

Ellen Kellen Bellucio

**Influência da rugosidade superficial e o uso de novos tipos
de fibras em almofadas de argamassa para ligações de
concreto pré-moldado**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof^o. Dr. Mounir Khalil El Debs

São Carlos
2010

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B449i Bellucio, Ellen Kellen
Influência da rugosidade superficial e o uso de novos tipos de fibras em almofadas de argamassa para ligações de concreto pré-moldado / Ellen Kellen Bellucio ; orientador Mounir Khalil El Debs. -- São Carlos, 2010.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Almofadas de apoio. 2. Ligações. 3. Estruturas de concreto pré-moldado. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

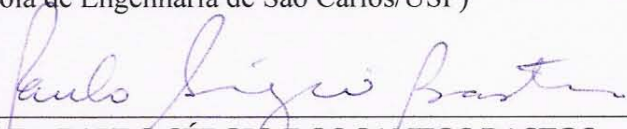
Candidato(a): Engenheiro Civil ELLEN KELLEN BELLUCIO.

Dissertação defendida e julgada em 12/03/2010 perante a Comissão Julgadora:



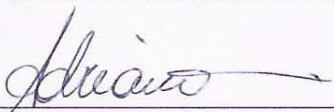
Prof. Titular **MOUNIR KHALIL EL DEBS – (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



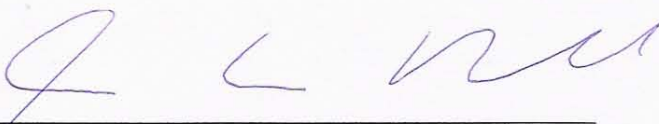
Prof. Dr. **PAULO SÉRGIO DOS SANTOS BASTOS**
(Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”/UNESP/Campus de Bauru)

Aprovado



Prof. Associado **JOÃO ADRIANO ROSSIGNOLO**
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/USP)

APROVADO



Prof. Associado **MARCIO ANTONIO RAMALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)



Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Aos meus pais, Antonio e
Judith, meu irmão Lenon, com
amor e gratidão.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por sempre me abençoar e me guiar nos caminhos que me levaram a conquistas fundamentais em minha vida.

Aos meus pais, Antonio e Judith, meu irmão Lenon, pela compreensão e confiança nas minhas escolhas; e a minha cunhada Tati pelo apoio.

À minha 'mana' Marcela e ao Dênis, minha família em São Carlos, pela amizade, compreensão, apoio em todos os momentos que precisei.

Ao Prof. Mounir, pela excelente orientação, sempre prestativo em todos os momentos.

Aos MC's da Sala 2: Gabi, Branson, Rapha e Calil, verdadeiros irmãos que tive o prazer de passar a maior parte dos meus dias. Obrigada por todo auxílio, companheirismo, momentos de alegrias que serão recordadas com muito carinho.

À galera da turma de 2008: Andreilton, Higor, Hugo, Marli, Dani, Cátia, Bianca, Dênis, Chicão, Jonas, Valmiro, Rodolfo, Fernando, Wagner, Carlão e Wellison, pessoas presentes nos momentos de estudo e descontração.

À Galera do SET e agregados: Raimundo, Flavi, Rodrigo Mário, Mineiro, Érica, Dorival, Jesus Daniel, Jesus Sánchez, Aref, Chris, Saulo, Zé Brasília, Denise, Alyne Branson, Aline Póvoa e tantos outros colegas que sempre estiveram presente em vários momentos de minha passagem por São Carlos.

Ao Vinícius Guerra, por me auxiliar no início da minha pesquisa.

Ao Renato, por me ajudar em todas as moldagens, sempre prestativo e otimista.

Aos técnicos do laboratório e estagiários: Mário, Mauri, Amauri, Romeu, Vareda, Fabiano, Rodrigo, Eduardo e Rogério, sempre me auxiliando nos ensaios.

À Orpec, ao Sérgio e ao Sérgio Ikai da Saint-Gobain pelo fornecimento das fibras.

Aos professores da UFV, Antonio Carlos, Reginaldo Carneiro, Rita de Cássia, José Luiz e Gustavo Veríssimo, por todo apoio e conselhos para o ingresso na pós-graduação.

Aos amigos da UFV, que mesmo distante, não mediram esforços para me ajudar.

Às amigas Sely e Sabrina, por toda compreensão e palavras de incentivo.

A CNPq pela bolsa de mestrado concedida e à FAPESP pelo financiamento do trabalho experimental.

Aos funcionários e professores do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, que certa forma contribuíram para conclusão deste trabalho.

...se tentares viver de amor,
perceberás que, aqui na Terra,
convém fazeres a sua parte.
A outra, não sabes nunca se virá,
e não é necessário que venha.
Por vezes, ficarás desiludido,
porém jamais perderás a coragem,
se te convenceres de que, no amor,
o que vale é amar...

Chíara Lubich

RESUMO

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. 106f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

Este trabalho apresenta o estudo de uma argamassa modificada para ser utilizada como almofada de apoio em ligações entre elementos de concreto pré-moldado. Esta argamassa é composta de cimento e areia, com a adição de látex estireno-butadieno (SB), agregado leve (vermiculita) e fibras curtas (polipropileno, vidro e PVA). As pesquisas anteriores mostraram que este compósito apresentou uma boa resistência à compressão e baixo módulo de elasticidade. O objetivo desta pesquisa é dar continuidade dos estudos anteriores analisando a influência da rugosidade superficial nas almofadas, introduzida para aumentar a sua deformabilidade e testar diferentes tipos de fibras. A rugosidade é analisada comparando placas com ambos os lados lisos, um lado liso e outro rugoso e ambos os lados rugosos. Foram estudadas dois tipos de fibras de polipropileno de 10mm de comprimento – uma com 12 μ m e outra com 180 μ m de diâmetro. Nesta pesquisa foram realizados ensaios de caracterização do compósito (compressão simples, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade) e ensaios em placas (compressão centrada – monotônica e cíclica, força concentrada e flexão). Os resultados de caracterização apontam um bom comportamento do compósito, com resistência à compressão de 41MPa e módulo de elasticidade de 12,8GPa. Os ensaios de placas mostram melhores resultados para fibras de 12 μ m de diâmetro em função de: a) uma redução de 30% da rigidez nos ensaios monotônicos em relação a uma argamassa de referência, b) melhor capacidade de absorção de carga no ensaio de força concentrada e c) no ensaio de flexão, um índice de tenacidade 40% maior quando comparadas com os outros traços estudados. Na análise da rugosidade superficial, o melhor resultado é com rugosidade em ambos os lados da placas, sendo que nos ensaios de carregamento monotônico e cíclico houve uma redução de até 30% na rigidez e um aumento do afundamento acumulado de mais de 120% em relação às placas com ambos os lados lisos.

Palavras-chave: almofadas de apoio; Ligações; Estruturas de concreto pré-moldado.

ABSTRACT

BELLUCIO, E. K. **Influence of surface roughness and the use of new types of fiber in bearing pads of cement-based material for precast concrete connections.** 2010. 106f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

This paper presents the study of a mortar modified to be used as a bearing pad connections between precast concrete elements. This mortar is composed of cement and sand, with the addition of styrene-butadiene latex (SB), lightweight aggregate (vermiculite) and short fibers (polypropylene, glass and PVA). Previous research showed that this composite presents good compressive strength and low modulus of elasticity. The objective of this research is to continue the previous studies, analyzing the influence of surface roughness on the pads, introduced to increase its deformability, and test other types of fibers. The roughness is analyzed by comparing bearing pads with both smooth sides, one side smooth and other rough and rough both sides. Two types of polypropylene fibers of 10mm in length - one with 12 μ m and another with 180 μ m in diameter are studied. In this research, tests were carried out to characterize the composite (compressive strength, tensile strength by diametral compression and modulus of elasticity) and test on bearing pads (uniform compressive load - monotonic and cyclic, concentrated load and bending). The results on cylindrical samples to characterize the composite indicate a good behavior, the compressive strength of 41MPa and modulus of elasticity of 12.8 GPa. The test bearing pads presents the best results for fibers of 12 μ m of diameter in terms of: a) a 30% reduction of stiffness in the monotonic tests in relation to a reference mortar, b) the best ability to absorb the load test concentrated load and c) the bending test, an index of toughness 40% higher when compared with the other mixture studied. Regarding surface roughness analysis, the best result is with roughness on both sides of the bearing pads, and tests of monotonic and cyclic loading are reduced by 30% in stiffness and an increase in deformation accumulated more than 120% bearing pads regarding with both sides smooth.

Keywords: *bearing pads; Connections; Precast concrete structures.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquema de ligação viga-pilar (SIQUEIRA, 2007)	3
Figura 1.2 - (a) Almofada de argamassa pronta para utilização; (b) Almofada no consolo; (c) Ligação viga-pilar utilizando almofada de argamassa; (d) Ampliação do galpão do Laboratório de Estruturas da EESC onde se utilizou a almofada de argamassa.....	4
Figura 2.1 - Perfil da curva tensão em função da deformação da matriz de cimento.....	12
Figura 2.2 - Esquema da ligação utilizada no ensaio (MIOTTO, 2002)	15
Figura 2.3 - Resultados dos ensaios de compressão axial (MONTEADOR, 2004).....	18
Figura 2.4 - Resultados de ensaios de tração por compressão diametral (MONTEADOR, 2004).....	19
Figura 2.5 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade tangente e secante (MONTEADOR, 2004)	19
Figura 2.6 - Gráfico da curva de deformação da placa com o cálculo da rigidez (MONTEADOR, 2004)	21
Figura 2.7 - Resultados dos ensaios de carregamento monotônico, e=5mm (MONTEADOR, 2004).....	21
Figura 2.8 - Resultados dos ensaios de carregamento monotônico, e=10mm (MONTEADOR, 2004)	22
Figura 2.9 - Resultados dos ensaios de carregamento monotônico, e=20mm (MONTEADOR, 2004)	22
Figura 2.10 - Comparação entre os resultados de rigidezes das placas (MONTEADOR, 2004).....	22
Figura 2.11 - Esquema de ensaio de afundamento (MONTEADOR, 2004)	23
Figura 2.12 - Resultados dos ensaios de afundamento (MONTEADOR, 2004).....	23
Figura 2.13 - Esquema do ensaio de blocos (MONTEADOR, 2004)	24
Figura 2.14 - Resultados encontrados nos ensaios de blocos (MONTEADOR, 2004).....	25
Figura 2.15 - Resultados dos ensaios de Compressão Axial (SIQUEIRA, 2007)	29
Figura 2.16 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral (SIQUEIRA, 2007).....	29
Figura 2.17 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade (SIQUEIRA, 2007).....	30
Figura 2.18 - Comparação entre os resultados de módulo de elasticidade tangente e secante (SIQUEIRA, 2007).....	30
Figura 2.19 - Resultados dos ensaios de Carregamento Monotônico (SIQUEIRA, 2007)	31
Figura 2.20 - Resultados ensaio cíclico V5PP4,5L30, e=10mm (SIQUEIRA, 2007)	32
Figura 2.21 - Resultados ensaio cíclico V5PP4L30, e=10mm (SIQUEIRA, 2007)	32
Figura 2.22 - Resultados ensaio cíclico V5PP3,5 L30, e=10mm (SIQUEIRA, 2007)	33
Figura 2.23 - Resultados ensaio cíclico V5PP4,5 L30, e=10mm (SIQUEIRA, 2007)	33
Figura 2.24 - Resultados ensaio cíclico V5PP4L30, e=10mm (SIQUEIRA, 2007).....	34

Figura 2.25 - Resultados ensaio cíclico V5PP3,5L30, e=10mm (SIQUEIRA, 2007)	34
Figura 2.26 - Resultados do ensaio de afundamento (SIQUEIRA, 2007)	36
Figura 2.27 - Tipos de ligações dos blocos utilizado nos ensaios (SIQUEIRA, 2007).....	37
Figura 2.28 - Esquema da rugosidade aplicada nos blocos (SIQUEIRA, 2007)	37
Figura 2.29 - Resumo das tipologia dos blocos ensaiados (SIQUEIRA, 2007).....	37
Figura 2.30 - Resultados ensaio de blocos (SIQUEIRA, 2007)	38
Figura 2.31 - Esquema de ensaio de rotação (SIQUEIRA, 2007).....	39
Figura 2.32 - Posicionamento dos relógios no ensaio de rotação (SIQUEIRA, 2007)	39
Figura 2.33 - Esquema de ensaio de tenacidade ao fraturamento (SIQUEIRA, 2007)	40
Figura 2.34 - Resultados ensaio de rotação (SIQUEIRA, 2007).....	40
Figura 2.35 - Retirada da amostra para o ensaio de microscopia ótica (SIQUEIRA, 2007) ..	41
Figura 2.36 - Foto das amostras ensaiadas e não-ensaiadas (SIQUEIRA, 2007)	42
Figura 3.1 - Curva granulométrica da areia	46
Figura 3.2 - (a) Fibra Brasilit (b) Fibra Concrefil	47
Figura 3.3 - (a) Fibra Brasilit (b) Fibra Concrefil	48
Figura 3.4 - Massa fresca com fibra de (a) 12 μ m e (b) 180 μ m.....	51
Figura 4.1 - Batedeira Industrial utilizada na mistura da argamassa	53
Figura 4.2 - Placas moldadas em fôrmas sem controle de uma das superfícies	55
Figura 4.3 - (a) Desenho do molde de cada placa; (b) Desenho da fôrma completa – bateria;	55
Figura 4.4 - (a) Foto de uma fôrma da almofada; (b) Foto da fôrma completa – Bateria; (c) desmoldagem de cada placa; (d) Bateria com as placas prontas para desmoldar.	56
Figura 4.5 - Moldagem das placas utilizando o funil e o ‘pente’.....	57
Figura 4.6 - (a) Borracha DF; (b) Borracha DCO; (c) borracha DMA.....	58
Figura 4.7 - Placas feitas nas fôrmas com placas de piso após a desmoldagem	58
Figura 4.8 - (a) Manta utilizada nas fôrmas para conferir rugosidade nas placas; (b) Fôrma com a manta colada; (c) Almofada com superfície lisa e outra rugosa; (d) Detalhes das superfícies das almofadas	59
Figura 4.9 - (a) Molde dos corpos-de-prova; (b) Corpo-de-prova pronto para ensaio	59
Figura 4.10 - Esquema de ensaio de tração por compressão diametral.....	61
Figura 4.11 - Esquema do ensaio de módulo de elasticidade	61
Figura 4.12 - Modelo para o cálculo do módulo de elasticidade	62
Figura 4.13 - (a) Placas na bateria após a moldagem; (b) Placa sendo desmoldada	62
Figura 4.14 - (a) Instron modelo 5595-300HVL; (b) Instron modelo 8506; (c) Sistema de aquisição de dados na Instron 5595-300HVL; (d) Sistema de aquisição de dados na Instron 8506.....	63
Figura 4.15 - Exemplo para o cálculo da rigidez das placas.....	64
Figura 4.16 - (a) Amostra para o ensaio de força concentrada; (b) Esquema do ensaio de força concentrada.....	65

Figura 4.17 - Resultado de uma curva de força concentrada	65
Figura 4.18 - Dispositivo de flexão (ABNT NBR 12142:1991)	66
Figura 4.19 Distância dos pontos de aplicação de carga na amostra de flexão	67
Figura 4.20 - (a) Amostra para ensaio de flexão; (b) Esquema de ensaio de flexão.....	67
Figura 4.21 Curva Força x Deslocamento para calcula da tenacidade.....	68
Figura 4.22 Curva Força x Deslocamento padrão elasto-plástico para cálculo da tenacidade.....	68
Figura 4.23 - Gráfico com as curvas de regressão linear para cálculo das áreas.....	69
Figura 4.24 - Seção de ruptura para ensaio de flexão (ABNT NBR 12142:1991).....	69
Figura 4.25 - Gráfico do ensaio cíclico demonstrando o cálculo da rigidez para tensão de 20MPa.....	71
Figura 4.26 - Gráfico do ensaio cíclico demonstrando o afundamento acumulado para o ciclo de 450kN.....	71
Figura 5.1 - Resultados dos ensaios de compressão simples.....	74
Figura 5.2 - Corpo-de-prova PP12 após ensaio de compressão simples	74
Figura 5.3 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral.....	75
Figura 5.4 - Corpo-de-prova após ensaio de Tração	76
Figura 5.5 - Resultados dos ensaios de Módulo de elasticidade.....	76
Figura 5.6 - Resultados de rigidez do traço PP12	78
Figura 5.7 - Resultados de rigidez do traço PP180	79
Figura 5.8 - Resultados de rigidez do traço Mistura	80
Figura 5.9 - Resultados de rigidez do traço de referência	81
Figura 5.10 - Comparação dos resultados de rigidez.....	82
Figura 5.11 - Comparação da rigidez conforme a rugosidade aplicada.....	82
Figura 5.12 - Detalhe da placa (a) antes e (b) depois do ensaio	83
Figura 5.13 - Resultados de força concentrada para o traço PP12	84
Figura 5.14 - Resultados de força concentrada para o traço PP180	84
Figura 5.15 - Resultados de força concentrada para o traço Mistura	84
Figura 5.16 - (a) Amostra no ensaio; (b) Amostra após o ensaio; (c) Detalhe do ensaio na amostra; (d) Detalhe da amostra após o ensaio	85
Figura 5.17 - Resultados de força concentrada para o de referência	86
Figura 5.18 - (a) Amostra no ensaio; (b) amostra após o ensaio; (c) detalhe do ensaio na amostra; (d) detalhe da amostra após o ensaio.....	86
Figura 5.19 - Curvas médias dos resultados de força concentrada.....	87
Figura 5.20 - Resultados de flexão para o traço PP12	88
Figura 5.21 - Resultados de flexão para o traço PP180	88
Figura 5.22 - Resultados de flexão para o traço Mistura	89
Figura 5.23 - (a)Resultados de flexão para o traço de referência; (b) Detalhe do gráfico nos primeiros deslocamentos	89

