chumbadores.

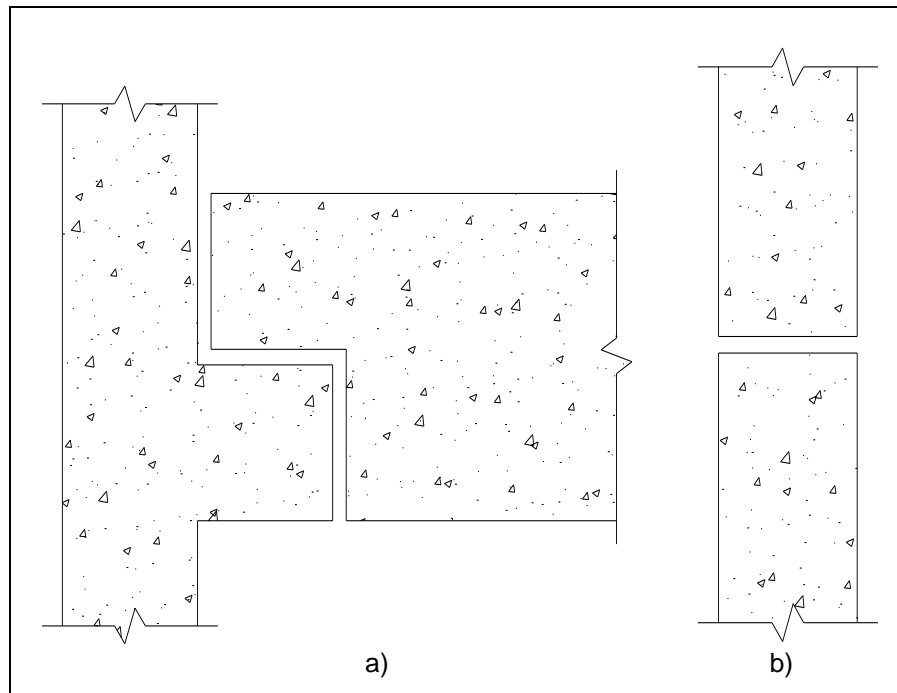


Figura 2.6 – Ligação: a) Viga-pilar; b) Pilar-pilar

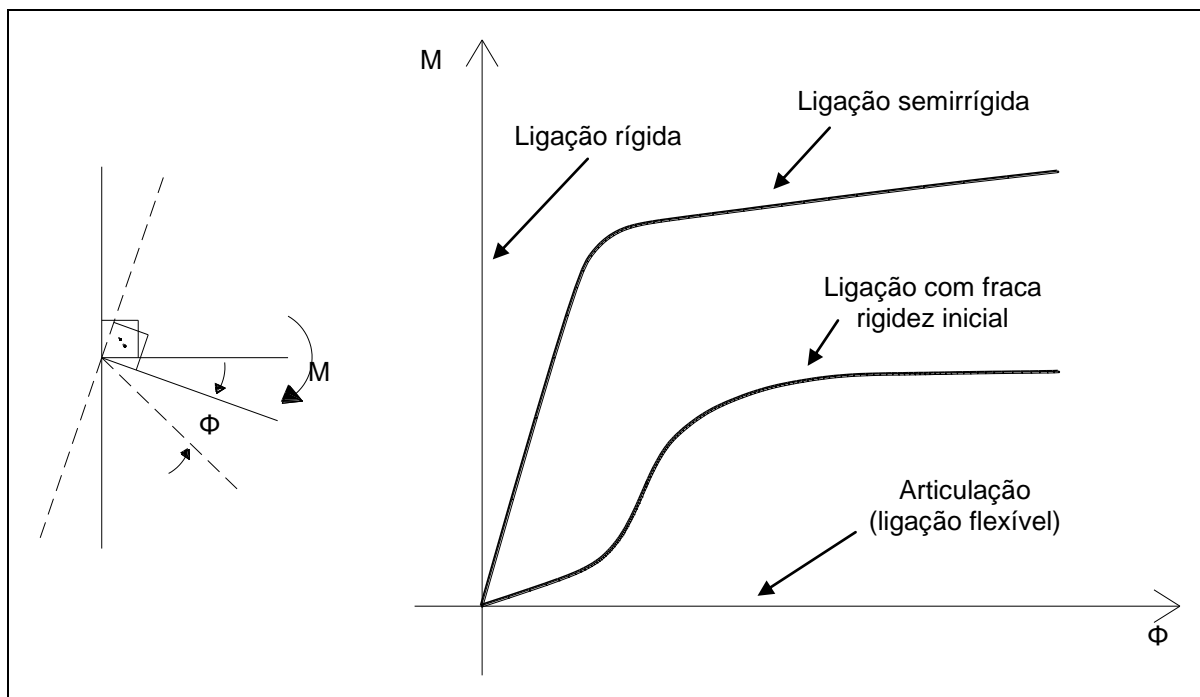


Figura 2.7 – Tipos de rigidez em ligações em função do momento fletor (EL DEBS, 2000)

2.2 Argamassas modificadas

Os compósitos cimentícios modificados são conseguidos com a adição de materiais especiais, os quais fornecem características particulares à mistura no estado endurecido. Em geral, as propriedades mais desejadas quando da

incorporação de aditivos especiais são elevada resistência mecânica, alto ou baixo módulo de elasticidade, alta deformabilidade, alta ou baixa permeabilidade, entre outros.

Esse capítulo apresenta uma revisão bibliográfica da literatura sobre as fibras poliméricas, látex estireno-butadieno e vermiculita termo-expandida e as características incorporadas à mistura através da adição desses materiais.

2.2.1 Fibras poliméricas

Feldman (1989) classifica as fibras poliméricas aptas para aplicação em concretos e argamassas em dois grupos:

- Grupo a: Fibras com baixo módulo de elasticidade e alta capacidade de deformação. São exemplos: poliamida, polipropileno e polietileno – são as mais indicadas para adição em argamassas onde se deseja alta deformabilidade;
- Grupo b: Fibras com alta resistência mecânica e alto módulo de elasticidade. São exemplos: aço, vidro e carbono – por apresentarem baixa deformabilidade não são indicadas para argamassas onde se deseja boa característica de tenacidade.

Segundo Bentur e Mindess (1990), a presença de fibras na argamassa fornece ao compósito uma maior resistência à tração na flexão, maior capacidade de deformação e aumento de tenacidade, entretanto pode tornar o material anisotrópico.

A Tabela 2.1 apresenta as propriedades de várias fibras poliméricas possíveis de serem utilizadas em concretos e argamassas.

As fibras de polipropileno são produzidas a partir de uma resina de polipropileno e podem assumir várias formas e tamanhos. Suas principais vantagens são boa resistência à álcalis, alto ponto de fusão (165°C) e baixo custo. Já as desvantagens são baixa resistência ao fogo, sensibilidade à luz solar e ao oxigênio, baixo módulo de elasticidade e baixa aderência com a matriz de cimento (BENTUR E MINDESS, 1990).

Balaguru e Shah (1992) afirmam existir fibras de polipropileno formadas por filamentos únicos e filamentos fibrilados, mas que o primeiro caso proporciona maior resistência mecânica se orientadas de forma correta, visto que se dispostas na

forma de grelha ou forma aleatória não há bom aproveitamento das propriedades mecânicas desse material.

Tabela 2.1 – Propriedades das fibras poliméricas (BENTUR e MINDESS, 1990)

| Tipo de fibra | Diâmetro (µm) | Peso específico (kg/dm ³) | Resistência à tração (GPa) | Módulo de elasticidade (GPa) | Elongação última (%) |
|----------------|---------------|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------|
| Acrílica | 20 – 350 | 1,16 – 1,18 | 0,2 – 1,0 | 14 – 19 | 10 – 50 |
| Aramida | 10 – 12 | 1,44 | 2,3 – 3,5 | 63 – 120 | 2 – 4,5 |
| Carbono (PAN) | 8 – 9 | 1,6 – 1,7 | 2,5 – 4,0 | 230 – 380 | 0,5 – 1,5 |
| Carbono (Pich) | 9 – 18 | 1,6 – 1,21 | 0,5 – 3,1 | 30 – 480 | 0,5 – 2,4 |
| Náilon | 23 – 400 | 1,14 | 0,75 – 1,0 | 4,1 – 5,2 | 16 – 20 |
| Poliéster | 10 – 200 | 1,34 – 1,39 | 0,23 – 1,2 | 10 – 18 | 10 – 50 |
| Polietileno | 25 – 1000 | 0,92 – 0,96 | 0,08 – 0,6 | 5 | 3 – 100 |
| Polioléfina | 150 – 635 | 0,91 | 275 | 2,7 | 15 |
| Polipropileno | 20 – 400 | 0,9 – 0,95 | 0,45 – 0,76 | 3,5 – 10 | 15 – 25 |
| PVA | 14 – 650 | 1,3 | 0,8 – 1,5 | 29 – 36 | 5,7 |
| Aço | 100 – 1000 | 7,84 | 0,5 – 2,6 | 210 | 0,5 – 3,5 |

Com relação aos procedimentos de produção de concretos e argamassas modificadas com fibras poliméricas, Balaguru e Shah (1992) afirmam que grandes teores de fibra podem dificultar a trabalhabilidade e que, após o lançamento das fibras à mistura no estado fresco, esta deve ser misturada por pelo menos mais 10 minutos. As fibras devem ser o último componente adicionado ao misturador. Misturas exageradamente fluidas, devido à possível baixa massa específica de alguns tipos de fibras, podem produzir segregação, pois as fibras tendem a flutuar sobre a camada exsudada da água de amassamento (BALAGURU e SHAH, 1992).

O comportamento à fadiga, como afirmam Balaguru e Shah (1992), para concretos e argamassas contendo fibras de polipropileno, polietileno ou náilon é melhorado, não como para misturas contendo fibras de aço, mas segundo os autores há uma contribuição significativa na resistência mecânica do compósito para solicitações repetitivas.

Uma pesquisa realizada por Mehdipour et al. (2013) apresenta, entre outros, resultados de ensaios experimentais de resistência à compressão, resistência à tração e resistência à flexão em compósitos de cimento. Os autores utilizaram fibras

de polipropileno de 6 mm e 12 mm de comprimento e 0,02 mm de diâmetro em proporções de 0,1%, 0,3%, 0,5% e 0,7% sobre o volume total da mistura, além de variar o teor de água entre alto (H series) e baixo (L series). Os resultados de resistência à compressão (Figura 2.9), tração (Figura 2.10) e flexão (Figura 2.11) foram mostrados em função do fator de fibra, que é igual ao produto da razão comprimento / diâmetro da fibra e a proporção empregada na mistura.

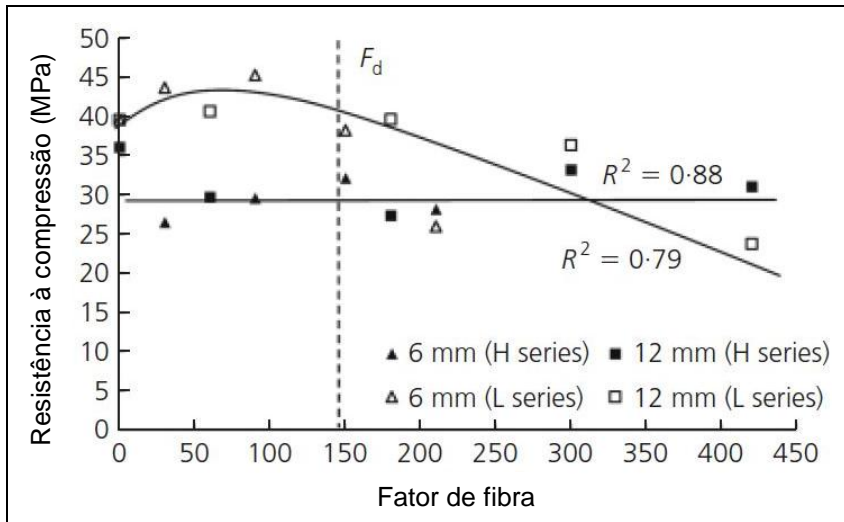


Figura 2.8 – Resistência à compressão das dosagens de Mehdipour et al. (2013)

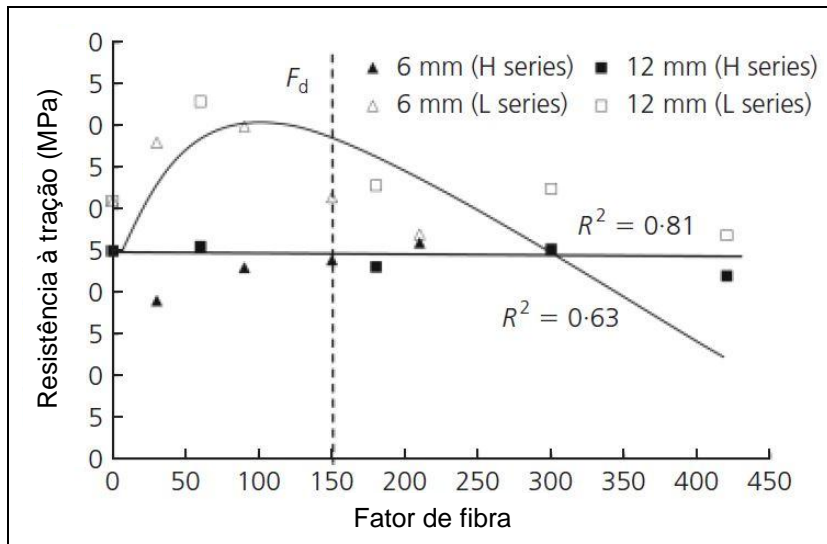


Figura 2.9 – Resistência à tração das dosagens de Mehdipour et al. (2013)

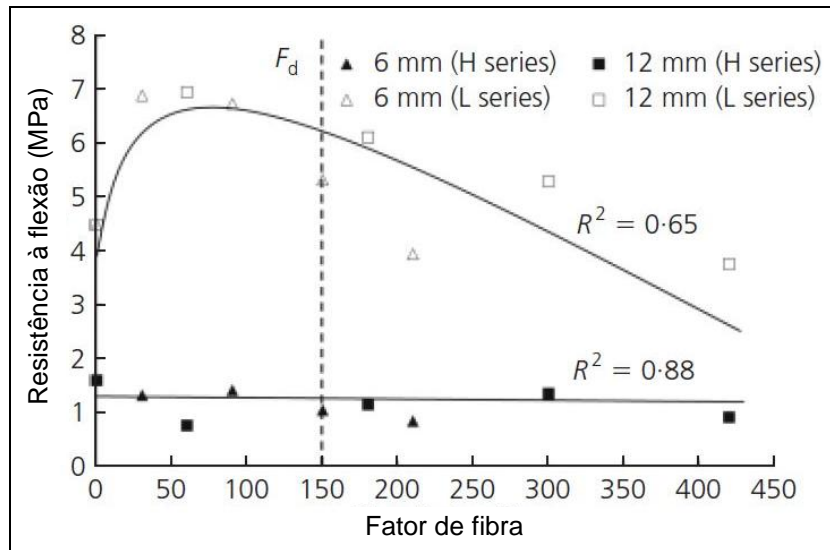


Figura 2.10 – Resistência à flexão das dosagens de Mehdipour et al. (2013)

O fator de fibras considerado ideal pelos pesquisadores foi igual a 150 e está indicado pela barra vertical tracejada presente nos gráficos. O teor de fibras julgado adequado representa a quantidade de 0,5% sobre a massa do cimento para fibras 6 mm de comprimento e 0,3% para fibras com comprimento igual a 12 mm.

Os ensaios de Mehdipour et al. (2013) mostraram que os valores de resistência à compressão independeram do comprimento das fibras, mas sofreram pequenos acréscimos com o aumento do seu volume. Os valores de resistência à tração e flexão tiveram aumento mais acentuado, em relação à resistência à compressão, com o incremento de fibras. Todos os ensaios experimentais confirmaram que um valor elevado de fibras resultava em decréscimo da resistência à compressão, tração e flexão, pois as amostras apresentaram defeitos de compactação devido à má trabalhabilidade da mistura no estado fresco, imposta pela adição de fibras.

Como a almofada de argamassa é disposta entre as peças das estruturas de concreto pré-moldado, e estas estão sujeitas a irregularidades, o material deve possuir grande capacidade de deformação, para poder se adequar às superfícies conectadas. As fibras, em princípio, conseguem atribuir essa propriedade às almofadas de apoio.

2.2.2 Látex estireno-butadieno

O látex, um composto polimérico – mistura à base de polímeros – é capaz de melhorar algumas propriedades do compósito cimentício, tais como resistência

mecânica, deformabilidade (redução do módulo de elasticidade), permeabilidade e durabilidade (OHAMA, 1998). O látex estireno-butadieno é um dos mais usados e indicados como aglomerante hidráulico em concretos e argamassas.

Kim e Park (2012) realizaram um estudo onde, entre outros, testaram a trabalhabilidade, a resistência à compressão e a resistência à flexão para amostras de concreto contendo látex estireno-butadieno como variável. O látex usado na pesquisa foi uma emulsão com 49% de polímero e as proporções em relação à massa do cimento foram de 0%, 5%, 10% e 15%. O traço utilizado possuía relação água / aglomerante igual a 0,35 e as dosagens possuíam quantidades fixas de fibras de PVA ou polipropileno.

Os resultados dos ensaios de trabalhabilidade (slump test) estão representados na Figura 2.12.

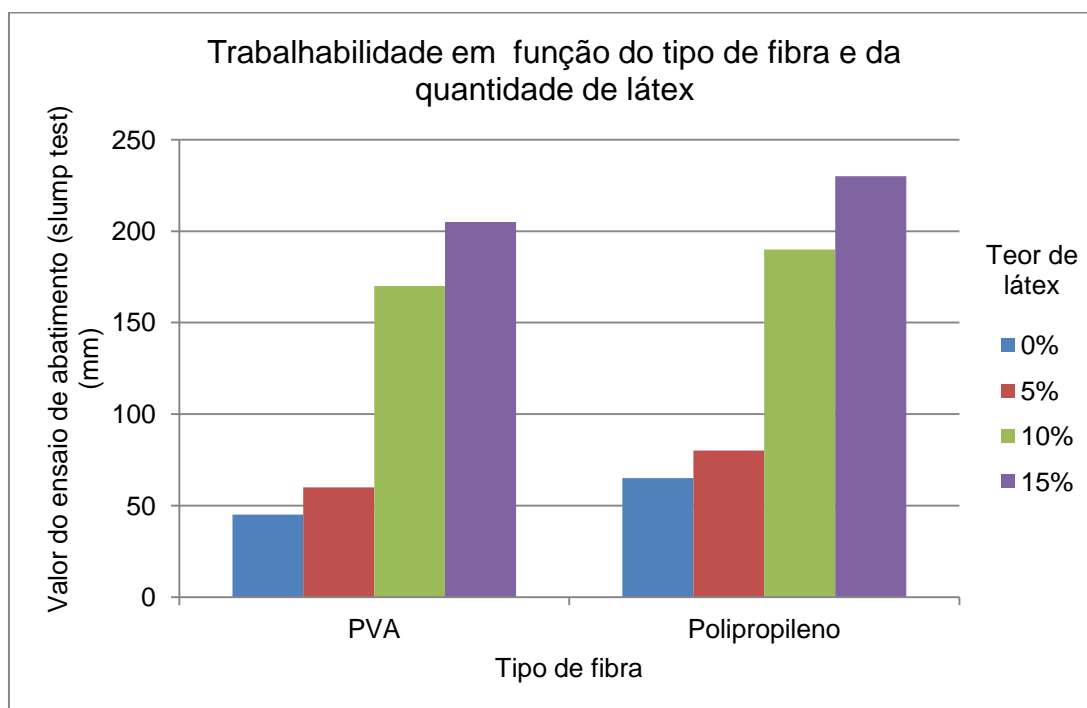


Figura 2.11 – Valores de abatimento nos ensaios de Kim e Park (2012)

Os ensaios de abatimento realizados por Kim e Park (2012) demonstraram a melhora na trabalhabilidade de concretos e argamassas quando o látex estireno-butadieno é adicionado à mistura fresca, o que já era esperado, pois o látex é uma emulsão que contém grande parte de água. Além do mais, as misturas com fibras de polipropileno apresentaram maiores valores de abatimento em comparação às fibras de PVA.

A Figura 2.13 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados por Kim e Park (2012).

Observando-se a Figura 2.13, nota-se que o aumento da resistência mecânica foi inversamente proporcional ao acréscimo de látex estireno-butadieno, o que, segundo os autores, se deve a demora na reação de hidratação do concreto que ocorre mediante o uso do polímero. Além disso, observa-se também que as fibras de polipropileno apresentam desempenho ligeiramente inferior ao concreto com fibras de PVA.

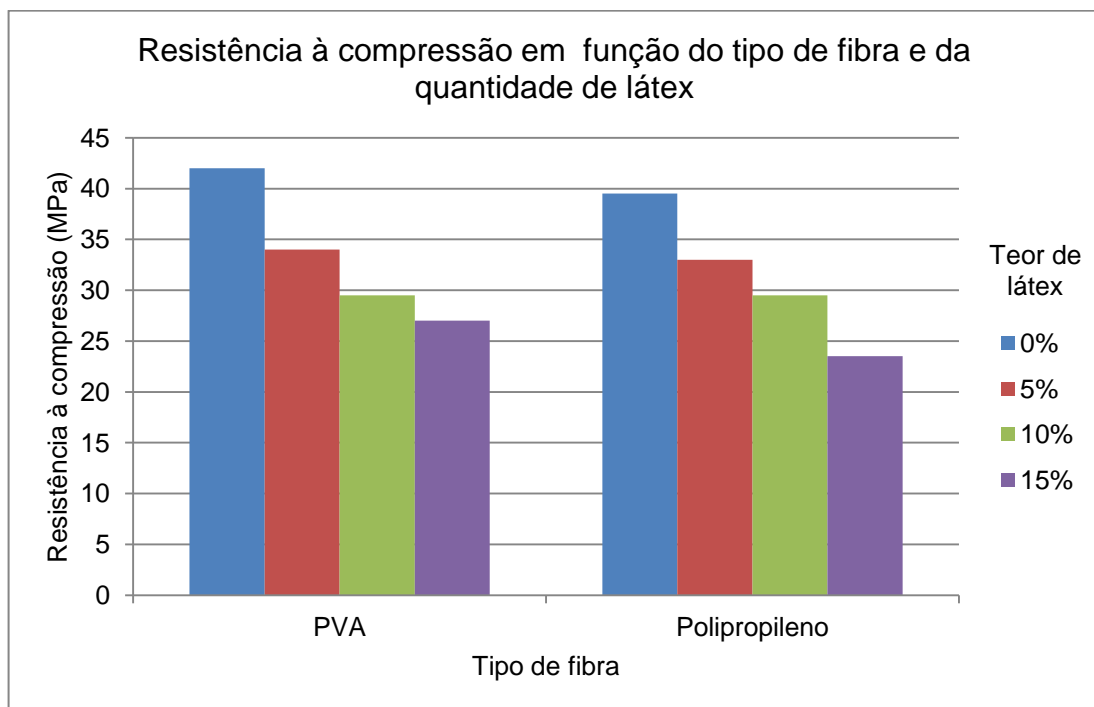


Figura 2.12 – Resistência à compressão nos ensaios de Kim e Park (2012)

Os resultados de resistência à flexão para os prismas ensaiados estão dispostos na Figura 2.14.

Através da Figura 2.14 observa-se que o látex conseguiu atribuir um aumento na resistência à flexão e, segundo os autores, também na resistência à tração do compósito no estado endurecido. Isso ocorre devido a formação de uma película de látex que melhora a resistência de adesão entre os componentes da mistura quando sujeita a esforços de flexão ou tração.

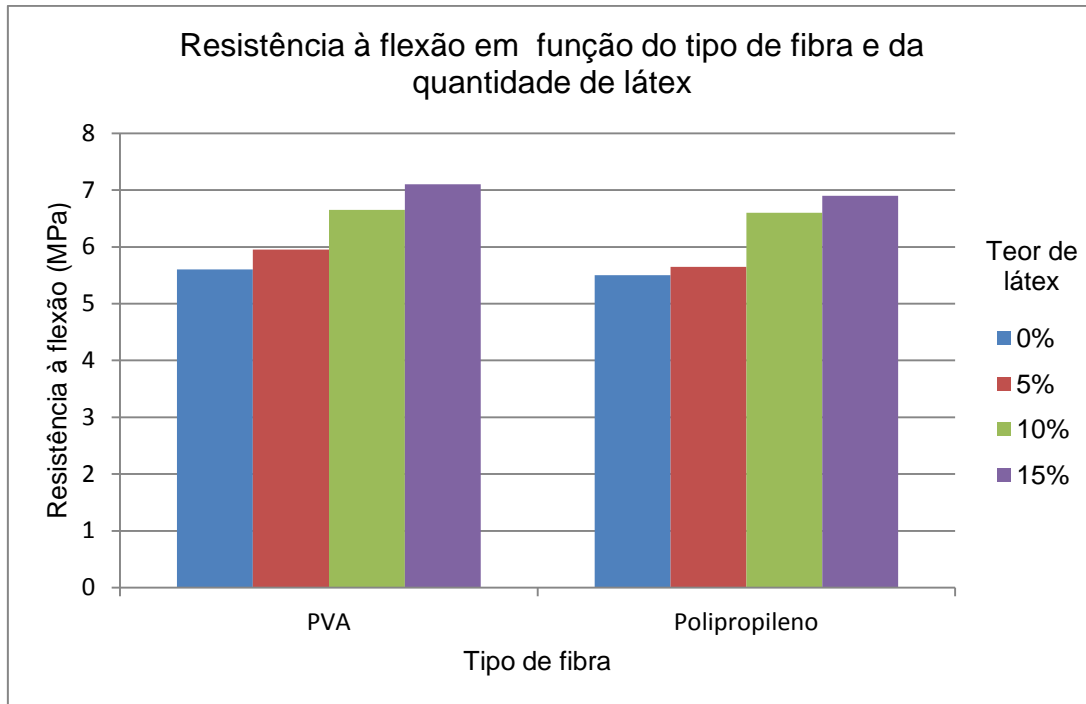


Figura 2.13 – Resistência à flexão nos ensaios de Kim e Park (2012)

Com relação ao tipo de cura de argamassas contendo polímeros, Ohama (1995) afirma que essas misturas, devido à adição dos polímeros de látex, necessitam de um processo diferenciado de cura. As melhores propriedades da mistura no estado endurecido são conseguidas com cura úmida durante 1 a 3 dias após a desmoldagem seguida de cura seca à temperatura ambiente. A cura a vapor é desaconselhada para esses compósitos.

Rossignolo e Agnesini (2000) estudaram seis diferentes tipos de cura para microconcretos modificados com látex estireno-butadieno. As amostras, utilizando dosagens de 0 a 10% de polímero, eram ensaiadas à tração e à compressão com idade de 27 dias da data de moldagem. Os procedimentos de cura adotados foram:

- Cura seca por 27 dias (S);
- Cura úmida por um dia seguido de cura seca por 26 dias (1C);
- Cura úmida por dois dias seguidos de cura seca por 25 dias (2C);
- Cura úmida por seis dias seguidos de cura seca por 21 dias (6C);
- Cura úmida por 27 dias (27C);
- Cura úmida por dois dias seguidos de cura em imersão em água por quatro e dias e depois cura seca por 21 dias (2C4A).

Como era esperado, os tipos de cura que proporcionaram melhor resistência à compressão e à tração para compósitos sem látex foram a 27C e a 6C (nesta

ordem), indicando que a cura úmida por mais de sete dias é fundamental para o desenvolvimento dessas propriedades mecânicas.

Os ensaios de Rossignolo e Agnesini (2000) indicaram também que o processo de cura para dosagens contendo látex tem menor influência sobre a resistência mecânica da amostra. Entretanto, os ensaios com cura úmida nas primeiras idades e após cura seca (1C e 2C) apresentaram os melhores resultados.

2.2.3 Vermiculita termo-expandida

De acordo com Sbrighi Neto (2010), a vermiculita termo-expandida se trata de um agregado leve, obtido por aquecimento entre 900 e 1100°C do mineral vermiculita. Ao atingir determinadas temperaturas, o mineral se expande em até 30 vezes, atingindo a massa unitária de apenas 60 a 130 kg/m³. O seu emprego em compósitos cimentícios tende a reduzir a resistência mecânica da mistura no estado endurecido, bem como sua rigidez, devido à inclusão de grandes quantidades de vazios na pasta.

Montedor (2004) confirmou que a presença de vermiculita termo-expandida na argamassa reduz significativamente seu módulo de elasticidade, tornando o material mais deformável. Essa característica é fundamental para compósitos utilizados como elemento de apoio em juntas de concreto pré-moldado.

2.3 Pesquisas anteriores realizadas na Escola de Engenharia de São Carlos

As pesquisas já realizadas no Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos por, principalmente, Montedor (2004), Siqueira (2007), El Debs et al. (2008) e Bellucio (2010) trouxeram avanços no desenvolvimento das almofadas de apoio de argamassa para ligação em elementos de concreto pré-moldado e são descritas na sequência.

Montedor (2004) realizou ensaios com almofadas de argamassa que continham em sua composição, além de cimento e areia, vermiculita termo-expandida, látex estireno-butadieno e fibras curtas de vidro, PVA e polipropileno. O pesquisador adotou um traço de referência, fixando as quantidades de cimento, areia e água (1

cimento : 0,3 areia : 0,4 água), variando apenas as adições especiais acima citadas, como indica a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Variáveis analisadas por Montedor (2004)

| Variáveis | Dosagem (%) | | | | |
|-------------|-------------|----|----|----|----|
| | 50 | 25 | 10 | 5 | 0 |
| Vermiculita | 50 | 25 | 10 | 5 | 0 |
| Látex | 0 | 0 | 20 | 30 | 40 |
| Fibras | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |

As almofadas moldadas por Montedor (2004) possuíam superfície lisa e suas moldagens eram realizadas em fôrmas que permitiam a concretagem de forma horizontal (Figura 2.15), havendo assim dificuldade em se controlar o bom acabamento das peças.



Figura 2.14 – Moldagem das almofadas de Montedor (2004)

Montedor (2004) testou inicialmente 21 traços, os quais são indicados na Tabela 2.3, e realizou os ensaios de caracterização, objetivando conhecer a resistência à compressão, resistência à tração e o módulo de elasticidade.

Após a realização dos ensaios de caracterização, Montedor (2004) selecionou as dosagens que apresentaram melhores resultados e iniciou os testes de compressão centrada uniforme, afundamento (compressão com carga localizada) e ligação entre blocos.

No caso do ensaio de compressão centrada, o objetivo foi determinar a rigidez das almofadas com espessuras de 5 mm, 10 mm e 20 mm, de modo a avaliar a capacidade de deformação da peça sem que esta rompa. Já nos ensaios de carga localizada, esperava-se conhecer o afundamento das almofadas, ou seja, a capacidade de acomodar imperfeições mediante aplicação de carga pontual.

Nos ensaios de ligação entre blocos, Montedor (2004) submeteu peças de concreto monolíticas e blocos ligados com e sem a presença de almofadas de argamassa à compressão centrada e excêntrica, objetivando conhecer o comportamento da ligação, variando-se a espessura das almofadas e o grau de excentricidade ao qual a peça estava exposta. A aplicação da carga excêntrica de Montedor (2004) ocorreu através da confecção dos blocos de concreto com uma das faces com uma inclinação variável de 5% e 10%, conforme Figura 2.16.