Figura 5.24 - Foto do ensaio de flexão.....	90
Figura 5.25 - Resultados dos índices de tenacidade.....	90
Figura 5.26 - Exemplo do cálculo de rigidez para ensaio cíclico	91
Figura 5.27 - Resultados de rigidez com carregamento de 10MPa e 20MPa.....	93
Figura 5.28 - Resultados de rigidez para o traço de referência e PP12.....	93
Figura 5.29 - Resultados de rigidez comparando as rugosidades aplicadas	94
Figura 5.30 - Resultados de afundamento acumulado para o traço de referência e PP12 ...	94
Figura 5.31 - Resultados de afundamento acumulado com carregamento de 10MPa e 20MPa.....	95
Figura 5.32 - Resultados do afundamento acumulado comparando as rugosidades aplicadas	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Especificações da fibra utilizada por Montedor (2004)	16
Tabela 2.2 - Variáveis analisadas (MONTEDOR, 2004).....	17
Tabela 2.3 - Misturas para ensaios de caracterização do material (MONTEDOR, 2004)	17
Tabela 2.4 - Legenda dos traços utilizados (MONTEDOR, 2004)	18
Tabela 2.5 - Mistura para ensaios de compressão centrada – placas 10x10cm (MONTEDOR, 2004)	20
Tabela 2.6 - Mistura para ensaios de compressão centrada – placas 10x10cm (MONTEDOR, 2004)	20
Tabela 2.7 - Especificações da fibra utilizada por Siqueira (2007)	27
Tabela 2.8 - Variáveis utilizadas nos traços das almofadas (SIQUEIRA, 2007)	27
Tabela 2.9 - Esquema dos ensaios realizados por Siqueira (2007).....	28
Tabela 2.10 - Comparação de valores de afundamentos para diferentes carregamentos.	35
Tabela 2.11 - Comparação de valores de rigidezes para diferentes carregamentos. (SIQUEIRA, 2007).....	35
Tabela 3.1 - Características físico-químicas do cimento (Fonte: HOLCIM S.A.).....	45
Tabela 3.2 - Propriedades do Latéx IMPRIMASTER - Contruquil	48
Tabela 3.3 - Propriedades das fibras utilizadas.....	48
Tabela 3.4 - Dados técnicos do GLENIUM 51.....	49
Tabela 3.5 - Traço de referência em volume.....	50
Tabela 3.6 - Traço base em volume.....	50
Tabela 3.7 - Traço utilizando a fibra de 12 \square m em volume.....	51
Tabela 3.8 - Traço utilizando a fibra de 180 \square m em volume.....	51
Tabela 3.9 - Traço utilizando as duas fibras em volume.....	51
Tabela 3.10 - Traço de referência em massa.....	52
Tabela 4.1 - Quadro resumo dos ensaios realizados	54
Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de compressão simples	73
Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral	75
Tabela 5.3 - Resultados dos ensaios de Módulo de elasticidade	76
Tabela 5.4 - Resultados das médias das rigidezes do ensaio monotônico para traço PP12 (MPa)	78
Tabela 5.5 - Resultados das médias das rigidezes do ensaio monotônico para traço PP180 (MPa).....	79
Tabela 5.6 - Resultados das médias das rigidezes do ensaio monotônico para traço Mistura (MPa).....	80
Tabela 5.7 - Resultados das médias do ensaio monotônico para traço Referência.....	81
Tabela 5.8 - Resultado da força última (kN)	87

Tabela 5.9 - Resultado dos índices de tenacidade.....	90
Tabela 5.10 - Resultados das rigidezes para o ensaio de carregamento cíclico.....	92
Tabela A.1 - Resultados dos ensaios de compressão simples	103
Tabela A.2 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral	103
Tabela A.3 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade	103
Tabela A.4 - Resultados dos ensaios de carregamento monotônico - Traço PP12	104
Tabela A.5 - Resultados dos ensaios de carregamento monotônico - Traço PP180	105
Tabela A.6 - Resultados dos ensaios de carregamento monotônico - Traço Mistura	105
Tabela A.7 - Resultados dos ensaios de carregamento monotônico - Traço Referência ...	105
Tabela A.8 - Resultados dos ensaios de carregamento cíclico – afundamento acumulado	106

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	4
1.2	Justificativas	5
1.3	Metodologia	5
1.4	Apresentação da Dissertação	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Composição dos Materiais	9
2.1.1	Fibras de polipropileno	10
2.1.2	Argamassa com fibras de polipropileno	13
2.2	Trabalhos realizados utilizando almofadas de argamassa modificadas na EESC	15
2.2.1	Primeiros trabalhos publicados	15
2.2.2	Montedor (2004)	16
2.2.3	Siqueira (2007)	26
2.2.4	Pesquisas relacionadas à aplicação da almofada em ligações	42
3	MATERIAIS UTILIZADOS	45
3.1.	Cimento Portland	45
3.2.	Areia	46
3.3.	Vermiculita termo-expandida	46
3.4.	Látex Estireno-butadieno	47
3.5.	Fibras de Polipropileno	48
3.6.	Aditivo Superplastificante	49
3.7.	Dosagem	49
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	53
4.1.	Disposições de Moldagem e Definição de Fôrmas	54
4.2.	Ensaio de Caracterização do material	59
4.2.1.	Compressão Simples	60
4.2.2.	Tração por Compressão Diametral	60
4.2.3.	Módulo de Elasticidade	61
4.3.	Ensaio de Placas	62
4.3.1.	Carregamento Monotônico	63
4.3.2.	Força Concentrada	64
4.3.3.	Ensaio de Flexão	66
4.3.4.	Carregamento Cíclico	70
5	ANÁLISE DE RESULTADOS	73
5.1.	Ensaio de Caracterização	73
5.1.1.	Compressão Simples	73

5.1.2.	Tração por Compressão Diametral	75
5.1.3.	Módulo de Elasticidade.....	76
5.2.	Ensaio de Placas	77
5.2.1.	Carregamento Monotônico	77
5.2.2.	Ensaio de Força Concentrada	83
5.2.3.	Ensaio de Flexão	88
5.2.4.	Carregamento Cíclico	91
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
	REFERÊNCIAS.....	99
	APÊNDICE A.....	103

1 INTRODUÇÃO

A escolha do tipo de ligação entre os elementos de concreto pré-moldado é de fundamental importância na concepção do projeto, tanto no que se refere à sua produção (execução de parte dos elementos adjacentes às ligações, montagem da estrutura e serviços complementares no local) como para o comportamento da estrutura montada. As falhas na concepção das ligações, bem como defeitos em sua execução, podem ocasionar não conformidade estrutural e provocar o colapso da estrutura.

Nas ligações entre elementos de concreto pré-moldado, a transferência das tensões de compressão pode ser de duas maneiras: (a) por contato direto; e (b) por inserção de material entre os elementos.

Devido ao comportamento frágil do concreto, o apoio por contato direto é raramente utilizado e limitado a tensões de compressão muito baixas. O uso de argamassa moldada no local pode ser uma alternativa para minimizar as irregularidades da superfície de contato. O seu alcance é limitado e sua aplicação é restrita a baixos níveis de tensão de compressão, sendo que, esta ainda requer trabalhos adicionais na obra.

Com relação à inserção de material entre os elementos pré-moldados, o material pode ser rígido ou flexível. O material rígido seria elementos metálicos embutidos nas peças pré-moldadas de concreto e, o contato pode ser feito por estes elementos. Este tipo de ligação requer cuidados para garantir a uniformidade dimensional da superfície de contato e frequente manutenção, porque os elementos metálicos podem ser expostos.

Os elementos flexíveis podem ser na forma de almofadas de elastômero. O elastômero mais comum utilizado como elemento de apoio é o policloropreno, conhecido comercialmente como neoprene. Por ser um material bastante deformável ele acomoda as irregularidades da superfície, promovendo uma distribuição de tensões mais uniforme e permite certos movimentos de rotação e deslocamento horizontal. A rotação faz que o comportamento da ligação seja bem próximo de uma

ligação articulada e o deslocamento horizontal possibilita aliviar as tensões provenientes da variação de comprimento dos elementos apoiados, sendo uma grande vantagem deste tipo de material, quando esta variação de comprimento introduz esforços de grande magnitude na estrutura. Este material apresenta como desvantagem alto custo, a durabilidade menor que a do concreto, baixa resistência a incêndios e à compressão, além de que sua aplicação é incompatível com ligações sujeitas a altas tensões de compressão, devido à grande deformação do material.

Nesta pesquisa realizou-se estudos de um material a base de argamassa de cimento com adições para ser utilizada como almofada de apoio em ligações vigapilar.

Este material deve possuir módulo de elasticidade tão baixo quanto possível e um valor razoável de resistência. Um material mais deformável e com maior tenacidade que as argamassas usuais, poderá cumprir a finalidade de transferir tensões de compressão, uniformes ou não, e acomodar irregularidades da superfície de forma a evitar a concentração de tensão.

A argamassa é composta dos seguintes elementos: agregado leve (vermiculita); látex e fibras curtas. A vermiculita promove um significativo aumento na capacidade de deformação da argamassa no estado endurecido. O látex é uma dispersão de polímeros orgânicos em água que melhora propriedades do material no estado endurecido como a durabilidade, resistência à flexão e ao impacto, permeabilidade, resistência ao congelamento e resistência à abrasão. A adição de fibras curtas ao concreto melhora, em geral, as resistências ao impacto e a fadiga do material endurecido, bem como aumentam a sua tenacidade. Em grandes quantidades, as fibras reduzem a trabalhabilidade da mistura e podem incorporar ar ao material endurecido, o que promove também a redução do módulo de elasticidade.

Esses ingredientes adicionados à argamassa comum tendem a aumentar a deformabilidade do material endurecido. Esta característica, geralmente considerada um efeito colateral, é bastante importante para o material ser utilizado como camada em contato nas ligações.

Este compósito possui a vantagem de aumentar a rigidez da ligação quando comparado com ligações utilizando o elastômero, além de ter um custo menor e não

precisar de manutenção. Também apresenta a capacidade de moldá-lo de acordo com a tipologia da ligação, independentemente do tamanho e do tipo de apoio e da necessidade de vazios na almofada. Esta almofada de argamassa não apresenta capacidade de distorção, portanto, tem que levar em consideração os esforços horizontais produzidos pela variação volumétrica dos elementos. Também tem que se considerar que esta almofada de argamassa não admite certos ajustes na montagem como as almofadas de elastômeros, não podendo forçar os pilares na colocação da viga. Portanto, deve haver um melhor controle na execução da montagem da estrutura. A sua aplicação mais comum é em ligações viga-pilar de estruturas de edifícios comerciais e residenciais e de galpões industriais. A Figura 1.1 apresenta um esquema típico de ligação viga-pilar utilizando aparelho de apoio e a Figura 1.2 apresenta fotos da almofada de argamassa modificada.

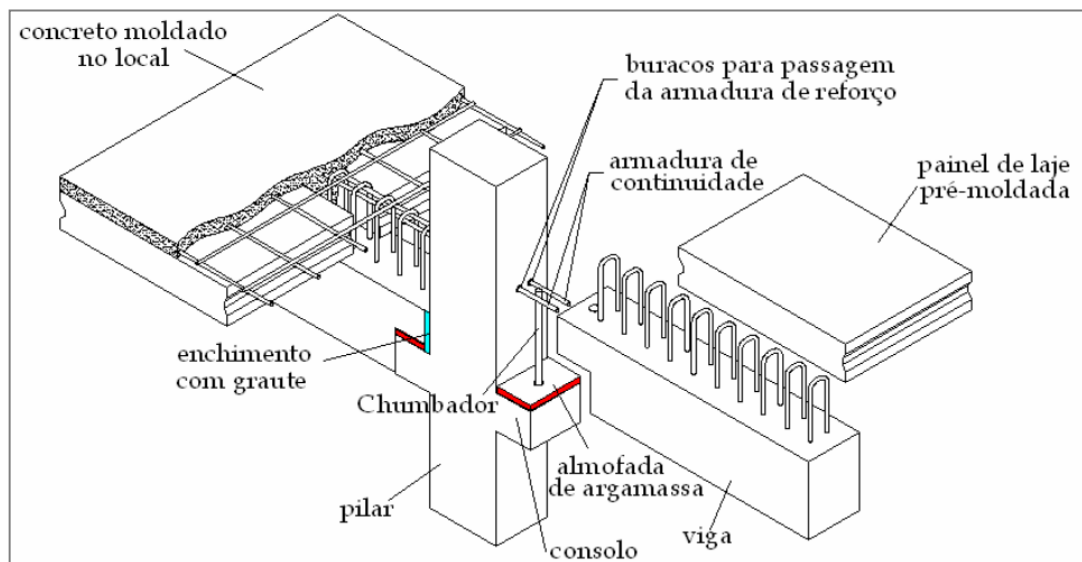


Figura 1.1 - Esquema de ligação viga-pilar (SIQUEIRA, 2007)

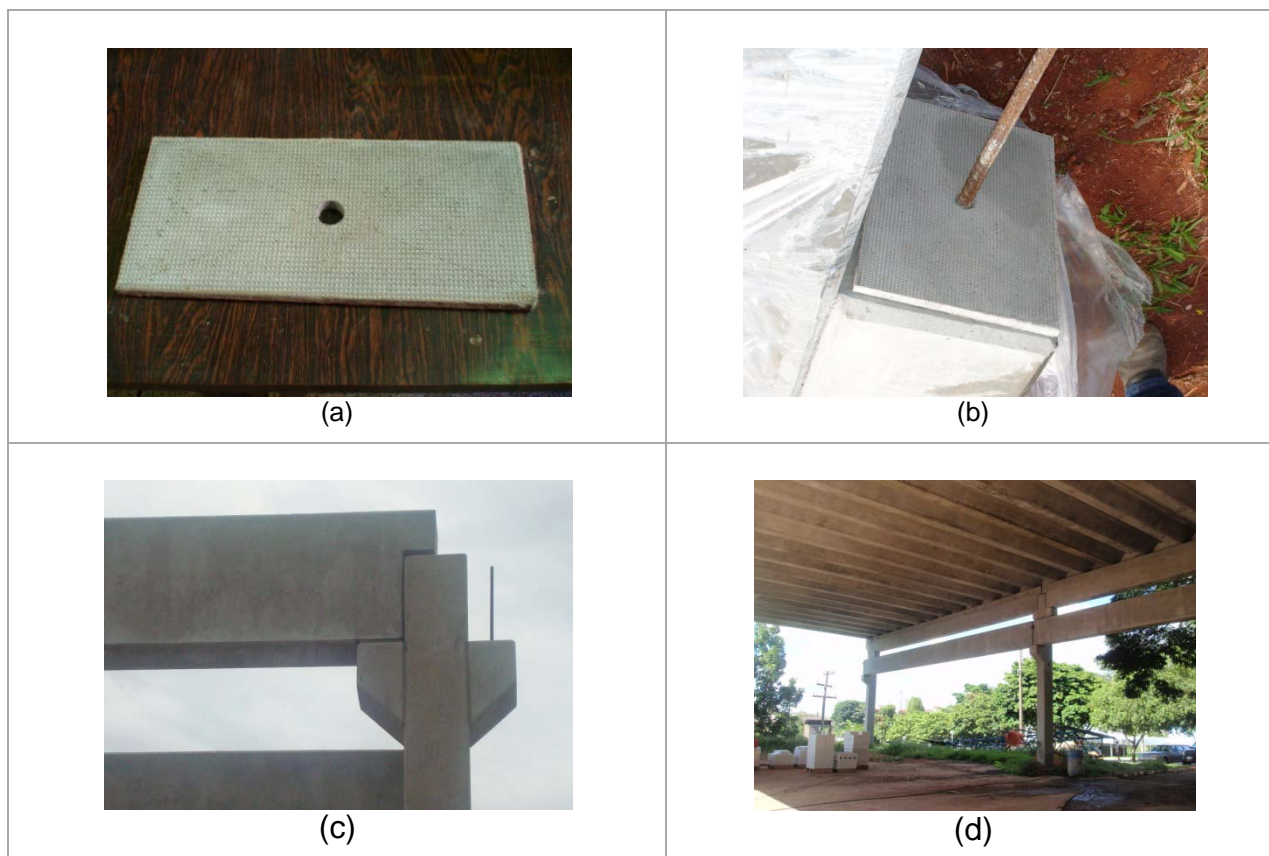


Figura 1.2 - (a) Almofada de argamassa pronta para utilização; (b) Almofada no consolo; (c) Ligação viga-pilar utilizando almofada de argamassa; (d) Ampliação do galpão do Laboratório de Estruturas da EESC onde se utilizou a almofada de argamassa.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o efeito da rugosidade superficial aplicada nas almofadas de argamassa e analisar a utilização de novos tipos de fibra.

Os objetivos específicos são:

- a) desenvolver uma forma de moldagem para controlar a rugosidade de ambos os lados das placas para que se possa moldar as almofadas de forma eficiente e rápida;
- b) avaliar novas fibras de polipropileno para este compósito a fim de encontrar um tipo que obtenha uma boa trabalhabilidade na argamassa fresca e compatível com a nova forma de moldagem desenvolvida;
- c) avaliar a variação da rigidez das almofadas do material conforme o tipo de rugosidade aplicada na superfície da almofada.

1.2 JUSTIFICATIVAS

As ligações com a utilização de argamassa entre elementos pré-moldados são bastante utilizadas devido a sua facilidade de execução. Porém, nesse tipo de configuração apresentada, não existem parâmetros suficientes que determinem suas características resistentes, portanto:

- a) por se tratar de um material novo, existem poucos estudos nesse sentido no país, concentrando-se no Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos;
- b) a pesquisa é continuidade de dois estudos sobre as almofadas de argamassa por Montedor (2004) e Siqueira (2007) que concluíram que o material é viável para aplicação como almofada de apoio;
- c) o comportamento da argamassa quando utilizada nas ligações ainda é pouco conhecido, necessitando a realização de novos estudos para avaliação mais ampla na sua utilização;
- d) a argamassa apresentou boa capacidade de deformação, em alguns testes previamente realizados, porém, há algumas dúvidas referentes à influência da rugosidade superficial que precisa ser estudada;
- e) a fibra utilizada em pesquisas anteriores com bom comportamento não é disponível comercialmente, o que impossibilita seu uso para aplicação no mercado, portanto há necessidade de novos estudos com diferentes fibras para viabilizar a aplicação das almofadas.

Com base nos aspectos citados nota-se a relevância do estudo do material, mesmo porque existem variações do tipo de fibras utilizadas que determinam algumas características diferenciadas às argamassas produzidas.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia a ser empregada no desenvolvimento desta dissertação de mestrado pode ser assim dividida:

a) Pesquisa bibliográfica

Através da revisão bibliográfica foram estudadas as características de modificação que cada um dos elementos introduzidos na argamassa poderia trazer. Verificou-se o que já foi realizado em pesquisas anteriores buscando adequar o que foi feito de melhor e aplicar na nova composição das almofadas. Assim, pode-se fazer uma análise dos tipos de fibras utilizadas e o que cada uma confere ao compósito, além disso, fazer uma análise de algumas rugosidades já aplicadas na moldagem.

b) Definição das variáveis do compósito

Com base nos trabalhos desenvolvidos anteriormente, foram definidos os tipos de fibras e rugosidades a serem utilizadas no estudo.

c) Programa experimental

Através dos ensaios experimentais foram verificadas as características reais da argamassa, possibilitando assim, analisar as características de resistência e elasticidade do compósito e o comportamento das almofadas. Para o programa, foram realizados ensaios de caracterização do compósito e caracterização das almofadas.

Para determinação das características do material, foram realizados ensaios de:

- compressão simples;
- tração por compressão diametral;
- módulo de elasticidade em corpos-de-prova cilíndricos.

Para os ensaios com as almofadas do compósito, trazendo suas características e suas propriedades básicas, foram realizados:

- ensaios de força uniforme (monotônico e cíclico);
- ensaios de força concentrada;
- ensaios de flexão.

d) Análise dos resultados

Por meio da análise dos resultados foi feita uma avaliação crítica do compósito em relação às características necessárias para seu uso como elemento de apoio, podendo assim, validar as hipóteses de desempenho do material comparando com resultados encontrados em pesquisas anteriores.

1.4 APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No **capítulo 1**, *introdução*, são apresentadas a utilização dos elastômeros nas ligações, os objetivos e justificativas deste trabalho. Descreve também a metodologia adotada para realização da pesquisa.

O **capítulo 2**, *revisão bibliográfica*, apresenta uma revisão dos trabalhos já realizados sobre almofadas de argamassas, abordando todos os aspectos já estudados e resultados encontrados. Apresenta-se uma pequena revisão sobre fibras de polipropileno e sua aplicação em argamassas, sendo este o material estudado nessa pesquisa.

No **capítulo 3**, *materiais utilizados*, são apresentados todos os materiais utilizados na composição das almofadas, bem como suas características e propriedades.

No **capítulo 4**, *programa experimental*, são descritos todos os ensaios realizados para o estudo do compósito. São apresentados os ensaios de caracterização e ensaios específicos das placas.

No **capítulo 5**, *análise de resultados*, são apresentados e avaliados os resultados encontrados nos ensaios, apresentando gráficos comparativos dos diferentes traços e rugosidades. Realizou-se uma comparação com os resultados encontrados em pesquisas anteriores.

O **capítulo 6**, *considerações finais e conclusões*, apresenta as principais considerações sobre os resultados encontrados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estudos sobre este compósito vem sendo realizados na Escola de Engenharia de São Carlos desde 1999, iniciados com pesquisas em nível de iniciação científica e algumas aplicações em pesquisas de ligações. Motivados pelos bons resultados encontrados, Montedor (2004) estudou especificamente o compósito analisando vários traços que melhor atendia ao comportamento para ser usado como almofada de apoio, e Siqueira (2007) deu continuidade aos estudos utilizando outras fibras e realizando novos ensaios na almofada.

Neste capítulo apresenta-se: a) uma breve revisão sobre a modificação da argamassa com os novos materiais introduzidos; b) uma abordagem sobre as fibras de polipropileno (PP) utilizadas neste trabalho; c) uma revisão dos primeiros estudos realizados com as almofadas, estudos de Montedor (2004) e Siqueira (2007) e d) algumas pesquisas de ligações utilizando essas almofadas de argamassa modificada.

2.1 COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS

Novos materiais podem ser desenvolvidos a partir da combinação de outros, sendo necessário conhecer as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição e como eles podem ser combinados. Budinski¹ (1996, apud ARAÚJO, 2005, p. 23) descreve que um material compósito é a combinação de dois ou mais materiais que tem propriedades que os materiais componentes isoladamente não apresentam. Eles são, portanto, constituídos de duas fases: a matriz e o elemento de reforço, e são desenvolvidos para aperfeiçoar os pontos fortes de cada uma das fases.

Na construção civil, os compósitos são tipicamente constituídos por matriz frágil reforçada com fibra dúctil, como as argamassas reforçadas com fibras de polipropileno, embora haja exceções, como o cimento amianto, possivelmente o

¹ BUDINSKI, K.G. **Engineering materials: properties and selection**. New Jersey: Prentice Hall International., 5ed, 1996. 653p.

mais popular compósito da engenharia civil, no qual a matriz (pasta de cimento) e as fibras (amianto) apresentam ruptura frágil.

Ainda segundo BUDINSKI (1996, apud ARAÚJO, 2005, p. 23), os materiais compósitos mais importantes são combinações de polímeros e materiais cerâmicos. Os produtos baseados em cimento Portland são considerados como materiais cerâmicos por apresentarem características típicas a este grupo de materiais, como, por exemplo, alta rigidez, fragilidade, baixa resistência à tração e tendência de fissuração por secagem.

Os polímeros são caracterizados por terem baixo módulo de elasticidade, ductibilidade variável e resistência à tração moderada. São extremamente versáteis e, dentro de certos limites, podem ser modificados para adaptar-se segundo necessidades específicas (TAYLOR, 1994).

Os materiais compósitos, originados da combinação das cerâmicas e dos polímeros, apresentam características mais apropriadas de resistência mecânica, rigidez, ductibilidade, fragilidade, capacidade de absorção de energia de deformação e comportamento pós-fissuração, quando comparado com os materiais que lhes deram origem.

2.1.1 Fibras de polipropileno

A fibra de polipropileno é formada de macrocélulas lineares saturadas de hidrocarbonetos das quais um carbono, entre cada dois, comporta uma ramificação metila, em disposição estática e sem substituições ulteriores. Esta fibra incorporada ao concreto reduz substancialmente as fissuras de retração plástica, reduz a permeabilidade e promove o aumento da resistência ao impacto, à abrasão e ao congelamento, proporcionando aumento da durabilidade do concreto, além de aumentarem a resistência à fadiga e à fragmentação.

O polipropileno é hidrofóbico, ou seja, sua introdução no concreto não afeta o processo de hidratação da pasta de cimento e ao mesmo tempo impede a formação de ligações fortes entre a fibra e a matriz cimentícia.

As fibras poliméricas, quanto ao módulo de elasticidade, podem ser divididas em dois grupos: as de alta resistência e alto módulo de elasticidade; e as de baixa resistência e baixo módulo. A maior vantagem de usar as fibras de alta resistência e alto módulo de elasticidade, como fibras de carbono, está relacionada com o aumento da capacidade da resistência à flexão antes e/ou depois da fissuração da

matriz, mesmo com baixos teores de fibra. No entanto, a maior desvantagem, quando comparada com as fibras de baixo módulo, como polipropileno, está relacionada com o elevado custo de comercialização.

Silva (2006) descreve que dentre as fibras de baixo módulo de elasticidade destacam-se as de náilon, polietileno, poliéster e polipropileno, sendo a última a mais utilizada na matriz de cimento. Segundo um dos fabricantes de fibras de polipropileno, atuante no mercado da construção civil há três anos, do ano 2000 para 2001 foi verificado um crescimento de 40% no volume de fibras vendidas, enquanto de 2001 para 2002 houve um crescimento de 150%.

Em função do tipo de tecnologia de produção utilizada, as fibras de polipropileno podem apresentar uma estrutura do tipo monofilamento – macrofibras produzidas individualmente – ou multifilamento – microfibras agrupadas formando filmes (redes) de fibras (BENTUR; MINDESS, 1990).

Por outro lado, quanto menor o comprimento da fibra inserida na matriz, ela tende a perder a aderência em relação à matriz, não oferecendo nenhum efeito de reforço. Isso ocorre devido à baixa resistência de atrito, proporcionada pela pequena extensão da fibra embebida na matriz, ser menor do que a resistência da fibra.

Quando comparadas entre si, a fibra de polipropileno:

- a) tem uma facilidade de dispersar durante a mistura da matriz, o que não acontece com as fibras de náilon, por exemplo (BENTUR; MINDESS, 1990);
- b) não se degrada rapidamente quando imersa na matriz de cimento Portland, o que acontece com as fibras de poliéster (BENTUR; MINDESS, 1990);
- c) possui maior resistência de aderência (fibras do tipo monofilamento – 0,34 a 0,48 MPa) na matriz, quando comparada com fibras de poliéster (0,10 MPa) e náilon (0,20 MPa). Porém, possui menor resistência de aderência quando comparada com fibras de polietileno (BENTUR; MINDESS, 1990).

Bentur e Mindess (1990) salientam a relação direta do teor de fibra com a capacidade do reforço após a fissuração da matriz. Logo, aumentando a quantidade de fibras por uma unidade de área do compósito, pode ocorrer o aumento da sua capacidade resistente e sua tenacidade. Isso porque o aumento da quantidade de fibras faz com que ocorra o aumento da quantidade de pontes de transferência de tensões nas fissuras, como também o aumento da quantidade de fibra a serem arrancadas.

Em argamassa reforçada com fibras de polipropileno observa-se o aumento

somente da tenacidade. Devido às propriedades mecânicas da fibra (baixa resistência e módulo), o uso de teores baixos de fibra não proporciona uma capacidade resistente do compósito. (Figura 2.1)

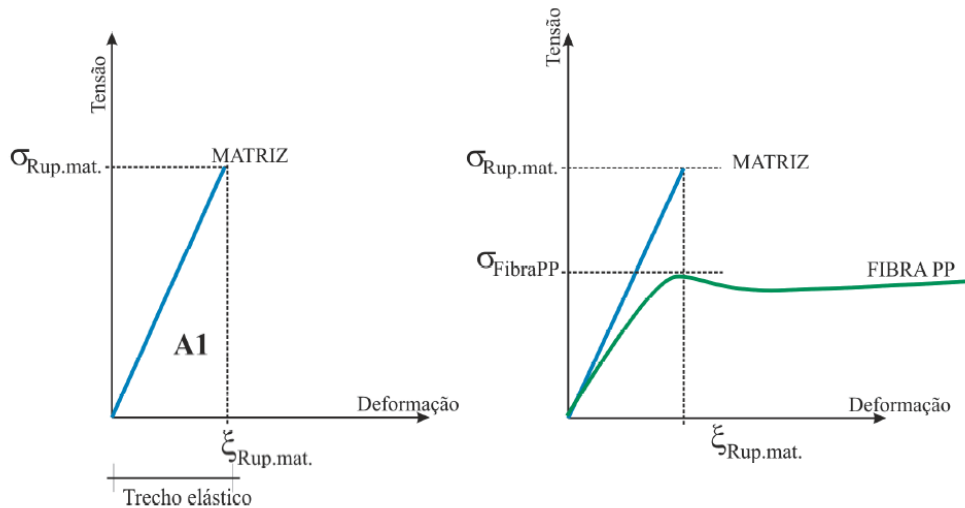


Figura 2.1 - Perfil da curva tensão em função da deformação da matriz de cimento (FIGUEIREDO, 2000)

Segundo Jiang e Roy (1992), a utilização de 2% de fibra de polipropileno na elaboração de amostras de concreto mostra que a sua adição interrompe ou desvia a propagação de microfissuras, sendo isso equivalente a uma melhora na resistência à tração. A interrupção das microfissuras também é observada por Shah (1991) em concretos contendo fibras de polipropileno.

O comprimento da fibra de polipropileno é considerado um fator de eficiência do reforço devido à sua correlação com a resistência de atrito, parâmetro indispensável para a condição pós-fissuração do compósito, uma vez que a transmissão de tensões por atrito fibra-matriz é o mecanismo que governa a transferência de esforços após a fissuração da matriz. Dessa forma, quanto maior a extensão de fibra inserida na matriz, maior será a resistência de atrito durante o seu arrancamento a qual está diretamente relacionada com a energia de fratura.

Segundo Bentur e Mindess (1990), quando comparadas, as fibras poliméricas são as mais atrativas para reforçar matriz de cimento devido à sua não degradação: seja por microorganismo, o que acontece com a fibra vegetal; seja por corrosão, o que acontece com a fibra de aço; ou por degradação em meio alcalino do cimento, o que acontece com as fibras de vidro e vegetal.

2.1.2 Argamassa com fibras de polipropileno

A eficiência da fibra de polipropileno no reforço do material cimentício está diretamente associada com aspectos tecnológicos inerentes à fibra, à matriz e ao preparo do compósito. As propriedades físicas e mecânicas da fibra, seu teor, as propriedades mecânicas da matriz e a distribuição volumétrica da fibra na matriz são alguns dos fatores cujas características devem ser levadas em conta, no momento da produção do compósito, a fim de que o produto final desempenhe suas funções adequadamente; por isto, seus aspectos principais serão aqui sintetizados.

O uso de fibras na matriz de cimento pode contribuir para que esta restrição seja superada ou até mesmo controlada, possibilitando assim o uso do compósito em situações quais são frequentes estes tipos de esforços. Utilizar fibras nos materiais de construção não é uma técnica moderna; Mehta; Monteiro (1994) destacam que os egípcios usavam a palha para reforçar tijolos de barro. Os autores complementam que há evidências de que as fibras de asbesto foram usadas para reforçar postes de argila há cerca de 5000 anos.

No entanto, somente no início de 1960 começou a ocorrer o estudo sistêmico de cimento reforçado com fibra, tendo sido primeiramente estudado fibras de amianto em matriz de concreto (Jelidi et al., 1991). O uso de fibras de polipropileno, como comenta Dantas (1987), foi inicialmente direcionado para reforçar o concreto, sugerido por Goldfein em 1965, para a construção de edifícios resistentes à explosão. Apresentando um custo relativamente baixo, boa qualidade e com poucos problemas de comercialização e produção, as fibras de polipropileno começam a ter uma força potencial no campo dos produtos de concreto, e, posteriormente, em outros campos de aplicação na Construção Civil.

Sabe-se que, devido aos carregamentos atuantes, às movimentações externas ou às deformações na estrutura interna da pasta de cimento, ocorrem tensões internas em uma matriz de cimento. Estas tensões internas, quando superiores ao nível de tensão de ruptura da matriz, irão lhe originar pequenas fissuras que poderão ter sua abertura e sua profundidade aumentadas devido à concentração de tensões situada na sua extremidade.

Como comentam Agopyan e John (2000), o efeito da adição de fibra na matriz frágil é o de dificultar a propagação destas fissuras. Sua presença em uma microfissura em propagação serve como uma barreira, e para “enfrentá-la”, vai exigir

o arrancamento da fibra, ou o desvio da fissura pelo contorno da fibra, ou a ruptura da fibra. Estas três situações requerem um elevado gasto de energia. Enquanto esta energia não é superada, uma outra microfissura se inicia em outro defeito estrutural da matriz, e se propaga até encontrar outra fibra, repetindo o mesmo mecanismo anteriormente comentado. Dessa forma, são apresentadas duas características intrínsecas ao compósito de matriz de cimento com fibras; para a sua ruptura faz-se necessário o aumento de energia, além da ocorrência de múltiplas fissuras.