Tabela 2.3 – Traços usados por Montedor (2004) para caracterização do material

| Consumo de vermiculita (%) | Taxa volumétrica de látex (%) | Taxa volumétrica de fibra de PVA (%) |
|----------------------------|-------------------------------|--|
| 25 | 30 | 3 |
| 25 | 30 | 2 |
| 10 | 30 | 3 |
| 5 | 30 | 3 |
| 0 | 30 | 3 |
| 5 | 0 | 3 |
| 5 | 20 | 2 |
| 5 | 40 | 3 |
| 5 | 30 | 0 |
| 5 | 30 | 1 |
| 5 | 30 | 2 |
| 5 | 30 | 4 |
| 0 | 30 | 2 |
| 0 | 30 | 4 |
| 0 | 40 | 2 |
| 0 | 0 | 0 |
| Consumo de vermiculita (%) | Taxa volumétrica de látex (%) | Taxa volumétrica de fibra de vidro (%) |
| 50 | 30 | 2 |
| 25 | 30 | 2 |
| 5 | 30 | 2 |
| 5 | 30 | 3 |
| Consumo de vermiculita (%) | Taxa volumétrica de látex (%) | Taxa volumétrica de fibra de polipropileno (%) |
| 5 | 30 | 2 |



Figura 2.15 – Ensaio de ligação excêntrica de Montedor (2004)

Ao final de seus ensaios, Montedor (2004) concluiu que:

- A inclusão de 5% de vermiculita reduz em aproximadamente 10% a resistência à compressão do compósito, porém aumenta significativamente a deformabilidade e a capacidade de acomodação das almofadas à cargas pontuais;
- O látex auxilia na trabalhabilidade da mistura, pois o mesmo corresponde a uma emulsão na qual se encontram 50% de água. Entretanto, para valores superiores a 30% da massa de cimento, acarreta redução na resistência mecânica;
- As fibras provocam incrementos na resistência mecânica e na rigidez, além de evitarem fissuras e lascas no compósito, aumentando a tenacidade do material. As que apresentaram melhores resultados foram as de vidro (2% da massa de cimento) e PVA (3% da massa de cimento);
- Quanto menor a espessura da almofada de argamassa, menor sua rigidez;
- A presença de almofada de argamassa entre blocos de concreto melhora a resistência à compressão centrada da ligação;
- O custo da almofada de argamassa, à época de sua pesquisa, assumia valores da ordem de 7% a 8% do custo do elastômero de policloropreno.

Em um estudo apresentado por El Debs et al. (2006) foram utilizados vermiculita termo-expandida, látex estireno-butadieno e dois tipos de fibras (PVA e vidro) como agentes modificadores da argamassa. Nesse estudo foram confeccionadas várias dosagens de argamassas de cimento e areia adicionadas dos elementos modificadores citados acima. Foram fixados os valores das relações água / cimento em 0,4 e cimento / agregado em 0,3, além de um valor mínimo desejado de resistência à compressão (20 MPa).

El Debs et al. (2006) realizaram ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral para caracterização das misturas, além de ensaios de compressão uniforme em almofadas de argamassa para estimar uma medida de rigidez e de ensaios de carregamento pontual, para obter valores de deformação das amostras perante carga concentrada.

Com relação aos ensaios de compressão e tração, El Debs et al. (2006) verificaram que grandes quantidades de vermiculita e látex reduzem tanto a resistência mecânica quanto o módulo de elasticidade do compósito. Além disso, o aumento do teor de fibras só trouxe reflexos positivos na resistência à tração da argamassa.

Para os ensaios de compressão uniforme em almofadas, El Debs et al. (2006) realizaram testes também em amostras de almofadas de policloropreno, comparando-as ao material proposto. Foi possível observar que para argamassa modificada o aumento da espessura da peça aumentou também a rigidez, ao contrário das almofadas de policloropreno, onde a rigidez diminuía com o aumento da espessura. Segundo os autores, esse fato está relacionado ao fator de forma do elemento, que é função da área superficial e espessura da almofada. Para El Debs et al. (2006) a rigidez de almofada de policloropreno é praticamente proporcional ao seu fator de forma.

Na Figura 2.17 está esquematizado o ensaio de carga pontual e a marcação das fissuras pós ensaio.

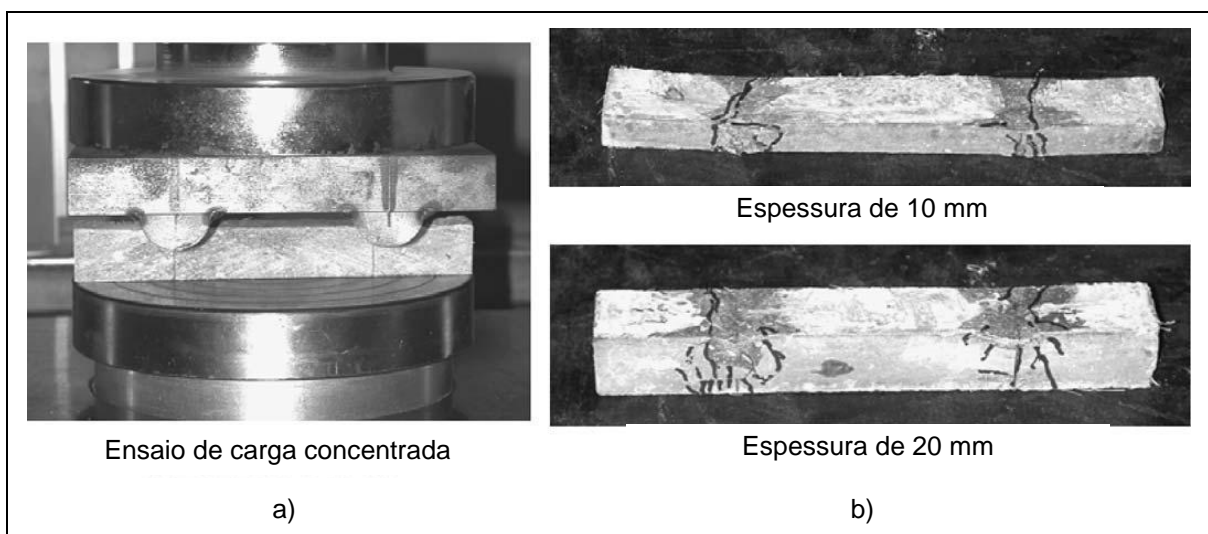


Figura 2.16 – Ensaio de carregamento pontual de El Debs et al. (2006)

Nesse ensaio, as almofadas foram cortadas em faixas. A Figura 2.17a mostra a execução do ensaio de carregamento pontual. Duas espécies de hastes aplicam força concentrada de compressão nos terços da faixa de argamassa modificada. Já nas imagens da Figura 2.17b notam-se, em destaque, as fissuras geradas com os carregamentos. Para ambas as espessuras, não houve ruptura brusca das amostras e esse poder de tenacidade dos corpos de prova foi atribuído a presença das fibras.

Siqueira (2007), na sua pesquisa de mestrado, fixou também a quantidade de látex usado em 30% e variou somente as taxas de vermiculita e fibras em valores mais específicos, como indica a Tabela 2.4. As dosagens usadas seguiram o padrão da pesquisa de Montedor (2004). Outra variável desta pesquisa foi a espessura das almofadas: 10 e 20 mm.

Tabela 2.4 – Variáveis das dosagens de Siqueira (2007)

| Variáveis | Dosagem (%) | | | | | |
|-------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Vermiculita | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Fibras | 5,0 | 4,5 | 4,0 | 3,5 | 3,0 | 2,5 |

As fibras utilizadas nesta pesquisa foram as de polipropileno, apesar de terem apresentado os piores resultados de Montedor (2004). Utilizaram-se estas, de características diferentes às da pesquisa anterior, pois têm menor custo e maior disponibilidade. Após os ensaios de caracterização da argamassa, Siqueira (2007) realizou os testes experimentais conforme indica a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Ensaio realizados por Siqueira (2007)

| Nome do ensaio | Objetivo |
|--|---|
| Força distribuída: carregamento monotônico | Determinar a rigidez das almofadas, avaliando a capacidade de deformação destas. |
| Força distribuída: carregamento cíclico | Determinar a rigidez das almofadas para um regime de carga repetitivo. |
| Força concentrada | Medir o afundamento das almofadas, ou seja, a capacidade de acomodar imperfeições. |
| Ligações de blocos | Verificar a carga última à compressão centrada em blocos de concreto lisos e com rugosidade superficial ligados com e sem almofadas de argamassa, além de blocos monolíticos para fins de comparação. |
| Rotação de apoio | Medir a capacidade de rotação das almofadas mediante carregamento excêntrico. |
| Tenacidade ao fraturamento | Determinar a tenacidade das almofadas de argamassa em ensaios de flexão dos corpos de prova. |
| Microscopia ótica | Verificar o padrão de rugosidade superficial das almofadas, avaliando se essa textura superficial poderia ou não ser benéfica ao compósito. |

As conclusões de Siqueira (2007) foram as seguintes:

- O módulo de elasticidade da argamassa modificada, para a dosagem que obteve melhores resultados, foi da ordem de 50 a 60% do valor do compósito tradicional (sem adição de vermiculita, fibras de polipropileno e látex estireno-butadieno);
- O compósito com fibras de polipropileno conseguiu atingir valores de módulo de elasticidade bem próximos aos obtidos por Montedor (2004) com fibras de vidro e PVA;
- Em relação às almofadas de policloropreno, a rigidez das almofadas de argamassa foi superior na ordem de apenas 5 ou 6 vezes, o que o autor julga ser satisfatória;
- O melhor traço foi o que apresentou 10% de vermiculita em substituição à areia e adição de 4% (em relação ao cimento) de fibras de polipropileno;
- O compósito apresentou boa propriedade de resiliência, observada nos ensaios de carregamento monotônico e cíclico;
- A presença de almofada de argamassa entre os blocos de concreto melhorou o desempenho do conjunto bloco-almofada-bloco à compressão, conseguindo

absorver imperfeições nas superfícies. Para rugosidades maiores que 1 mm, a efetividade da almofada foi reduzida;

- A capacidade das almofadas em absorver rotações foi adequada;
- As almofadas com espessura de 10 mm se mostraram mais adequadas que às de espessura igual a 20 mm.

O trabalho de Siqueira (2007) deu origem a outra pesquisa realizada por El Debs et al. (2008) e publicada em Tóquio no 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete. O objetivo foi verificar a influência da presença de almofada de argamassa mediante carregamento centrado em blocos com diferentes rugosidades superficiais.

Os ensaios de compressão foram realizados em blocos monolíticos de 300 mm de altura e 150 mm de arestas e em dois blocos cúbicos de 150 mm de arestas com e sem presença de almofada de argamassa entre as peças.

O compósito foi dosado de acordo com os estudos prévios. O valor médio de resistência à compressão foi de 34,9 MPa, resistência à tração igual a 2,66 MPa e módulo de elasticidade de 13,1 GPa. Já os blocos de concreto tiveram resistência à compressão média variando de 52 a 61 MPa.

Os blocos possuíam quatro saliências nas superfícies conectadas de 0,75 mm, 1,0 mm e 1,5 mm de espessura, além de superfícies perfeitamente lisas. A Figura 2.18 detalha o bloco de concreto e a disposição das saliências.

O conjunto bloco-almofada-bloco, formado com a inserção da almofada de argamassa em meio a dois blocos de concreto, está retratado na Figura 2.19, que apresenta também o corpo de prova disposto na máquina de ensaios.

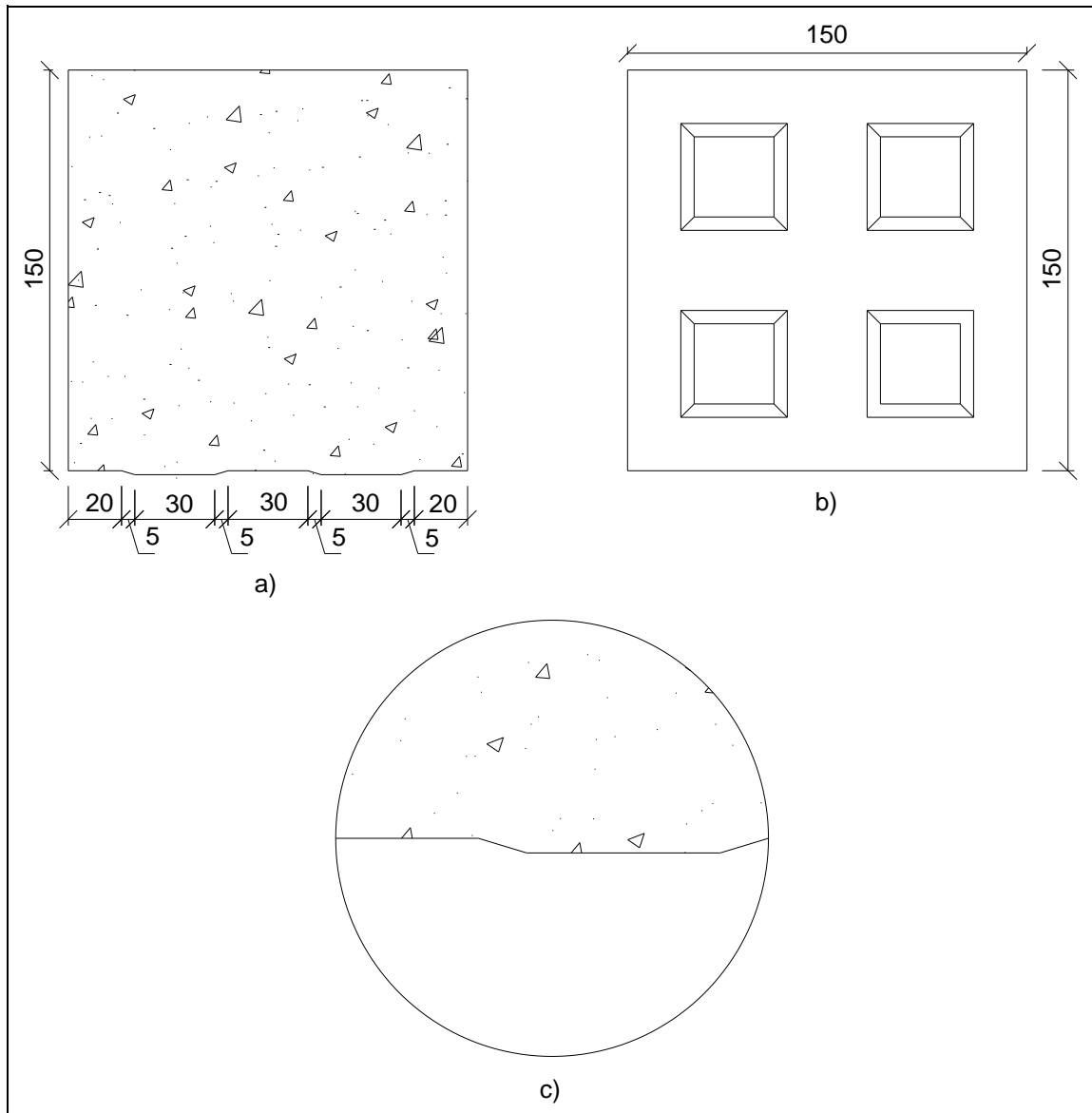


Figura 2.17 – Detalhe do bloco de concreto com quatro saliências (dimensões em mm) (EL DEBS et al., 2008): a) Vista lateral; b) Vista da face rugosa; c) Detalhe da saliência do bloco



Figura 2.18 – Corpo de prova formado pelo conjunto bloco-almofada-bloco (EL DEBS et al., 2008)

Após a execução dos trabalhos experimentais, foi possível realizar uma análise comparativa entre a resistência à compressão do conjunto ensaiado, a espessura das saliências e a presença ou não de almofada de argamassa. A Figura 2.20 apresenta os resultados obtidos por El Debs et al. (2008).

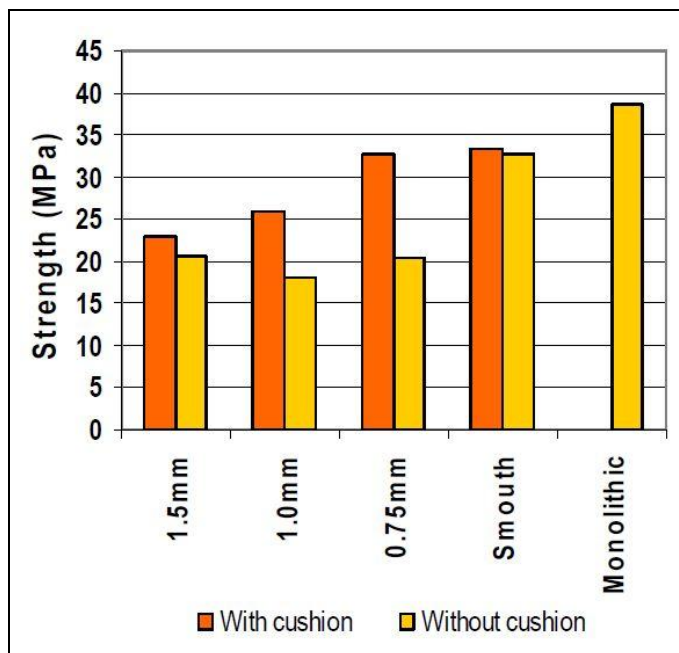


Figura 2.19 – Resistências à compressão dos conjuntos bloco-almofada-bloco para cada série de ensaio (EL DEBS et al., 2008)

A partir da Figura 2.20 é possível verificar que o maior benefício da presença de almofadas de argamassa ocorreu para blocos com rugosidades superficiais de espessuras igual a 0,75 mm e 1,0 mm. Para espessuras iguais a 1,5 mm, as almofadas perderam efetividade por não conseguirem acomodar as imperfeições. Já para superfícies lisas, há um bom contato entre blocos mesmo sem a presença da almofada, portanto, perdendo também a efetividade e não justificando a sua utilização.

El Debs et al. (2008) observaram ainda que a ruptura, para blocos com superfícies de contato lisas, ocorreu a partir de fissuras concentradas no centro dos blocos e que na sequência expandiram-se até as extremidades. Já no caso de blocos com rugosidades superficiais, as fissuras se iniciaram próximas às bordas dos blocos, causando o destacamento dessas bordas devido à concentração de tensões.

A pesquisa de Bellucio (2010) objetivou conhecer a influência de pequenas rugosidades superficiais uniformes nas almofadas de argamassa e a implementação de novos tipos de fibras, visto que as que apresentaram melhor desempenho no trabalho de Montedor (2004) não são disponíveis comercialmente.

Para o processo de dosagem dos componentes da mistura, Bellucio (2010) baseou-se nas pesquisas anteriores, sobretudo no melhor traço de Siqueira (2007), que indicava o uso de 10% de vermiculita em substituição à areia, 4% de fibras de polipropileno e 30% de látex. Entretanto, algumas ressalvas foram feitas pela pesquisadora:

- Em relação ao látex utilizado por Siqueira (2007), o desta pesquisa é de origem diferente e, sendo assim, o fabricante não recomenda mais do que 20% na composição da mistura;
- Como a vermiculita retém muita água, adotou-se a quantidade de 5% em substituição parcial à areia;
- A fibra de polipropileno usada foi diferente da utilizada por Siqueira (2007). Nesta pesquisa, foram empregados dois diâmetros de fibras (12 μm e 180 μm , além de uma dosagem mista com ambos os diâmetros).

Os traços utilizados por Bellucio (2010) estão indicados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Dosagens, em massa, adotadas por Bellucio (2010)

| Cimento | Areia | Vermiculita | Látex | Fibra | Água |
|---------|-------|-------------|-------|--|------|
| 1 | 0,285 | 0,015 | 0,20 | 0,02 ($\Phi=12 \mu\text{m}$) | 0,25 |
| 1 | 0,285 | 0,015 | 0,20 | 0,09 ($\Phi=180 \mu\text{m}$) | 0,25 |
| 1 | 0,285 | 0,015 | 0,20 | 0,02 ($\Phi=12 \mu\text{m}$) + 0,03 ($\Phi=180 \mu\text{m}$) | 0,25 |

Além dos traços supracitados, a autora realizou ensaios com uma dosagem de referência, conforme Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Traço de referência em massa de Bellucio (2010)

| Cimento | Areia | Água |
|---------|-------|------|
| 1 | 0,3 | 0,35 |

O acabamento superficial das almofadas de apoio – que tinham 10 mm de espessura – também foi uma variável do trabalho. Algumas foram moldadas em fôrmas que permitiam a introdução de pequenas rugosidades superficiais uniformes

(Figura 2.21), o que foi feito para verificar a influência dessas saliências na rigidez de almofada. As três situações estudadas quanto ao acabamento das almofadas eram (a): ambas as superfícies lisas, (b): ambas as superfícies rugosas e (c): um lado liso e outro rugoso.



Figura 2.20 – Almofada de argamassa com rugosidade superficial (BELLUCIO, 2010)

Além dos ensaios de compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, foram realizados outros ensaios experimentais nas almofadas do compósito. São eles:

- Carregamento monotônico: Determina a rigidez da almofada, ou seja, medida da capacidade de deformação;
- Ensaio de força concentrada: Mede a capacidade de acomodação de cargas pontuais;
- Ensaio de flexão: Determina a resistência da argamassa à flexão e a capacidade de contribuição das fibras no período pós-fissuração;
- Carregamento cíclico: Analisa a rigidez do compósito através da aplicação de um regime de carregamento repetitivo.

Após a execução dos ensaios, Bellucio (2010) chegou as seguintes conclusões:

- Com relação a resistência à compressão das amostras com traços de referência, a redução na resistência quando usada argamassa modificada foi de 48%, resultando em valores de resistência à compressão na ordem de 41 MPa, o que a autora julga suficiente;
- A resistência à tração se mostrou pouco dependente da presença ou não das adições na argamassa;

- A redução do módulo de elasticidade, empregando argamassa modificada, foi de 45% em relação ao traço de referência, atingido 12,8 GPa, valor considerado satisfatório;
- A rugosidade superficial nas almofadas reduz sua rigidez, chegando a ultrapassar 30% quando empregada em ambos os lados, em comparação às superfícies lisas;
- O traço que mostrou melhor desempenho foi o que usou fibras de polipropileno com diâmetro de 12 μm , influenciando para menor rigidez, tenacidade até 55% maior que os demais compósitos, melhor comportamento perante carregamentos repetidos e capacidade até 37% maior que o traço de referência em absorver cargas pontuais.

No ano de 2012, outro artigo decorrente da dissertação de mestrado de Siqueira (2007) foi publicada, por Siqueira e El Debs (2012), onde o objetivo foi, entre outros, avaliar a rigidez de almofadas de argamassa modificada com diferentes tipos de dosagens para carregamentos monotônicos e cíclicos.

Como adição à mistura, foram usados látex estireno-butadieno, vermiculita termo expandida e fibras de polipropileno com 20 μm de diâmetro e 6 mm de comprimento. A mistura de referência continha 1 parte de cimento para 0,3 de areia, 0,3 de látex e 0,1 de água.

Inicialmente foram adotados como variáveis os teores das adições, em relação a massa de cimento, conforme mostrados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Variáveis utilizadas por Siqueira e El Debs (2012)

| Mistura | Vermiculita (%) | Fibra (%) | Látex (%) |
|---------|-----------------|-----------|-----------|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 5 | 30 |
| 3 | 5 | 4,5 | 30 |
| 4 | 10 | 4 | 30 |
| 5 | 15 | 3,5 | 30 |
| 6 | 20 | 3 | 30 |
| 7 | 25 | 2,5 | 30 |

Após a realização dos ensaios para avaliação da resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade, além dos ensaios de afundamento para verificar a

capacidade de acomodar carregamentos concentrados, Siqueira e El Debs (2012) utilizaram as dosagens que apresentaram melhores resultados nesses ensaios e iniciaram os testes para avaliação da rigidez de almofada das misturas para carregamentos monotônicos e cíclicos. Em relação ao acabamento superficial, os procedimentos de confecção das almofadas seguiram o adotado por Siqueira (2007), portanto sem rugosidade superficial.

Os resultados de resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade estão apresentados na Tabela 2.9. Em negrito, as dosagens utilizadas nos ensaios de rigidez de almofada.

Tabela 2.9 – Resultados dos ensaios de caracterização de Siqueira e El Debs (2012)

| Mistura | Resistência à compressão (MPa) | Resistência à tração (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) |
|----------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1 | 47,5 | 4,5 | 21,8 |
| 2 | 43 | 2,9 | 15,7 |
| 3 | 36 | 2,8 | 16 |
| 4 | 35 | 2,7 | 13,1 |
| 5 | 29,5 | 3,1 | 14,5 |
| 6 | 24,5 | 2,4 | 10,2 |
| 7 | 20 | 2,5 | 11,7 |

Foram usados dois procedimentos para avaliação da rigidez para carregamentos cíclicos:

(a): duas amostras de cada dosagem selecionada para um total de 200 ciclos, divididos uniformemente em 50 ciclos para cada nível de tensão empregado (2,5, 5, 10 e 20 MPa);

(b): duas amostras de cada dosagem selecionada para um total de 1200 ciclos, totalizando 300 ciclos para cada um dos mesmos níveis de tensão de (a).

Nos ensaios de carregamento monotônico, ficou claro que o acréscimo de vermiculita – e conseqüente redução de fibras – reduzia a rigidez do compósito.

Para ensaios de carregamento cíclico, Siqueira e El Debs (2012) traçaram o gráfico tensão *versus* variação da espessura da almofada para uma amostra da mistura 4 submetida à 1200 ciclos (Figura 2.22).

Para carregamentos repetitivos, em geral, as almofadas de apoio apresentaram deformação plástica significativa até o primeiro nível de carregamento (2,5 MPa).

Após os ensaios cíclicos para regime de 1200 ciclos, as almofadas de apoio não apresentaram significativa deformação plástica ou deterioração da sua rigidez, o que evidenciou a sua capacidade resiliente.

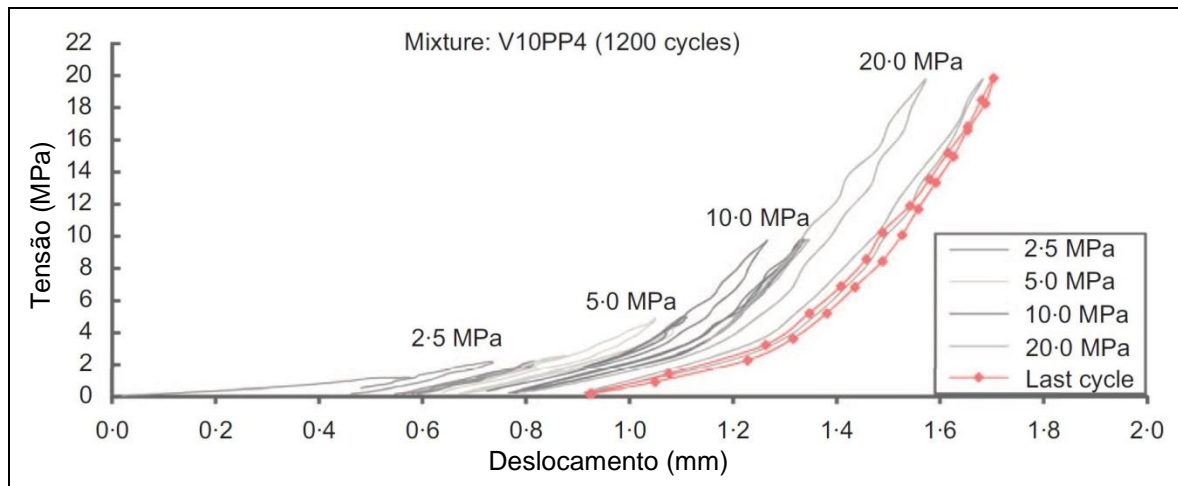


Figura 2.21 – Resultados de uma amostra da mistura 4 para carregamento cíclico em almofadas no regime de 1200 ciclos (SIQUEIRA e EL DEBS, 2012)

Os resultados das medidas de rigidez para carregamento monotônico e cíclico (200 e 1200 ciclos) são apresentados na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 – Resultados dos ensaios rigidez de almofada de Siqueira e El Debs (2012). Valores em MPa

| Mistura | Monotônico | Cíclico: 200 ciclos | Cíclico: 1200 ciclos |
|---------|------------|---------------------|----------------------|
| 3 | 388 | 420 | 370 |
| 4 | 351 | 363 | 374 |
| 5 | 335 | 373 | 380 |

As almofadas que possuem maior quantidade de vermiculita, tiveram, além de menor resistência mecânica e menor módulo de elasticidade, menor rigidez de almofada. Essas almofadas, mesmo quando submetidas a vários ciclos de carregamento, não demonstraram excessivas variações na rigidez em comparação aos valores dos ensaios monotônicos.

3. MATERIAIS UTILIZADOS

3.1 Cimento Portland

A norma NBR 5732 (ABNT, 1991) define Cimento Portland como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Segundo a publicação, é possível ainda a adição, durante a moagem, de materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto forno e/ou materiais carbonáticos.

Nesta pesquisa, o Cimento Portland utilizado é do tipo CP-V-ARI da fabricante HOLCIM S.A., o qual permite rápido ganho de resistência e possibilita rápida desmoldagem. O desenvolvimento dessas propriedades do referido Cimento Portland é conseguido devido à utilização de diferentes dosagens de calcário e argila na produção do clínquer e pela moagem mais fina do cimento.

As características principais do cimento utilizado na pesquisa estão na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características do Cimento Portland utilizado (Fonte: HOLCIM S.A.)

| Características | Unidade | Valor |
|-----------------------|--------------------|-------|
| Massa específica | g/cm ³ | 3,12 |
| Finura Blaine | cm ² /g | 4687 |
| Início de pega | min | 130 |
| Fim de pega | min | 210 |
| Resistência (1 dia) | MPa | 27,7 |
| Resistência (3 dias) | MPa | 42,0 |
| Resistência (7 dias) | MPa | 46,7 |
| Resistência (28 dias) | MPa | 56,1 |

3.2 Areia

A areia utilizada para a produção das almofadas de apoio, dos blocos de concreto e do material para caracterização possui a mesma origem da usada por

Montedor (2004), Siqueira (2007) e Bellucio (2010). Esta é proveniente do rio Mogi Guaçu, no estado de São Paulo.

Toda a areia utilizada na pesquisa foi primeiramente separada, secada e armazenada. Procedeu-se então sua caracterização seguindo o prescrito nas publicações NBR 7251 (ABNT, 1982), NBR 9776 (ABNT, 1987) e NBR NM 248 (ABNT, 2003). A curva granulométrica da areia está apresentada na Figura 3.1 e as demais propriedades estão na Tabela 3.2.

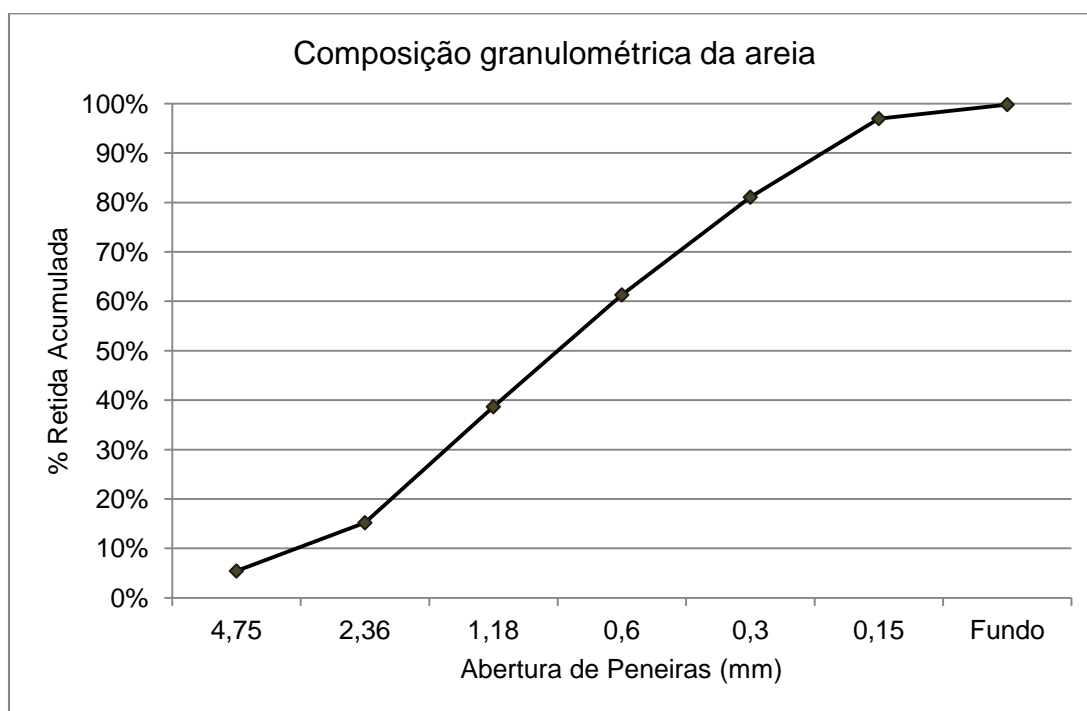


Figura 3.1 – Curva granulométrica da areia

Tabela 3.2 – Propriedades da areia utilizada na pesquisa

| Característica | Unidade | Valor |
|------------------|-------------------|-------|
| Módulo de finura | - | 2,44 |
| Massa específica | g/cm ³ | 2,63 |
| Massa unitária | g/cm ³ | 1,58 |

A areia utilizada para as moldagens das almofadas foi toda passada na peneira de malha igual a 0,6 mm, pois Montedor (2004) concluiu que agregados de pequenas dimensões proporcionavam à mistura melhor desempenho no estado endurecido.

3.3 Vermiculita termo-expandida

Utilizada como agregado leve para produção das almofadas de argamassa, a vermiculita desta pesquisa é do tipo termo-expandida, é fabricada pela Brasil Minérios e possui o nome de AGLOFLOC – mesma origem de Montedor (2004), Siqueira (2007) e Bellucio (2010). A curva granulométrica da vermiculita termo-expandida está apresentada na Figura 3.2.

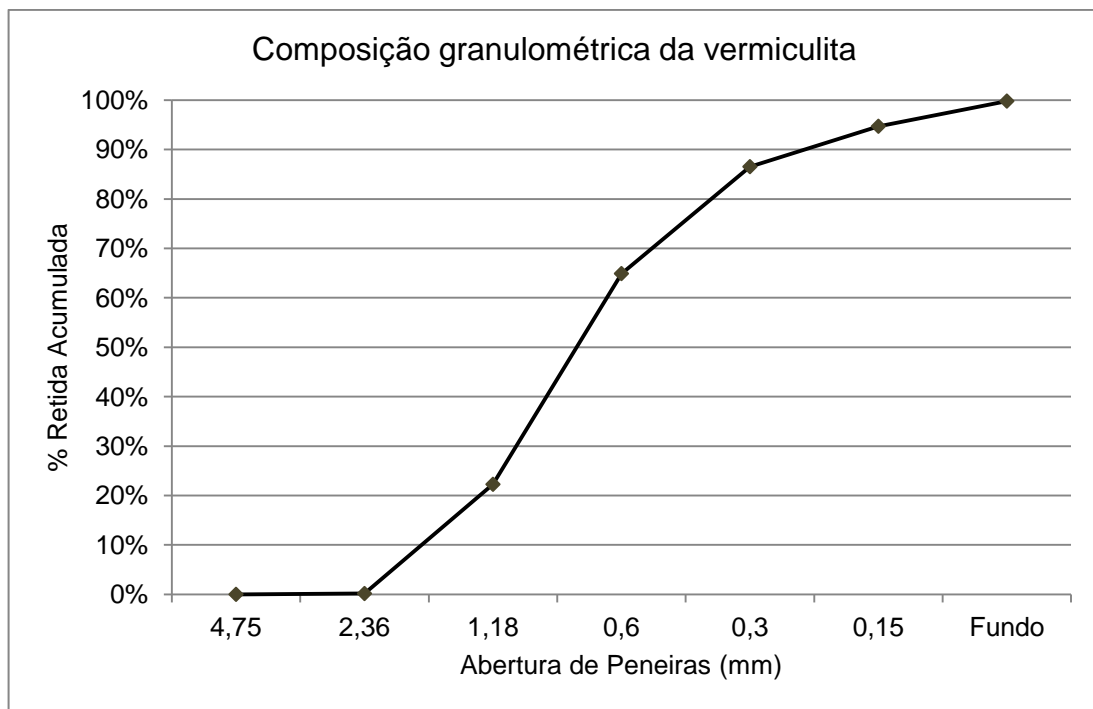


Figura 3.2 – Curva granulométrica da vermiculita utilizada na pesquisa

Algumas de suas principais características são:

- Inorgânica;
- Não tóxica;
- Não abrasiva (dureza mohs: 1,5);
- Não solúvel em bases e ácidos fracos e solventes orgânicos;
- Ponto de fusão de 1300°C;
- pH praticamente neutro;
- Massa específica igual a 356 kg/m³;
- Massa unitária igual a 113 kg/m³;
- Módulo de finura igual a 3,68.

3.4 Látex estireno-butadieno

O látex utilizado nesta pesquisa é do tipo estireno-butadieno, recebe o nome de IMPRIMASTER e é fornecido pela empresa Construquil, do município de Araraquara. As propriedades desse polímero estão na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Propriedades do látex utilizado na pesquisa (Fonte: CONSTRUQUIL)

| Característica | Unidade | Valor |
|---|-------------------|--------------------|
| Teor de sólidos | % | 50 ± 1 |
| pH | - | 7,5 ± 0,5 |
| Viscosidade Brookfield (RVT / 50rpm / 23°C) | mPa.s | 75 ± 25 |
| Aspecto | - | Líquido esverdeado |
| Massa específica | g/cm ³ | 1,02±0,02 |
| Tensão superficial | mN/m | 35±2 |
| Diâmetro das partículas | µm | 0,16 |
| TMFF | °C | < 0 |

3.5 Fibras de polipropileno

As fibras utilizadas nesta pesquisa são de polipropileno e foram fornecidas pela empresa BRASILIT-Saint Gobain (Figura 3.3).

As especificações das fibras utilizadas estão expostas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Propriedades das fibras de polipropileno utilizadas (Fonte: BRASILIT-Saint Gobain)

| Característica | Unidade | Valor |
|------------------|-------------------|-------|
| Massa específica | g/cm ³ | 0,91 |
| Diâmetro | µm | 12 |
| Comprimento | mm | 10 |
| Alongamento | % | 21 |
| Ponto de fusão | °C | 170 |



Figura 3.3 – Fibra de polipropileno utilizada na pesquisa (BRASILIT – Saint Gobain)

3.6 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante foi utilizado para melhorar a trabalhabilidade da mistura fresca do compósito de cimento para produção das almofadas de apoio e dos blocos de concreto. Esta é significativamente reduzida em função, principalmente, da presença de fibras de polipropileno.

O aditivo usado foi o GLENIUM 51 – o mesmo utilizado por Bellucio (2010) – fabricado pela empresa BASF e conhecido como um superplastificante de terceira geração. Optou-se pelo emprego deste aditivo em função da disponibilidade. Suas características estão descritas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Propriedades do superplastificante utilizado (Fonte: BASF – GLENIUM 51)

| Característica | Unidade | Valor |
|------------------|-----------------|----------------------|
| Aparência | - | Líquido branco turvo |
| Base química | - | Éter policarboxílico |
| pH | - | 6 ± 1 |
| Massa específica | g/cm^3 | $1,087 \pm 0,02$ |
| Teor de sólidos | % | $30 \pm 1,5$ |
| Viscosidade | cps | < 150 |

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado o programa experimental da pesquisa, como as dosagens utilizadas, os ensaios de caracterização das argamassas e concretos, bem como os procedimentos de confecção dos corpos de prova e ensaios de ligação de blocos.

Primeiramente realizaram-se ensaios de caracterização em quatro diferentes argamassas, variando-se as quantidades de cada componente da mistura. A dosagem que apresentou os resultados mais satisfatórios foi utilizada nos ensaios de ligação de blocos.

A Figura 4.1 apresenta o detalhamento dos corpos de prova utilizados nos ensaios de ligação, que visaram conhecer o comportamento da almofada de argamassa quando sujeita aos carregamentos de compressão centrada e excêntrica. As mossas dos blocos de concreto estão destacadas na figura para facilitar a visualização.

Entre as variáveis analisadas nos ensaios de ligação estão a presença ou ausência da almofada, a espessura e a quantidade de saliências na face ligada do bloco superior de concreto (mossas que imitam as imperfeições encontradas em estruturas reais de concreto pré-moldado), a classe de resistência do concreto adjacente, presença ou não de excentricidade no carregamento de compressão, regime monotônico e cíclico de carregamento, além de um arranjo onde a almofada foi previamente solidarizada ao bloco inferior de concreto.

Os ensaios de compressão em ligações foram acompanhados de ensaios de compressão simples nos concretos de referência, ou seja, em amostras de concreto retiradas da mesma moldagem dos blocos para ensaios de ligação. Isso possibilitou o controle da classe de resistência dos blocos e a análise comparativa entre a resistência à compressão da ligação e dos respectivos concretos.

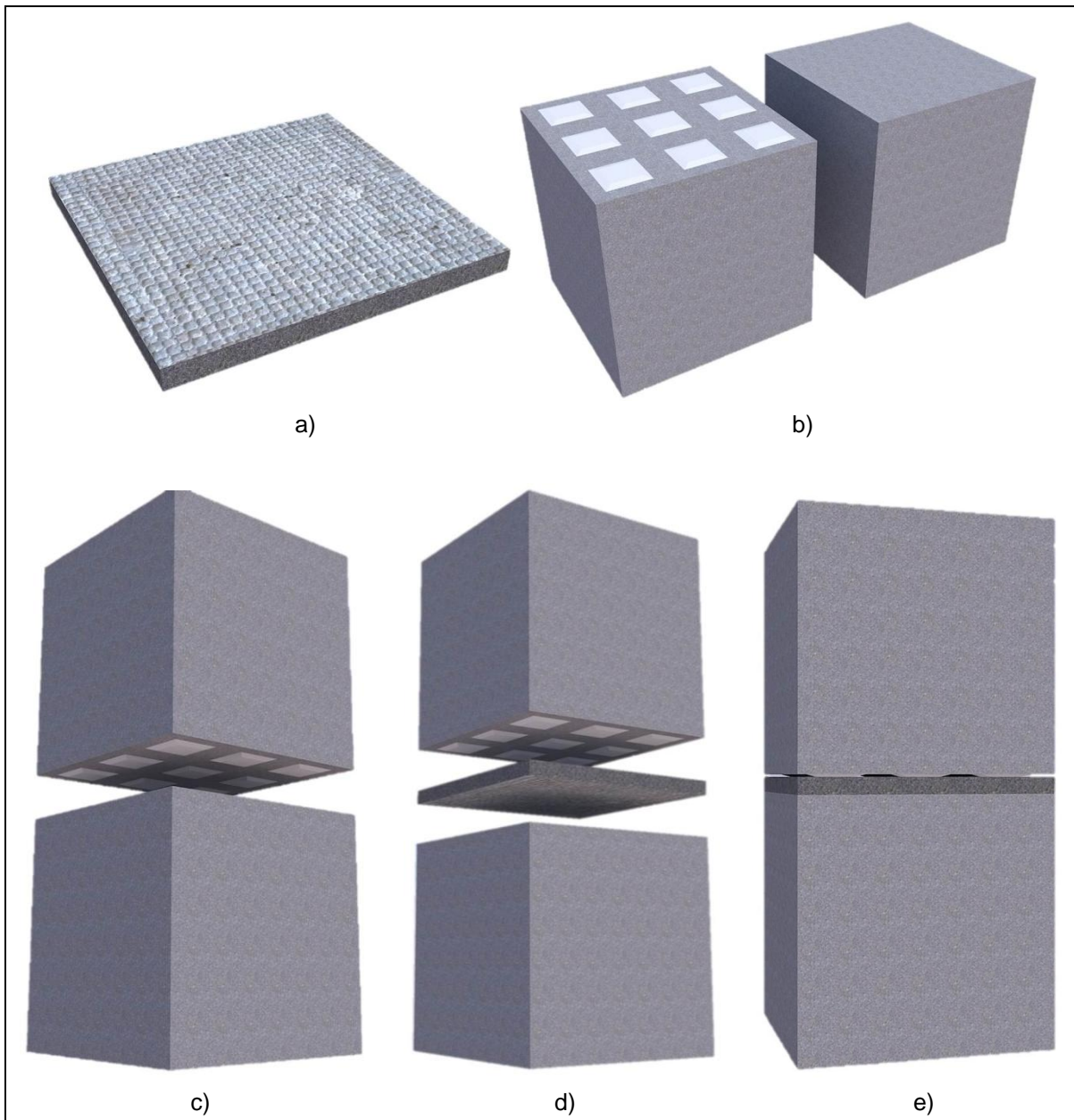


Figura 4.1 – Corpo de prova padrão dos ensaios de ligação: a) Almofada de argamassa modificada; b) Blocos de concreto com e sem rugosidade superficial; c) Processo de ligação entre blocos de concreto sem almofada de apoio; d) Processo de ligação entre blocos de concreto com almofada de apoio; e) Ligação com almofada de apoio

4.1 Dosagens

4.1.1 Argamassas

As pesquisas anteriores a esta e referentes a um tema semelhante objetivaram, entre outros, estudar um melhor traço para a confecção das almofadas de argamassa. A dosagem em massa que apresentou melhores resultados, de

Bellucio (2010) – denominada *AM* – foi inicialmente adotada neste trabalho, a qual está indicada na Tabela 4.1.

A fibra utilizada nessa pesquisa foi a fibra de polipropileno com diâmetro igual a 12 μm , a que obteve melhores resultados nos ensaios de Bellucio (2010).

Tabela 4.1 – Traço em massa da argamassa modificada (*AM*) (BELLUCIO, 2010)

| Cimento | Areia | Vermiculita | Látex | Fibra | Superplastificante | Água |
|---------|-------|-------------|-------|-------|--------------------|------|
| 1 | 0,285 | 0,015 | 0,2 | 0,02 | 0,02 | 0,25 |

O cálculo do consumo de cimento (C - kg/m^3) pode ser feito através da Equação 4.1, citada por Siqueira (2007). Na expressão, os índices γ_c , γ_a e γ_v significam, respectivamente, as massas específicas do cimento, da areia e da vermiculita em g/cm^3 e os índices a , v , L e h indicam o consumo, em relação ao cimento, de areia, vermiculita, látex e água.

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{v}{\gamma_v} + L + h} \quad (\text{Equação 4.1})$$

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{3,12} + \frac{0,285}{2,63} + \frac{0,015}{0,356} + 0,2 + 0,25} = 1085,76 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad (\text{Equação 4.1})$$

Portanto, o consumo de cimento da argamassa modificada (*AM*) foi igual a 1085,76 kg/m^3 .

Em relação à ordem de colocação dos materiais na misturadora mecânica, primeiro foram adicionados os sólidos (cimento, areia e vermiculita). Após uma mistura manual desses materiais, colocou-se o látex e iniciou-se a mistura mecânica. Depois foi introduzida, nesta ordem, a água e o superplastificante (diluído com pequena quantidade da própria água de amassamento). Por fim, após o compósito atingir adequada plasticidade, eram adicionadas as fibras.

A Figura 4.2 ilustra a argamassa após a mistura, antes de ser lançada às fôrmas. Na imagem, nota-se certa heterogeneidade e baixa trabalhabilidade em função das fibras. O lançamento do compósito é feito manualmente. Já a compactação é realizada através da sequencial penetração e retirada de uma espécie de “garfo” junto à mistura no estado fresco.



Figura 4.2 – Argamassa modificada no estado fresco

Como alternativa a dosagem de Bellucio (2010), realizou-se também a mistura e caracterização de outra argamassa modificada (*AM2*), esta com quantidade inferior de látex (10% sobre o cimento). Esse procedimento foi realizado devido a dosagem *AM* ter apresentado resistência à compressão inferior a desejada. Esse traço está apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Traço em massa da argamassa *AM2*

| Cimento | Areia | Vermiculita | Látex | Fibra | Superplastificante | Água |
|---------|-------|-------------|-------|-------|--------------------|------|
| 1 | 0,285 | 0,015 | 0,1 | 0,02 | 0,02 | 0,3 |

Na mistura *AM2* foi mantida a mesma relação água / aglomerante da dosagem *AM*. A mistura, lançamento e compactação são idênticas ao compósito denominado *AM*. A dosagem *AM2* possui custo inferior à *AM* em função da menor quantidade de polímero, visto que esse é um material de custo relativamente elevado.

O cálculo do consumo de cimento segue na Equação 4.2:

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{v}{\gamma_v} + L + h} = \frac{1000}{\frac{1}{3,12} + \frac{0,285}{2,63} + \frac{0,015}{0,356} + 0,1 + 0,3} = 1148,09 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Equação (4.2)}$$

Portanto, o consumo de cimento da argamassa *AM2* é igual a 1148,09 kg/m³.

Com os resultados de resistência à compressão ainda não satisfatórios, realizou-se mais um ajuste na dosagem. Na pesquisa, esta é denominada *AM3* e

possui inferior quantidade de água, o que visa aumentar a resistência mecânica das almofadas, ciente de que poderia haver também pequeno aumento do módulo de elasticidade. Para não prejudicar a trabalhabilidade, utilizou-se maior quantidade de superplastificante. A dosagem *AM3* possui as proporções de materiais apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Traço em massa da argamassa *AM3*

| Cimento | Areia | Vermiculita | Látex | Fibra | Superplastificante | Água |
|---------|-------|-------------|-------|-------|--------------------|------|
| 1 | 0,285 | 0,015 | 0,1 | 0,02 | 0,025 | 0,25 |

O consumo de cimento é calculado na Equação 4.3:

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{v}{\gamma_v} + L + h} = \frac{1000}{\frac{1}{3,12} + \frac{0,285}{2,63} + \frac{0,015}{0,356} + 0,1 + 0,25}$$

$$= 1218,00 \frac{kg}{m^3} \quad \text{Equação (4.3)}$$

Portanto, o consumo de cimento da argamassa *AM3* é 1218,00 kg/m³.

Foram adotadas como almofadas para os ensaios de ligação de blocos as que apresentarem melhores resultados nos ensaios de caracterização, que são descritos na sequência.

Além dos corpos de prova de argamassa modificada, foram realizados os mesmos ensaios de caracterização também em amostras de argamassas sem adições (argamassa de referência – *AR*). Isso foi feito para verificar a eficiência da presença das adições especiais em modificar as propriedades do compósito. Os modelos em argamassa tradicional são somente caracterizados e o comportamento da ligação com essa almofada não foi estudado.

A argamassa de referência (*AR*) foi a mesma utilizada por Bellucio (2010). Nela, respeitou-se a mesma relação agregado / cimento e água / cimento da mistura *AM*, uma vez que o látex, retirado dessa dosagem, é uma emulsão que contém 50% de água. Por isso, adicionou-se água no valor de 50% da quantidade de látex. O traço dessa mistura está apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Traço em massa da argamassa de referência (AR) (BELLUCIO, 2010)

| Cimento | Areia | Água |
|---------|-------|------|
| 1 | 0,3 | 0,35 |

Para essa dosagem, o cálculo do consumo de cimento está apresentado na Equação 4.4.

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + h} \quad \text{Equação (4.4)}$$

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{3,12} + \frac{0,3}{2,63} + 0,35} = 1274,56 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Equação (4.4)}$$

Portanto, para a mistura AR, o consumo de cimento foi igual a 1274,56 kg/m³.

A ordem de introdução dos componentes na misturadora foi semelhante à argamassa modificada. Foram colocados e misturados manualmente o cimento e a areia e após foi adicionada a água. Ao contrário da mistura com adições, a dosagem de referência apresentou excelente trabalhabilidade. Seu lançamento e vibração foram fáceis, devido às boas condições de trabalhabilidade.

A Tabela 4.5 apresenta um resumo das dosagens utilizadas, bem como do consumo de cimento de cada mistura.

Tabela 4.5 – Resumo das dosagens utilizadas para as argamassas

| Dosagem | Cimento | Areia | Vermiculita | Látex | Fibra | Superplastificante | Água | Consumo de cimento (kg/m ³) |
|---------|---------|-------|-------------|-------|-------|--------------------|------|---|
| AM | 1 | 0,285 | 0,015 | 0,2 | 0,02 | 0,02 | 0,25 | 1085,76 |
| AM2 | 1 | 0,285 | 0,015 | 0,1 | 0,02 | 0,02 | 0,3 | 1148,09 |
| AM3 | 1 | 0,285 | 0,015 | 0,1 | 0,02 | 0,025 | 0,25 | 1218,00 |
| AR | 1 | 0,3 | - | - | - | - | 0,35 | 1274,56 |

4.1.2 Concretos

Os concretos moldados foram utilizados nos blocos para ensaios de ligação e nos corpos de prova cilíndricos para ensaios de compressão. Optou-se por utilizar

classes de resistência à compressão superiores a usual encontrada em obras de concreto armado moldadas *in loco*, visto que nas indústrias de pré-fabricados de concreto há um bom controle de qualidade, garantindo maiores resistências mecânicas.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define como Concreto de Alta Resistência misturas que possuam resistência à compressão de pelo menos 50 MPa. Baseado nesses conceitos, a resistência média adotada como padrão nessa pesquisa foi de 65 MPa, com desvio de 25 MPa para mais ou para menos em algumas séries analisadas.

As dosagens desses elementos foram realizadas de forma experimental, até a obtenção do traço julgado adequado. Para isso foi utilizado Cimento Portland CP-V-ARI, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (pedra britada – agregado basáltico), água e superplastificante GLENIUM 51.

As dosagens que foram utilizadas para as três classes de resistência média empregadas, bem como os respectivos consumos de cimento, estão apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Dosagens dos concretos utilizados

| Classes de resistência / materiais | Cimento | Areia | Pedra | Água | Superplastificante | Consumo de cimento (kg/m ³) |
|------------------------------------|---------|-------|-------|------|--------------------|---|
| 40 MPa | 1,0 | 1,80 | 2,90 | 0,50 | 0,0 | 393,5 |
| 65 MPa | 1,0 | 1,30 | 2,05 | 0,40 | 0,005 | 524,2 |
| 90 MPa | 1,0 | 0,85 | 1,55 | 0,30 | 0,005 | 667,2 |

4.2 Ensaios de caracterização

Além de ensaios de caracterização dos agregados (areia e vermiculita), onde foram determinados a massa específica, massa unitária, curva granulométrica, módulo de finura e diâmetro máximo característico, também foram realizados ensaios em corpos de prova de argamassa e concreto, como descrito na sequência. Esses ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios da marca INSTRON, modelo 8506 e em uma ELE, modelo Autotest 2000 e foram testadas seis amostras para cada dosagem e tipo de ensaio, calculando-se após a média.

4.2.1 Ensaio de compressão axial

Foram realizados ensaios de compressão axial em corpos de prova das argamassas modificadas e da argamassa de referência, de modo a caracterizá-las quanto a resistência à compressão. Os ensaios foram realizados de acordo com as especificações da norma NBR 5739 (ABNT, 1994), utilizando corpos de prova de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

Nos corpos de prova de concreto, os ensaios foram semelhantes, porém as amostras possuíam diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm. Nesses casos, o objetivo foi controlar a resistência para se obter blocos de 40 MPa, 65 MPa e 90 MPa. Destaca-se que, em cada concretagem, foram recolhidas amostras cilíndricas dos concretos utilizados.

4.2.2 Ensaio de tração por compressão diametral

Este é um ensaio indireto para avaliar a resistência à tração, através de aplicação de força de compressão ao longo do diâmetro de uma amostra cilíndrica, de uma mistura no estado endurecido. A aplicação da força de compressão gera um estado biaxial de tensões que faz com que a peça de concreto rompa à tração. Esse procedimento é regido pela norma NBR 7222 (ABNT, 1994).

Para se estimar a resistência à tração deve-se aplicar a Equação 4.5.

$$f_t = 0,85 * \frac{2 * F}{\pi * d * h} \quad (\text{Equação 4.5})$$

onde:

f_t = Resistência à tração por compressão diametral;

F = Força de ruptura;

d = Diâmetro do corpo de prova

h = Comprimento do corpo de prova

4.2.3 Módulo de elasticidade

O objetivo deste ensaio é determinar o módulo de elasticidade estático das misturas de argamassas modificadas e argamassa de referência. Para isso,

submeteram-se corpos de prova do compósito cimentício de comprimento igual a 100 mm e diâmetro igual a 50 mm a ensaios de compressão. Foram instalados dois transdutores de deslocamento de comprimento igual a 50 mm – em lados opostos do modelo – para a obtenção da variação de comprimento e, conseqüentemente, da deformação das amostras.

A velocidade de carregamento foi igual a 0,005 mm/s e as deformações foram adotadas para valores de 5% a 50% da tensão de ruptura.

4.2.4 Rigidez de almofada

Este foi um ensaio utilizado primeiramente por Montedor (2004) e Siqueira (2007). Bellucio (2010), com algumas adaptações com o objetivo de facilitar e aprimorar o ensaio, o utilizou também. Visando determinar uma medida de rigidez da almofada – sua capacidade de deformar-se – este ensaio consiste em aplicar um carregamento distribuído uniforme sobre a almofada de apoio no sentido de sua maior área e medir sua variação de espessura.

A forma de obter a variação da espessura das almofadas com a aplicação do carregamento de compressão foi através do deslocamento do pistão da máquina de ensaios. Portanto, não foi usado nenhum transdutor de deslocamento (à exceção dos ensaios na argamassa *AM3*, onde foram usados quatro transdutores instalados nas extremidades da almofada, para avaliar uma possível diferença nos valores de rigidez dependendo da forma de medida da variação da espessura). Nos ensaios de Montedor (2004) e Siqueira (2007), as almofadas foram carregadas até 2000 kN e depois aliviadas. Já em Bellucio (2010), o carregamento foi até 1500 kN, já que as pesquisas preliminares indicaram que carregamentos superiores a 1500 kN não influenciavam consideravelmente. A velocidade de carregamento foi igual a 0,01 mm/s, idem a utilizada por Bellucio (2010).

Para se estimar a rigidez da almofada, aplica-se a Equação 4.6. Lembrando que para utilização como elemento de apoio em ligações de concreto pré-moldado, espera-se uma boa capacidade da almofada em deformar-se sem romper, ou seja, uma baixa rigidez.

$$R = \frac{F}{A} * \frac{h}{\Delta h} \quad (\text{Equação 4.6})$$

onde:

R = Rigidez da almofada

F = Força de compressão aplicada

A = Área da almofada

h = Espessura da almofada

Δh = Variação de espessura da almofada

A rigidez da almofada pode também ser avaliada através de uma regressão linear, realizada após a fase de acomodação do carregamento, na curva que relaciona a tensão atuante e sua deformação. Nesse caso, a rigidez é dada pelo coeficiente angular de uma reta que passa ou se aproxima dos pontos da curva.

O ensaio recebeu o nome de “rigidez de placa”, dado por Montedor (2004), devido à forma da peça e por esta possuir valores maiores de deformação que os corpos de prova cilíndricos, o que acabaria por mascarar o valor da rigidez. Nos estudos anteriores a este, foi utilizado este termo. Entretanto, ao decorrer do atual estudo, percebeu-se que o termo “placa” pode levar o leitor a crer que o experimento sujeita algum elemento à flexão, o que não é verdade. Por esse motivo, substituiu-se o nome do ensaio para “rigidez de almofada”.

Pode-se diferenciar a rigidez de almofada da rigidez obtida nos ensaios de módulo de elasticidade pela primeira ser restrita a modelos que possuem pequena espessura – as almofadas de argamassa – e que, segundo Montedor (2004), possuem rigidez inferior a amostras cilíndricas.

4.3 Montagem das amostras para ensaios de ligação de blocos

Os modelos para os ensaios de ligação consistiram em dois blocos cúbicos de concreto com arestas de 150 mm ligados com ou sem almofada de apoio. O corpo de prova formado foi levado então aos ensaios de compressão centrada e excêntrica. Entre as variáveis do estudo, e que são descritas na sequência, estão a presença de blocos monolíticos com seção transversal quadrada de 150 mm e altura igual a 300 mm, que foram moldados e ensaiados para servir como parâmetro de comparação. A geometria dos modelos para ensaios de ligação atendem, portanto, as recomendações de Mehta e Monteiro (2008), de que a relação altura / diâmetro do corpo de prova deva ser igual a dois.

Alguns dos blocos de concreto apresentaram uma superfície rugosa. Essas saliências, quatro e nove mossas com espessuras de 0 mm (superfície lisa), 0,5 mm, 1 mm e 1,5 mm, foram propositalmente conformadas nas faces ligadas do bloco, que visaram simular as imperfeições encontradas nas estruturas reais de concreto pré-moldado e a capacidade que a almofada, colocada entre ambos os blocos, tem de absorver essas falhas. Nos ensaios de ligação que envolvem blocos com saliências na face conectada, somente o bloco superior é que apresentou essas irregularidades propositais, sendo o outro bloco com a face conectada totalmente regular.

A Figura 4.3 detalha a disposição das mossas para os blocos contendo nove saliências. As faces com quatro saliências seguiram a mesma disposição adotada por El Debs et al. (2008). Já a Figura 4.4, salvo diferenças devido às variáveis do trabalho, mostra o modelo analisado nos ensaios de ligação.

O sistema de fôrmas dos blocos de concreto é do tipo “encaixe”, onde a caixa lateral (Figura 4.5a), que foi confeccionada com madeira compensada plastificada e fixa com barras rosqueadas, encaixa sobre o fundo da fôrma (Figura 4.5b), que é feito com madeira compensada e placa de poliestireno colada sobre essa madeira, fornecendo o aspecto saliente da face conectada dos blocos de concreto.