Em conseqüência a esta restrição à propagação da fissura, o compósito resultante apresenta uma série de propriedades otimizadas. O estudo de diversas literaturas, particularmente as de Bentur e Mindess (1990); Balaguru (1994), Dantas (1987) e Figueiredo (2000), deixam claro que ao se adicionar fibras em matriz de cimento, o compósito pode apresentar um aumento: da capacidade de resistência à tração na flexão; da capacidade de deformação e da tenacidade.

De acordo com Bentur e Mindess (1990), ao se adicionar fibras na matriz, pode ocorrer transferência de tensões antes e após a fissuração, mas com mecanismos distintos. Em compósitos de matriz de cimento e fibras de polipropileno, cuja atuação das fibras é na pós-fissuração da matriz, o mecanismo é, predominantemente, de transferência de tensões de atrito.

Bentur e Mindess (1990) defendem que, antes da fissuração da matriz, estão atuando transferências de tensões do tipo elásticas - é uma tensão de cisalhamento que ocorre na extensão da interface fibra-matriz. Quando esta tensão for maior que a resistência de aderência da fibra-matriz, ocorre o desligamento da fibra. Se esta não romper antes, o seu deslizamento que, favorecerá o surgimento da resistência de atrito entre a fibra e a matriz, transformando, com isso, o mecanismo de transferência de tensões elásticas para o mecanismo de transferência de tensões de atrito.

Assumindo que o atrito ocorre na interface da matriz ao longo da extensão da fibra, o nível de transferência dessas tensões está associado com as propriedades físicas e mecânicas da fibra e da matriz. Assim, o aparecimento de fissuras na matriz e as propriedades de resistência de ruptura e deformação de ruptura do compósito estão diretamente relacionados com a tensão de atrito.

2.2 TRABALHOS REALIZADOS UTILIZANDO ALMOFADAS DE ARGAMASSA MODIFICADAS NA EESC.

2.2.1 Primeiros trabalhos publicados

Barboza et al. (2001) apresenta a primeira publicação completa das almofadas com materiais alternativos: látex de estireno-butadieno, argamassa de cimento Portland com agregado leve (vermiculita) e fibras de polipropileno. O novo material mostrou uma boa resistência à compressão e módulo de elasticidade menor que a argamassa convencional. Foram realizados testes de compressão simples e módulo de elasticidade para caracterização do material e teste de compressão em placas e flexão para analisar o comportamento da almofada.

Observou-se que com os valores de módulos de elasticidade e compressão obtidos, o compósito é recomendado para ser usado em ligações de viga-pilar. Com a utilização do látex, o módulo de elasticidade e a resistência à compressão são reduzidas, porém são suficientes para sua aplicação, além disso, ele reduz a relação água/cimento sem perder a funcionalidade. As fibras de polipropileno proporcionaram maior deformabilidade do material, bem como um comportamento mais dúctil sem falha repentina em qualquer uma das misturas. Os resultados dos testes demonstram que o material estudado pode ser utilizado para diferentes tipos de conexões desde que definido um traço adequado para cada ligação.

El Debs et al. (2002) estudou a caracterização do material através de ensaios de compressão simples, módulo de elasticidade e ensaio de compressão em placas. Além desses ensaios também foi realizado um ensaio num protótipo de ligação conforme esquema da Figura 2.2.

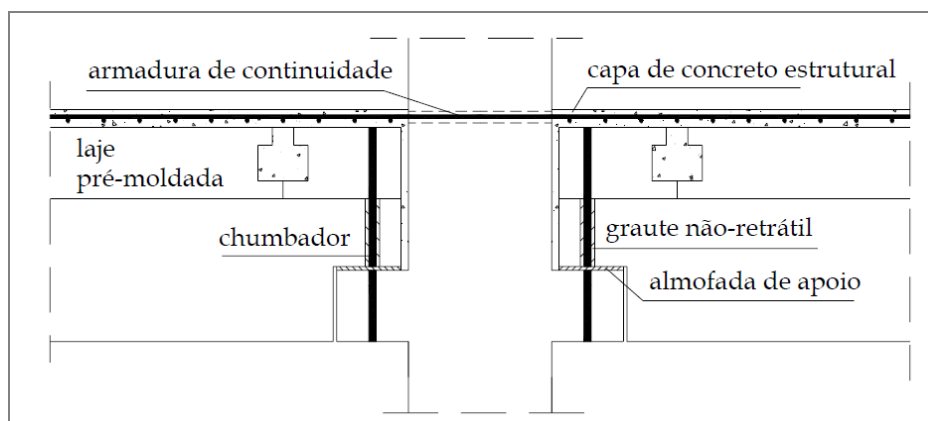


Figura 2.2 - Esquema da ligação utilizada no ensaio (MIOTTO, 2002)

Os resultados dos testes indicaram que é possível obter um material suficientemente deformável para ser usado como aparelho de apoio, com rigidez aparente de cerca de 200MPa. Teste da conexão do protótipo mostrou que com a almofada a ligação se comportou de forma adequada.

Este estudo indica que o material tem grande utilidade neste tipo de conexão e pode ser projetado para aumentar a rigidez e a resistência da ligação.

El Debs et al.. (2003) apresenta resultados de resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade para corpos-de-prova cilíndricos do compósito, bem como resultados da utilização de almofadas em ligações do tipo viga-pilar e do tipo pilar-pilar.

Os resultados obtidos mostram que é possível a obtenção de um material suficientemente deformável para ser utilizado como elemento de apoio de concreto pré-moldado. Os resultados da ligação viga-pilar sugerem que o uso desse tipo de almofadas produz ligações mais rígidas e estas características podem ser utilizadas no projeto estrutural. Para o caso da ligação pilar-pilar, os resultados indicaram que as almofadas do compósito podem ser utilizadas em casos onde os elementos pré-moldados tenham resistência da ordem de 35MPa.

Montedor (2004) e Siqueira (2007) trabalharam em suas pesquisas especificamente no desenvolvimento de dosagem do compósito para que fosse viável a utilização da almofada de argamassa nas ligações.

2.2.2 Montedor (2004)

Foi a primeira pesquisa específica em nível de mestrado com o objetivo de desenvolvimento desse compósito. Na composição das almofadas foram utilizados combinações de vermiculita, látex estireno-butadieno e fibras curtas (de vidro, PVA e polipropileno). As fibras tinham características conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Especificações da fibra utilizada por Montedor (2004)

Tipo de Fibra	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Densidade (g/cm ³)
PVA	± 0,2	12	1,3
Vidro	0,014	13	2,67
Polipropileno	-	25	0,9

Foram estudados 21 traços, visando primeiramente características de resistência e elasticidade. Determinaram-se as características mecânicas do material realizando ensaios de resistência à compressão, resistência à tração pelo ensaio de compressão diametral e módulo de elasticidade.

O pesquisador adotou um traço de referência 1: 0,3: 0,4 (cimento: areia: água) e variou a quantidade de materiais conforme Tabela 2.2 e Tabela 2.3 apresenta a composição dos traços utilizados.

Tabela 2.2 - Variáveis analisadas (MONTEDOR, 2004)

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

Tabela 2.3 - Misturas para ensaios de caracterização do material (MONTEDOR, 2004)

Consumo de Vermiculita (%)	Taxa Volumétrica de Latéx (%)	Taxa Volumétrica de fibras 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 Latéx (%)	Taxa Volumétrica de fibras de Vidro (%)
50	30	2
25	30	2
5	30	2
5	30	3
Consumo de Vermiculita (%)	Taxa Volumétrica de Latéx (%)	Taxa Volumétrica de fibras de Polipropileno (%)
5	30	2

Para facilitar a apresentação, Montedor (2004) criou uma legenda para indicar os traços utilizados conforme Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Legenda dos traços utilizados (MONTEADOR, 2004)

Legenda	Descrição
V + número	Consumo de vermiculita (%)
L + número	Taxa volumétrica de látex (%)
F + número	Taxa volumétrica de fibra de PVA (%)
VD + número	Taxa volumétrica de fibra de vidro (%)
PP + número	Taxa volumétrica de fibra de polipropileno (%)

Como exemplo tem-se:

V10L30VD3 – significa que o traço tem 10% de vermiculita, 30% de látex e 3% de fibra de vidro.

Para os ensaios de caracterização, os resultados encontrados estão apresentados nos gráficos: Figura 2.3, Figura 2.4 e Figura 2.5.

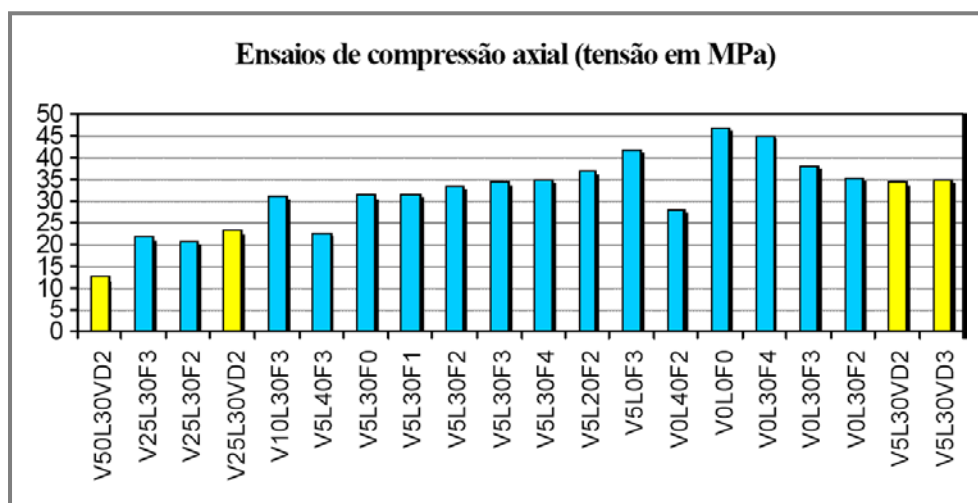


Figura 2.3 - Resultados dos ensaios de compressão axial (MONTEADOR, 2004)

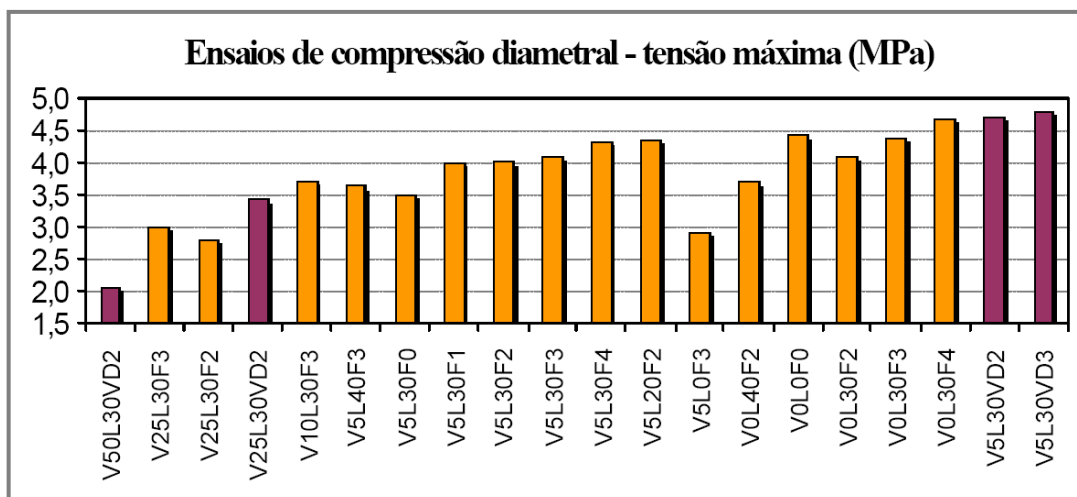


Figura 2.4 - Resultados de ensaios de tração por compressão diametral (MONTEADOR, 2004)

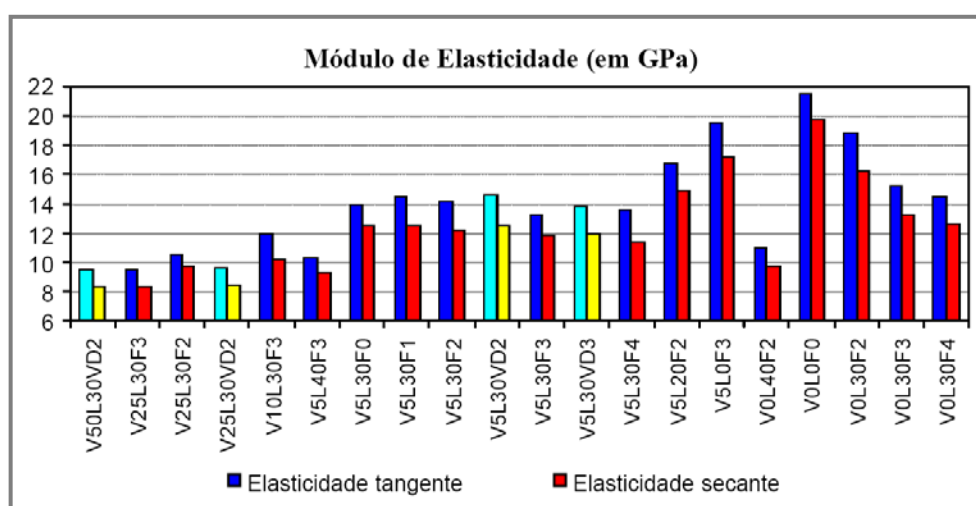


Figura 2.5 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade tangente e secante (MONTEADOR, 2004)

Com os resultados dos ensaios de caracterização foram selecionados os traços que obtiveram melhores comportamentos para serem realizados ensaios nas placas.

Para a caracterização das placas foram realizados ensaios de: compressão centrada, para determinação da relação entre tensão e deformação da almofada; determinação da capacidade de afundamento, onde a placa foi ensaiada com uma carga concentrada; e ensaio entre blocos simulando uma ligação pilar-pilar, onde se verificou a capacidade de distribuição da tensão na região de ligação com a almofada.

a) Compressão Centrada

Foram realizados ensaios em placas quadradas de 150mm de lados com espessuras de 5mm, 10mm e 20mm. Também foram realizados ensaios com placas de 100mm de lados com espessuras de 10mm e 20mm para avaliar os efeitos de forma. Os traços utilizados para os ensaios estão apresentados nas Tabela 2.5 e Tabela 2.6.

Tabela 2.5 - Mistura para ensaios de compressão centrada – placas 10x10cm (MONTEDOR, 2004)

Consumo de Vermiculita (%)	Taxa Volumétrica de Látex (%)	Taxa Volumétrica de fibras de PVA (%)
0	0	0
0	30	3
5	30	2
5	30	3
5	30	4
10	30	3
25	30	2
Consumo de Vermiculita (%)	Taxa Volumétrica de Látex (%)	Taxa Volumétrica de fibras de Vidro (%)
0	30	3
5	30	2
5	30	3
25	30	2
50	30	2
Consumo de Vermiculita (%)	Taxa Volumétrica de Látex (%)	Taxa Volumétrica de fibras de Polipropileno (%)
5	30	2

Tabela 2.6 - Mistura para ensaios de compressão centrada – placas 10x10cm (MONTEDOR, 2004)

Consumo de Vermiculita (%)	Taxa Volumétrica de Látex (%)	Taxa Volumétrica de fibras de PVA (%)
0	0	0
5	30	3
25	30	2
Consumo de Vermiculita (%)	Taxa Volumétrica de Látex (%)	Taxa Volumétrica de fibras de Vidro (%)
25	30	2
50	30	2

Para avaliar a deformabilidade da almofada de cada traço foi calculada o que o pesquisador chamou de rigidez, que consiste na relação entre a tensão aplicada e a deformação conforme a equação 1 e a Figura 2.6.

$$R = \frac{\sigma}{\Delta h/h} \quad (1)$$

Onde:

R = rigidez da placa;

σ = tensão aplicada;

Δh = variação da espessura da placa;

h = espessura da placa.

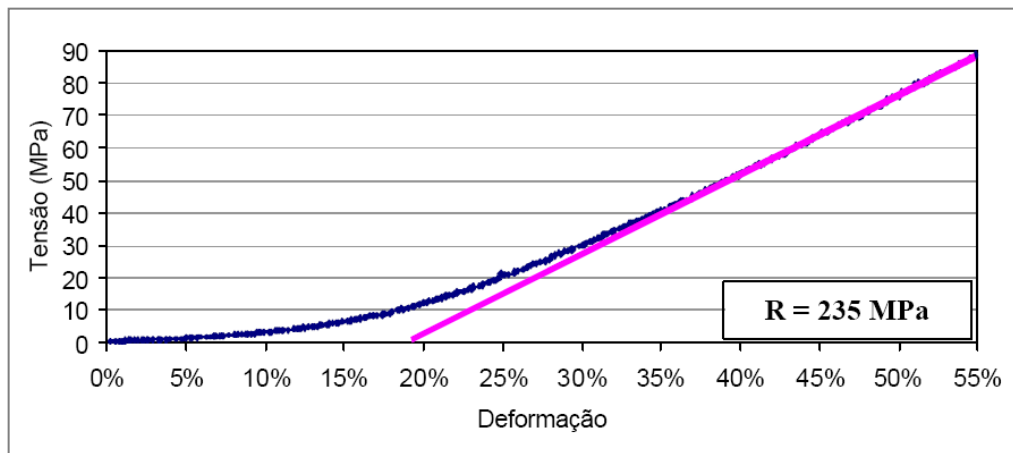


Figura 2.6 - Gráfico da curva de deformação da placa com o cálculo da rigidez (MONTEDOR, 2004)

Os resultados encontrados para os ensaios de força centrada estão apresentadas nas Figura 2.7, Figura 2.8, Figura 2.9 e Figura 2.10.