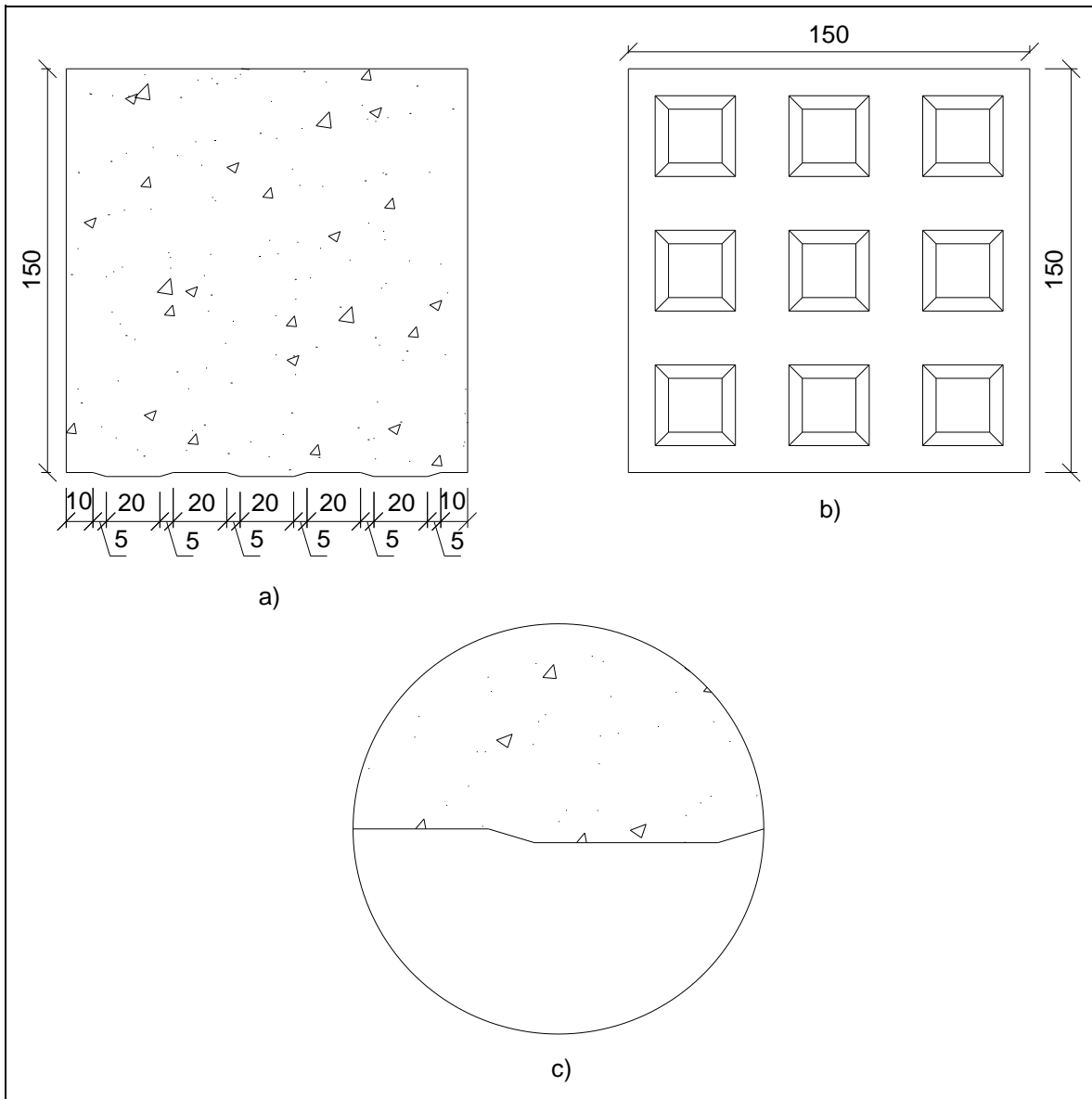


Figura 4.3 – Detalhe do bloco de concreto com nove saliências (dimensões em mm) (Adaptado de El Debs et. at. (2008)): a) Vista lateral; b) Vista da face rugosa; c) Detalhe da saliência do bloco

O processo de adensamento do concreto dos blocos foi realizado através de agulha de vibração manual. Semelhante aos corpos de prova cilíndricos, os quais possuem esse procedimento normatizado, os blocos foram concretados em três camadas com vinte e cinco golpes em cada camada. A Figura 4.6 ilustra o processo de adensamento dos blocos de concreto.

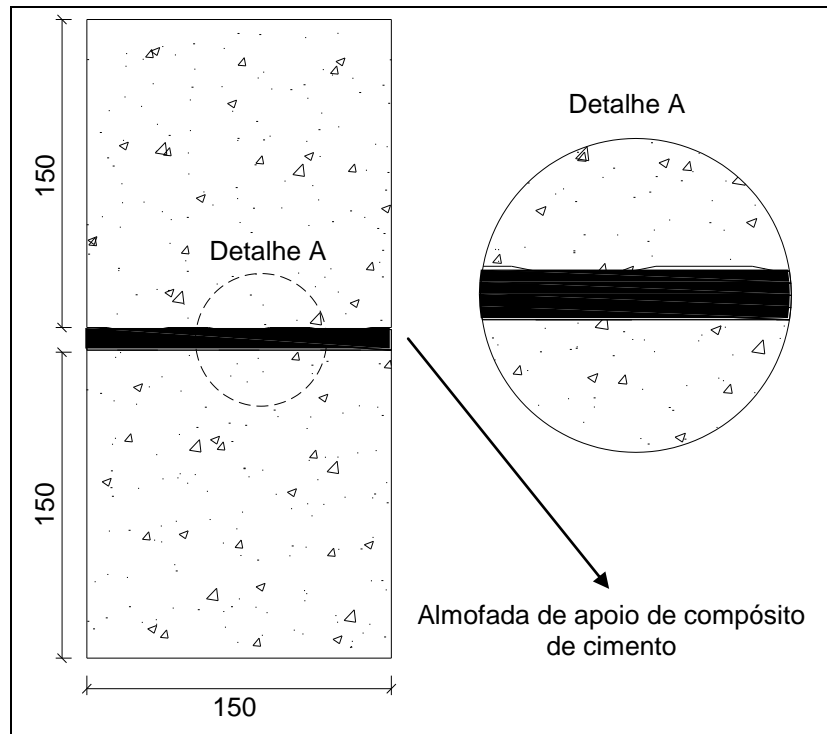


Figura 4.4 – Montagem dos corpos de prova (dimensões em mm)

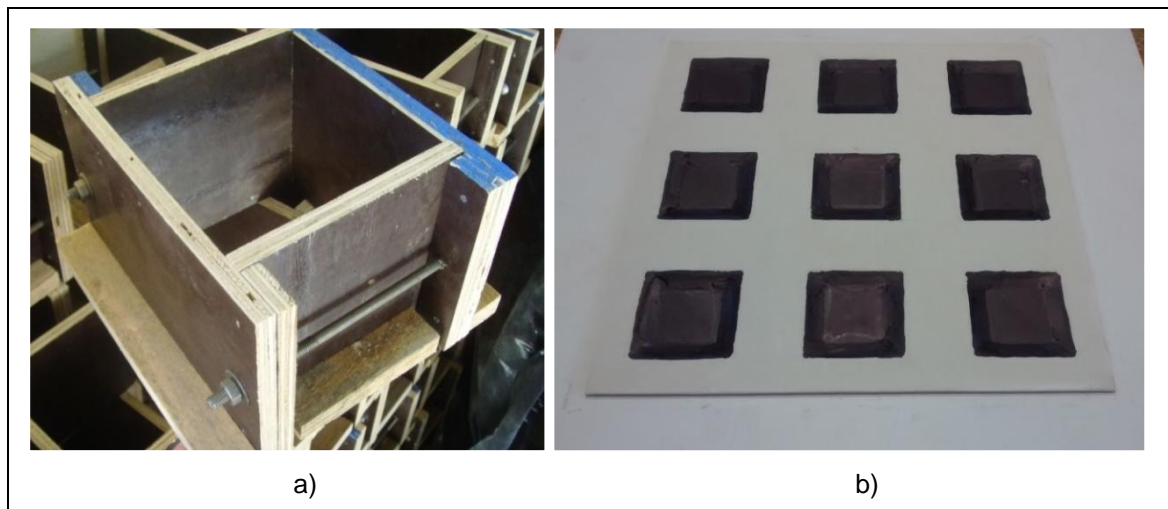


Figura 4.5 – Fôrma dos blocos de concreto: a) Caixa lateral; b) Fundo da fôrma



Figura 4.6 – Processo de adensamento do concreto dos blocos

A Figura 4.7 apresenta uma imagem de blocos de concreto com saliências na face a ser ligada após a desfôrma.

A concretagem das almofadas, que possuíam 150 mm de lado e espessura de 10 mm, foi feita em série, em fôrmas de madeira e de forma vertical, como mostra a Figura 4.8. Nesse sistema há vantagens na produção das almofadas, pois o acabamento das faces é feito pela própria fôrma. Nas pesquisas de Montedor (2004) e Siqueira (2007), que utilizavam concretagem horizontal, havia a dificuldade de se controlar o bom acabamento das superfícies. Outras vantagens desse sistema são a produção em maiores quantidades e a desmoldagem, bastando retirar cada uma das divisórias através da liberação de parafusos dispostos nas extremidades da fôrma.

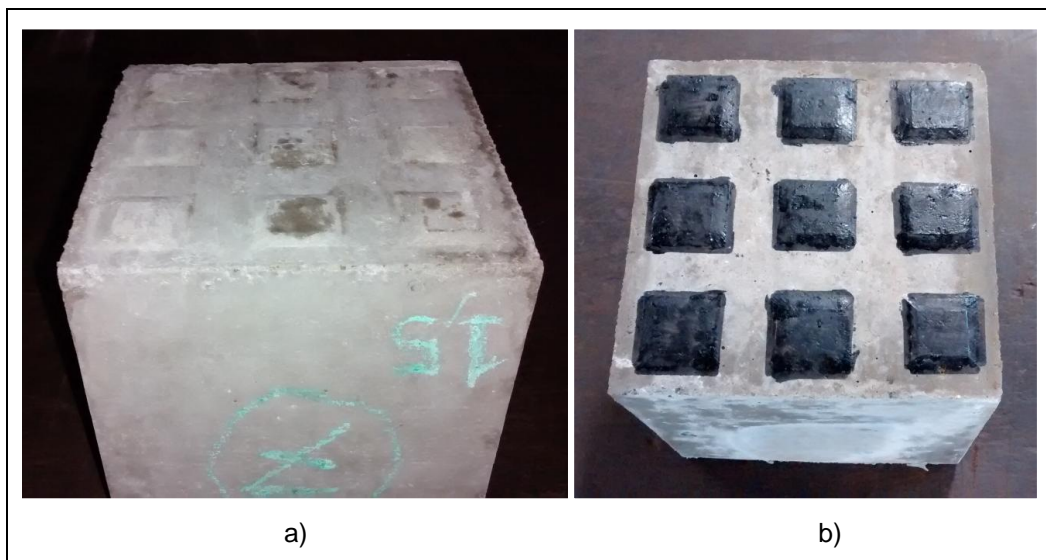


Figura 4.7 – a) Bloco de concreto com saliências em uma das faces; b) Bloco de concreto com saliências em destaque em uma das faces

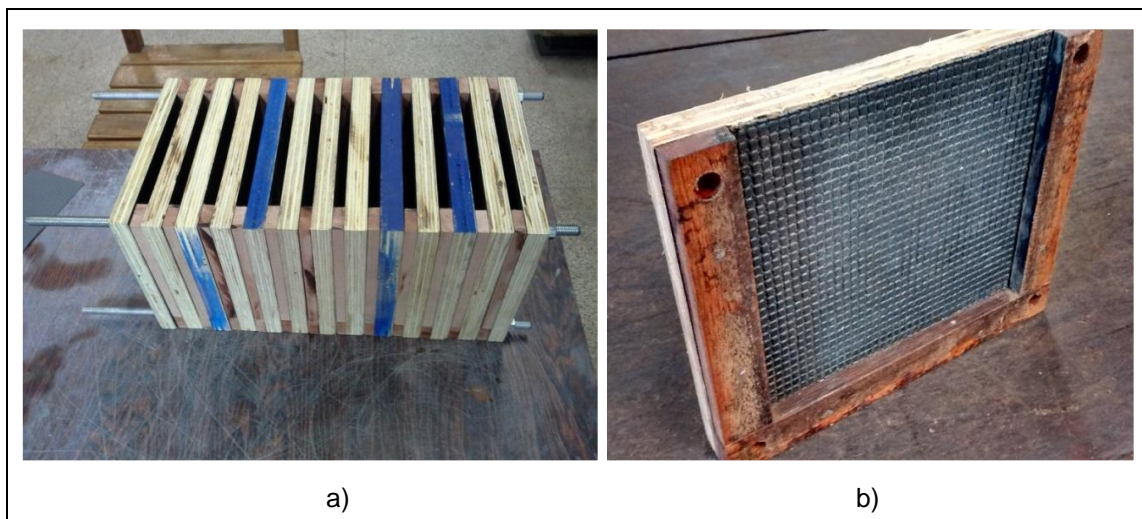


Figura 4.8 – Fôrma das almofadas: a) Fôrma completa; b) Fôrma unitária

Como a pesquisa de Bellucio (2010) apontou que almofadas que apresentam ambos os lados com pequenas rugosidades superficiais possuem rigidez aproximadamente 30% inferior em relação às lisas, utilizaram-se nesse estudo almofadas com superfícies rugosas uniformes. Isso foi realizado através do emprego de manta de borracha com a devida rugosidade aderida à forma das almofadas, indicada na Figura 4.9. Não foram realizados ensaios em almofadas com superfícies lisas.



Figura 4.9 – Manta para introdução da rugosidade das almofadas

Para a mistura da argamassa no estado fresco foi utilizada uma bateadeira industrial com capacidade de 20 litros que possui vários níveis de velocidade e proporciona boa energia de amassamento. A desmoldagem das almofadas e amostras cilíndricas ocorreu 48 horas após a moldagem.

A desfôrma foi realizada retirando-se as barras rosqueadas e liberando, uma a uma, as almofadas, que estão retratadas na Figura 4.10.

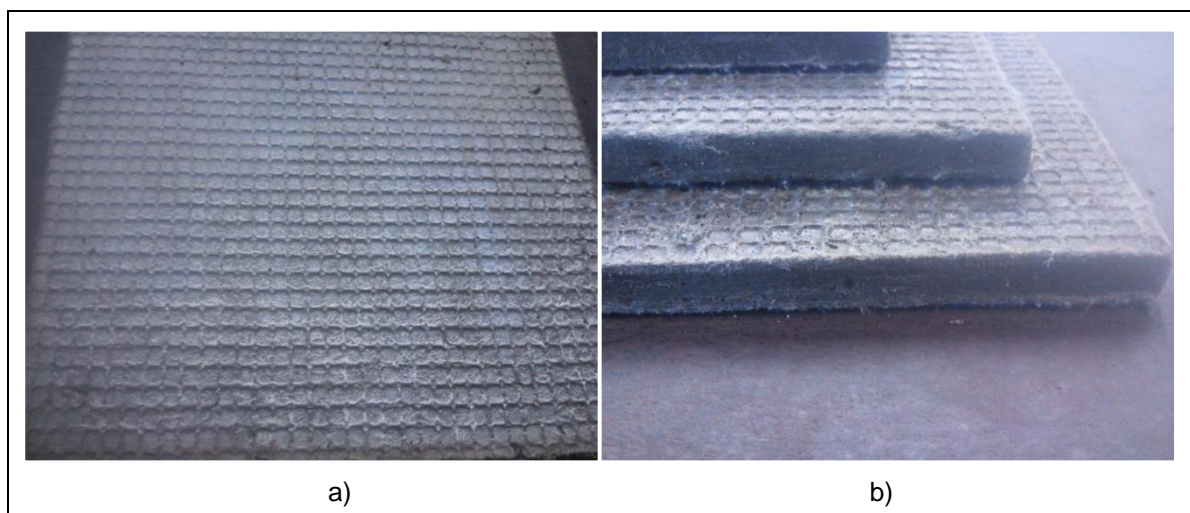


Figura 4.10 – Almofada de argamassa modificada: a) vista superior; b) Vista lateral / superior

O processo de cura adotado foi semelhante às pesquisas anteriores. Seguindo as recomendações de Ray et al. (1995) para compósitos cimentícios modificados com polímeros, as primeiras 48 horas após a desmoldagem foram em câmara úmida. Após esse período as amostras foram curadas a seco e em temperatura ambiente até a data de execução dos ensaios. O mesmo foi válido para os corpos de prova de argamassa de referência. Todos os ensaios com argamassas foram realizados com idades entre 14 e 21 dias da data de moldagem.

Os blocos de concreto foram confeccionados com a utilização de agregado graúdo – pedrisco – e, por isso, não puderam ser realizados na mesma batedeira. Para eles, utilizou-se uma betoneira. A desmoldagem das amostras cilíndricas para o ensaio de compressão e das amostras cúbicas para ensaio de ligação foi realizada com 24 horas da data de moldagem seguido de imediata disposição em câmara úmida para cura e retirados um dia antes da execução dos ensaios. Os blocos de concreto foram ensaiados com sete dias da data de moldagem.

Antes da execução dos ensaios de ligação foi realizado o capeamento com massa plástica da superfície não conformada pela fôrma dos blocos de concreto para sua completa regularização, como indicado na Figura 4.11.



Figura 4.11 – Bloco com superfície superior regularizada com massa plástica

4.4 Ensaios de compressão em ligações

O carregamento nos corpos de prova que analisam a transferência de tensões de compressão com almofada de argamassa modificada disposta entre dois blocos de concreto, de modo a simular uma ligação de concreto pré-moldado, é de compressão centrada e excêntrica. Para casos de compressão centrada, foi

estudado também o comportamento da almofada em regime cíclico de carregamento.

A taxa de carregamento adotada para os ensaios monotônicos foi de 0,3 kN/s, à exceção dos modelos monolíticos (sem descontinuidade), que necessitaram de maior carga e maior tempo de ensaio para que houvesse a ruptura. Nesses casos, em função de adaptações necessárias ao perfeito funcionamento da máquina de ensaios, a taxa de carregamento adotada foi de 0,9 kN/s. Segundo Andrade e Tutikian (2010), a velocidade de carregamento influencia em no máximo $\pm 5\%$ o resultado do ensaio de compressão.

Mesmo com o capeamento das faces dos blocos de concreto com massa plástica, nas extremidades do corpo de prova foram dispostos aparelhos de neoprene para distribuição completamente uniforme das tensões de compressão, como pode ser visto na Figura 4.12a.

Na Figura 4.12a pode-se ver também um modelo para ensaio de ligação de blocos com almofada de apoio e com saliências na face ligada para carregamento monotônico centrado. Ampliando-se a visão na região descontínua, é possível observar, na Figura 4.12b, um detalhe do contato bloco-almofada-bloco.

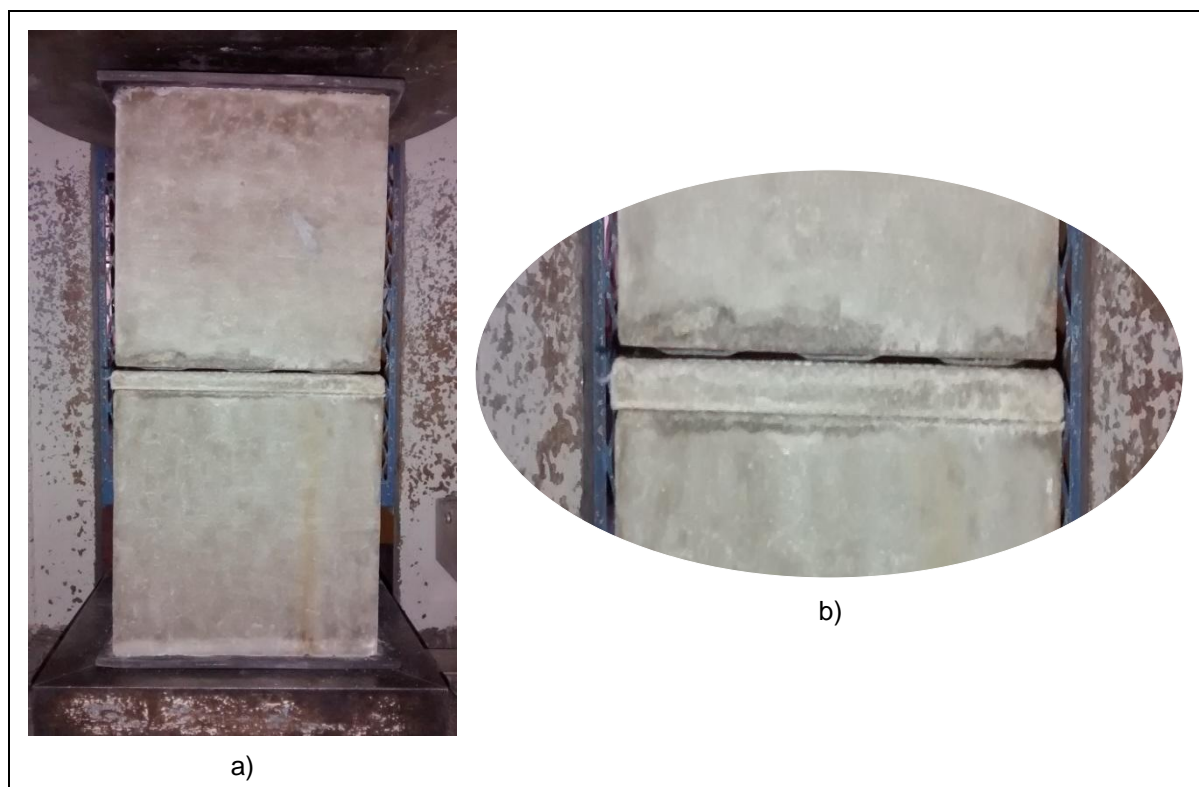


Figura 4.12 – Ensaio de ligação de blocos: a) Corpo de prova; b) Detalhe do contato bloco-almofada-bloco

Nos ensaios de compressão excêntrica, foi realizada a aplicação da força distribuída em uma área localizada apenas em uma parte não centrada da seção da peça, como mostra a Figura 4.13. O valor da excentricidade foi igual a $\frac{1}{6}$ da largura do bloco (25 mm) e a área de carregamento foi de 90 mm x 150 mm.

Ensaio piloto realizado no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos permitiram validar os testes de carga excêntrica. Esses testes foram realizados em blocos monolíticos de 300 mm de altura e seção transversal quadrada de arestas iguais a 150 mm. A Figura 4.14 ilustra o carregamento excêntrico e as conseqüentes fissuras geradas com o acréscimo de tensão.

Os ensaios monotônicos de ligação de blocos foram realizados em uma máquina ELE Autotest 2000, com capacidade para 2000 kN, embora os ensaios piloto tenham sido realizados na máquina de ensaios INSTRON 8506.

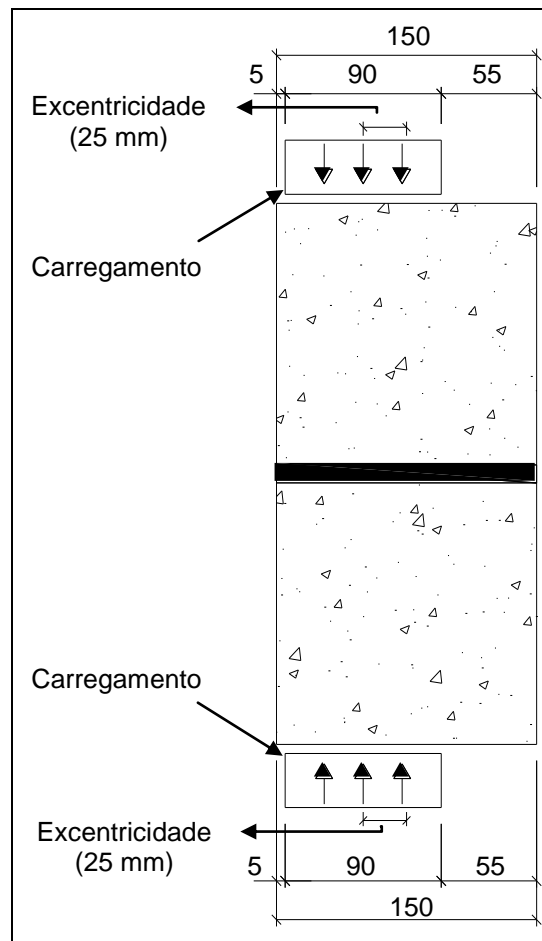


Figura 4.13 – Excentricidade e aplicação do carregamento excêntrico (dimensões em mm)

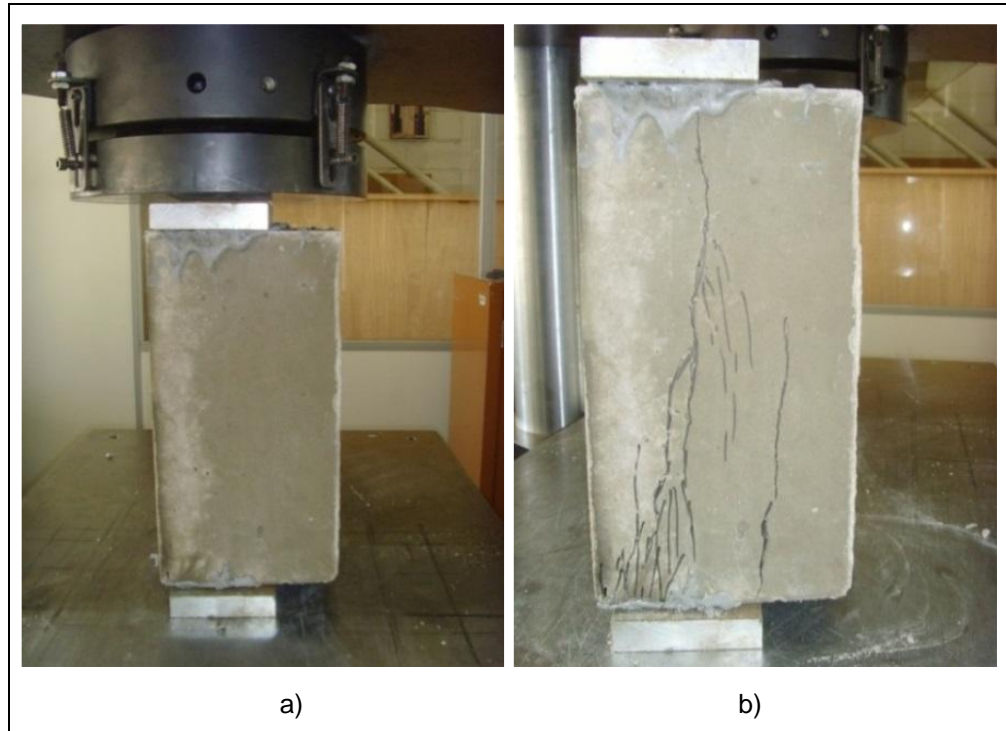


Figura 4.14 – Ensaios pilotos de carga excêntrica

Não há presença de esforços de tração nos modelos ensaiados à compressão excêntrica. Na borda mais próxima do carregamento as tensões são máximas e na borda mais afastada as tensões, teoricamente, são nulas. A distribuição das tensões nesses modelos se dá conforme a Figura 4.15.

Nos ensaios com carregamento excêntrico, a massa plástica foi aplicada na parte futuramente carregada por compressão nas extremidades dos modelos de ensaio. Uma chapa espessa de aço de 90 mm x 150 mm foi usada para marcação dessa área e também para servir como base para o carregamento de compressão excêntrica. Esses procedimentos de delimitação da área de carregamento e capeamento foram realizados com 24 horas de antecedência ao ensaio. Um exemplo desse ensaio está ilustrado na Figura 4.16.

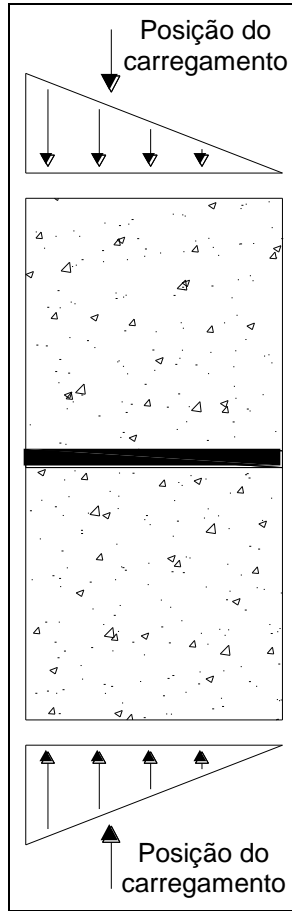


Figura 4.15 – Distribuição das tensões no ensaio de compressão excêntrica



Figura 4.16 – Ensaio de compressão excêntrica

Foram analisados também modelos de ligação submetidos à um regime de carga repetitivo, simulando uma situação real de carregamento e descarregamento. Nesses casos, procurou-se verificar o desempenho da ligação para ciclos de carregamento e descarregamento. Esses experimentos foram divididos em três etapas, como indica a Figura 4.17.

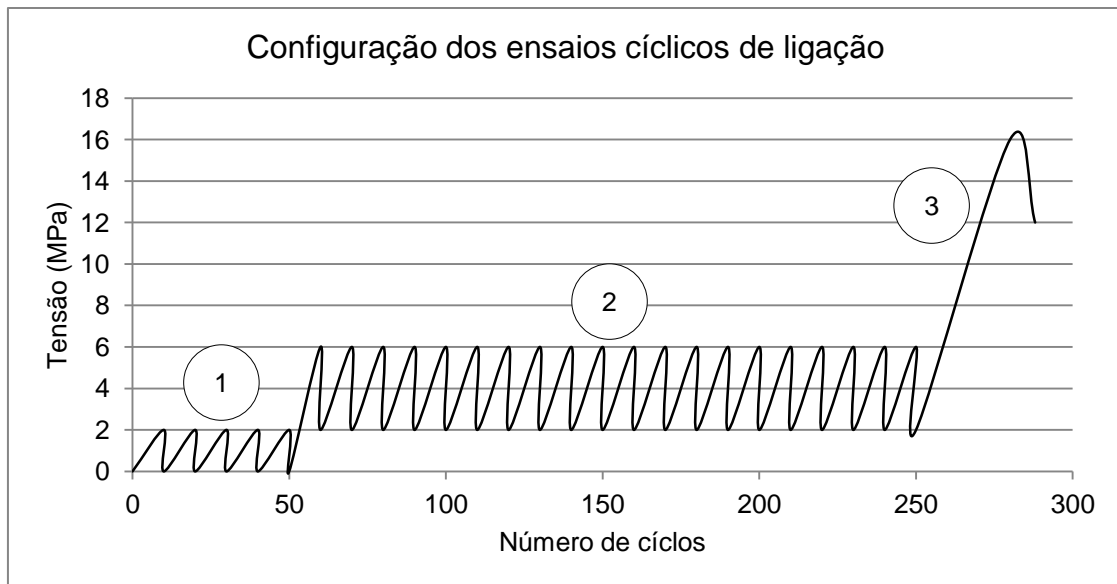


Figura 4.17 – Configuração do regime cíclico de carregamento

As configurações de cada etapa – adaptadas de acordo com a capacidade e disponibilidade da máquina de ensaios INSTRON 8506 – foram as seguintes:

- Etapa 1: 50 ciclos de carregamento e descarregamento à uma taxa de 10 kN/s. Nesse momento, a força atuante variou de um valor residual de 0,2 kN até 45 kN (2 MPa). Cada ciclo de carregamento durou 4,5 s;
- Etapa 2: 200 ciclos de carregamento e descarregamento à uma taxa de 20 kN/s. Nessa etapa, a tensão atuante máxima foi um valor considerado de serviço (6 MPa), sendo que o alívio de carregamento não foi total, se restringindo ao valor máximo do período 1 (2 MPa). Cada ciclo demorou também 4,5 s;
- Etapa 3: Regime monotônico de ruptura. Nessa etapa o carregamento se deu em ciclo único até se obter a ruína da amostra. Ao contrário das demais etapas e por questões de segurança relacionadas ao funcionamento da máquina de ensaios, a taxa de carregamento é dada por controle de deslocamento, que foi igual a 0,005 mm/s.

Os modelos ensaiados em regime cíclico foram amostras de ligação com e sem almofada de apoio contendo saliências de 1 mm de espessura no bloco superior. Os ensaios foram de compressão centrada, totalizando, portanto, duas séries. A Figura 4.18 apresenta uma fotografia de um ensaio cíclico de compressão.



Figura 4.18 – Ensaio cíclico com almofada de apoio e rugosidade de 1 mm de espessura

As máquinas onde foram realizados os ensaios estão apresentadas na Figura 4.19. A ELE Autotest 2000, além de servir para a execução dos ensaios monotônicos de ligação, serviu também para os ensaios de compressão e tração nas argamassas e compressão nos concretos de referência dos ensaios de ligação. Já a INSTRON 8506 foi utilizada nos ensaios cíclicos de ligação, na determinação do módulo de elasticidade e rigidez de almofada, além dos ensaios pilotos de compressão excêntrica em ligações.