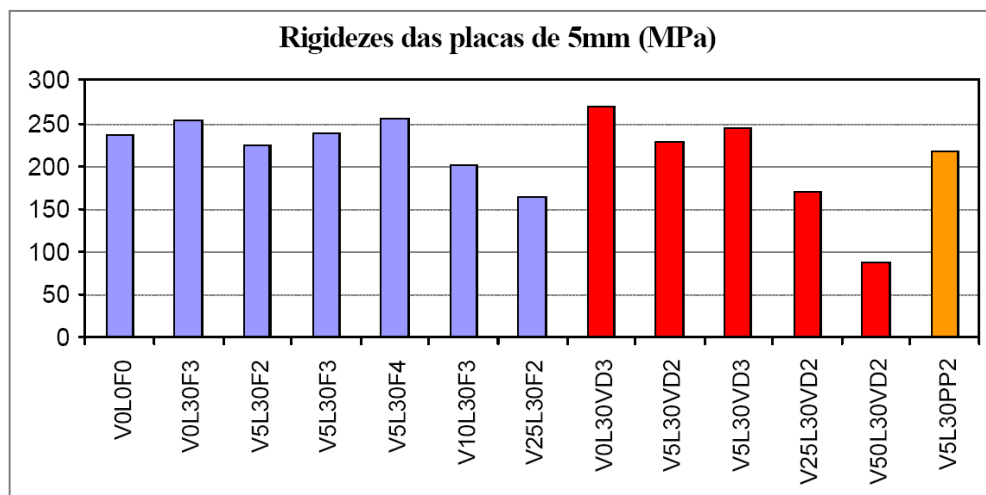


Figura 2.7 - Resultados dos ensaios de carregamento monotônico, e=5mm (MONTEDOR, 2004)

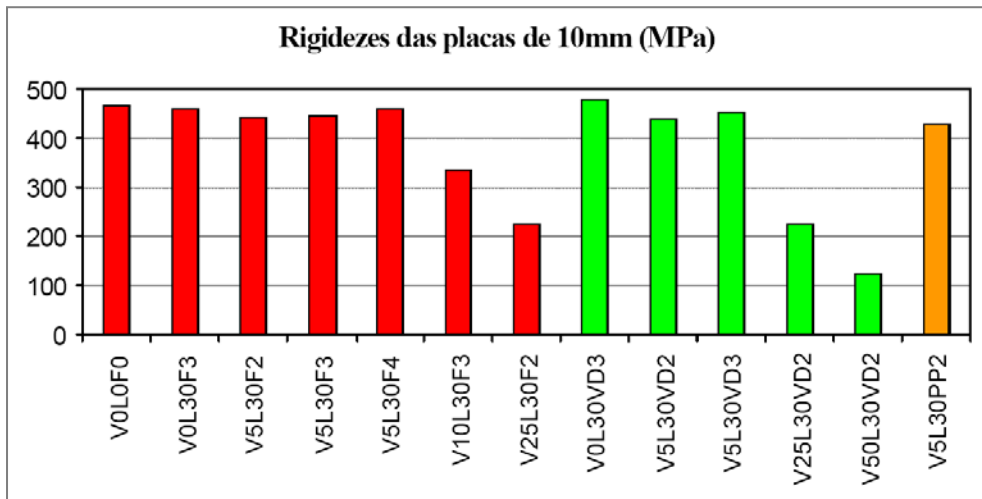


Figura 2.8 - Resultados dos ensaios de carregamento monotônico, e=10mm (MONTEADOR, 2004)

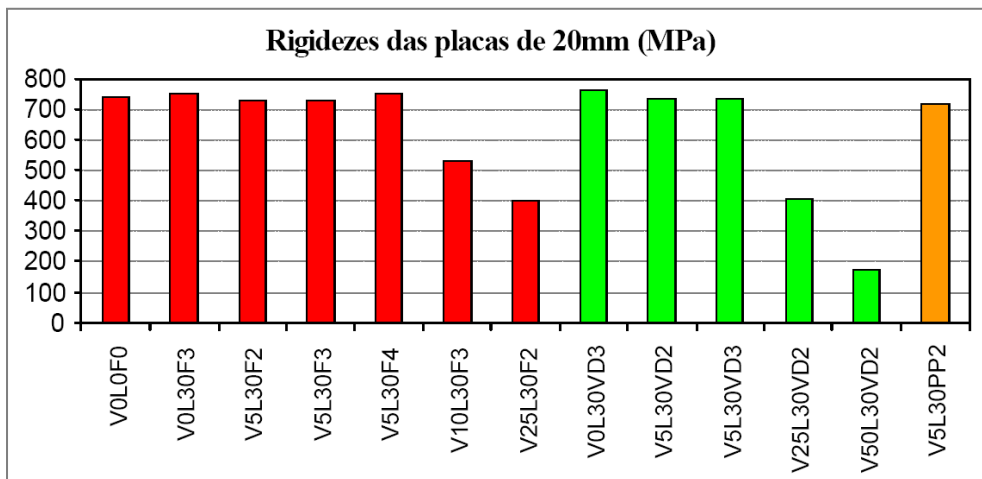


Figura 2.9 - Resultados dos ensaios de carregamento monotônico, e=20mm (MONTEADOR, 2004)

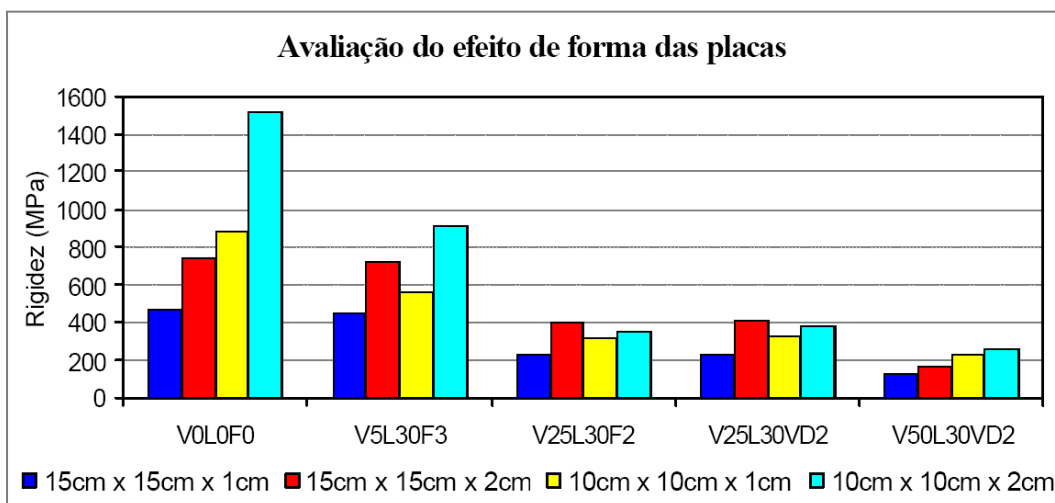


Figura 2.10 - Comparação entre os resultados de rigidezes das placas (MONTEADOR, 2004)

b) Afundamento (Força Concentrada)

Foram ensaiadas tiras que foram feitas a partir do corte das placas. Assim, foram feitas tiras com 150mmx25mm e espessuras variando em 5mm, 10mm e 20mm. A Figura 2.11 demonstra o esquema do ensaio.



Figura 2.11 - Esquema de ensaio de afundamento (MONTEDOR, 2004)

Os resultados e os traços utilizados estão expostos na Figura 2.12.

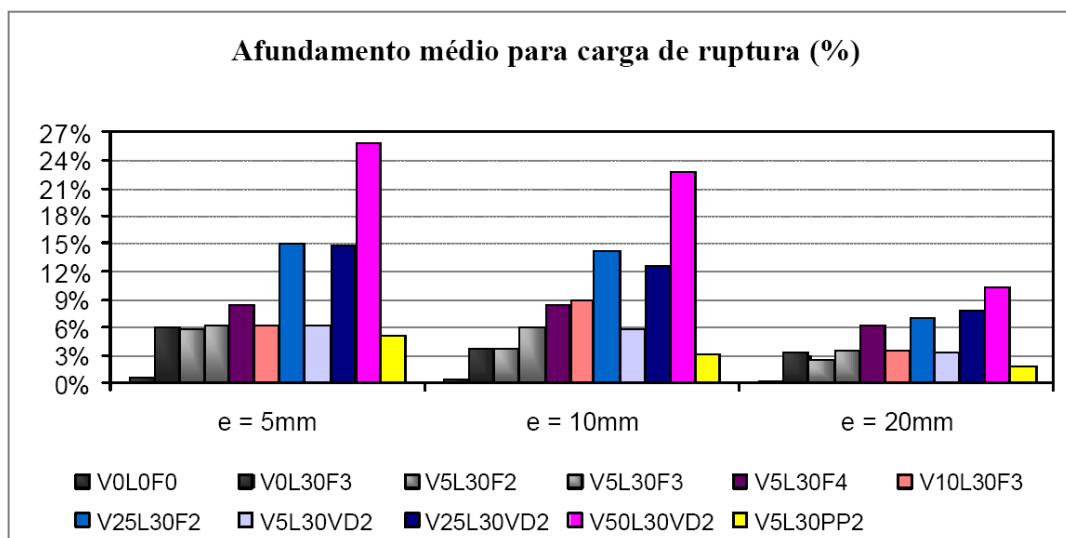


Figura 2.12 - Resultados dos ensaios de afundamento (MONTEDOR, 2004)

c) Ligação entre blocos

Neste ensaio procurou-se simular a utilização das almofadas em ligações reais. Para se ter uma comparação, foram ensaiados blocos sem emendas, com emendas e sem almofadas e com emendas e com almofadas. Além disso, foram realizados ensaios com os blocos sem e com inclinação de 0%, 5% e 10%. A Figura 2.13

apresenta o esquema do ensaio de blocos. Para esta análise foram utilizados três traços conforme apresentados nos resultados da Figura 2.14.

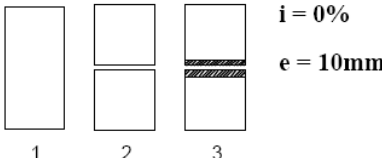
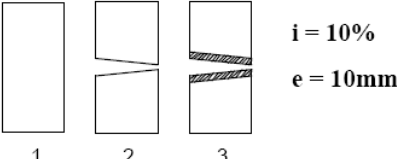
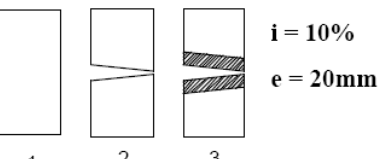
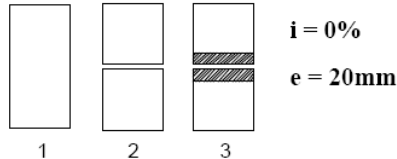
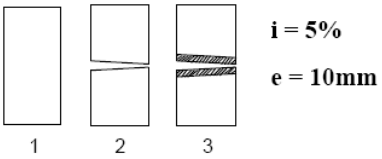
Para todas as séries	Modelo de ensaio - Série 1
<p>Tipo 1: corpo sem emenda Tipo 2: corpos com emenda e sem almofada Tipo 3: Corpos com emenda e com almofada</p>	 <p>$i = 0\%$ $e = 10\text{mm}$</p>
Modelo de ensaio - Série 2	Modelo de ensaio - Série 3
 <p>$i = 10\%$ $e = 10\text{mm}$</p>	 <p>$i = 10\%$ $e = 20\text{mm}$</p>
Modelo de ensaio - Série 4	Modelo de ensaio - Série 5
 <p>$i = 0\%$ $e = 20\text{mm}$</p>	 <p>$i = 5\%$ $e = 10\text{mm}$</p>

Figura 2.13 - Esquema do ensaio de blocos (MONTEDOR, 2004)

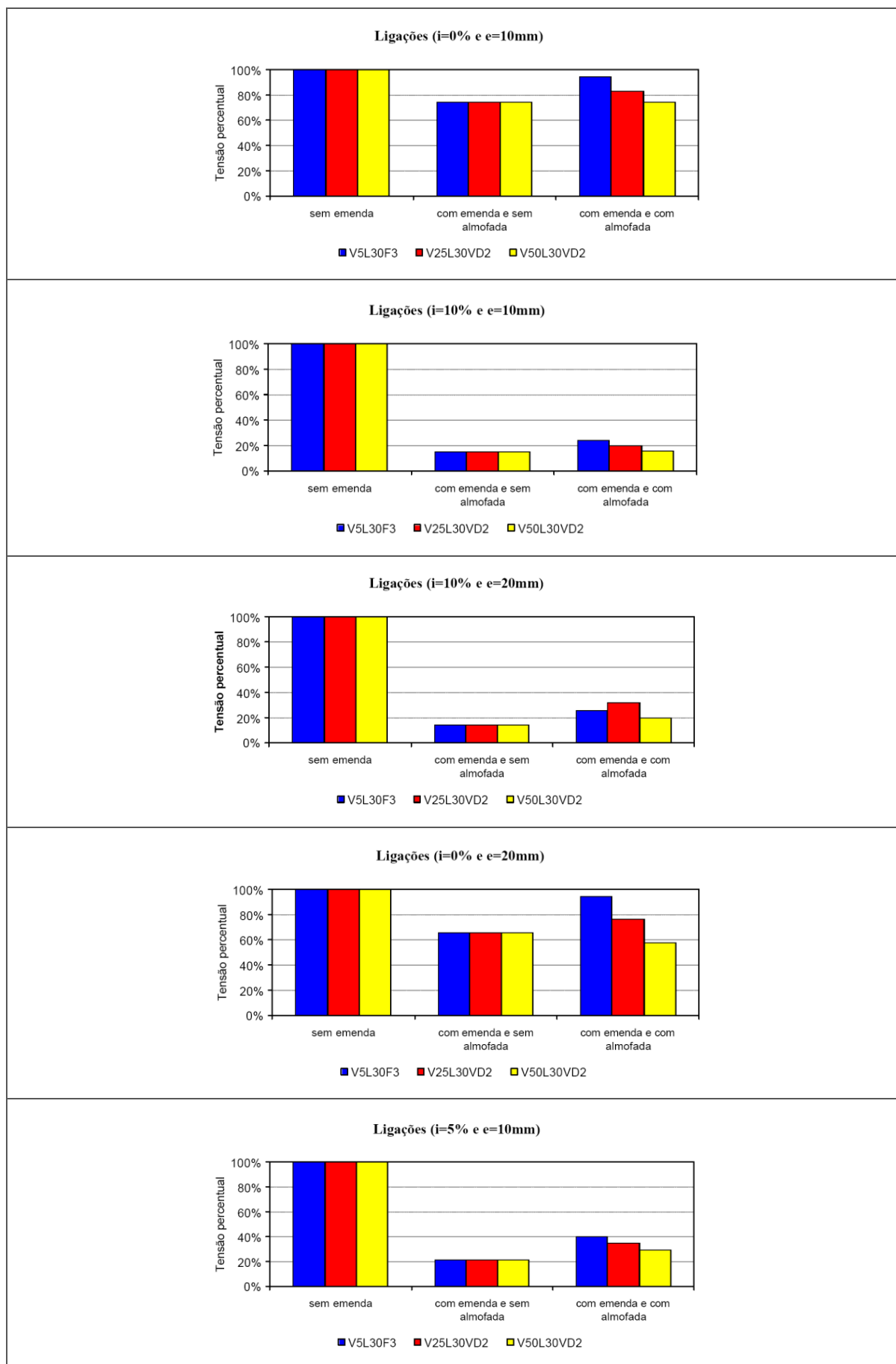


Figura 2.14 - Resultados encontrados nos ensaios de blocos (MONTEADOR, 2004)

De posse de todos os resultados, as principais conclusões de Montedor (2004) em seus estudos foram que:

- a) é possível reduzir o módulo de elasticidade do material com a introdução do látex, fibra e vermiculita, tornando assim a almofada de argamassa deformável;
- b) quanto maior a quantidade de vermiculita, mais deformáveis eram as almofadas, permitindo um maior afundamento, porém, reduzia a resistência, elasticidade e rigidez, bem como a trabalhabilidade, pois retém muita água;
- c) o látex auxiliava no aumento da trabalhabilidade, pois a emulsão tem 50% de água, porém, para quantidades acima de 30% reduzia muito a resistência do compósito;
- d) as fibras de PVA e de vidro apresentaram bom desempenho na modificação da argamassa, já a de polipropileno, além de reduzir a trabalhabilidade, atribuiu menores valores de resistência ao compósito;
- e) verificou-se que quanto maior a espessura das almofadas maiores eram as rigidezes, sobretudo no caso das almofadas com menor área;
- f) os ensaios de blocos confirmaram a contribuição do aparelho de apoio na distribuição de tensão;
- g) para ligações sem inclinação verificou-se que o traço mais adequado foi o V5L30F3.

Montedor (2004) concluiu que o compósito é bastante eficiente para ser utilizado como almofada de apoio em ligações viga-pilar, verificando qual traço é mais adequado para tal aplicação.

2.2.3 Siqueira (2007)

Este trabalho deu continuidade aos estudos de Montedor (2004) utilizando um novo tipo de fibra polipropileno (Tabela 2.7), com propriedades diferentes da usada por Montedor (2004), que apresentava melhor custo em relação a outras fibras encontradas comercialmente. Nesta pesquisa foi melhor avaliada a relação de vermiculita e a deformabilidade da almofada, verificadas as características resilientes do material em decorrência de carregamento cíclicos, avaliado o emprego da

almofada em ligações de blocos de concreto e a capacidade de rotação dos elementos.

Tabela 2.7 - Especificações da fibra utilizada por Siqueira (2007)

Tipo	Espessura	Comprimento	Densidade
Polipropileno	20 μm	6,0 mm	0,9 g/cm ³

A dosagem utilizada foi baseada na pesquisa de Montedor (2004), utilizando o traço de referência de 1:0,3:0,3:0,1 (cimento:areia:látex:água) variando a quantidade de vermiculita e fibras, conforme Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Variáveis utilizadas nos traços das almofadas (SIQUEIRA, 2007)

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

Também foram feitos ensaios de caracterização do material: compressão simples, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

Cada traço utilizou a mesma simbologia de Montedor (2004). Por exemplo, V25PP2L30, onde significa que do traço de referência mostrado acima, será mantido constante o consumo de látex em 30%, será incorporada fibra de polipropileno na quantidade de 2% do volume da argamassa e, da quantidade de agregado miúdo, que está sendo incorporado a uma taxa de 0,3 da massa de cimento, 25% será de vermiculita e 75% será de areia fina.

SIQUEIRA (2007) apresentou uma síntese do programa experimental conforme Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Esquema dos ensaios realizados por Siqueira (2007)

Caracterização do compósito			
Traços	Compressão	Tração	Módulo de Elasticidade
V0PP5L30	4 corpos-de-prova cilíndricos de 50mm de diâmetro por 100mm de altura para cada traço	4 corpos-de-prova cilíndricos de 50mm de diâmetro por 100mm de altura para cada traço	3 corpos-de-prova cilíndricos de 50mm de diâmetro por 100mm de altura para cada traço
V5PP4,5L30			
V10PP4L30			
V15PP3,5L30			
V20PP3L30			
V25PP2,5L30			
Total de amostras	24 corpos-de-prova	24 corpos-de-prova	18 corpos-de-prova
Ensaio de força distribuída			
Carregamento monotônico - compressão		Carregamento cíclico - compressão	
V5PP4,5L30	2 placas de 150mm x 150mm com espessura de 10mm para cada traço	V5PP4,5L30	Aplicação de 50 e 300 ciclos de carga em almofadas de 10mm e 20mm de espessura*
V10PP4L30		V10PP4L30	
V15PP3,5L30		V15PP3,5L30	
V20PP3L30		-	
V25PP2,5L30		-	
Total de amostras		10 almofadas	
* Aplicação de pressões com intensidades de 2,5MPa, 5,0MPa, 10,0MPa e 20,0MPa.			
Ensaio de força concentrada			
Traços	Compressão		
V0PP5L30	10 tiras de 25mm x 150mm cortadas das almofadas do compósito e ensaiadas com auxílio de dispositivo metálico para aplicação de força concentrada para cada traço		
V5PP4,5L30			
V10PP4L30			
V15PP3,5L30			
V20PP3L30			
V25PP2,5L30			
Total de amostras	60 tiras de almofada		
Ensaio de ligação de blocos			
Traço da almofada	Compressão com rugosidade variável		
V10PP4L30	9 conjuntos de blocos, 4 peças para cada conjunto, que simulavam peças de concreto moldado no local e concreto pré-moldado com e sem presença da almofada nas ligações e com rugosidades de 0,75mm, 1,00mm e 1,5mm		
Total de amostras	36 blocos e 16 almofadas		
Ensaio de rotação de apoio			
Traços	Compressão excêntrica		
V5PP4,5L30	aplicação cargas excêntricas gerando pressões de até 20MPa em almofadas de 150mm de lado, sendo 2 almofadas de 10mm de 2 almofadas de 20mm de espessura para cada traço		
V10PP4L30			
V15PP3,5L30			
Total de amostras	12 almofadas		
Ensaio tenacidade ao fraturamento			
Traços	Flexão em 3 pontos		
V10PP4L30	5 vigas de 300,0mm de vão livre com altura de 75,0mm e largura de 37,5mm com um entalhe de 20,0mm no meio do vão		
Total de amostras	5 vigas		

Os resultados encontrados para os ensaios de caracterização foram:

a) compressão simples (Figura 2.15)

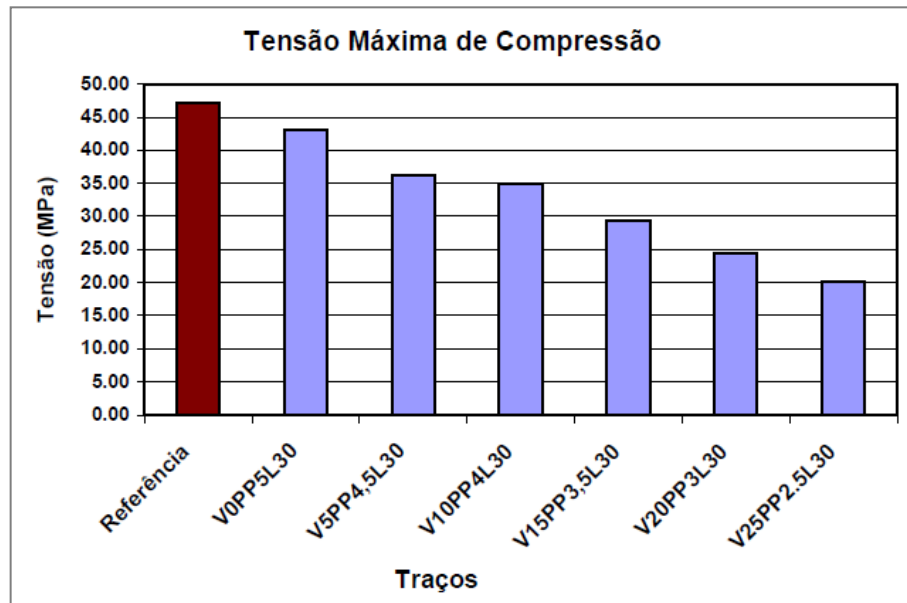


Figura 2.15 - Resultados dos ensaios de Compressão Axial (SIQUEIRA, 2007)

Notou-se que com a redução da quantidade de fibra e aumento da vermiculita houve uma queda acentuada da resistência à compressão, comparados com o traço de referência. As fibras de polipropileno não alteraram de forma significativa o compósito comparado com outras fibras.

b) tração por compressão diametral (Figura 2.16)

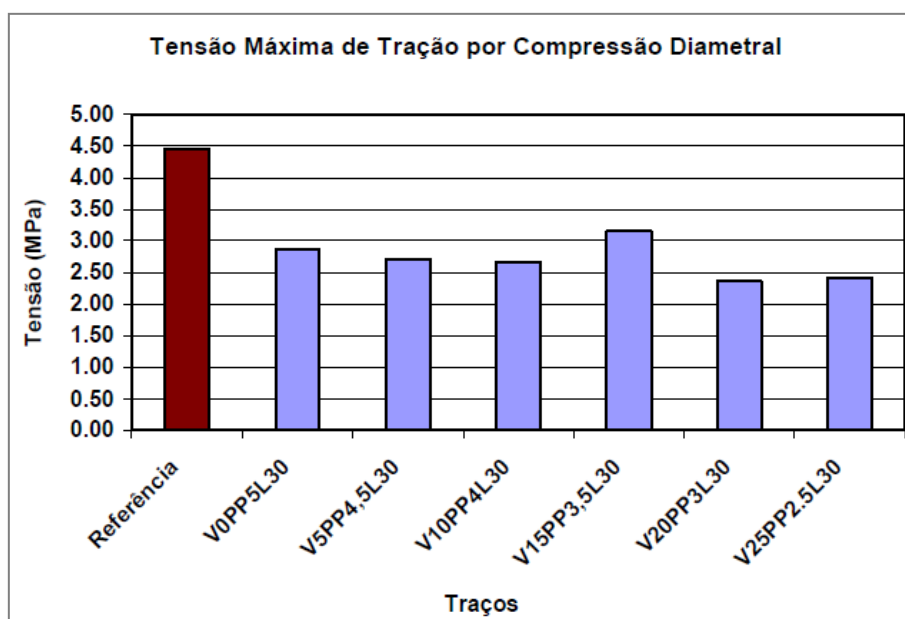


Figura 2.16 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral (SIQUEIRA, 2007)

Com a redução da quantidade de fibra e o aumento da quantidade de vermiculita houve a tendência de diminuição da resistência à tração do compósito. Para a amostra **V15F3,5L30** não pode ser explicada o aumento da resistência somente por meio da análise dessa amostragem.

c) módulo de elasticidade (Figura 2.17 e Figura 2.18)

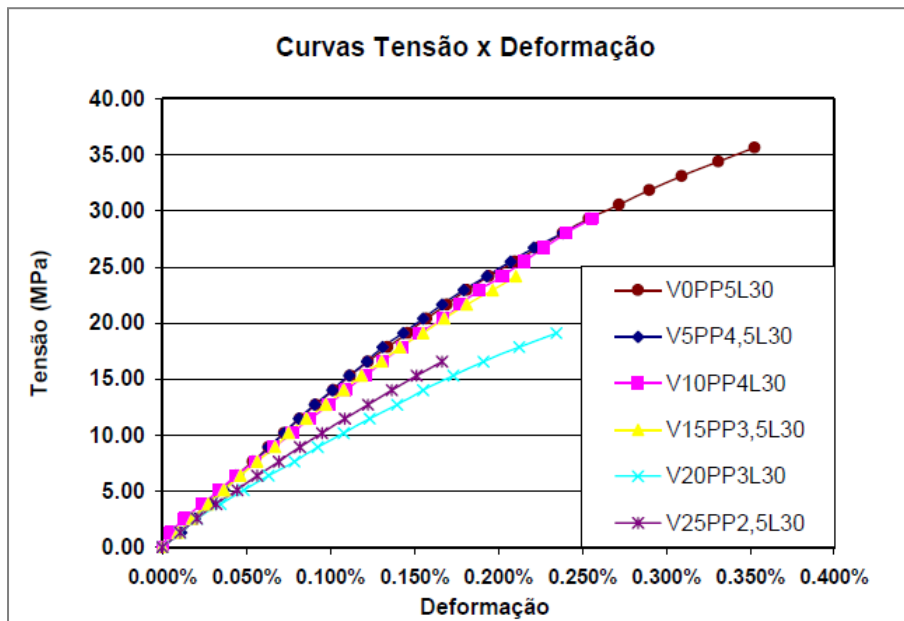


Figura 2.17 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade (SIQUEIRA, 2007)

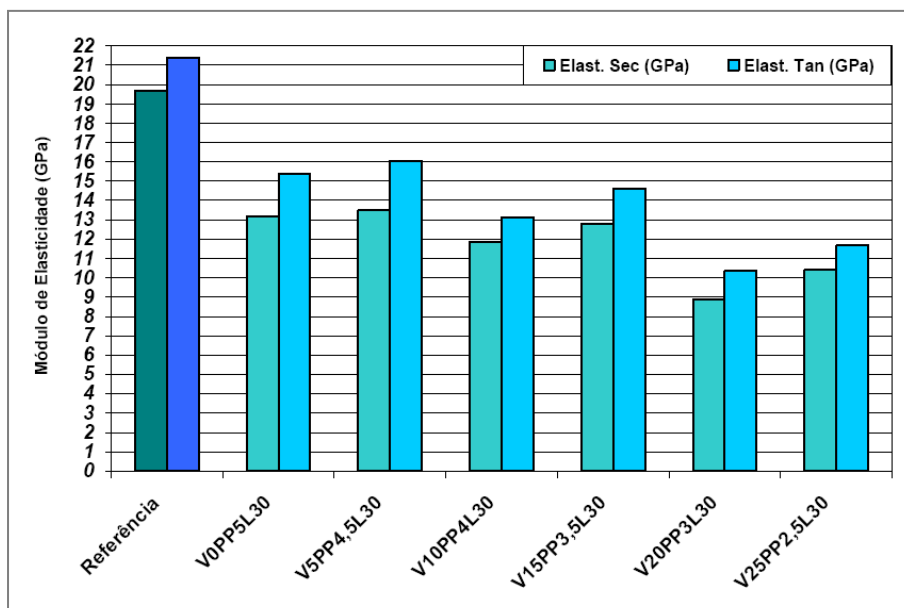


Figura 2.18 - Comparação entre os resultados de módulo de elasticidade tangente e secante (SIQUEIRA, 2007)

O principal objetivo do trabalho era justamente diminuir o módulo de elasticidade da argamassa, tornando-a mais deformável para ser usada como almofada de apoio. Para quantidades menores de vermiculita e maiores de fibras, observou-se um aumento deste módulo.

Para ensaios de placas, os resultados encontrados estão listados abaixo.

a) Força Distribuída - Carregamento Monotônico (Figura 2.19)

O ensaio foi realizado como o ensaio de Força Centrada de Montedor (2004).

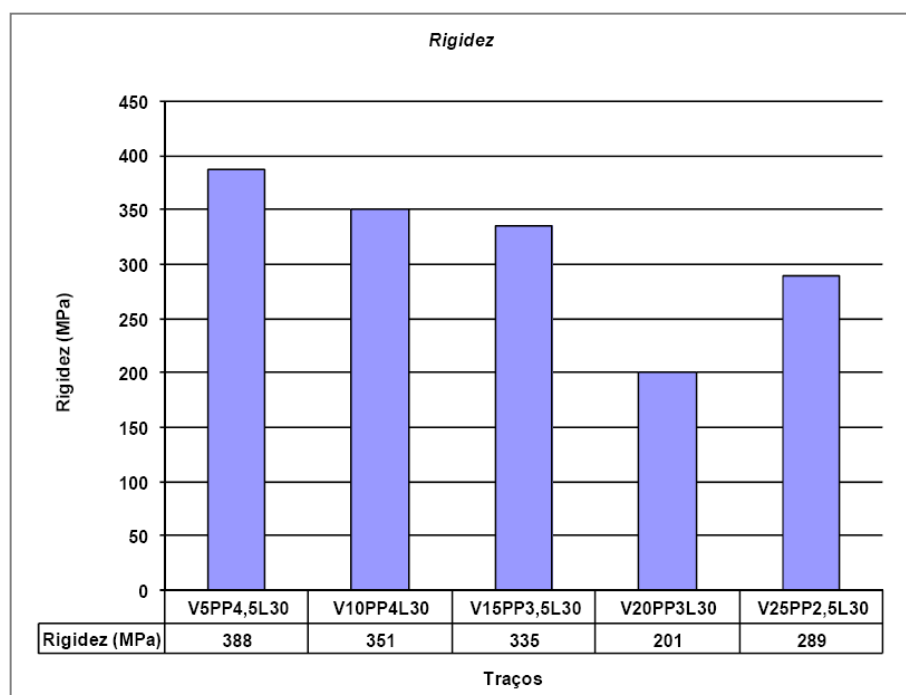


Figura 2.19 - Resultados dos ensaios de Carregamento Monotônico (SIQUEIRA, 2007)

Observou-se que ocorreu uma diminuição da rigidez com o aumento da vermiculita e diminuição da fibra. E a rigidez das placas foram bem menores que os valores do módulo de elasticidade dos corpos-de-prova, tendo assim maior capacidade de deformação e melhor distribuição de tensões.

b) Força Distribuída (Carregamento Cíclico)

Neste ensaio buscou-se submeter as almofadas a um carregamento de situação real, ou seja, tensões de contato com valores que pudessem representar uma gama de situações a que o compósito estaria submetido.

Foram realizados ensaios com 200 e 1200 ciclos de carregamento divididos em quatro carregamentos. Os resultados para 200 ciclos estão expostos na Figura 2.20, Figura 2.21 e Figura 2.22.