Os ensaios foram divididos em séries, como indica a Tabela 4.7. Foram ensaiados seis corpos de prova por série, realizando após a verificação de valores espúrios pelo *Critério de Chauvenet*. O critério utilizado para verificação de valores suspeitos possui o seguinte enunciado: “se em uma série de n medições, a probabilidade de ocorrência de um desvio de valor x é menor do que $1/2.n$, então a medição que apresentar tal desvio deverá ser rejeitada”.



Figura 4.19 – Máquinas de ensaios utilizadas: a) ELE Autotest 2000; b) Instron 8506

Após o descarte, foram realizados o cálculo da média dos resultados das cargas máximas nos ensaios de compressão, além de desvio padrão e coeficiente de variação.

Em cada moldagem dos blocos para ensaios de ligação foram recolhidas também seis amostras desse concreto para controle da sua resistência à compressão. Assim, em virtude de possíveis diferenças na resistência do compósito ao longo das dosagens e de forma a amortizar tais diferenças, foi relacionada a resistência da ligação com a resistência à compressão do concreto. Portanto, a apresentação dos resultados foi feita em função dessa relação adimensional, chamada no trabalho de relação L/C . Dessa forma, pode-se dizer que determinada ligação tem um percentual do valor da resistência à compressão do concreto de referência.

As variáveis dos ensaios de ligação são o tipo e regime de carregamento (centrado ou excêntrico; monotônico ou cíclico), a espessura e a quantidade das saliências dos blocos de concreto, a classe de resistência à compressão das amostras de concreto, a solidarização ou não da almofada a um dos blocos de

concreto, além da presença ou não de almofada de apoio. Além disso, cada variável tem um valor padrão, alterando-a em casos específicos.

Às séries foram atribuídos nomes, baseado nas siglas que identificam cada uma das variáveis analisadas. A atribuição dos nomes foi dada pela sequência das variáveis indicadas na Tabela 4.7.

As letras C ou E indicam, respectivamente, se o carregamento é centrado ou excêntrico; na sequência há a indicação da espessura e da quantidade das mossas na face conectada ou então se o bloco foi monolítico, o qual é identificado pela sigla Mo; o próximo número indica a classe de resistência dos blocos de concreto; a letra L indica que a almofada de apoio não foi usada solidarizada ao bloco inferior de concreto, ao contrário da letra S, que aponta almofada solidária ao bloco; a sigla P identifica a presença de almofada no corpo de prova e a sigla A indica sua ausência; já as letras M e R indicam, respectivamente, se o carregamento é de caráter monotônico ou repetitivo.

Por exemplo, a série C1965LPM indica modelo com carregamento centrado, com nove mossas de 1 mm de espessura em concreto de 65 MPa. Essa série possuiu almofada de apoio livre e foi submetida a carregamento monotônico.

Séries com ou sem almofada de apoio objetivaram avaliar uma possível melhora na resistência à compressão centrada e excêntrica da ligação através do uso de almofada de apoio. Nesses casos, a comparação do desempenho de cada série respeita as demais variáveis. Por exemplo, para avaliar o desempenho da ligação com almofada em relação à ligação sem almofada de apoio para espessuras de saliências de 1 mm, todas as demais variáveis devem ser mantidas constantes.

As espessuras das saliências foram adaptadas do estudo de El Debs et al. (2008). A única alteração se dá na menor espessura dessas mossas, que na pesquisa anterior era de 0,75 mm. Nesse estudo, para se obter valores lineares de espessuras de saliências na ligação, substituiu-se esse valor para 0,5 mm. Teoricamente, estas rugosidades simulam as encontradas em estruturas reais. Segundo os autores, em El Debs et al. (2008) houveram relatos de dificuldade, à época de sua pesquisa, na produção de fôrmas com espessuras de saliências inferiores a 0,75 mm.

As mossas de espessuras iguais a 0 mm indicam faces perfeitamente lisas. Apesar do estudo de El Debs et al. (2008) ter apontado haver pouca efetividade da almofada no caso de blocos lisos conectados (devido ao perfeito acabamento dos

blocos), optou-se nesta pesquisa por realizar os ensaios nesses casos também, a fim de confirmar a ideia anterior dos pesquisadores. Além da espessura das saliências na face conectada, também estudou-se a variação de suas quantidades (quatro ou nove mossas), avaliando de maneira mais generalizada a influência da almofada de apoio na ligação. As pesquisas de Siqueira (2007) e El Debs et al. (2008) utilizaram somente blocos com quatro dessas protuberâncias na face ligada.

Tabela 4.7 – Séries dos ensaios de compressão em ligações

| Série / variáveis | Tipo de carregamento Padrão: Centrado | Espessura das saliências na face rugosa (mm). Padrão: 1 mm | Número de saliências na face rugosa. Padrão: 9 | Resistência à compressão dos blocos de concreto (MPa). Padrão: 65 MPa | Almofada solidarizada ao bloco? Padrão: Não | Presença de almofada? Padrão: sim | Regime de carregamento Padrão: Monotônico |
|-------------------|--|---|---|--|--|--------------------------------------|--|
| CMo65M | Centrado | Monolítico | - | 65 | - | - | Monotônico |
| C1965LPM | Centrado | 1,0 | 9 | 65 | Não | Sim | Monotônico |
| C1465LPM | Centrado | 1,0 | 4 | 65 | Não | Sim | Monotônico |
| C1940LPM | Centrado | 1,0 | 9 | 40 | Não | Sim | Monotônico |
| C1990LPM | Centrado | 1,0 | 9 | 90 | Não | Sim | Monotônico |
| C0,5965LPM | Centrado | 0,5 | 9 | 65 | Não | Sim | Monotônico |
| C1,5965LPM | Centrado | 1,5 | 9 | 65 | Não | Sim | Monotônico |
| C065LPM | Centrado | 0 | - | 65 | Não | Sim | Monotônico |
| C0,5965AM | Centrado | 0,5 | 9 | 65 | - | Não | Monotônico |
| C1965AM | Centrado | 1,0 | 9 | 65 | - | Não | Monotônico |
| C1,5965AM | Centrado | 1,5 | 9 | 65 | - | Não | Monotônico |
| C065AM | Centrado | 0 | - | 65 | - | Não | Monotônico |
| C1965SPM | Centrado | 1,0 | 9 | 65 | Sim | Sim | Monotônico |
| C1965LPR | Centrado | 1,0 | 9 | 65 | Não | Sim | Cíclico |
| C1965AR | Centrado | 1,0 | 9 | 65 | - | Não | Cíclico |
| EMo65M | Excêntrico | Monolítico | - | 65 | - | - | Monotônico |
| E1965LPM | Excêntrico | 1,0 | 9 | 65 | Não | Sim | Monotônico |
| E065LPM | Excêntrico | 0 | - | 65 | Não | Sim | Monotônico |
| E1965AM | Excêntrico | 1,0 | 9 | 65 | - | Não | Monotônico |
| E065AM | Excêntrico | 0 | - | 65 | - | Não | Monotônico |
| E1965SPM | Excêntrico | 1,0 | 9 | 65 | Sim | Sim | Monotônico |

As indústrias que produzem elementos pré-fabricados de concreto utilizam, costumeiramente, de maior controle qualidade na produção em relação aos compósitos moldados *in loco*, elevando os valores de resistência e durabilidade de seus elementos. No setor, há certa tendência de se trabalhar cada vez mais com produtos pré-moldados de concreto de alto desempenho, o que acabou estimulando o emprego, nesta pesquisa, de concretos de maiores resistências mecânicas em relação ao usualmente utilizado.

Ao contrário do estudo de Siqueira (2007), que avaliava o desempenho das ligações com e sem almofada de apoio para concretos de resistência de cerca de 35 MPa, essa pesquisa adota como padrão de resistência um Concreto de Alta Resistência (CAR), que, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), são misturas com resistência à compressão superiores a 50 MPa. O padrão de resistência média adotado para os concretos foi de 65 MPa, porém há, em algumas séries, concretos com diferentes classes de resistência, de modo a avaliar o desempenho da ligação com almofada de argamassa mediante a variação desse parâmetro, o que ainda não foi realizado em pesquisas anteriores.

As classes de resistência são variáveis em séries diferentes. Não foram realizados ensaios com classes de resistências variáveis dentro de um mesmo corpo de prova, com um bloco com resistência diferente do outro.

Nos ensaios com almofadas solidarizadas ao bloco de concreto, as almofadas de argamassa foram dispostas no fundo da fôrma de um dos blocos da ligação quando do lançamento do concreto (Figura 4.20). Isso possibilitou o estudo, à compressão centrada e excêntrica, de um arranjo onde a almofada foi fixada a um dos blocos conectados (Figura 4.21). Nesses casos, o bloco cuja almofada não está solidarizada possui o padrão de nove saliências de 1,0 mm de espessura.



Figura 4.20 – Fôrma para bloco de concreto com almofada inserida antes do lançamento do concreto

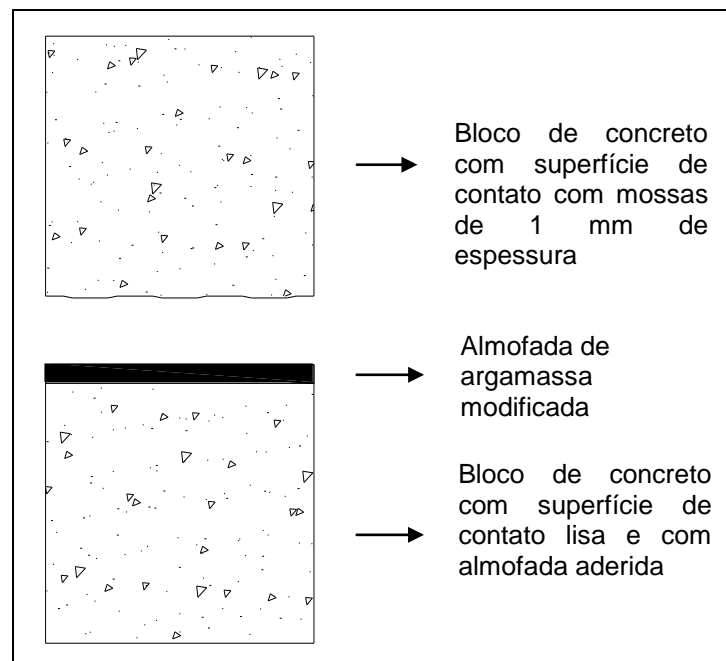


Figura 4.21 – Detalhe do contato bloco-almofada de apoio para corpo de prova com almofada solidarizada ao bloco de concreto

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Ensaio de caracterização

Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e rigidez de almofada para os quatro tipos de argamassas estudadas. Através da análise desses resultados foi definida a dosagem com a qual foram confeccionadas as almofadas de argamassa para os ensaios de ligação.

Foi também realizada uma análise comparativa com os ensaios realizados por Bellucio (2010), evidenciando e justificando possíveis diferenças entre ambas as pesquisas.

Os resultados foram analisados estatisticamente através do *Critério de Chauvenet*, o que possibilitou o descarte de valores espúrios. Além da média, foi calculado também o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada mistura cimentícia. Através desse coeficiente de variação pôde ser calculada uma estimativa de dispersão dos resultados, que é apresentada nas tabelas e gráficos que seguem ao longo do capítulo.

O anexo A, ao final do trabalho, apresenta os resultados de todos os corpos de prova ensaiados para todos os ensaios de caracterização.

5.1.1 Ensaio de compressão axial

Após a realização dos ensaios de compressão axial nas seis amostras dos quatro tipos de argamassas estudadas foi possível verificar, em uma análise visual, que a mistura de referência teve um comportamento frágil – apesar de mais resistente – em relação às modificadas. Nesse último caso os corpos de prova permaneceram íntegros após a ruptura.

A Tabela 5.1 e a Figura 5.1 apresentam os resultados médios dos ensaios de compressão simples, além dos valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 5.1 – Resultados médios dos ensaios de compressão nas argamassas (6 corpos de prova)

| Tipo de argamassa / Medida | Resistência à compressão média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coefficiente de variação (%) |
|----------------------------|--------------------------------------|---------------------|------------------------------|
| AM | 10,60 | 0,658 | 6,2 |
| AM2 | 19,14 | 1,072 | 5,6 |
| AM3 | 27,65 | 2,340 | 8,5 |
| AR | 79,94 | 1,236 | 1,5 |

Os resultados de todas as amostras dos ensaios de compressão, bem como dos demais ensaios de caracterização, estão no anexo A.

As barras na extremidade superior de cada coluna indicativa nos gráficos representam o coeficiente de variação de cada dosagem. Esse coeficiente foi calculado como sendo a razão entre o desvio padrão e a média aritmética dos resultados e é expresso em porcentagem, representando possíveis valores de dispersão de resultados.

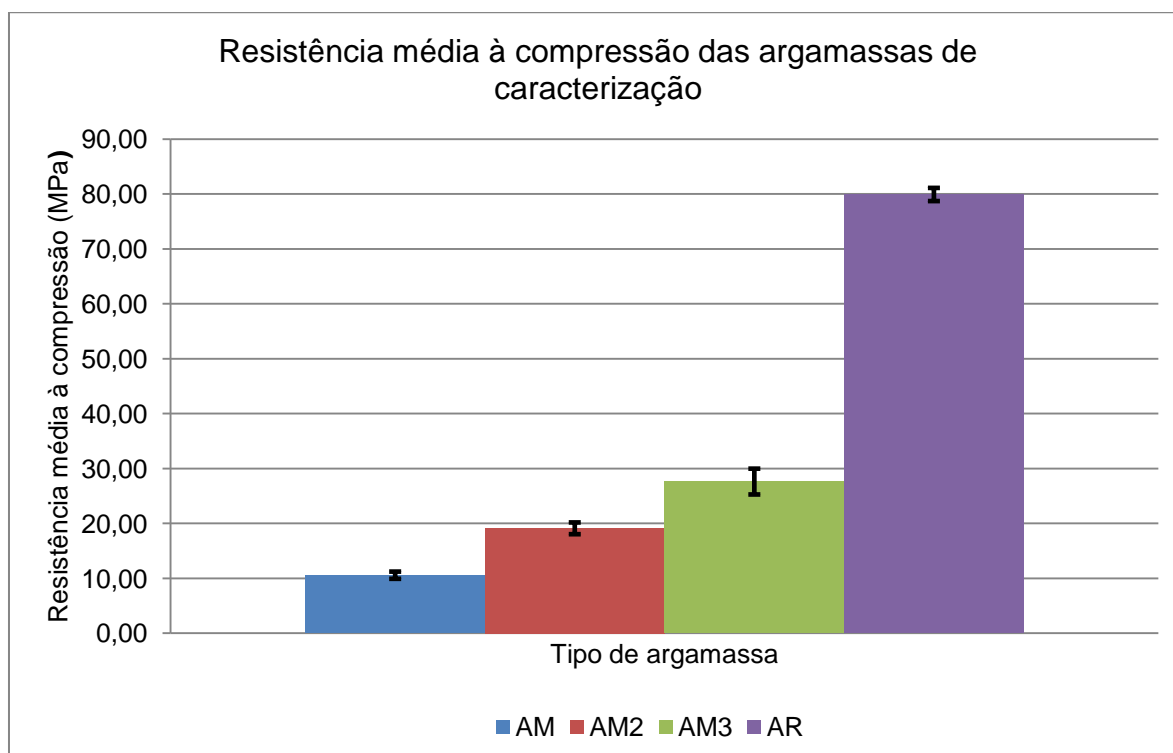


Figura 5.1 – Resultados dos ensaios de compressão nas argamassas

Observando a Figura 5.1 nota-se que a argamassa de referência possui valores significativamente maiores de resistência à compressão, da ordem de 2,9 a 8 vezes superior às argamassa modificadas. As adições de vermiculita termo-

expandida e látex estireno-butadieno provavelmente foram os responsáveis por tal redução da resistência mecânica, já que o primeiro incrementa vazios à mistura e o segundo reduz sua rigidez e conseqüentemente sua resistência mecânica.

Já no comparativo entre as misturas *AM* e *AM2*, que possuem diferentes teores de látex, confirma-se que o incremento desse polímero tende a reduzir a resistência à compressão do compósito. Nesse caso, o aumento de 100% do teor de látex diminuiu a resistência à compressão em 80%. A argamassa *AM*, utilizada por Bellucio (2010), teve resistência à compressão da ordem de 10 MPa, valor considerado abaixo do desejado.

A redução do teor de látex e da relação água / aglomerante empregada em *AM3* forneceu uma resistência à compressão 2,6 vezes superior a *AM* e 1,45 vezes superior a *AM2*.

5.1.2 Resistência à tração por compressão diametral

Realizados em corpos de prova idênticos aos do ensaio de compressão, os modelos ensaiados à tração por compressão diametral apresentaram comportamento semelhante aos dos ensaios do item anterior. A mistura sem adições especiais veio à ruína de forma frágil, sem aviso prévio. Já os compósitos modificados, em especial em função da presença das fibras, que agem aumentando a tenacidade do material, apresentaram forma de ruína dúctil. As fibras, portanto, atuaram como uma espécie de armadura, retardando a fissuração por tração. Os resultados médios e medidas de variação estão retratados na Tabela 5.2 e Figura 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral nas argamassas (6 corpos de prova)

| Tipo de argamassa / Medida | Resistência à tração média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coefficiente de variação (%) |
|----------------------------|----------------------------------|---------------------|------------------------------|
| AM | 1,81 | 0,066 | 3,6 |
| AM2 | 2,86 | 0,074 | 2,6 |
| AM3 | 3,62 | 0,191 | 5,3 |
| AR | 3,63 | 0,426 | 11,7 |

Observando a Figura 5.2 nota-se que a relação entre a resistência à tração das argamassas modificadas e da argamassa de referência foi superior que a mesma relação para os ensaios de compressão. A argamassa *AM3*, que possui 20% a menos de água em relação as demais, teve resistência média à tração tecnicamente igual à da mistura *AR*, evidenciando o aumento de tenacidade que as fibras conseguem atribuir ao compósito modificado, visto que há tendência de redução da resistência mecânica devido à inclusão da vermiculita e do látex.

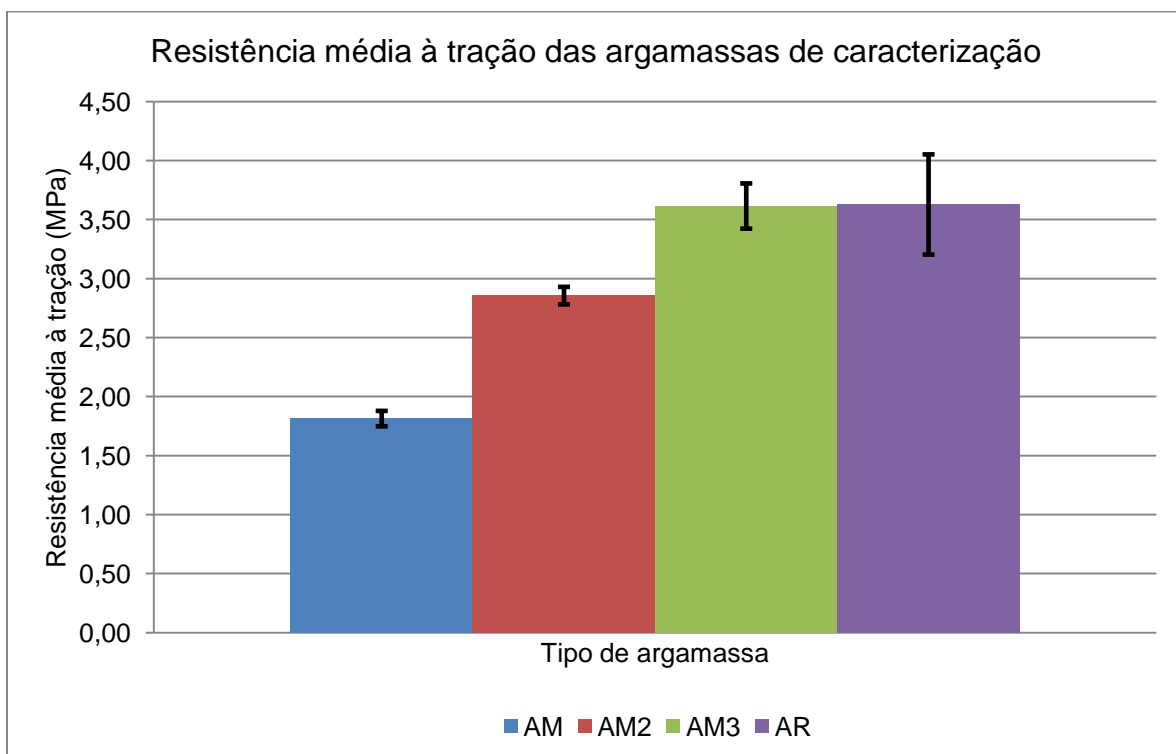


Figura 5.2 – Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral nas argamassas

A dosagem *AR* teve resistência à tração 2 vezes superior a obtida na argamassa *AM*. A redução do teor de látex da argamassa *AM2* elevou a resistência à tração, fazendo com que esta fosse 1,27 vezes inferior a *AR*.

5.1.3 Módulo de elasticidade

Os corpos de prova utilizados foram os de 5 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento. O comportamento da argamassa foi diferente para as misturas modificadas em relação à mistura de referência, assim como nos ensaios de compressão. Neste ensaio foram instalados previamente dois transdutores longitudinais em faces opostas do modelo para medir a sua variação de

comprimento e conseqüentemente a deformação específica. Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático estão apresentados na Tabela 5.3 e Figura 5.3.

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade das argamassas (6 corpos de prova)

| Tipo de argamassa / Medida | Módulo de elasticidade estático (GPa) | Desvio padrão (GPa) | Coefficiente de variação (%) |
|----------------------------|---------------------------------------|---------------------|------------------------------|
| AM | 7,51 | 1,413 | 18,8 |
| AM2 | 8,78 | 0,353 | 4,0 |
| AM3 | 11,53 | 0,538 | 4,7 |
| AR | 22,77 | 0,875 | 3,8 |

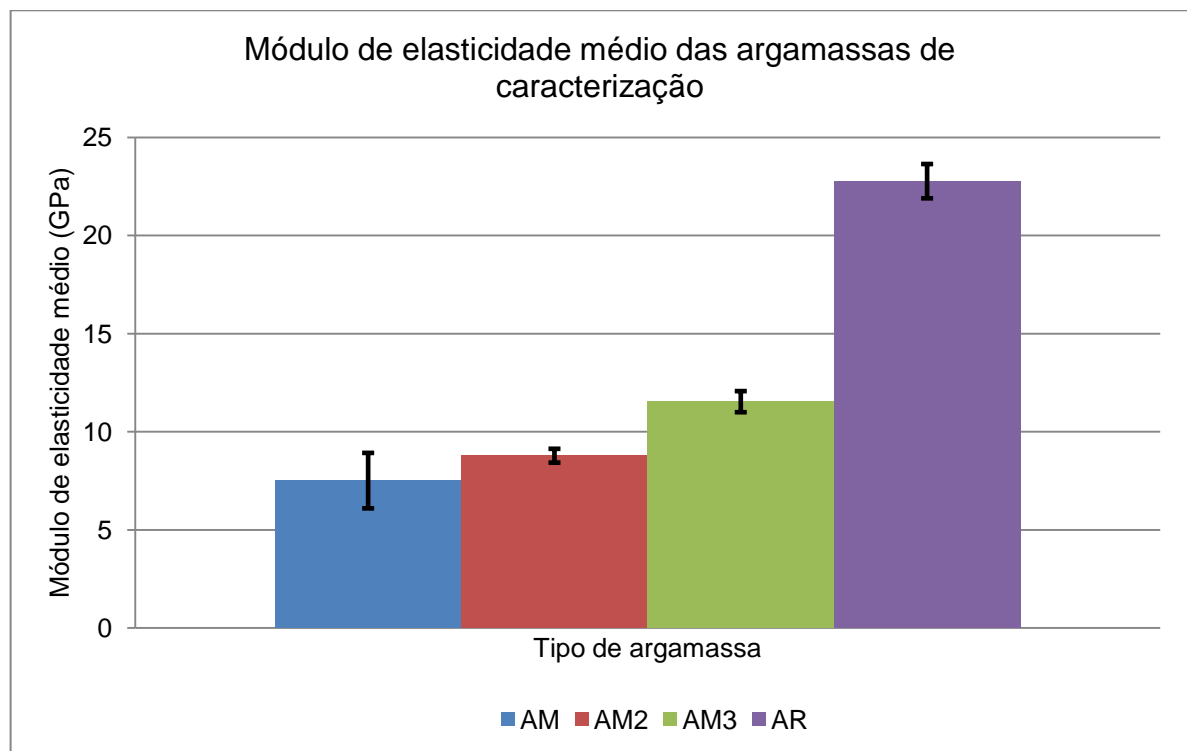


Figura 5.3 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade das argamassas

Os ensaios de módulo de elasticidade em amostras cilíndricas indicaram que a inclusão das adições de látex estireno-butadieno, vermiculita termo-expandida e fibras de polipropileno tendem a reduzir significativamente a rigidez das argamassas. O compósito de referência teve módulo de elasticidade da ordem de 23 GPa, valor três vezes superior à mistura AM e aproximadamente duas vezes superior à mistura AM3.

A dosagem *AM2* teve módulo de elasticidade 17% superior a *AM*. A redução pela metade do teor de látex aumentou a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, como era esperado. Entretanto, o aumento da resistência à compressão foi de mais de 80%, enquanto que o aumento do módulo elástico foi de somente 17%. Isso retrata grande aumento da capacidade resistente e pequeno aumento de rigidez.

Com relação a mistura *AM3*, observa-se que – em comparação à *AM2* – a redução da quantidade de água em 20% elevou o módulo de elasticidade em 31%, porém aumentou a resistência à compressão em 45% e a resistência à tração por compressão diametral em valores da ordem de 27%.

5.1.4 Rigidez de almofada

Os ensaios de rigidez de almofada, formatados para elementos com uma dimensão significativamente inferior as demais, estimou uma medida de rigidez para elementos com tal geometria.

O comportamento das almofadas com argamassa de referência pode ser visto na Figura 5.4a. Neste ensaio, ao retirar a almofada da máquina de ensaios, a mesma estava toda fragmentada. Com a aplicação do carregamento de compressão, sua variação de espessura foi pequena, sendo que a textura superficial em forma de pequenas ondulações sofreu pouco esmagamento e praticamente se manteve na cota inicial.

Na Figura 5.4b é apresentada uma almofada de argamassa modificada após ensaio de rigidez de almofada. Neste elemento houve significativa variação de sua espessura, sendo que grande parte desta variação ocorreu devido ao esmagamento das ranhuras salientes presentes na sua superfície. Além disso, não houve fragmentação do elemento.

A Figura 5.5 apresenta um gráfico da relação entre a carga de compressão aplicada e a variação de espessura sofrida pela almofada para um ensaio da argamassa *AM3*. A medida dessa variação de espessura possibilitou o cálculo da rigidez de almofada.

Nota-se na Figura 5.5 que dois perfis de carregamento predominam ao longo da curva do gráfico. Num primeiro momento, até cerca de 50 kN, há um período de

acomodação da carga, seguido de um período linear até a liberação total do carregamento, em 1500 kN.

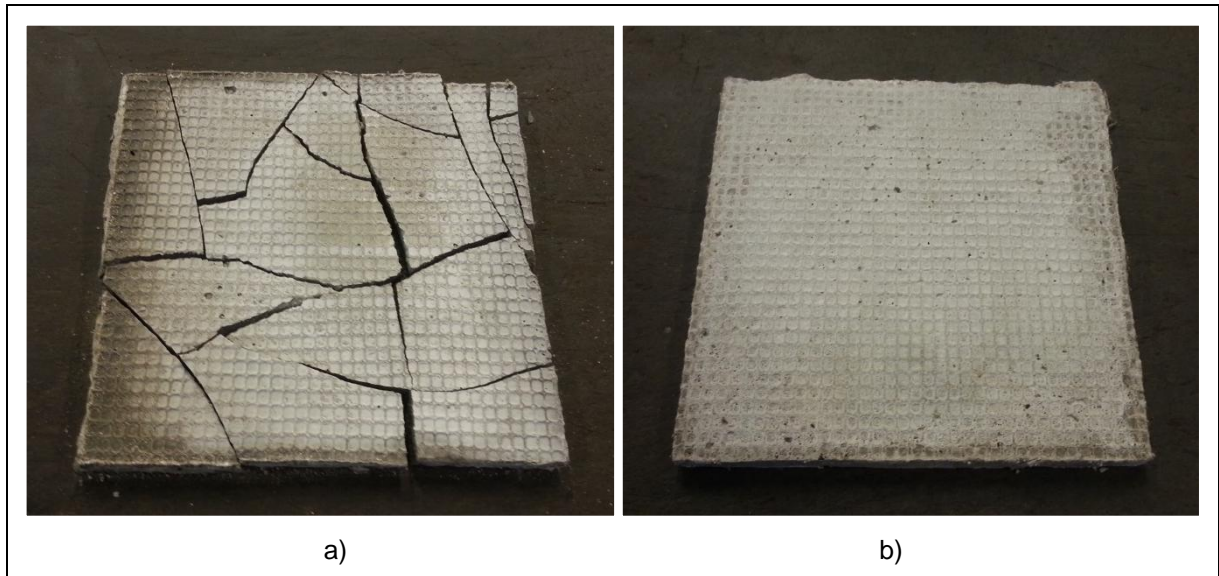


Figura 5.4 – a) Almofada de referência após ensaio de rigidez de almofada; b) Almofada modificada após ensaio de rigidez de almofada

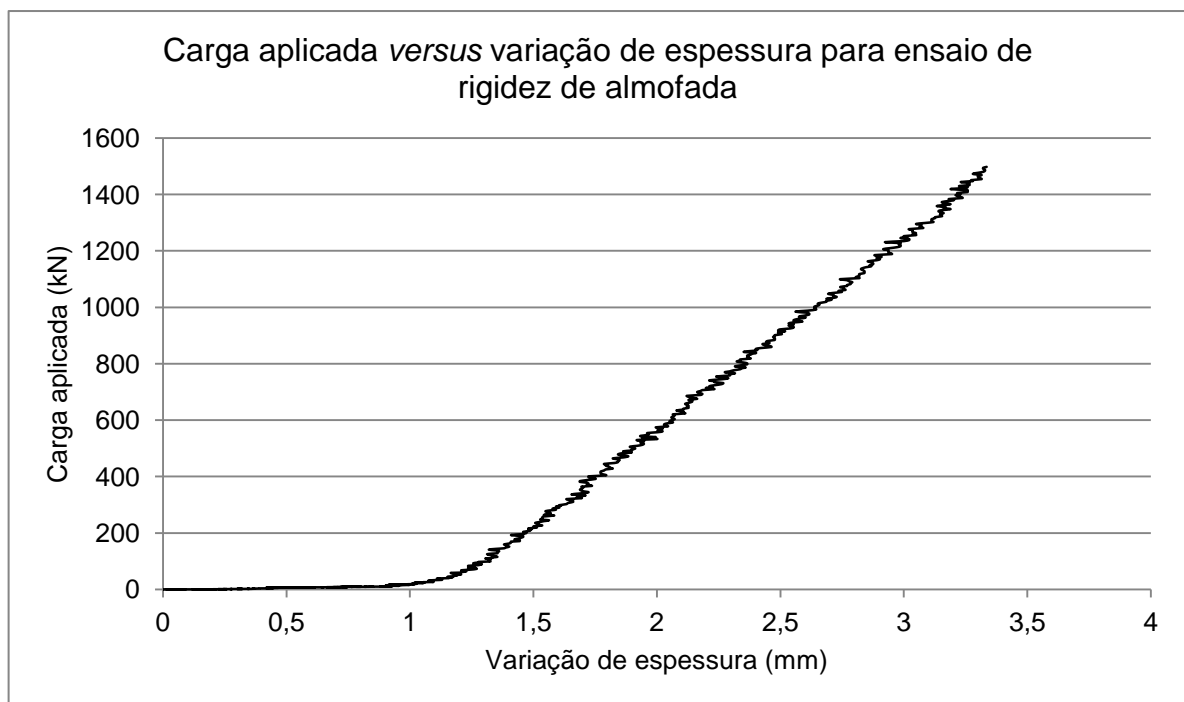


Figura 5.5 – Carga de compressão versus variação de espessura da almofada

Os ensaios de rigidez de almofada, outrora chamado de rigidez de placa, tiveram resultados de acordo com o esperado. As misturas modificadas obtiveram menor rigidez em relação as argamassas de referência. A Tabela 5.4 e a Figura 5.6 relatam os resultados encontrados nesses ensaios.

Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios de rigidez de almofada nas argamassas (6 corpos de prova)

| Tipo de argamassa / Medida | Rigidez de almofada (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coefficiente de variação (%) |
|----------------------------|---------------------------|---------------------|------------------------------|
| AM | 203,05 | 8,642 | 4,3 |
| AM2 | 246,16 | 9,228 | 3,7 |
| AM3 | 273,40 | 25,432 | 9,3 |
| AR | 352,51 | 9,496 | 2,7 |

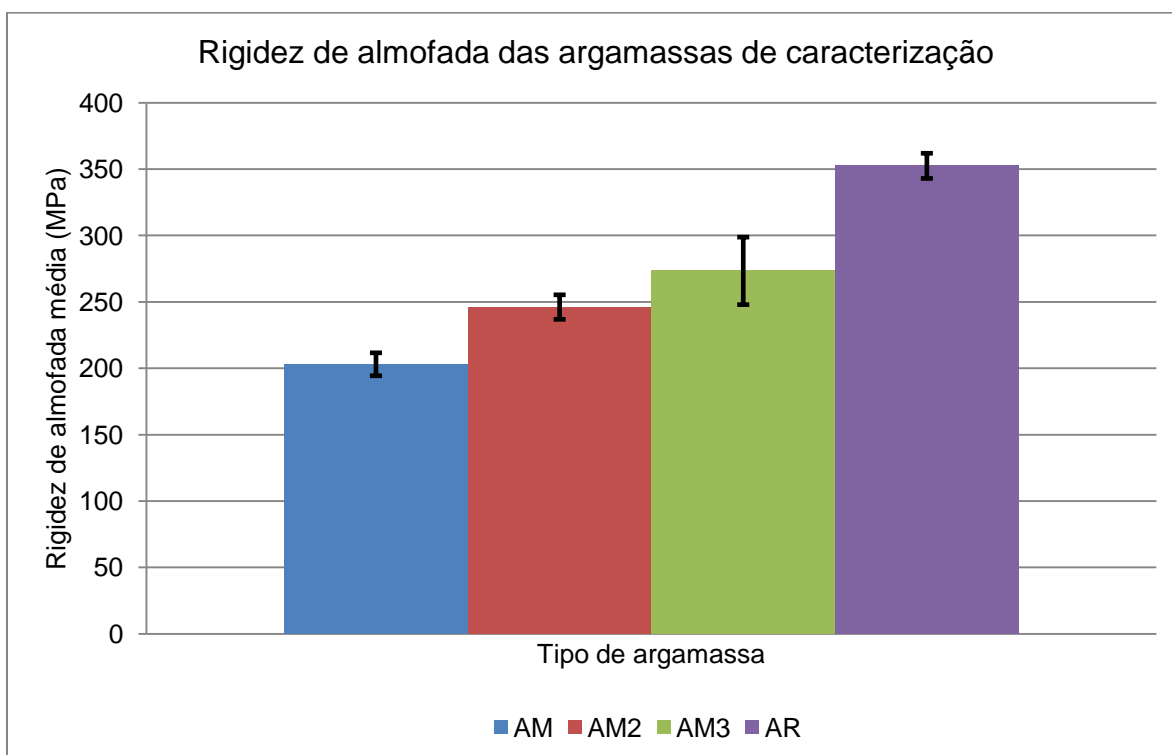


Figura 5.6 – Resultados dos ensaios de rigidez de almofada nas argamassas

Observa-se na Figura 5.6 que a relação entre a rigidez da almofada de argamassa de referência e a almofada *AM3* foi menor do que a mesma relação considerando o módulo de elasticidade. A rigidez de almofada de *AR* foi 73% superior à *AM*, 43% superior à *AM2* e 29% maior do que *AM3*.

Os valores de rigidez de almofada para *AM2* e *AM3* foram próximos, podendo inclusive ser amortizados pelo coeficiente de variação, devido ao elevado desvio padrão resultante dos ensaios de *AM3*. Portanto, a redução do teor de água da mistura aumentou em somente 11% a rigidez do compósito cimentício.

Assim como no ensaio do módulo de elasticidade, a argamassa *AM* teve menor rigidez, confirmando que o acréscimo de látex (10% e 20% sobre a massa do

cimento, respectivamente em *AM2* e *AM*) diminui a rigidez da argamassa no estado endurecido. Nesse caso, a redução da rigidez foi de cerca de 21%.

A variação da espessura da almofada de apoio, necessária para estimar a rigidez de almofada, foi encontrada através do deslocamento do pistão da máquina de ensaios decorrente do carregamento de compressão sobre o elemento. A exceção ocorreu com a argamassa *AM3*, onde a medida de variação da espessura das almofadas foi calculada não só pelo deslocamento do pistão da máquina de ensaios, mas também através de quatro transdutores de deslocamento, instalados próximos aos quatro vértices do modelo ensaiado.

A máxima variação de espessura média das almofadas quando carregadas sob 1500 kN de compressão está apresentada na Figura 5.7. Na legenda da imagem estão identificados os seis corpos de prova (CP1 a CP6), sendo que as linhas tracejadas são os resultados médios obtidos por quatro transdutores instalados próximos aos vértices da almofada e as linhas cheias são os resultados obtidos pelo deslocamento do pistão da máquina de ensaios.

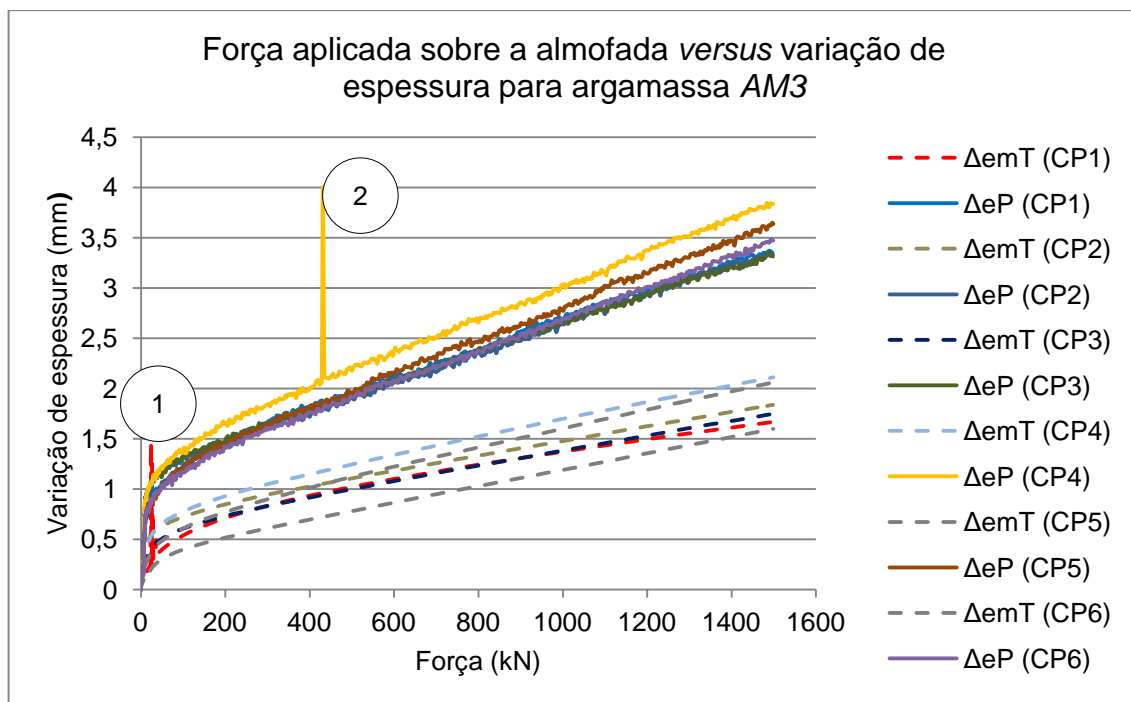


Figura 5.7 – Variação de espessura da mistura *AM3* obtida pelo deslocamento do pistão da máquina de ensaios e por transdutores de deslocamento no ensaio de rigidez de almofada

As pesquisas anteriores, de Montedor (2004), Siqueira (2007) e Bellucio (2010) por exemplo, que utilizaram este ensaio para estimar a rigidez da almofada, usaram também a variação da espessura encontrada a partir do deslocamento do pistão da

máquina de ensaios, embora a diferença entre os deslocamentos encontrados nesta pesquisa entre ambas as formas supracitadas tenha sido significativa. De fato, não imaginava-se tamanha diferença entre as formas de medida e possivelmente por isso nas pesquisas anteriores – e também nesta – tenha se usado a forma julgada mais simples, que é através do deslocamento do pistão da máquina de ensaios.

Deve-se levar em consideração que a obtenção da variação de espessura da almofada pelo pistão da máquina de ensaios pode compreender possivelmente alguma acomodação do próprio ensaio e que não é possível identificar através dos resultados. Isso pode justificar, pelo menos parcialmente, a maior variação de espessura identificada por esse método. Os pontos discrepantes, identificados como 1 e 2 na Figura 5.7, são valores espúrios que ocorreram durante o ensaio e devem ser descartados na análise.

Em pesquisas futuras, podem ser instalados transdutores de deslocamento em todas as misturas caracterizadas. A rigidez de almofada média obtida pela variação de espessura do corpo de prova através do pistão da máquina de ensaios para a argamassa *AM3* foi de 273,40 MPa, 34% inferior a encontrada através dos quatro transdutores de deslocamento, que foi de 366,61 MPa.

5.1.5 Comparação com os resultados de Bellucio (2010)

Nessa parte do texto são comparados e comentados os resultados dos ensaios de caracterização das argamassas da pesquisa atual e no estudo realizado por Bellucio (2010), o mais recente dos trabalhos sobre caracterização de argamassas modificadas para moldagem de almofadas de apoio realizado anteriormente a este.

Bellucio (2010), através de análises experimentais, julgou como mais adequada para utilização como almofada de apoio uma argamassa idêntica a chamada nesta pesquisa de *AM*. Portanto, *AM* foi uma dosagem idealizada por Bellucio (2010). Os resultados médios da “Argamassa de Bellucio (2010)”, da “Argamassa de referência de Bellucio (2010)” e dos referentes à atual pesquisa estão apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Resultados médios de Bellucio (2010) e da atual pesquisa nos ensaios de caracterização

| | Compressão (MPa) | Tração por compressão diametral (MPa) | Módulo de elasticidade (GPa) | Rigidez de almofada (MPa) |
|--|------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Argamassa de Bellucio (2010) | 40,90 | 3,10 | 12,80 | 307,00 |
| Argamassa de referência de Bellucio (2010) | 79,50 | 3,60 | 23,20 | 490,00 |
| <i>AM</i> | 10,60 | 1,81 | 7,51 | 203,05 |
| <i>AM2</i> | 19,14 | 2,86 | 8,78 | 246,16 |
| <i>AM3</i> | 27,65 | 3,62 | 11,53 | 273,40 |
| <i>AR</i> | 79,94 | 3,63 | 22,77 | 352,51 |

É notável a maior resistência mecânica do compósito modificado do trabalho de Bellucio (2010) em relação à *AM* desta pesquisa, embora também tenha tido maior rigidez. As diferenças nas propriedades do material no estado endurecido levam a crer que alguma reação adversa – causada supostamente pelo látex, que é da mesma fabricante da pesquisa anterior, mas possui algumas especificações técnicas diferentes – tenha influenciado no comportamento da argamassa, já que os outros materiais constituintes e as proporções de cada componente da mistura são exatamente iguais, bem como os processos de confecção.

Inicialmente seria utilizada nos ensaios de ligação a dosagem *AM*. Entretanto, em função da baixa resistência mecânica resolveu-se utilizar em caráter experimental as dosagens *AM2* e *AM3*, visando elevar a capacidade resistente da argamassa, ciente que a rigidez poderia também ser elevada.

Com relação a rigidez de almofada, deve-se lembrar que as almofadas de Bellucio (2010) nominalmente possuíam os mesmos 10 mm da atual pesquisa. Entretanto, a espessura real das almofadas do estudo anterior era de 12 mm, o que pode justificar, pelo menos parcialmente, sua maior rigidez de almofada. Segundo a pesquisadora, isso facilitava a moldagem dos elementos.

Embora a rigidez de almofada encontrada de forma simplificada (deslocamento do pistão da máquina de ensaios) tenha sido significativamente inferior à encontrada da forma complexa (através de transdutores de deslocamento), lembra-se que os valores encontrados nessa pesquisa são comparados somente entre si e entre os

valores de rigidez de almofada encontrados por Bellucio (2010), que utilizou ensaio idêntico.

5.1.6 Argamassa modificada utilizada nos ensaios de ligação

A escolha da argamassa que foi utilizada nos ensaios de ligação ocorreu através da análise dos resultados dos ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e rigidez de almofada. A argamassa de referência foi caracterizada somente para servir como parâmetro de comparação. Sua alta rigidez impossibilita o seu uso como almofada de apoio.

A argamassa que inicialmente seria utilizada era a *AM*, apontada por Bellucio (2010) como a mais adequada no seu estudo. Entretanto, a baixa resistência à compressão conseguida com tal dosagem fez com que essa proposta fosse descartada, apesar do seu baixo módulo de elasticidade e baixa rigidez de almofada. Diminuindo o teor de látex, aumentou-se a resistência à compressão para cerca de 19 MPa, o módulo de elasticidade para 8,78 GPa e a rigidez de almofada para 246,16 MPa.

Na mistura *AM3*, além de reduzir o consumo de látex em relação ao proposto por Bellucio (2010), reduziu-se também a quantidade de água de amassamento em 20%. Esse procedimento elevou o módulo de elasticidade para 11,53 GPa e a rigidez de almofada para 273,40 MPa (inferiores ainda ao atingido por Bellucio (2010) na sua mistura mais adequada), entretanto aumentou também a resistência mecânica para valores da ordem de 28 MPa, fazendo com que esta fosse adotada nos ensaios de ligação.

5.2 Ensaio de compressão em ligações

Esse capítulo apresenta os resultados dos ensaios de compressão em ligações. Os dados apresentados foram separados por variável analisada em forma de subcapítulos. Antes da apresentação, os resultados dos ensaios de ligação passaram também pelo tratamento de espúrios denominado *Critério de Chauvenet*, como aconteceu com os ensaios de caracterização.

Os resultados apresentados fazem referência à média das seis amostras para cada variável analisada, além de relatarem medidas de dispersão de resultados. Os

resultados detalhados são apresentados no Anexo B. Além disso, ao final desse capítulo é apresentado um quadro resumo com as médias e coeficientes de variação dos ensaios de ligação.

A relação L/C encontrada para a série CMo65M foi de aproximadamente 0,76. Esperava-se para esse ensaio uma relação L/C próxima a 1,0, visto que o modelo não possui descontinuidade, sofreu carregamento de compressão axial e tem a mesma relação altura / diâmetro dos corpos de prova cilíndricos. Entretanto, a geometria quadrada da seção transversal dos blocos de concreto possivelmente tenha influenciado. A taxa de carregamento foi diferente da utilizada para avaliar a resistência à compressão do concreto e pode ter influenciado também, embora em menor intensidade, pois Andrade e Tutikian (2010), afirmam que a velocidade do carregamento pode alterar em no máximo $\pm 5\%$ os resultados do ensaio de compressão. Além disso, apesar da retífica com massa plástica e do emprego de neoprene nas extremidades do corpo de prova para distribuir uniformemente as tensões durante o ensaio, possíveis irregularidades das superfícies também podem ter contribuído nesse resultado.

Aos valores de resistência à compressão da ligação e do concreto de referência estão atreladas medidas individuais de dispersão, como o desvio-padrão, que possibilita o cálculo dos coeficientes de variação. Entretanto, em função da relação L/C, foi preciso relacionar ambas as medidas de dispersão em um único valor. Essa relação entre os coeficientes de variação foi obtida de acordo com a Equação 5.1 (NAGASHIMA, 2011).

$$CV_t = \frac{m_x * \sigma_y + m_y * \sigma_x}{m_y^2} \quad (\text{Equação 5.1})$$

onde:

CV_t = Coeficiente de variação da relação L/C;

m_x = Tensão máxima média no ensaio de ligação;

m_y = Tensão máxima média no ensaio de resistência à compressão do concreto de referência;

σ_y = Desvio padrão no ensaio de ligação;

σ_x = Desvio padrão no ensaio de resistência à compressão do concreto de referência.

Observa-se que a Equação 5.1 é igual à soma dos coeficientes de variação relacionados individualmente aos resultados de resistência à compressão da ligação e de concreto de referência pelo produto da relação entre a tensão máxima média da ligação e do concreto de referência, conforme equacionamento a seguir:

$$\begin{aligned}
 CV_t &= \frac{m_x * \sigma_y + m_y * \sigma_x}{m_y^2} = \frac{m_x * \sigma_y}{m_y * m_y} + \frac{m_y * \sigma_x}{m_y * m_y} = \frac{m_x * CV_y}{m_y} + \frac{\sigma_x}{m_y} = \frac{m_x \left(CV_y + \frac{\sigma_x}{m_x} \right)}{m_y} \\
 &= \frac{m_x}{m_y} (CV_y + CV_x) \qquad \qquad \qquad \text{(Equação 5.1)}
 \end{aligned}$$

5.2.1 Influência da espessura das saliências no bloco de concreto

Nas ligações com diferentes níveis de imperfeição causados pelas saliências de diferentes espessuras na face conectada, medidos através do coeficiente adimensional L/C, avaliou-se na sequência o quão benéfico foi ou não a presença da almofada de apoio na resistência da ligação, o que pode ser visto na Figura 5.8.

Na Figura 5.8, bem como nas subsequentes, as barras nas extremidades superiores das colunas explicativas indicam possíveis margens de dispersão dos resultados, obtidos através da relação entre os coeficientes de variação, que são a razão entre os desvios padrão e as médias aritméticas, já descartados os valores espúrios.

O modelo monolítico teve resistência à compressão bastante superior aos corpos de prova descontínuos, o que já era esperado. Para espessuras de saliências muito elevadas, como o caso de 1,5 mm, possivelmente a almofada de apoio não tenha conseguido absorver tamanha imperfeição, como já constatou Siqueira (2007) e por isso seu emprego não foi justificado, resultando em valores de L/C praticamente iguais para ligação com e sem almofada de apoio. Nesses casos, a resistência da ligação foi de 27% em relação ao concreto de referência.

Para blocos com superfícies de contato lisas, a pesquisa apontou que o emprego das almofadas de apoio não resultou em aumento da resistência da ligação, visto que já há uma boa distribuição de tensões no contato bloco-bloco. Nesse caso, houve até pequena perda de desempenho quando o elemento de apoio foi utilizado, entretanto isso pode ser reduzido devido aos valores de dispersão.

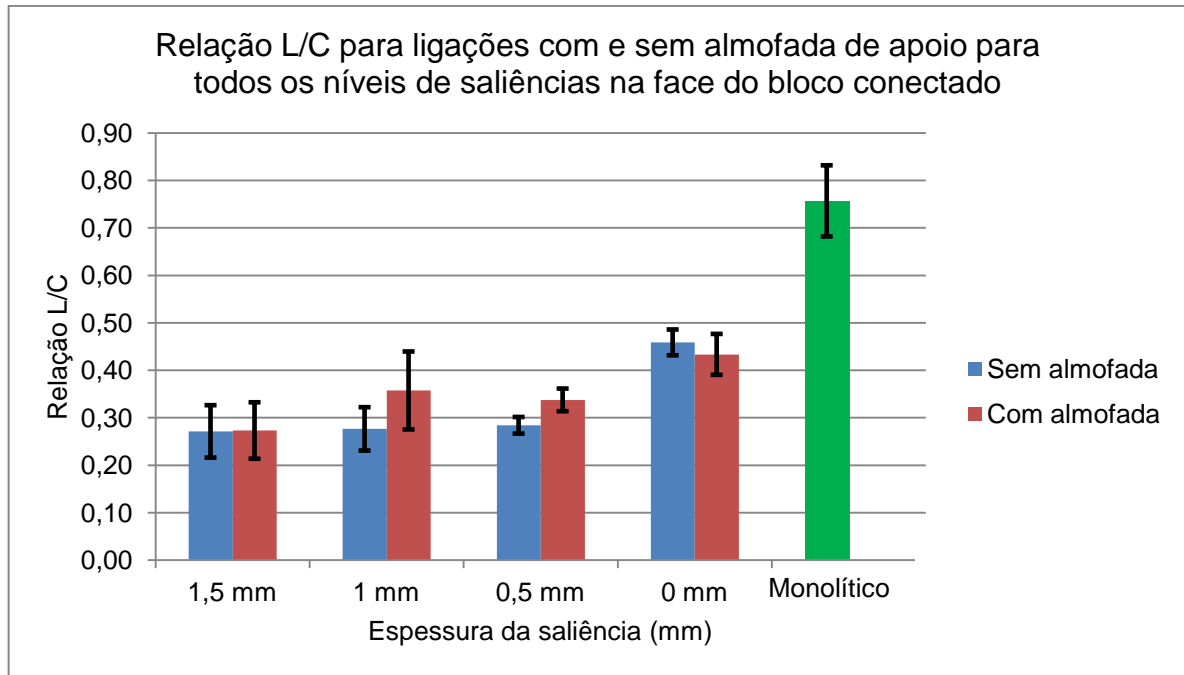


Figura 5.8 – Relação L/C para ligações com e sem almofada de apoio para todos os níveis de saliências na face do bloco conectado

Os maiores benefícios que a almofada forneceu à ligação foram para níveis intermediários de espessuras de saliências na face ligada. Para espessuras de 0,5 mm, a presença do elemento de apoio aumentou em cerca de 20% a resistência do conjunto, possuindo a ligação aproximadamente 34% da resistência do concreto de referência. Já para espessuras de 1 mm esse aumento foi de 30%, ficando a ligação com aproximadamente 35% da resistência do concreto e considerando os valores médios.

A Figura 5.9 apresenta uma imagem de um corpo de prova típico com almofada de apoio e com saliências na face ligada após o ensaio de compressão centrada. Destaca-se que as fissuras iniciaram sempre no bloco de concreto, apesar deste ter possuído, para todas as resistências médias estudadas, resistências à compressão superiores às da argamassa modificada. O que pode ter definido isso foi o baixo módulo de elasticidade do compósito utilizado nas almofadas.



Figura 5.9 – Exemplo de modelo de ligação após ensaio de compressão centrada

Para o modelo da Figura 5.9, bem como para os demais sujeitos à carregamento centrado, as fissuras geradas nos blocos e na almofada de apoio ocorreram na região central dessas amostras, “separando” o corpo de prova geralmente em duas, três ou quatro partes. Isso tende a indicar que realmente não houve presença de excentricidade indesejada no momento do ensaio.

Nos ensaios de ligação contendo saliências na face ligada, as almofadas de apoio sofreram esmagamento significativamente maior e pontual na região atingida pelas mossas dos blocos de concreto. As demais regiões do elemento de apoio sofreram a ação da força de compressão em menor intensidade e somente após a almofada ter absorvido toda a imperfeição imposta pelas saliências dos blocos. A textura superficial das almofadas contribuiu significativamente para a absorção das protuberâncias das faces dos blocos ensaiados. Nas Figuras 5.10a e 5.10b é possível observar o esmagamento concentrado sofrido pela almofada de apoio.

Interessante destacar que, após os ensaios de ligação, as almofadas apresentavam apenas pequenas fissuras e em nenhum caso houve separação em partes. As fibras presentes na mistura agiam como uma espécie de armadura, conferindo tenacidade ao compósito.

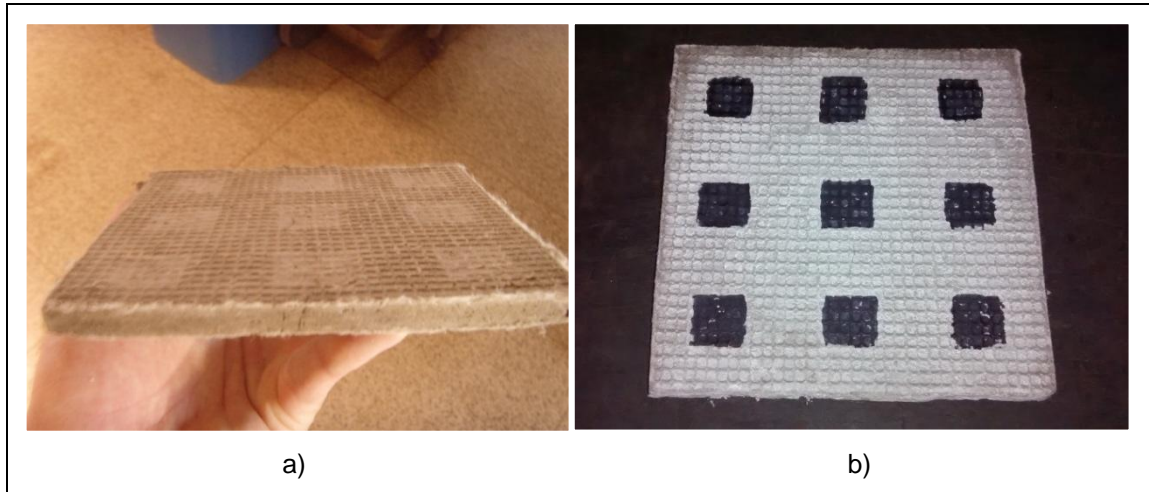


Figura 5.10 – a) Almofada de apoio após ensaio de compressão; b) Almofada de apoio com marcas em destaque das saliências causadas pelos blocos

Em blocos com ambas as faces conectadas lisas, observou-se que o esmagamento das superfícies da almofada foi uniforme e em menor intensidade que o causado na região das mossas.

Para os modelos descontínuos com saliências, em função da presença das protuberâncias propositais na face conectada do bloco inferior de concreto, a ruptura iniciou-se, independentemente de haver ou não almofada de apoio e do tipo de carregamento, na região descontínua. As fissuras geradas nesses ensaios podem ser vistas em destaque no bloco da Figura 5.11.



Figura 5.11 – Formação das fissuras no ensaio de ligação

O comportamento indicado na Figura 5.11 não pôde ser observado em ligações com faces perfeitamente lisas. Nesses casos, a formação das fissuras ocorreu a

partir das extremidades do modelo ensaiado, expandindo-se na sequência até a ruína completa da amostra.

Na Figura 5.12 pode-se observar imagens relacionadas aos ensaios que analisaram o rendimento da almofada de apoio para vários níveis de espessuras de saliências na face conectada e um exemplo típico de ruptura de blocos após ensaio de ligação.

Os resultados de El Debs et al. (2008) apontaram ganho de efetividade da ligação quando a almofada de apoio foi utilizada somente para níveis intermediários de espessuras de saliências. Para saliências de 0,75 mm e 1,0 mm, a almofada melhorou, respectivamente, em 55% e 44% a resistência da ligação. Ligações com almofadas em blocos com saliências de 1,5 mm de espessura e blocos lisos também não resultaram ganho de resistência ao corpo de prova. Estes resultados estão próximos ao da atual pesquisa, onde a presença da almofada aumentou em 20% e 30% o desempenho da ligação para blocos com saliências na face ligada de 0,5 mm e 1,0 mm de espessura.

No estudo de El Debs et al. (2008), as almofadas empregadas possuíam superfície lisa, os blocos tinham resistência média de 35 MPa, além de somente quatro moedas na face ligada. Aliados, esses fatores podem ter contribuído para a diferença nos resultados encontrados em ambas as pesquisas.

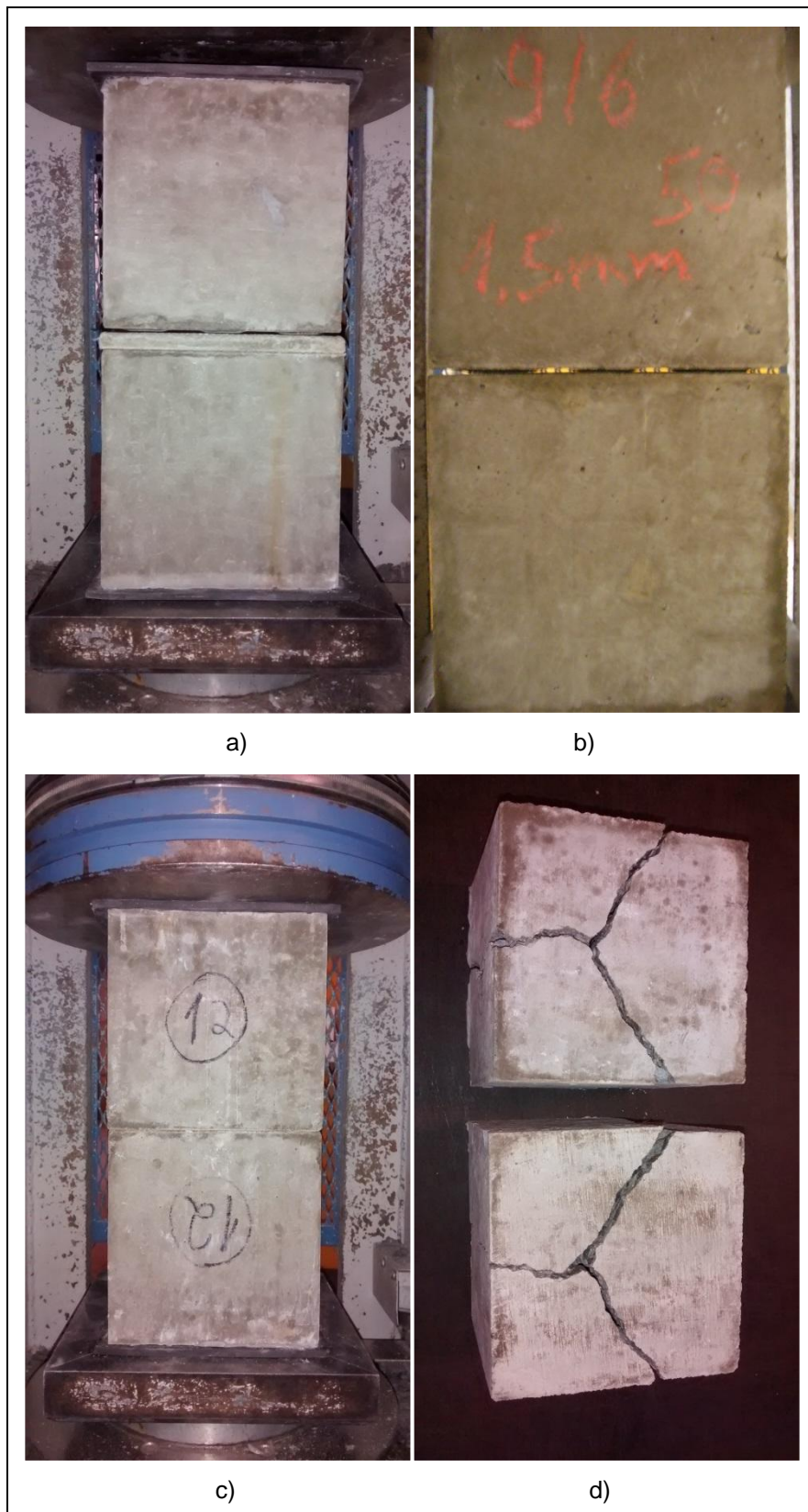


Figura 5.12 – a) Ligação com saliências na face conectada e com almofada de apoio; b) Ligação com saliências na face conectada e sem almofada de apoio; c) Ligação sem saliências na face conectada e sem almofada de apoio; d) Blocos após ensaio de ligação

5.2.2 Influência da quantidade de saliências no bloco de concreto

Para espessuras intermediárias, de 1 mm, foi estudada também a variação da quantidade dessas saliências. Realizou-se essa análise somente para esse nível de espessura, pois foi nesse caso que a almofada proporcionou melhor desempenho à ligação. Na Figura 5.13 constam os resultados desses experimentos.