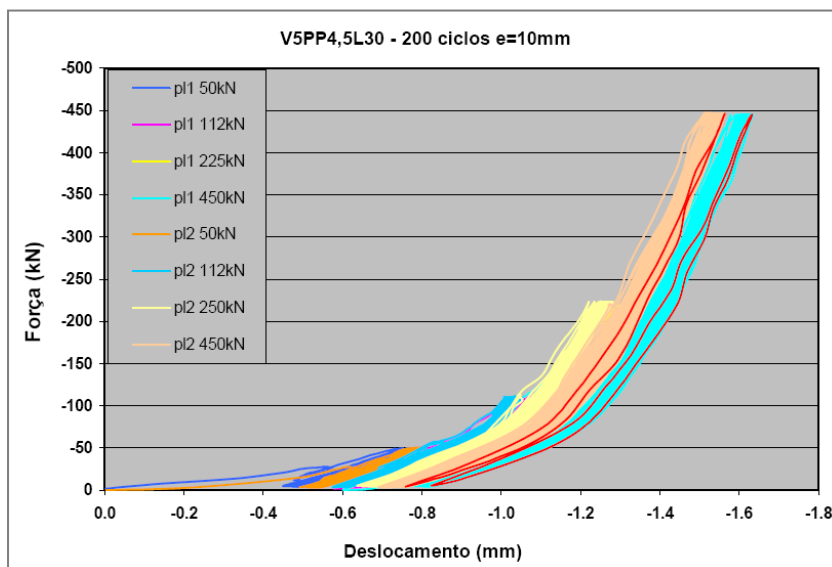


Figura 2.20 - Resultados ensaio cíclico V5PP4,5L30, e=10mm (SIQUEIRA, 2007)

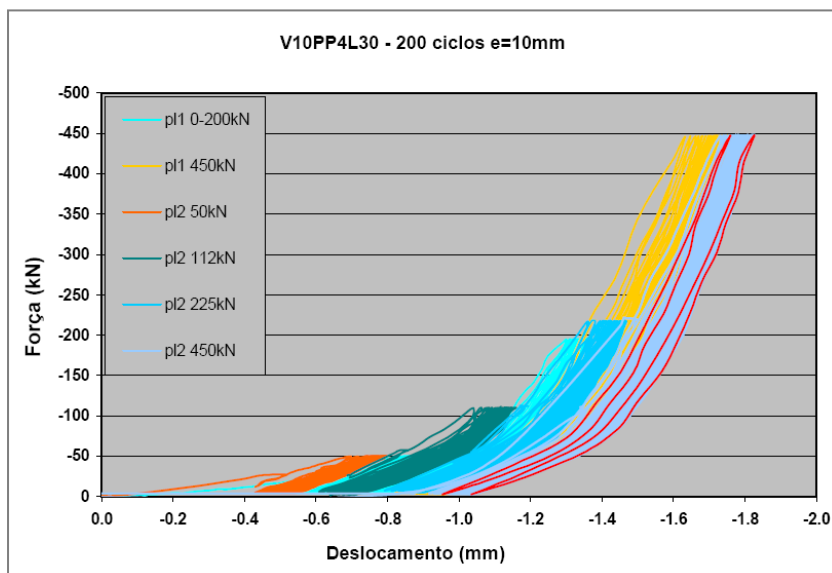


Figura 2.21 - Resultados ensaio cíclico V5PP4L30, e=10mm (SIQUEIRA, 2007)

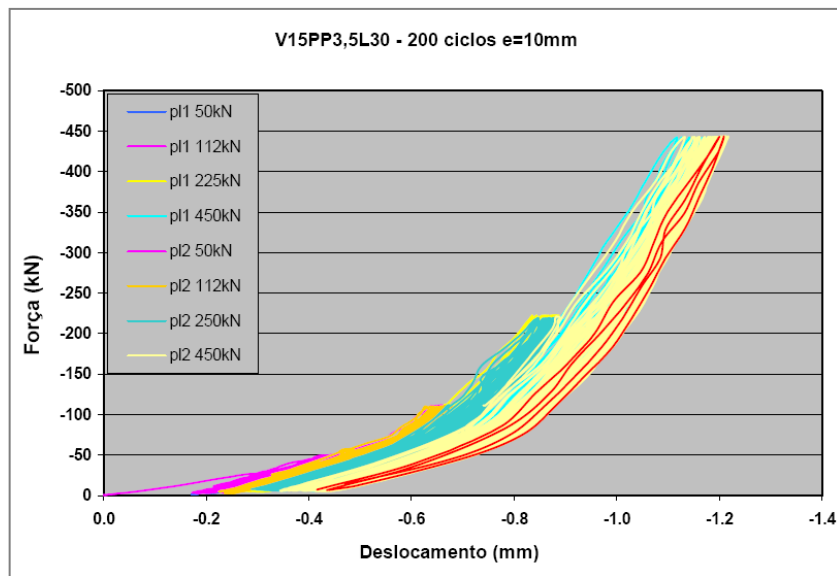


Figura 2.22 - Resultados ensaio cíclico V5PP3,5 L30, e=10mm (SIQUEIRA, 2007)

Os resultados para os 1200 ciclos estão expostos na Figura 2.23, Figura 2.24 e Figura 2.25.

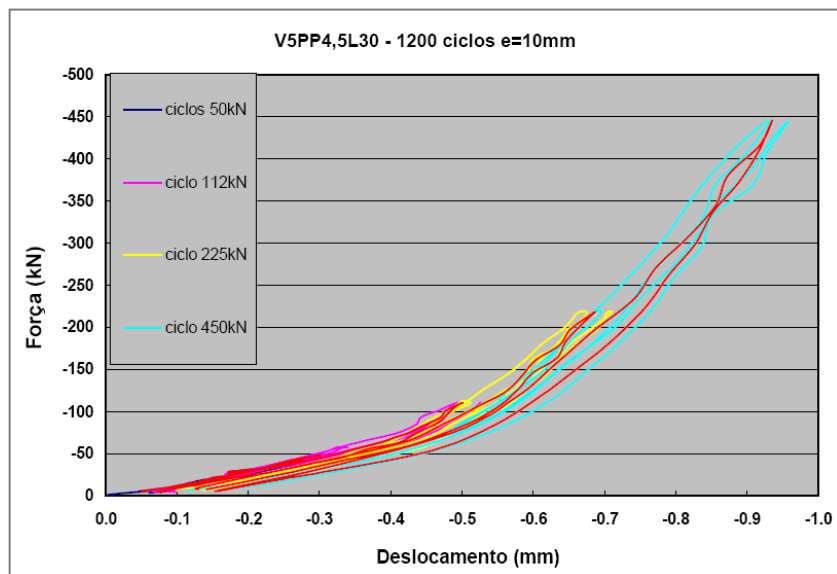


Figura 2.23 - Resultados ensaio cíclico V5PP4,5 L30, e=10mm (SIQUEIRA, 2007)

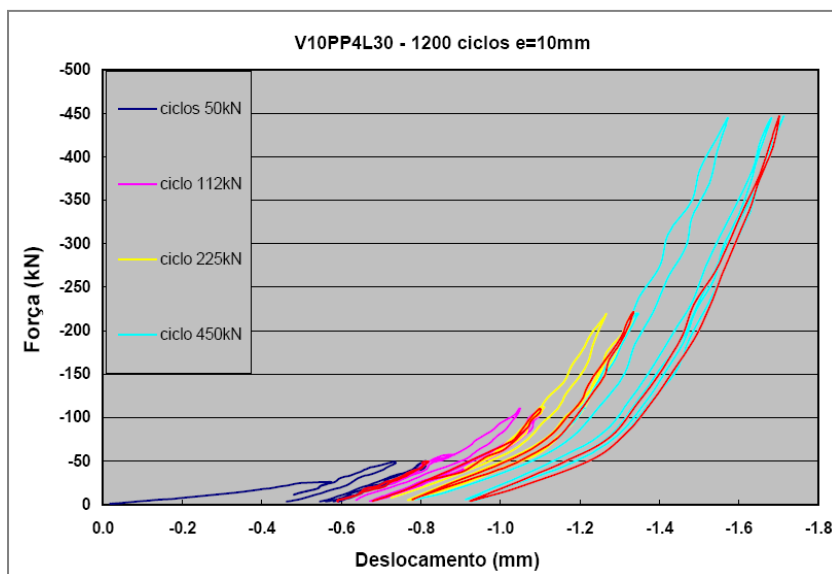


Figura 2.24 - Resultados ensaio cíclico V5PP4L30, e=10mm (SIQUEIRA, 2007)

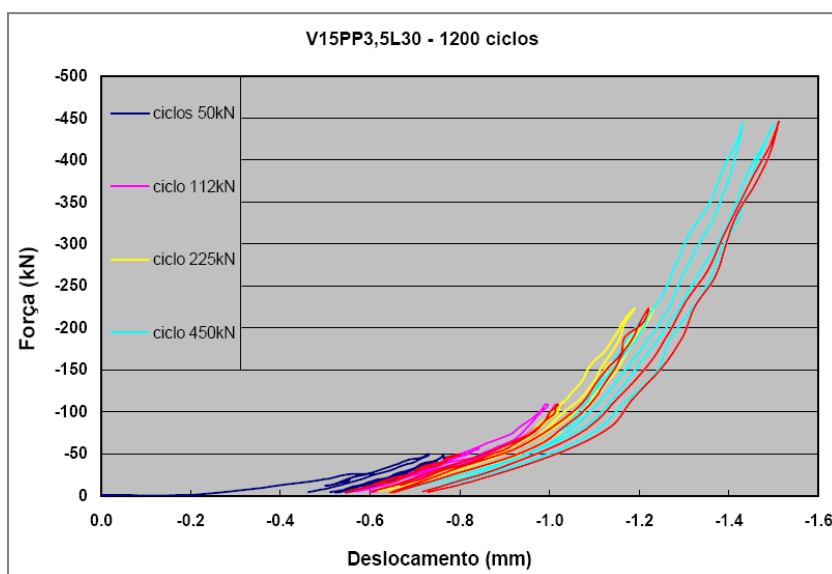


Figura 2.25 - Resultados ensaio cíclico V5PP3,5L30, e=10mm (SIQUEIRA, 2007)

As Tabela 2.10 e Tabela 2.11 apresentam um resumo dos resultados encontrados para o afundamento das placas conforme cada ciclo e o comportamento da rigidez conforme cada traço.

Tabela 2.10 - Comparação de valores de afundamentos para diferentes carregamentos. (SIQUEIRA, 2007)

Tipo de Carregamento	Afundamento (mm)			
	50 kN	112 kN	225 kN	450 kN
Monotônico	0.59	0.80	1.16	1.54
50 Ciclos	0.80	1.16	1.47	1.83
300 Ciclos	0.82	1.10	1.34	1.71

Tabela 2.11 - Comparação de valores de rigidezes para diferentes carregamentos. (SIQUEIRA, 2007)

Traços	Rigidez (MPa)		
	200 ciclos	1200 ciclos	Monotônico
V5PP4,5L30	420	370	388
V10PP4L30	363	374	351
V15PP3,5L30	373	380	335

Observou-se no ensaio a evolução da rigidez das almofadas, sendo que, a não ser por uma deformação plástica devido ao carregamento, a cada ciclo de carga o comportamento das deformações se mantém em um padrão constante, não sofrendo grandes variações. A partir de certa acomodação inicial, os ciclos de carga e descarga se apresentam comportados, sem evolução da deterioração da rigidez da almofada, denotando a capacidade resiliente do material.

Uma característica ressaltada é que mesmo sendo fibras de polipropileno, que tem baixo módulo de deformação, esta possui módulo e deformação maior que a rigidez das almofadas, comprovando que estas atuam no sentido de combater o início da fissuração.

c) Força Concentrada

Neste ensaio buscou-se obter uma medida da capacidade de afundamento destas almofadas conforme os ensaios de Montedor (2004). O objetivo era conseguir uma medida da melhor quantidade de vermiculita a ser incorporada no compósito.

Os resultados encontrados estão na Figura 2.26.

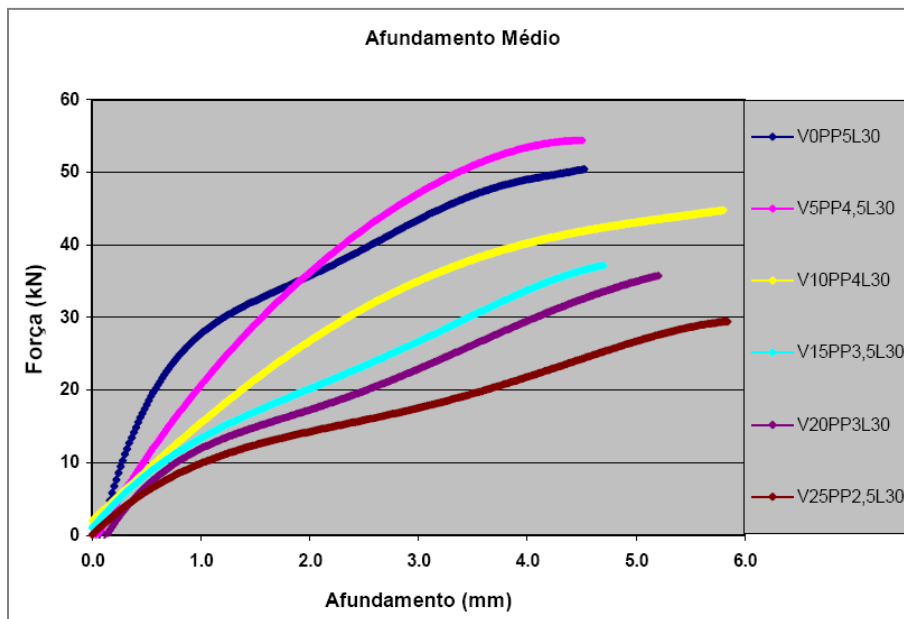


Figura 2.26 - Resultados do ensaio de afundamento (SIQUEIRA, 2007)

Observou-se que, quanto menor a quantidade de vermiculita empregada na amostra, existe um aumento da rigidez das almofadas, evidenciando o aumento da deformabilidade do compósito com a adição da vermiculita. Com a evolução do carregamento esse comportamento começa a desaparecer, porque ocorre o esmagamento da almofada e as fibras começam a atuar no sentido de manter a união da tira da almofada.

d) Ligações de blocos

De posse dos resultados anteriores, verificou-se que o melhor traço para composição das almofadas era o V10F4L30. Assim, realizaram-se os ensaios com blocos para verificar a capacidade de atuação do compósito. Os ensaios foram divididos em duas séries, onde na primeira eram blocos lisos e a segunda série foram introduzidas rugosidades. As Figura 2.27, Figura 2.28 e Figura 2.29 apresentam os esquemas dos ensaios.

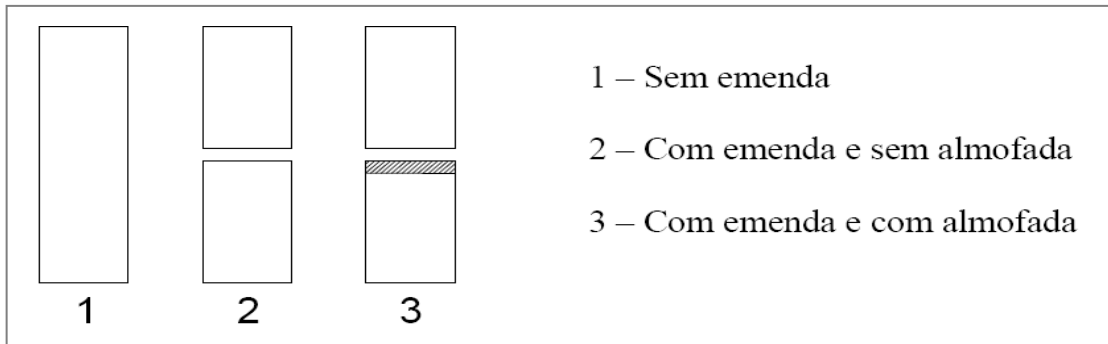


Figura 2.27 - Tipos de ligações dos blocos utilizado nos ensaios (SIQUEIRA, 2007)

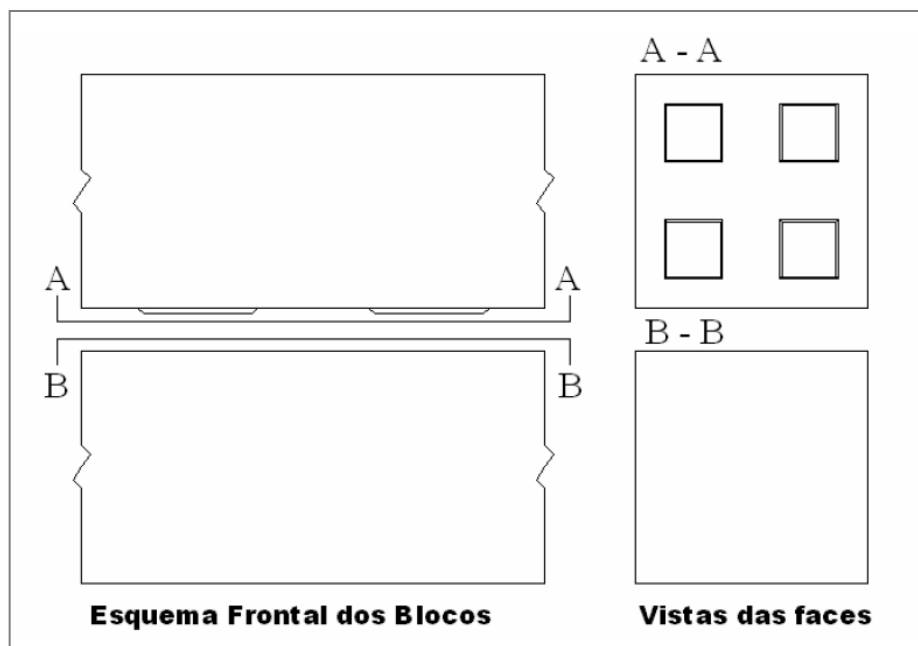


Figura 2.28 - Esquema da rugosidade aplicada nos blocos (SIQUEIRA, 2007)

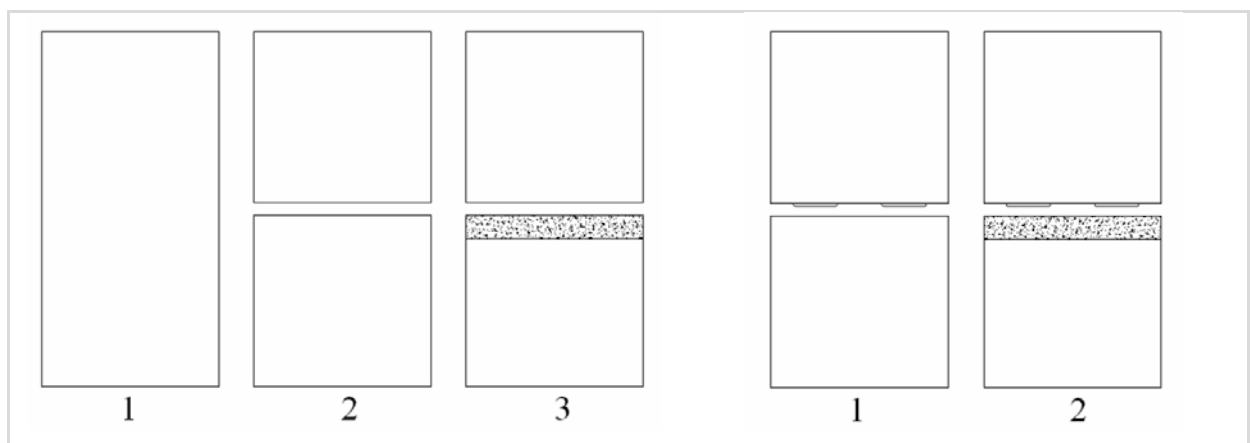


Figura 2.29 - Resumo das tipologia dos blocos ensaiados (SIQUEIRA, 2007)

Os resultados encontrados estão apresentados na Figura 2.30.