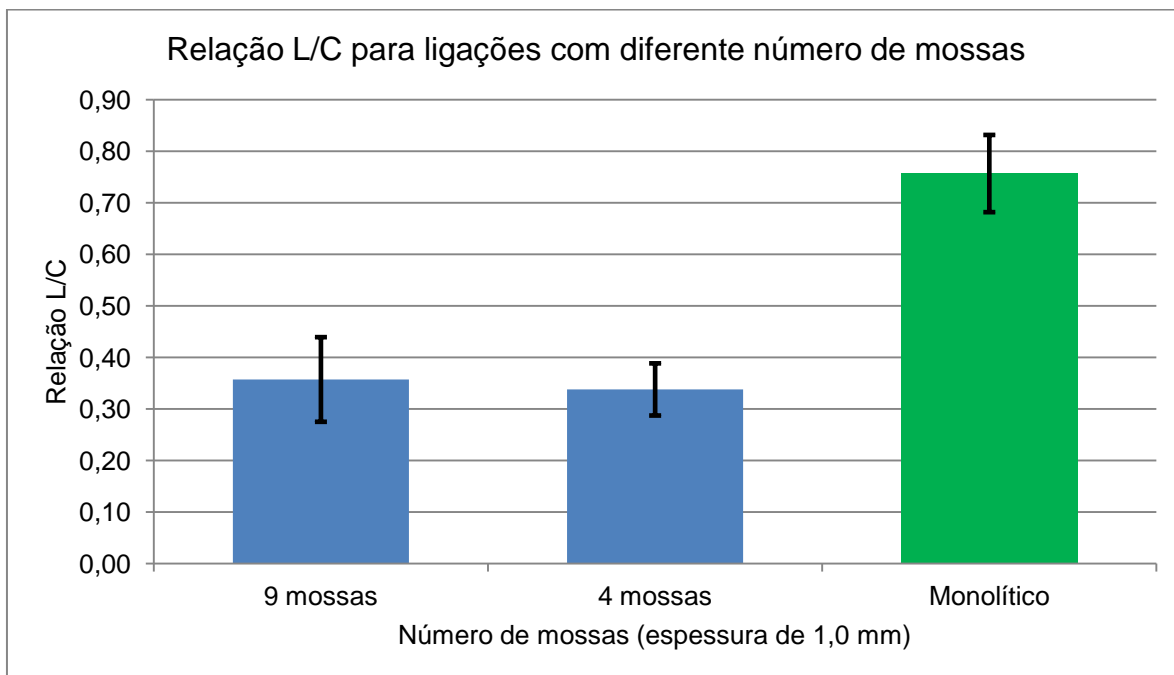


Figura 5.13 – Relação L/C para ligações com diferente número de mossas

Com exceção da série C1465LPM, que apresentou quatro mossas na face ligada, as demais com superfícies irregulares apresentaram todas um padrão de nove mossas. Para ligações com almofada de apoio e espessuras de saliências de 1 mm, as diferenças entre conjuntos com quatro ou nove mossas foram de apenas 5%.

Destaca-se que a área do bloco que sofreu o contato com a almofada de apoio (área superficial total das saliências) foi igual para todas as amostras, visto que os blocos com quatro mossas têm, individualmente, maior área superficial. Isso pode justificar a semelhança nos resultados indicados nas colunas do gráfico da Figura 5.13.

A Figura 5.14 apresenta imagens de um bloco contendo quatro saliências na face conectada e de uma almofada de argamassa ensaiada com este bloco.

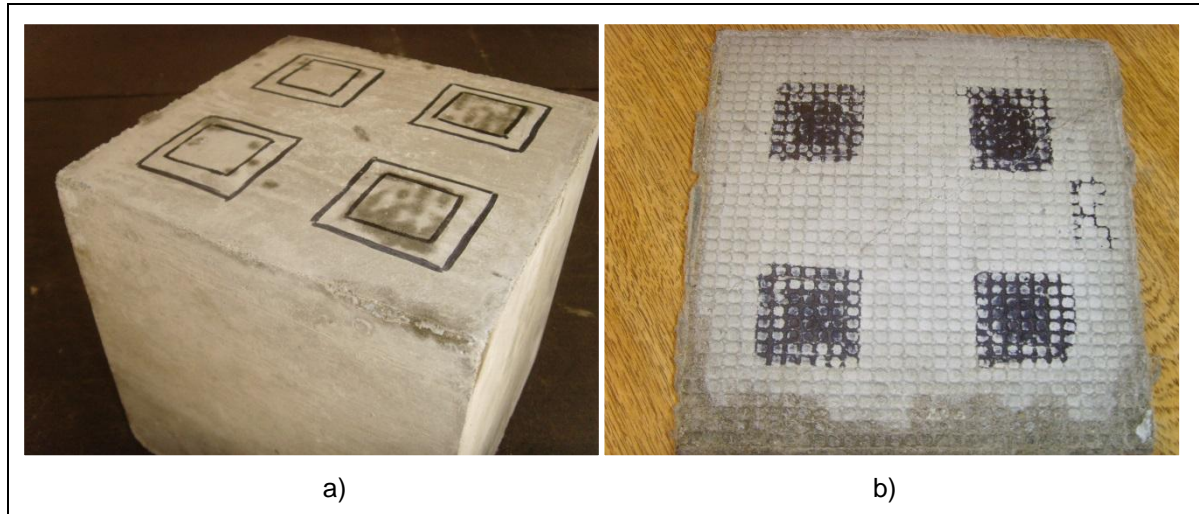


Figura 5.14 – a) Bloco com quatro mossas na face conectada; b) Almofada de argamassa ensaiada em ligação com bloco de quatro mossas

5.2.3 Influência da variação de resistência dos blocos de concreto

Nos ensaios de ligações com concretos de resistências à compressão médias variáveis, observou-se certa tendência de ganho de rendimento, usando almofada de apoio, para juntas com concretos de menores resistências à compressão, como pode ser visto na Figura 5.15. Nesses ensaios o tipo de carregamento foi centrado e em blocos com saliências no seu valor padrão, ou seja, nove mossas de 1 mm de espessura.

Como é possível observar na Figura 5.15, há uma tendência aproximadamente linear, desconsiderando possíveis valores de dispersão, em ocorrer leve aumento da relação L/C quando reduzida a resistência média à compressão. Reduzindo a resistência mecânica de 90 MPa para 65 MPa (25 MPa ou 38%), aumentou-se a relação L/C em 5%, passando de 0,3418 para 0,3574; e reduzindo a resistência mecânica de 65 MPa para 40 MPa (25 MPa ou 62%), o aumento da relação L/C foi de cerca de 14%, passando de 0,3574 para 0,4079.

O aumento da resistência do concreto tornou-o mais frágil, fazendo com que a almofada contribuísse menos no desempenho da ligação. Portanto, nessa pesquisa, em Concretos de Alta Resistência (CAR – Acima de 50 MPa, segundo NBR 6118 (ABNT, 2014)) a almofada de apoio passou a não contribuir com tamanha eficiência em relação à um concreto com resistência inferior à 50 MPa.

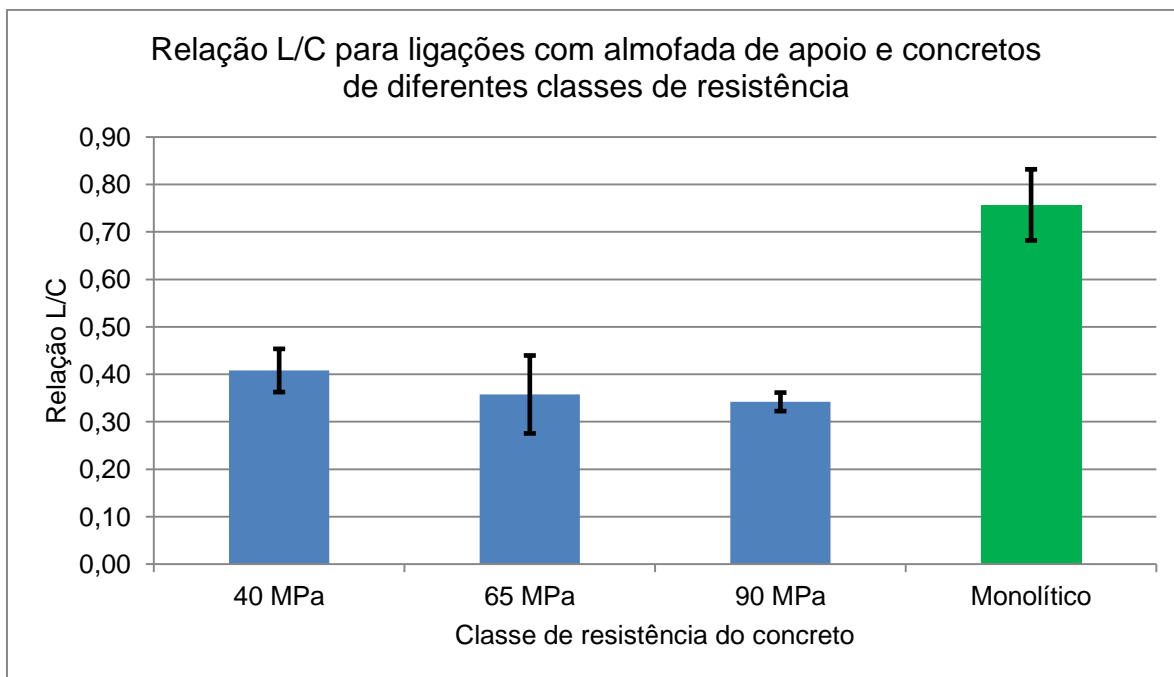


Figura 5.15 – Relação L/C para ligações com concretos de diferentes classes de resistência

5.2.4 Ensaios de compressão excêntrica

Os ensaios de carregamento excêntrico simularam situações em que há transmissão de esforço de compressão e de momento fletor, como o caso de ligação viga-pilar e demais elementos do grupo 1, seguindo classificação de El Debs et al. (2003) e detalhada no capítulo 2.1.

Os ensaios de compressão excêntrica em ligações apresentaram os resultados descritos na Figura 5.16. Esses resultados não foram altamente satisfatórios, indo em parte ao contrário do esperado. Para espessuras de saliências de 1 mm, a introdução da almofada de apoio, salvo a consideração dos valores de dispersão, proporcionou uma perda média no desempenho da ligação de aproximadamente 17% (nos ensaios com carregamento centrado a almofada melhorou em 30% o desempenho da ligação); já para blocos com superfície de contato lisa, o emprego da almofada significou a redução de 45% do desempenho da ligação à compressão excêntrica, entretanto os coeficientes de variação dessas duas últimas séries citadas foram os mais altos de toda a pesquisa, indicando imprecisão nos valores medidos. As tensões nos blocos de concreto foram calculadas considerando a área da seção transversal total do bloco.

Embora tenha sido tomada grande atenção com a marcação dos pontos excêntricos de carregamento, possivelmente alguma excentricidade não prevista

tenha agido, o que pode, talvez, justificar os valores de L/C e de dispersão encontrados. Outro problema que pode ter acontecido é justamente o contrário, ou seja, ter ocorrido, por algum motivo, redução da excentricidade, diminuindo o momento fletor e aumentando a resistência do conjunto em ligações sem almofada de apoio.

A presença das saliências na face ligada reduziu o desempenho da ligação em 41% para ligações sem almofada de apoio e cerca de 13% quando a almofada de apoio veio a ser utilizada. Isso tende a indicar que a almofada tenha conseguido absorver a imperfeição de 1 mm de espessura causada pela presença das mossas.

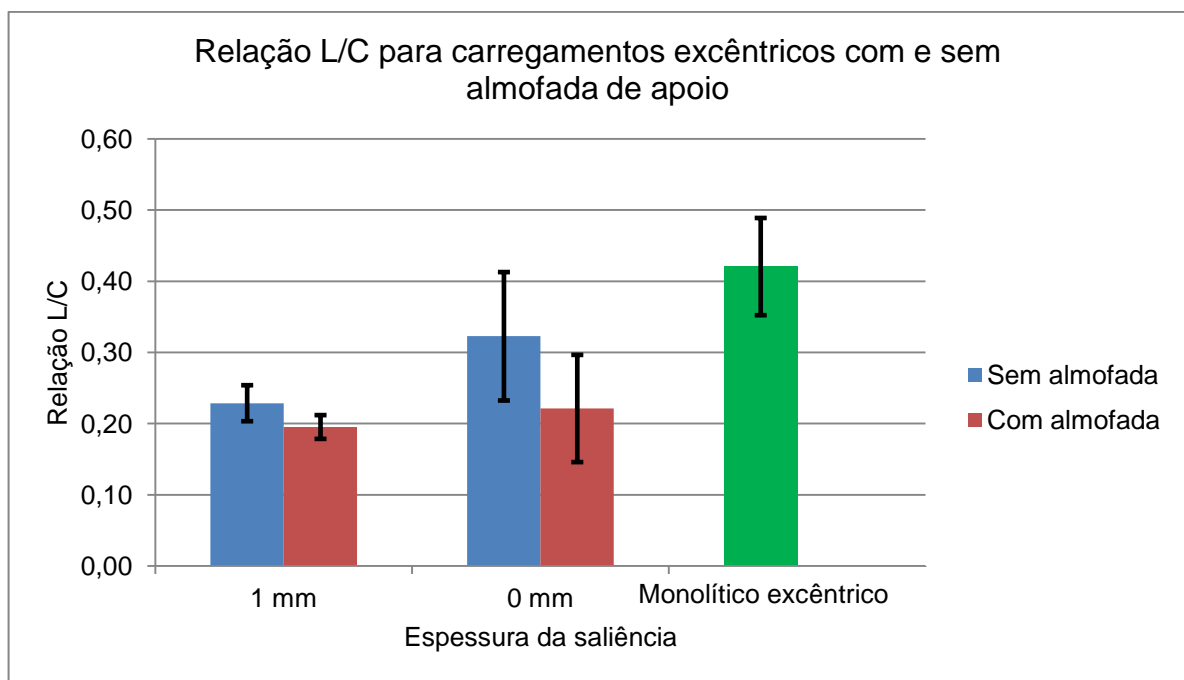


Figura 5.16 – Relação L/C para carregamentos excêntricos

O modelo monolítico ensaiado à compressão excêntrica teve uma relação L/C igual a 0,4206, ou seja, a compressão com excentricidade de $\frac{1}{6}$ da largura do bloco (25 mm) teve aproximadamente 42% da resistência do concreto de referência. Esse valor representa 30% a mais que ligações descontínuas com blocos com faces de contato lisas e sem almofada e cerca de 84% superior para blocos sem almofada, porém com mossas de 1 mm de espessura na face ligada.

Na Figura 5.17 apresenta-se um gráfico semelhante ao da Figura 5.16. Nesse caso, as tensões foram calculadas como máximas, adotando a área da seção transversal para o cálculo como a área da seção mais próxima da chapa que

delimita a área de carregamento. A tensão foi calculada, portanto, como a razão entre a carga de compressão e a área da chapa (90 x 150 mm).

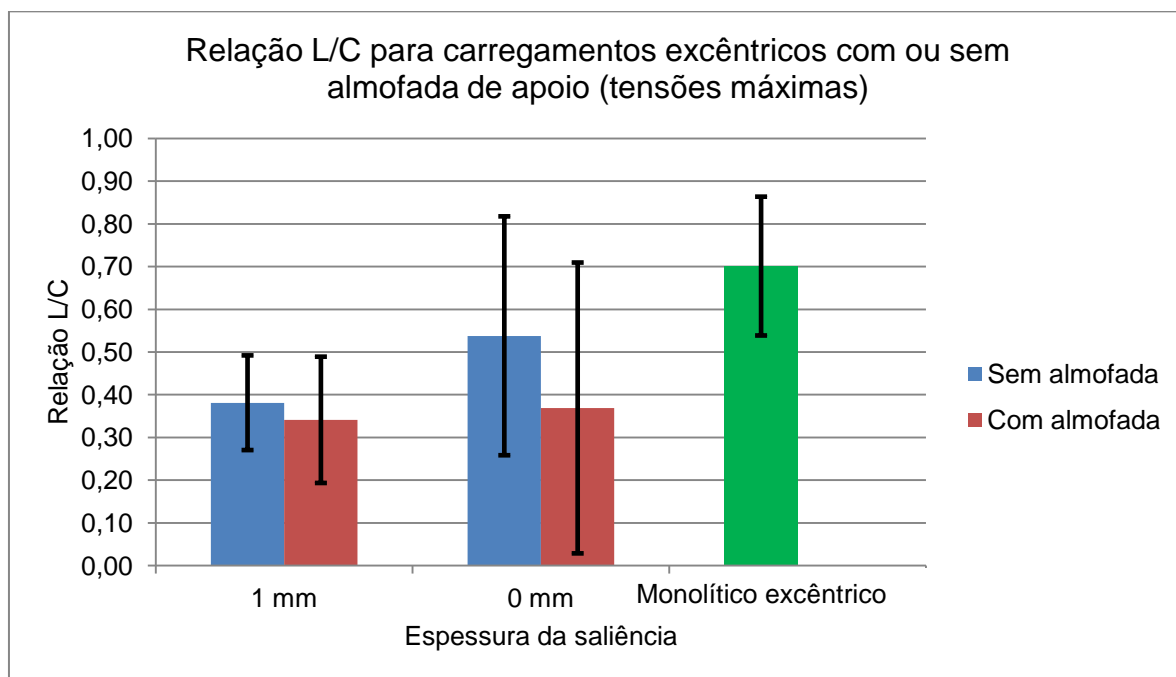


Figura 5.17 – Relação L/C para carregamentos excêntricos com tensão máxima

Para a análise da relação L/C em carregamentos excêntricos considerando a área de 90 mm x 150 mm, houve acréscimo de 66% na tensão de ruptura dos modelos de ligação em relação a consideração da área total do bloco, resultando em maiores relações L/C. O corpo de prova monolítico, por exemplo, teve uma relação L/C de 0,43 quando considerada a área de 150 mm x 150 mm e de 0,70 para área reduzida. Em ensaios com almofada de apoio, a introdução das saliências reduziu a resistência da ligação em pouco mais de 8%; já em modelos sem almofada de apoio, a presença dessas moedas reduziu o desempenho da ligação em 41%. Nessa análise as relações entre os modelos monolíticos e com e sem almofada se mantêm as mesmas, entretanto, os valores de dispersão sofrem aumento.

A Figura 5.18 apresenta uma imagem de um bloco de concreto após ensaio de compressão excêntrica, com a marcação das fissuras surgidas no lado carregado da amostra.



Figura 5.18 – Bloco fissurado após ensaio de compressão excêntrica

Quando analisados os dados dos ensaios de compressão centrada e excêntrica e comparados entre si, tem-se resultados aparentemente mais satisfatórios. No gráfico indicativo da Figura 5.19, comparam-se as relações L/C para corpos de prova com carregamento centrado e excêntrico, com almofada de apoio e espessuras de saliências de 1 mm e blocos com acabamento liso na face de contato, além de modelos monolíticos. Essa análise leva em conta a tensão na ligação aplicada sobre a área total das amostras.

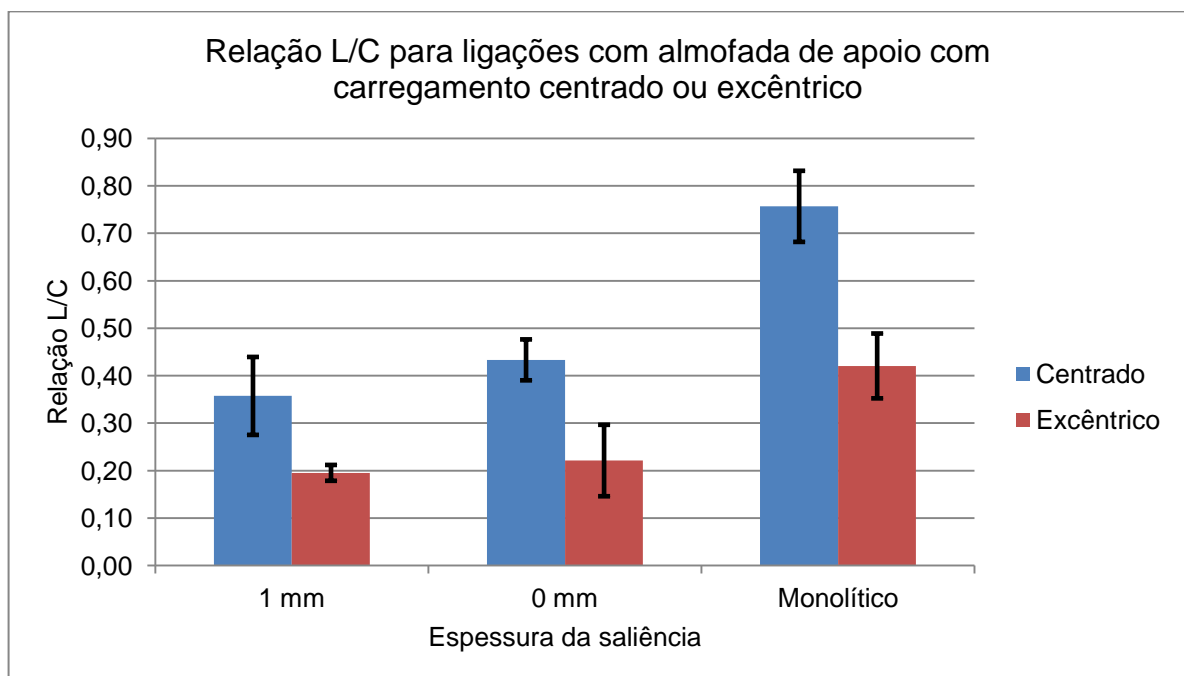


Figura 5.19 – Relação L/C para ligações à compressão centrada e excêntrica com almofada de apoio

Os modelos monolíticos tiveram um desempenho bastante superior aos demais. Já em ligações descontínuas, em relação às ligações com mossa em uma

das faces, as juntas com ambas as faces de contato lisas tiveram rendimento 21% superior para carregamento centrado e 13% superior para carregamento excêntrico.

Considerando a aplicação correta da excentricidade, o que foi idealizado, observando a Figura 5.19 nota-se que a aplicação dessa excentricidade reduziu em 80% a resistência da ligação para modelos contínuos, 96% para corpos de prova descontínuos e com imperfeições na face conectada e 83% para modelos descontínuos e com faces conectadas com acabamento liso. Portanto, a aplicação da carga excêntrica reduziu a resistência praticamente pela metade nos ensaios de ligação.

Similar ao gráfico da Figura 5.19, entretanto levando em consideração a área da região imediatamente próxima as extremidades, ou seja, uma área de 90 mm x 150 mm, está o gráfico da Figura 5.20. Este relaciona e compara ensaios de ligação com almofada de apoio para carregamento centrado e excêntrico.

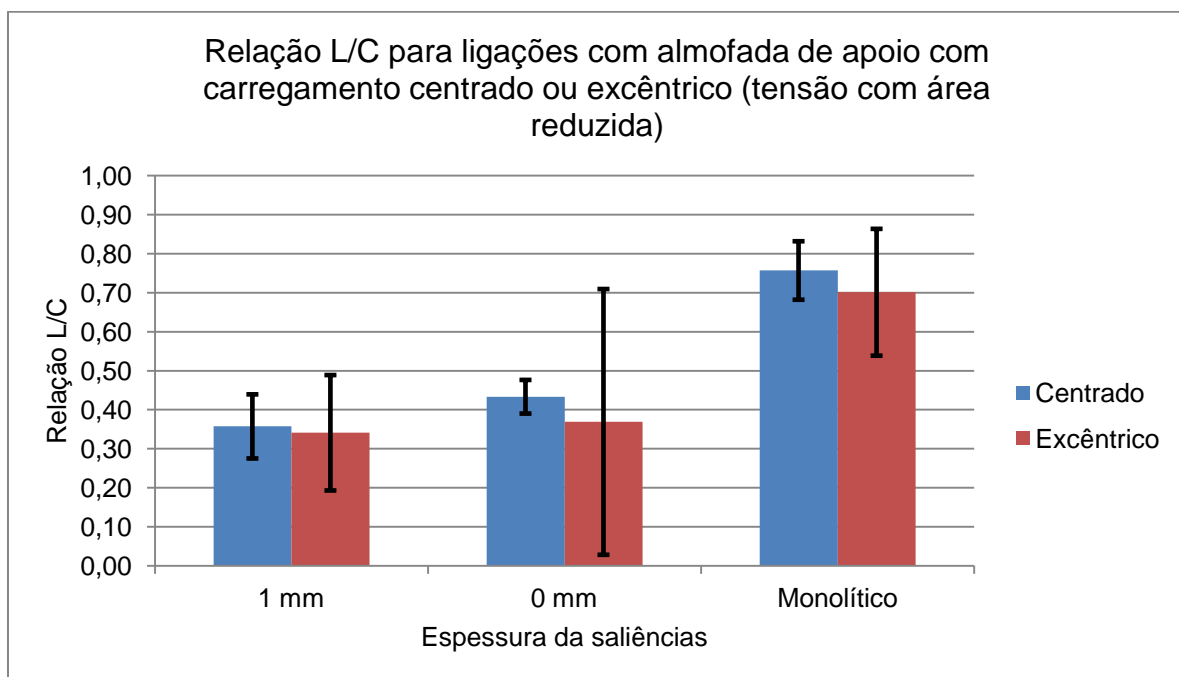


Figura 5.20 - Relação L/C para ligações à compressão centrada e excêntrica com almofada de apoio considerando tensões máximas

Na Figura 5.20 pode-se observar que, mesmo com a consideração dos valores de tensão com a área reduzida para carregamentos excêntricos, os carregamentos centrados apresentaram relação L/C superior. Para espessuras de 1 mm, o carregamento centrado teve desempenho 5% superior; para blocos com superfícies

lisas, o desempenho foi cerca de 17% melhor; e para blocos monolíticos a diferença foi de 8%.

5.2.5 Ensaios com carregamento cíclico

Os ensaios com carregamento cíclico foram realizados em duas séries: com e sem almofada de apoio para ligações com o bloco superior com nove moedas de 1 mm de espessura. As configurações do ensaio foram descritas no capítulo 4.4 e o gráfico comparativo que indica os desempenhos das séries analisadas e compara-os com os modelos com carregamento monotônico está apresentado na Figura 5.21.

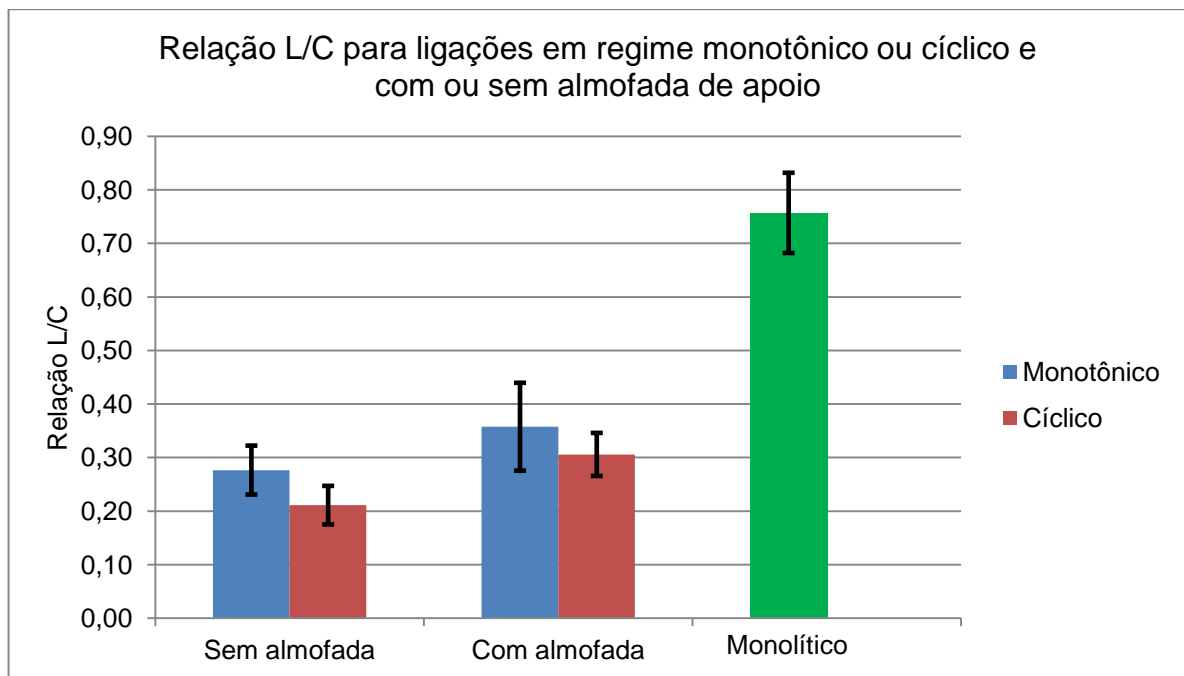


Figura 5.21 – Relação L/C para ligações com carregamento monotônico e cíclico

Observa-se na Figura 5.21 que as ligações com almofada de apoio apresentaram melhor desempenho também no regime cíclico, sendo que nesse processo de carregamento a melhora devido a presença do elemento de apoio foi de cerca de 45%. Esse dado, bem como as demais análises estatísticas, podem sofrer alteração devido aos coeficientes de variação indicados nas figuras representativas.

Em ligações com saliências na face conectada e sem almofada de apoio, o regime cíclico utilizado na pesquisa reduziu em 31% a resistência da ligação, avaliada pelo coeficiente adimensional L/C; já para ligações com a mesma espessura de saliência, porém com almofada de apoio, a redução no desempenho

da ligação causada pelo uso do regime repetitivo de carregamento foi de cerca de 17%.

Há, portanto, contribuição da almofada na ligação não só para o regime monotônico, mas também para regime repetitivo de carregamento. Havendo almofada de apoio na ligação, a redução da resistência da ligação em função do carregamento cíclico é inferior do que se não houvesse, mas ainda assim o seu emprego é justificado, pois há melhora no coeficiente L/C.

Na Figura 5.22 está discriminado um gráfico que analisa o acréscimo de carga em função dos ciclos de carregamento. Esta figura apresenta os períodos de carregamento de uma série qualquer ensaiada com almofada de apoio.

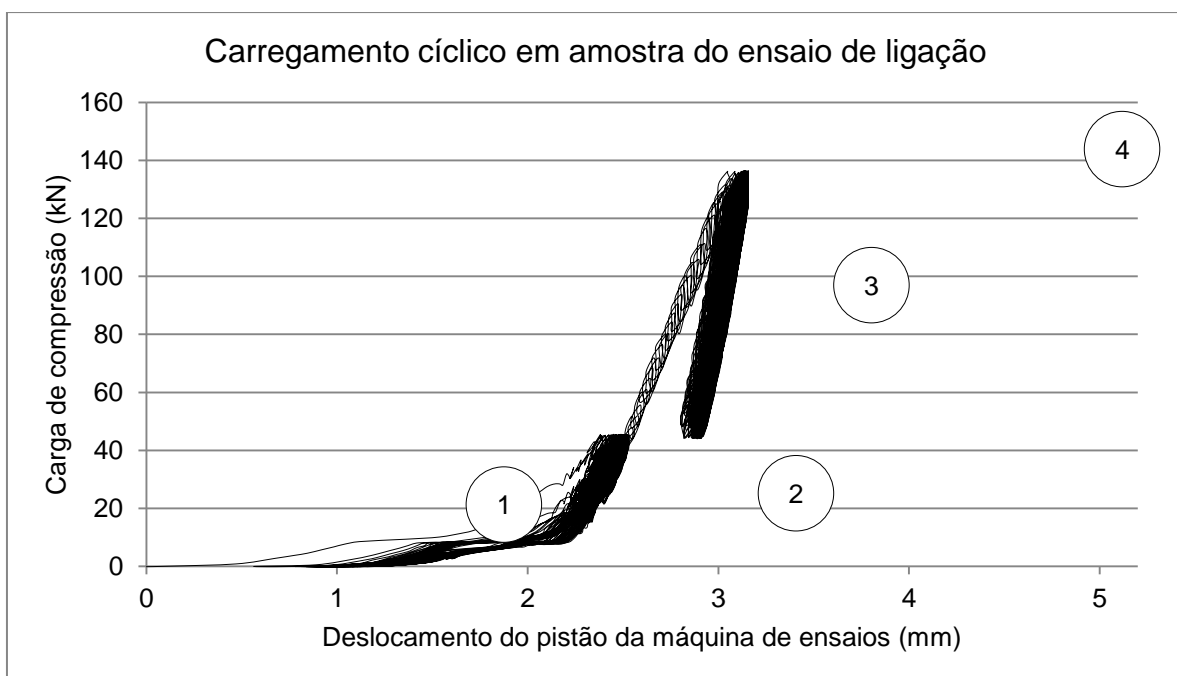


Figura 5.22 – Carregamento cíclico em amostra do ensaio de ligação

O ponto 1, indicado pela circunferência interna a figura, trata-se da primeira etapa de carregamento, com cinquenta ciclos; no ponto 2 há a segunda etapa, com 200 ciclos; no ponto 3 há o ciclo monolítico; finalmente no ponto 4 há a indicação da ruptura da ligação.

Na Figura 5.23 há a apresentação de um modelo de ligação com almofada de apoio e ensaiado perante carregamento cíclico.



Figura 5.23 – Amostra de ensaio de ligação após ensaio cíclico de compressão

O surgimento das primeiras fissuras e conseqüente ruína do corpo de prova foi idêntico aos modelos submetidos à carga monotônica. Devido à presença das irregularidades propositalis no bloco superior de concreto, as fissuras surgiam nessa descontinuidade e se expandiam até a ruptura completa da amostra.

5.2.6 Ligações com almofada aderida ao bloco inferior

Os modelos em que a almofada de apoio fica solidarizada a um dos blocos de concreto componentes do sistema de ligação (Figura 5.24) tiveram um comportamento semelhante aos modelos com almofada livre, pelo menos no que diz respeito a blocos com ranhuras salientes de espessura igual a 1 mm, como pode ser visto na Figura 5.25. Nesse sistema, já no momento da moldagem dos elementos de concreto, a almofada fora instalada previamente na fôrma.



Figura 5.24 – Bloco de concreto com almofada aderida

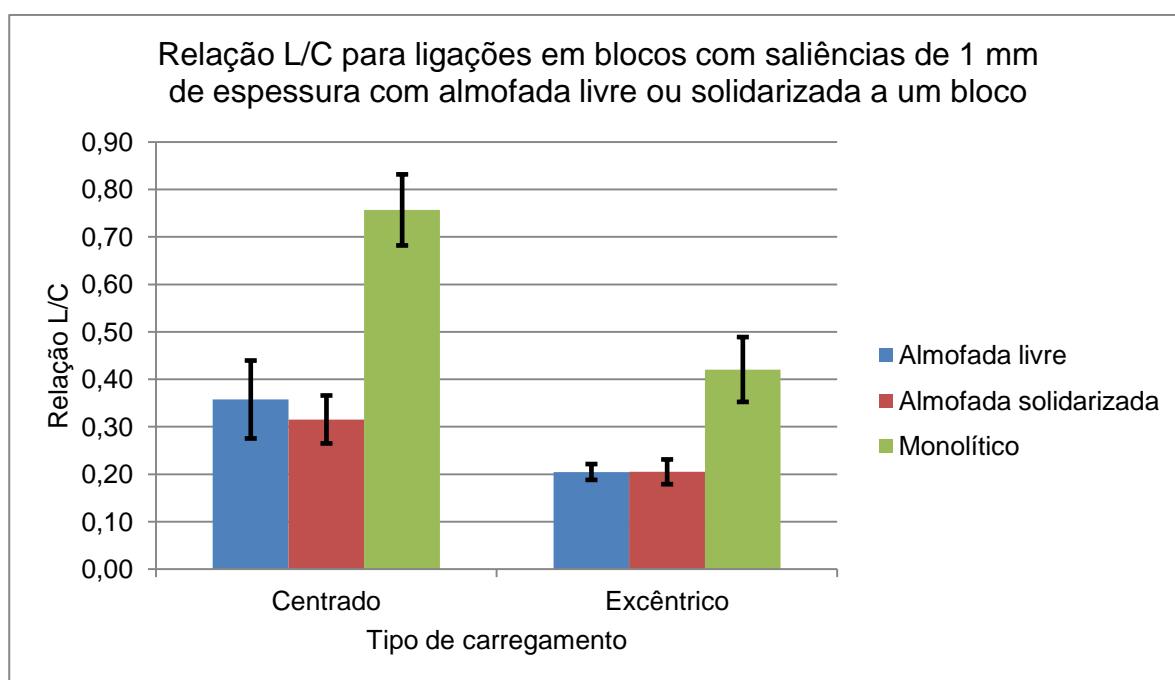


Figura 5.25 – Relação L/C para ligações com mossa de 1 mm de espessura e almofada solidarizada a um dos blocos

Observa-se na Figura 5.25 que os ensaios de compressão em ligações com almofada livre ou solidarizada apresentaram pouca diferença, seja considerando compressão centrada ou excêntrica. Nesses ensaios, é possível ver a fissuração dos modelos ensaiados à compressão excêntrica e o esmagamento sofrido pela almofada na região das mossa do bloco na Figura 5.26.



Figura 5.26 – Blocos de concreto com almofada aderida após ensaio de compressão excêntrica

As setas indicadas nos blocos de concreto da Figura 5.26 mostram o centro de gravidade do carregamento de compressão excêntrica. Observa-se que as fissuras geradas concentram-se próximas a região carregada. Além disso, mesmo após o ensaio a almofada permaneceu aderida ao bloco de concreto.

A ligação com almofada de apoio previamente aderida pode ser uma alternativa quando, no momento da concretagem dos elementos, já se possui pronta a almofada. Isso agiliza o processo de montagem do sistema de ligação e não ocasiona perda do desempenho da ligação.

5.2.7 Resumo das relações L/C para todas as séries analisadas

A Tabela 5.6 apresenta os resultados médios de todas as séries analisadas dos ensaios de ligação e de compressão simples do concreto de referência, além dos seus respectivos coeficientes de variação. Apresenta também a relação L/C e o coeficiente de variação relacionado. Os resultados detalhados dos ensaios de compressão em ligações e nos concretos de referência estão no Anexo B.

Tabela 5.6 – Resultados sucintos dos ensaios de ligação de blocos

| Série | $\sigma_{\text{med,lig}}$ (MPa) | CV_{lig} (%) | $\sigma_{\text{med,conc}}$ (MPa) | CV_{conc} (%) | L/C (%) | $CV_{L/C}$ (%) |
|------------|------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------|------------|-------------------|
| CMo65M | 47,30 | 6,0 | 62,5 | 3,9 | 75,68 | 9,9 |
| C1965LPM | 20,21 | 12,4 | 56,54 | 10,6 | 35,74 | 23,0 |
| C1465LPM | 23,55 | 10,1 | 69,67 | 4,9 | 33,81 | 15,0 |
| C1940LPM | 17,45 | 6,7 | 42,77 | 4,4 | 40,79 | 11,1 |
| C1990LPM | 29,20 | 4,1 | 85,43 | 1,6 | 34,18 | 5,7 |
| C0,5965LPM | 24,25 | 6,0 | 71,85 | 1,0 | 33,75 | 7,1 |
| C1,5965LPM | 19,31 | 17,9 | 70,73 | 3,9 | 27,30 | 21,8 |
| C065LPM | 28,03 | 7,2 | 64,61 | 2,7 | 43,34 | 9,9 |
| C0,5965AM | 19,59 | 3,3 | 68,99 | 2,9 | 28,40 | 6,2 |
| C1965AM | 18,26 | 7,1 | 66,07 | 9,5 | 27,65 | 16,5 |
| C1,5965AM | 15,33 | 9,8 | 56,54 | 10,6 | 27,12 | 20,3 |
| C065AM | 25,04 | 2,2 | 54,59 | 3,7 | 45,86 | 5,9 |
| C1965SPM | 20,28 | 8,0 | 64,31 | 8,0 | 31,53 | 16,0 |
| C1965LPR | 22,32 | 10,6 | 73,02 | 2,6 | 30,57 | 13,2 |
| C1965AR | 14,60 | 13,0 | 69,22 | 4,1 | 21,10 | 17,1 |
| EMo65M | 29,16 | 12,8 | 69,33 | 3,5 | 42,06 | 16,2 |
| E1965LPM | 14,09 | 4,7 | 72,16 | 3,9 | 19,53 | 8,5 |
| E065LPM | 15,92 | 30,4 | 71,92 | 3,6 | 22,13 | 34,0 |
| E1965AM | 16,64 | 8,1 | 72,78 | 3,0 | 22,87 | 11,1 |
| E065AM | 23,07 | 26,3 | 71,49 | 1,6 | 32,27 | 28,0 |
| E1965SPM | 14,98 | 9,8 | 73,09 | 2,9 | 20,50 | 12,7 |

onde: $\sigma_{\text{med,lig}}$ = Tensão média na ligação; CV_{lig} = Coeficiente de variação da tensão na ligação;
 $\sigma_{\text{med,conc}}$ = Tensão média no concreto de referência; CV_{conc} = Coeficiente de variação do concreto de referência; L/C = Relação L/C; $CV_{L/C}$ = Coeficiente de variação final da relação L/C

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

As conclusões são apresentadas separadamente para os ensaios de caracterização e ligação entre blocos.

A partir dos ensaios de caracterização nas diferentes dosagens utilizadas, pode-se concluir que:

- Apesar de possuir maior resistência à compressão, a argamassa de referência possui também módulo de elasticidade de duas a três vezes superior que os compósitos modificados utilizados e deve ser descartado, comprovando que as adições, especialmente do látex e da vermiculita, reduzem significativamente a rigidez;
- Os resultados não esperados de resistência à compressão da argamassa *AM*, idêntica a utilizada por Bellucio (2010), fizeram com que fossem utilizadas outras dosagens modificadas. A redução do teor de látex, além de reduzir o custo de produção, aumentou em 80% a resistência à compressão e elevou o módulo de elasticidade em cerca de 17%;
- A redução do teor de látex associada a redução de 20% de água fez com que a resistência à compressão fosse da ordem de 28 MPa e o módulo de elasticidade fosse de 11,53 GPa. Essa medida de rigidez é inferior a obtida por Bellucio (2010) na sua dosagem julgada com ideal;
- A variação da espessura das almofadas quando submetidas aos ensaios de rigidez de almofada foi obtida pela variação do pistão da máquina de ensaios. Em uma única dosagem essa variação foi indicada também por quatro transdutores instalados próximos aos vértices do corpo de prova. A rigidez obtida quando se utilizou este último método se mostrou cerca de 34% superior a obtida de forma simplificada e deve vir a ser utilizada.

Das análises experimentais e estatísticas dos ensaios de ligação entre blocos, observou-se que:

- Nos ensaios que avaliaram a eficiência da presença da almofada à ligação sujeita ao carregamento de compressão centrada, percebeu-se que ela ocorre prioritariamente para níveis intermediários de espessuras de saliências (0,5 mm e 1 mm), onde a melhora foi de 20 a 30%; para ligações com ambas as faces lisas, não houve contribuição da almofada à ligação, visto que já há um bom contato entre as partes; para espessuras de saliências elevadas, também não houve contribuição da almofada, possivelmente pela mesma não ter conseguido absorver tamanha imperfeição;
- As ligações com quatro ou nove mossas de 1 mm de espessura em um dos blocos conectados se mostrou praticamente indiferente no que diz respeito ao desempenho da ligação mediante uso da almofada de apoio;
- Em ligações com um dos blocos contendo saliências na face conectada, as primeiras fissuras ocorreram na descontinuidade causada pela junção entre os dois blocos e foram se expandindo até a ruína completa da amostra. Para blocos com faces de contato lisas, as fissuras se originaram nas extremidades dos corpos de prova;
- A pesquisa de Siqueira (2007) adotou um concreto com classe de resistência à compressão usual (35 MPa). Nesta pesquisa, a classe de resistência padrão adotada foi um Concreto de Alto Desempenho (65 MPa), mas foram utilizadas também outras classes de resistência. Percebeu-se uma tendência em haver melhor desempenho da ligação com almofada de apoio para concretos com classes de resistência mais usuais, ou seja, abaixo dos 50 MPa. Reduzindo a resistência à compressão de 90 MPa para 65 MPa, o aumento da relação L/C foi de 5%, e reduzindo de 65 MPa para 40 MPa, a relação L/C aumentou 14%;
- As ligações à compressão excêntrica apresentaram rendimento melhor quando descartada a almofada, caracterizando um resultado contrário ao esperado. Para melhor avaliação, esses ensaios deveriam ser realizados novamente com alguma metodologia que garanta a aplicação correta da excentricidade. Observou-se ainda que a aplicação da excentricidade de $\frac{1}{6}$ da largura do bloco reduziu em cerca de 80% a resistência da ligação com almofada de apoio para blocos monolíticos, 96% para corpos de prova descontínuos com saliências e 83% para modelos descontínuos sem saliências na face conectada;

- Mesmo em regime repetitivo de carregamento, a almofada melhorou a resistência da ligação. Nesse caso, a melhora causada pela almofada de apoio para um corpo de prova com saliências de 1 mm de espessura na face conectada foi de aproximadamente 45%, superior inclusive ao regime monotônico, que foi de 30%;
- O fato de a almofada estar livre ou solidarizada ao bloco superior de concreto pouco influenciou no rendimento da ligação, tanto para carregamento centrado como excêntrico.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se:

- Procurar reduzir o módulo de elasticidade e a rigidez de almofada das argamassas modificadas sem reduzir a sua resistência mecânica;
- Propor novas metodologias para aplicação de carregamento excêntrico em ligações, de modo com que se garanta a correta aplicação da excentricidade desejada;
- Avaliar a rigidez de almofada através da utilização de transdutores de deslocamento para obtenção da variação de espessura da almofada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J. J. O.; TUTIKIAN, B. Resistência Mecânica do Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Santa Maria: IBRACON, 2010. Cap.7, v.1, p.233-260.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**: Agregado em estado Solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 9776**: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 7222**: Argamassas e concretos – Determinação da resistência à tração na compressão diametral de corpos de prova cilíndricos; método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 5732**: Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739**: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 9062**: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-moldado. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BAIRÁN, J. M.; CLADERA, A. Collapse of a precast concrete beam for a light roof. Importance of elastomeric bearing pads in the element's stability. **Engineering Failure Analysis**. London, v.39. p.188-199, 2014.

BALAGURU, P. N.; SHAH, S. P. **Fiber reinforced cement composites**. New York: McGraw-Hill, 1992.

BARBOZA, A. d S. R.; EL DEBS, M. K. Load-bearing capacity of mortar joints between precast elements. **Magazine of Concrete Research**, London, v.58, n.9, p.589-599, 2006.

BELLUCIO, E.K. **Influência da rugosidade superficial e o uso de novos tipos de fibras em almofadas de argamassa para ligações de concreto pré-moldado**. 2010. 106p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2ed. London: Elsevier, 1990.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 90**. London: Thomas Telford, 1993.

EL DEBS, M. K.; BARBOZA, A. S. R.; MIOTTO, A. M. Development of material to be used for bearing pad in precast concrete connections. **Structural Concrete**, London, v.4, n.4, p.185-193, 2003.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. EESC – USP, São Carlos, 2000.

EL DEBS, M. K.; MONTEDOR, L. C.; HANAI, J. B. Compression tests of cement-composite bearing pads for precast concrete connections. **Cement and Concrete Composites**, London, v.28, n.7, p.621-629, 2006.

EL DEBS, M. K.; SIQUEIRA, G. H.; EL DEBS, A. L. H. C. Study of cement-base bearing pad subjected to compression load. In: 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, 2008, São Carlos. **Anais...** Tóquio, 2008. p.1177-1182.

FELDMAN, D. **Polymeric Building Materials**. New York: Elsevier, 1989.

FIB Bulletin 43. **Structural connections for precast concrete buildings: guide to good practice**. Switzerland, 2008.

KIM, D. G.; PARK, C. G. Strength, Permeability, and Durability of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete Containing Styrene Butadiene Latex. **Journal of Applied Polymer Science**, USA, v.129, n.3, p.1499-1505, 2012.

LEHMAN, D. E.; ROEDER, C. W.; RUSSELL, L.; CURTIN, K. **Cotton Duck Bearing Pads: Engineering Evaluation and Design Recommendations**. Technical report standard title page – Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington, Washington, 2003.

MEHDIPOUR, I; VAHDANI, M; LIBRE, N. A.; SHEKARCHI. Relationship between workability and mechanical properties of fibre-reinforced self-consolidating mortar. **Magazine of Concrete Research**, London, v.65, n.17, p.1011-1022, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. IBRACON, São Paulo, 2008.

MONTEADOR, L. C. **Desenvolvimento de compósito a ser utilizado como almofada de apoio nas ligações entre elementos pré-moldados**. 2004. 144p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

NAGASHIMA, H. N. **Laboratório de Física I**. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Notas de aula. Ilha Solteira, 2011.

OHAMA, Y. **Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars: Properties and Process Technology**. New Jersey: Noyes Publications, 1995.

OHAMA, Y. Polymer-based admixtures. **Cement and Concrete Composites**, London, v.20, p.189-212, 1998.

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. **PCI Design Handbook**. 7ed. Chicago, 2010.

RAY, I.; GUPTA, A. P. Effect of latex and superplasticiser on Portland Cement Mortar in the Hardened State. **Cement and Concrete Composites**, London, v.17, p.9-21, 1995.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Influência do tipo de cura nas propriedades mecânicas dos microconcretos leves de alto desempenho modificados com polímero para pré-fabricados de pequena espessura. In: XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, 2000, Montevideu. **Anais...** Montevideu, 2000. p.01-08.

SAI, L. K.; KJØERBYE, P.; SIT, L. C.; KWONG, Y. W.; WEI, G. L.; TENG, S. **Structural Precast Concrete Handbook**. 2ed. Singapore: Building and Construction Authority, 2001.

SBRIGHI NETO, C. Agregados Naturais, Britados e Artificiais para Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Santa Maria: IBRACON, 2010. Cap.7, v.1, p.233-260.

SIQUEIRA, G. H. **Almofada de apoio de compósito de cimento para ligações em concreto pré-moldado**. 2007. 169p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SIQUEIRA, G. H.; EL DEBS, M. K. Cement-based bearing pads for precast concrete connections. **Construction Materials**, London, v.166, n.5, p.286-294, 2012.

VAMBERSKY, J. N. J. A. Mortar joints loaded in compression. In: International Seminar Delft: Prefabrication of Concrete Structures, 1990, Delft. **Anais...** Delft, 1990, p.167-180.

YURA, J.; KUMAR, A.; YAKUT, A.; TOPKAYA, C.; BECKER, E.; COLLINGWOOD, J. **Elastomeric Bridge Bearings: Recommended Test Methods**. National Cooperative Highway Research Program, Washington, 2001.

ANEXO A

Tabela A.1 – Resultados detalhados dos ensaios de compressão nas argamassas (MPa)*

| Mix / CP | m ₁ | m ₂ | m ₃ | m ₄ | m ₅ | m ₆ | med _m | S _m | CV _m (%) |
|----------|------------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|---------------------|
| AM | 46,46 | 10,95 | 10,73 | 10,92 | 9,43 | 10,95 | 10,60 | 0,658 | 6,2 |
| AM2 | 43,74 | 17,45 | 20,26 | 19,6 | 19,55 | 18,82 | 19,14 | 1,072 | 5,6 |
| AM3 | 25,67 | 28,2 | 20,06 | 26,7 | 26,2 | 31,48 | 27,65 | 2,340 | 8,5 |
| AR | 80,53 | 80,36 | 89,7 | 78,25 | 79,15 | 81,39 | 79,94 | 1,236 | 1,5 |

Tabela A.2 – Resultados detalhados dos ensaios de tração por compressão diametral nas argamassas (MPa)*

| Mix / CP | m ₁ | m ₂ | m ₃ | m ₄ | m ₅ | m ₆ | med _m | S _m | CV _m (%) |
|----------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|----------------|---------------------|
| AM | 1,86 | 2,02 | 1,89 | 1,72 | 1,81 | 1,79 | 1,81 | 0,066 | 3,6 |
| AM2 | 2,89 | 2,64 | 2,76 | 2,94 | 2,80 | 2,89 | 2,86 | 0,074 | 2,6 |
| AM3 | 3,58 | 3,90 | 3,39 | 3,48 | 3,78 | 3,56 | 3,62 | 0,191 | 5,3 |
| AR | 4,09 | 3,72 | 3,19 | 3,18 | 4,83 | 3,96 | 3,63 | 0,426 | 11,7 |

Tabela A.3 – Resultados detalhados dos ensaios de módulo de elasticidade nas argamassas (GPa)*

| Mix / CP | m ₁ | m ₂ | m ₃ | m ₄ | m ₅ | m ₆ | med _m | S _m | CV _m (%) |
|----------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|---------------------|
| AM | 8,34 | 6,17 | 5,93 | 9,72 | 7,21 | 7,67 | 7,51 | 1,413 | 18,82 |
| AM2 | 7,24 | 8,99 | 8,27 | 9,19 | 8,62 | 8,81 | 8,78 | 0,353 | 4,02 |
| AM3 | 11,15 | 11,86 | 12,3 | 11,82 | 10,96 | 11,09 | 11,53 | 0,538 | 4,67 |
| AR | 22,54 | 23,6 | 23,83 | 22,2 | 21,5 | 22,92 | 22,76 | 0,875 | 3,84 |

Tabela A.4 – Resultados detalhados dos ensaios de rigidez de almofada nas argamassas (MPa)*

| Mix / CP | m ₁ | m ₂ | m ₃ | m ₄ | m ₅ | m ₆ | med _m | S _m | CV _m (%) |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|----------------|---------------------|
| AM | 198,84 | 192,28 | 205,86 | 202,68 | 479,46 | 215,58 | 203,05 | 8,642 | 4,3 |
| AM2 | 239,15 | 257,95 | 247,03 | 256,06 | 241,35 | 235,4 | 246,16 | 9,228 | 3,7 |
| AM3 | 297,62 | 292,27 | 296,7 | 246,27 | 242,78 | 264,76 | 273,40 | 25,432 | 9,3 |
| AR | 343,10 | 348,80 | 352,31 | 368,38 | 379,04 | 349,96 | 352,51 | 9,496 | 2,7 |

* Mix = Mistura de referência; CP = Corpo de prova; m₁ = Corpo de prova de referência; med_m = Média das tensões; S_m = Desvio padrão das tensões; CV_m = Coeficiente de variação; Números tachados = Resultados descartados pelo *Critério de Chauvenet*.

ANEXO B

Tabela B.1 – Tensão de ruptura nos ensaios de ligação (MPa)*

| Série / Resultados | σ_{L1} | σ_{L2} | σ_{L3} | σ_{L4} | σ_{L5} | σ_{L6} | $m_{\sigma L}$ | $S_{\sigma L}$ | $CV_{\sigma L}$ (%) |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|------------------|------------------|----------------|----------------|---------------------|
| CMo65M | 46,00 | 52,22 | 44,71 | 47,07 | 45,07 | 48,71 | 47,30 | 2,82 | 6,0 |
| C1965LPM | 23,67 | 18,48 | 22,84 | 19,63 | 19,26 | 17,36 | 20,21 | 2,50 | 12,4 |
| C1465LPM | 23,71 | 23,28 | 26,78 | 21,41 | 25,57 | 20,57 | 23,55 | 2,37 | 10,1 |
| C1940LPM | 13,97 | 16,00 | 18,61 | 18,60 | 16,62 | 17,41 | 17,45 | 1,17 | 6,7 |
| C1990LPM | 29,09 | 27,99 | 28,08 | 30,51 | 22,64 | 30,35 | 29,20 | 1,20 | 4,1 |
| C0,5965LPM | 25,67 | 25,76 | 23,25 | 22,12 | 23,68 | 25,01 | 24,25 | 1,46 | 6,0 |
| C1,5965LPM | 24,92 | 22,16 | 16,17 | 17,93 | 17,78 | 16,89 | 19,31 | 3,45 | 17,9 |
| C065LPM | 26,38 | 29,84 | 30,58 | 27,96 | 25,24 | 28,18 | 28,03 | 2,01 | 7,2 |
| C0,5965AM | 19,63 | 18,76 | 19,30 | 20,49 | 22,08 | 19,79 | 19,59 | 0,64 | 3,3 |
| C1965AM | 18,83 | 18,46 | 17,12 | 19,31 | 19,57 | 16,29 | 18,26 | 1,29 | 7,1 |
| C1,5965AM | 16,50 | 17,15 | 7,94 | 14,78 | 13,40 | 14,83 | 15,33 | 1,50 | 9,8 |
| C065AM | 24,34 | 26,64 | 25,55 | 25,17 | 25,53 | 24,59 | 25,04 | 0,55 | 2,2 |
| C1965SPM | 21,30 | 22,59 | 19,71 | 18,72 | 44,78 | 19,05 | 20,28 | 1,63 | 8,0 |
| C1965LPR | 24,22 | 19,07 | 23,50 | 21,31 | 20,63 | 25,20 | 22,32 | 2,36 | 10,6 |
| C1965AR | 14,80 | 16,85 | 12,96 | 13,60 | 12,56 | 16,84 | 14,60 | 1,90 | 13,0 |
| EMo65M | 33,65 | 28,04 | 26,13 | 24,16 | 30,28 | 32,70 | 29,16 | 3,73 | 12,8 |
| E1965LPM | 14,46 | 14,67 | 47,47 | 14,07 | 13,18 | AP | 14,09 | 0,66 | 4,7 |
| E065LPM | 11,58 | 12,62 | 11,25 | 22,07 | 21,11 | 16,88 | 15,92 | 4,84 | 30,4 |
| E1965AM | 16,95 | 15,21 | 17,60 | 18,24 | 14,83 | 17,03 | 16,64 | 1,35 | 8,1 |
| E065AM | 18,32 | 14,51 | 29,02 | 24,84 | 21,72 | 30,01 | 23,07 | 6,07 | 26,3 |
| E1965SPM | 16,43 | 14,61 | 14,66 | 16,33 | 12,88 | 49,00 | 14,98 | 1,47 | 9,8 |

* σ_{Li} = Corpo de prova de referência; $m_{\sigma L}$ = Média das tensões; $S_{\sigma L}$ = Desvio padrão; $CV_{\sigma L}$ = Coeficiente de variação; AP = Amostra perdida; Números tachados = Resultados descartados pelo *Crítério de Chauvenet*; Tensões calculadas considerando a área total do bloco.

Tabela B.2 – Tensão de ruptura nos ensaios de compressão nos concretos de referência (MPa)*

| Série / Resultados | σ_{C1} | σ_{C2} | σ_{C3} | σ_{C4} | σ_{C5} | σ_{C6} | $m_{\sigma C}$ | $S_{\sigma C}$ | $CV_{\sigma C}$ (%) |
|--------------------|---------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|----------------|---------------------|
| CMo65M | 62,29 | 62,33 | 62,70 | 65,13 | 64,43 | 58,07 | 62,49 | 2,47 | 3,9 |
| C1965LPM | 48,70 | 57,82 | 63,30 | 49,78 | 58,52 | 61,09 | 56,53 | 5,99 | 10,6 |
| C1465LPM | 73,52 | 65,88 | 67,00 | 69,08 | 72,87 | AP | 69,67 | 3,42 | 4,9 |
| C1940LPM | 41,14 | 43,84 | 40,80 | 45,39 | 41,39 | 44,05 | 42,77 | 1,90 | 4,4 |
| C1990LPM | 85,38 | 86,17 | 86,2 | 83,08 | 86,37 | 84,55 | 85,43 | 1,37 | 1,6 |
| C0,5965LPM | 70,63 | 71,77 | 60,5 | 71,95 | 72,29 | 72,61 | 71,85 | 0,75 | 1,0 |
| C1,5965LPM | 71,96 | 74,19 | 71,80 | 67,46 | 67,21 | 71,72 | 70,73 | 2,78 | 3,9 |
| C065LPM | 62,78 | 67,01 | 64,40 | 65,62 | 72,37 | 63,19 | 64,61 | 1,74 | 2,7 |
| C0,5965AM | 69,90 | 56,4 | 71,1 | 68,41 | 66,51 | AP | 68,99 | 1,99 | 2,9 |
| C1965AM | 57,06 | 60,15 | 73,20 | 69,98 | 69,70 | 66,35 | 66,07 | 6,25 | 9,5 |
| C1,5965AM | 48,70 | 57,82 | 63,30 | 49,78 | 58,52 | 61,09 | 56,53 | 5,99 | 10,6 |
| C065AM | 52,26 | 56,23 | 60,40 | 52,60 | 56,63 | 55,21 | 54,59 | 2,04 | 3,7 |
| C1965SPM | 71,46 | 56,26 | 63,1 | 65,58 | 67,17 | 62,28 | 64,31 | 5,13 | 8,0 |
| C1965LPR | 71,72 | 71,38 | 76,2 | 78,56 | 72,76 | 73,04 | 73,02 | 1,90 | 2,6 |
| C1965AR | 72,81 | 69,52 | 66,60 | 69,19 | 71,70 | 65,51 | 69,22 | 2,83 | 4,1 |
| EMo65M | 67,45 | 70,92 | 67,10 | 55,08 | 71,85 | AP | 69,33 | 2,41 | 3,5 |
| E1965LPM | 69,26 | 73,05 | 68,90 | 74,42 | 71,53 | 75,8 | 72,16 | 2,78 | 3,9 |
| E065LPM | 70,97 | 68,69 | 75,40 | 71,03 | 70,66 | 74,75 | 71,92 | 2,61 | 3,6 |
| E1965AM | 71,02 | 73,98 | 63,50 | 75,77 | 72,73 | 70,42 | 72,78 | 2,18 | 3,0 |
| E065AM | 72,82 | 71,03 | 70,40 | 71,85 | 70,10 | 72,77 | 71,49 | 1,17 | 1,6 |
| E1965SPM | 73,76 | 75,00 | 69,50 | 72,97 | 66,23 | 74,26 | 73,09 | 2,16 | 2,9 |

* σ_{Ci} = Corpo de prova de referência; $m_{\sigma C}$ = Média das tensões; $S_{\sigma C}$ = Desvio padrão; $CV_{\sigma C}$ = Coeficiente de variação; AP = Amostra perdida; Números tachados = Resultados descartados pelo Critério de Chauvenet.