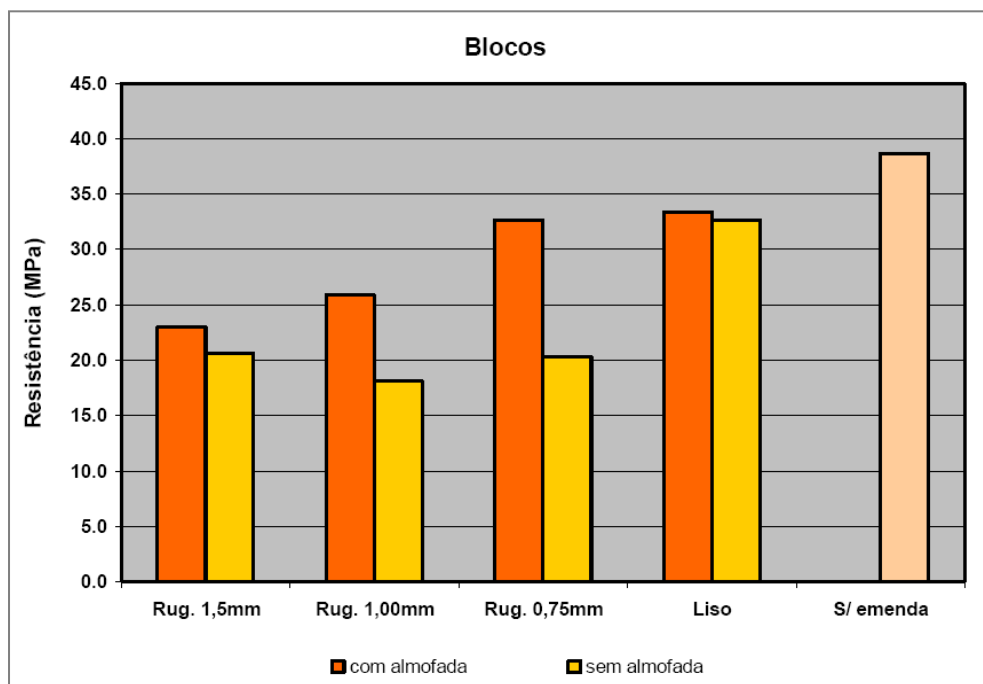


Figura 2.30 - Resultados ensaio de blocos (SIQUEIRA, 2007)

Para os ensaios sem rugosidade notou-se uma pequena melhora na acomodação das tensões e imperfeições da ligação com o uso das almofadas.

Para os ensaios com rugosidade notou-se uma melhora significativa com a presença das almofadas, nos valores de resistência dos blocos.

e) Ensaios de Rotação

Este ensaio foi realizado para tentar determinar a capacidade de rotação que a almofada poderia sofrer como elemento de apoio. Aplicou-se uma carga excêntrica sobre uma chapa metálica, ocasionando a rotação. A Figura 2.31 mostra o esquema do ensaio.

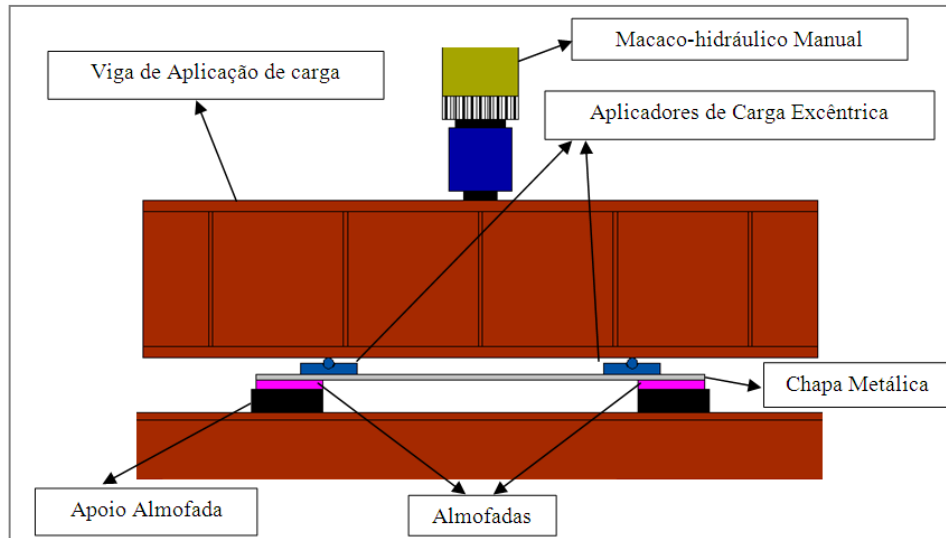


Figura 2.31 - Esquema de ensaio de rotação (SIQUEIRA, 2007)

Para a verificação dos resultados foram posicionados relógios como mostra a Figura 2.32.

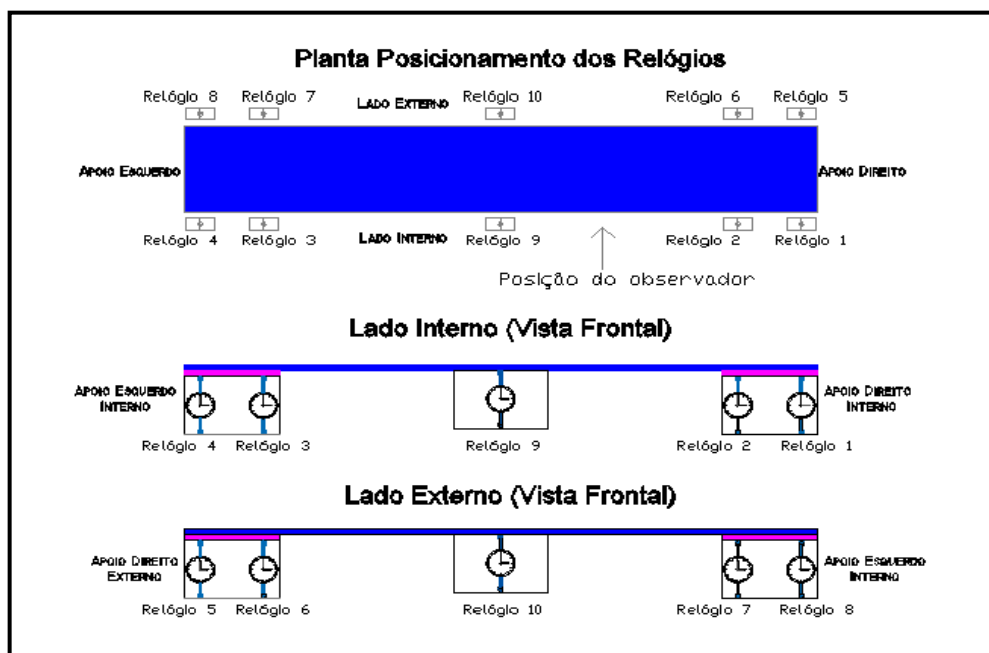


Figura 2.32 - Posicionamento dos relógios no ensaio de rotação (SIQUEIRA, 2007)

Foram ensaiados três traços diferentes, V5PP4,5L30, V10PP4L30 e o V15PP3,5L30 e duas espessuras diferentes, 10mm e 20mm. Esses traços foram escolhidos devido ao bom desempenho em resultados anteriores.

Siqueira (2007) concluiu neste ensaio que os resultados encontrados de rotação para as almofadas são suficientes para absorver as rotações ocasionadas por carregamentos ocorridos na prática.

f) Ensaio de tenacidade ao fraturamento

Neste ensaio, Siqueira (2007) buscou determinar parâmetros relacionados à tenacidade flexional do compósito, a exemplo do limite de proporcionalidade da fase elástica do material. O ensaio foi realizado conforme esquema da Figura 2.33.

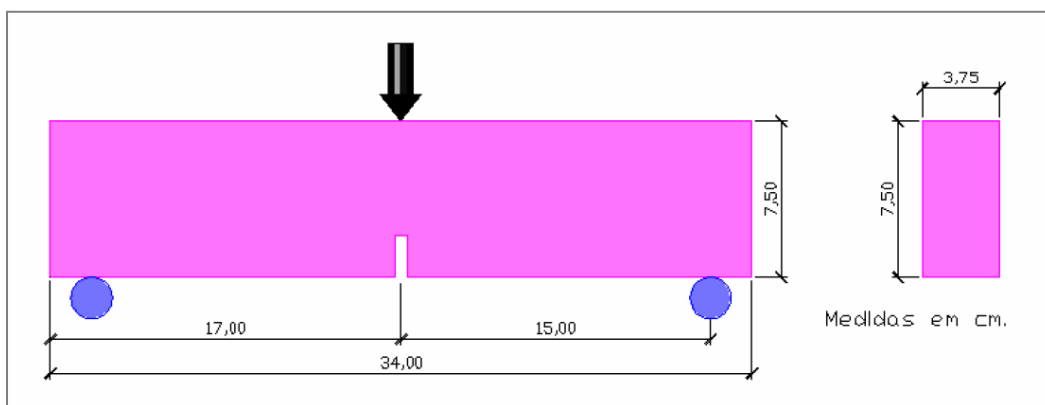


Figura 2.33 - Esquema de ensaio de tenacidade ao fraturamento (SIQUEIRA, 2007)

Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 2.34.

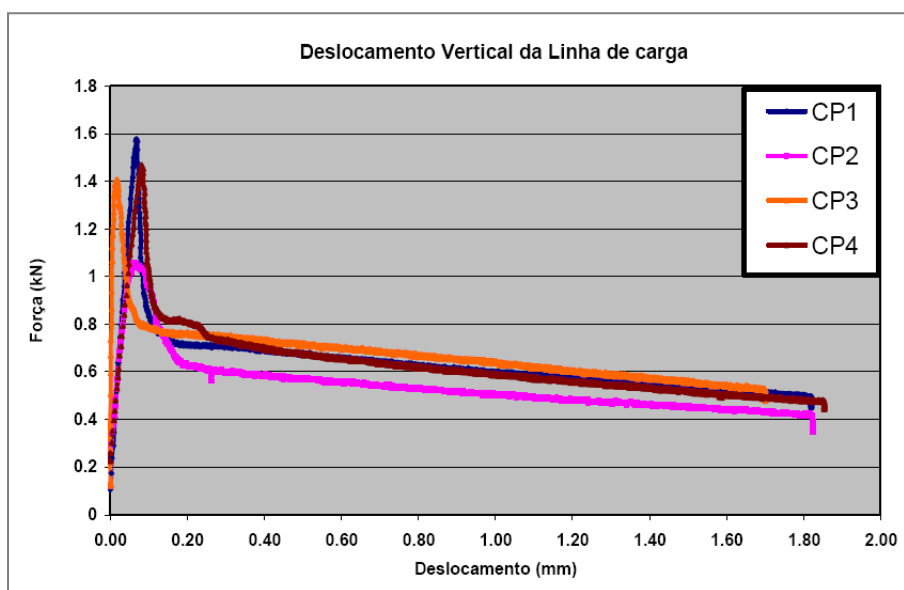


Figura 2.34 - Resultados ensaio de rotação (SIQUEIRA, 2007)

Analisando os gráficos observou-se que houve uma redução considerável da capacidade resistente do elemento, por causa da propagação de fissuras, entretanto, a deformabilidade do corpo-de-prova estende-se a níveis consideravelmente elevados. O autor concluiu que as contribuições das fibras na resistência do compósito variam de aproximadamente 50%, para baixos níveis de deslocamentos da linha de carga, até 30% para níveis maiores de deslocamentos verticais. Acredita-se que os níveis de contribuição das fibras foram adequados,

sendo os resultados dos conjuntos de ensaios evidenciaram que as almofadas apresentaram propriedades interessantes para utilização como elemento de apoio.

g) Microscopia ótica

Este ensaio foi efetuado visando verificar o padrão da rugosidade superficial por meio de fotos de microscópio ótico. Este estudo foi realizado devido a observação que as imperfeições presentes na face superior das moldagens (já que a moldagem era feita em formas horizontais) seriam benéficas para produzir melhores efeitos de acomodação quando estivessem em uso.

Para tal análise foi retirada amostra do meio das almofadas (Figura 2.35). Uma amostra de almofada sem ser ensaiada e outra amostra após a almofada ser submetida a ensaio cíclico.

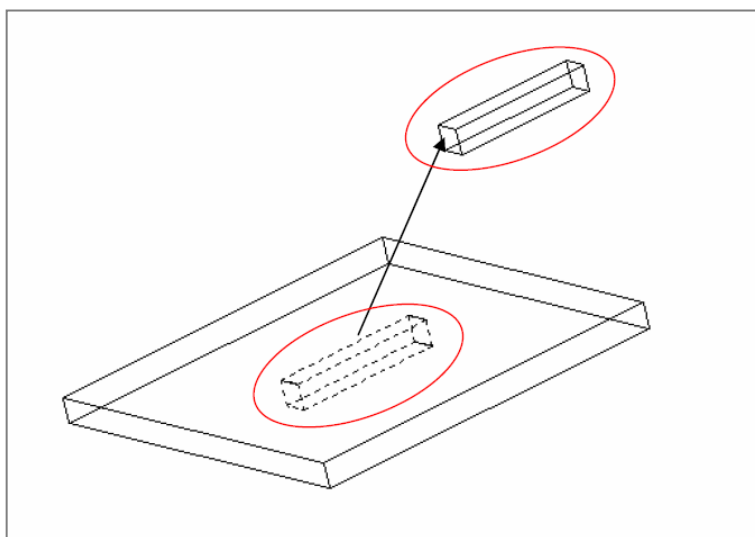


Figura 2.35 - Retirada da amostra para o ensaio de microscopia ótica (SIQUEIRA, 2007)

O estudo foi realizado de forma simples, apenas para observar o comportamento da acomodação após o carregamento. O que se pode concluir é que as fotos (Figura 2.36) reforçam as hipóteses de que as imperfeições ajudam no processo de acomodação, mas não podem ser afirmativas conclusivas, porque são necessários ensaios físicos para estas conclusões.

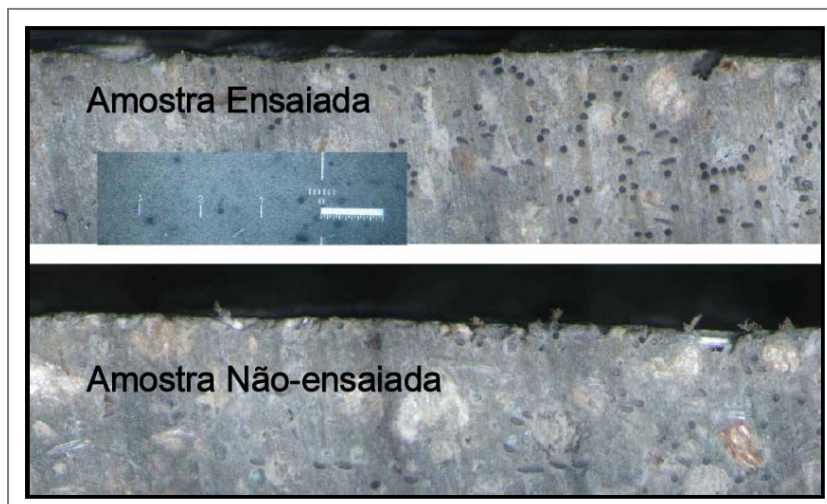


Figura 2.36 - Foto das amostras ensaiadas e não-ensaiadas (SIQUEIRA, 2007)

As principais conclusões feitas por Siqueira (2007) foram:

- a) os valores de elasticidade e rigidez foram bem reduzidos, sendo na ordem de 50 a 60% da argamassa convencional;
- b) comparando os valores da pesquisa de Montedor (2004) com fibras de PVA e vidro, verificou-se que os valores foram bem próximos;
- c) em relação a quantidade de vermiculita, concluiu-se que o melhor traço foi o de V10PP4L30;
- d) o material apresentou boa capacidade resiliente, verificada nos ensaios de carregamento cíclico e monotônicos;
- e) nas ligações a almofada melhorou o desempenho quando da existência de imperfeições iniciais nas peças ou na presença da rugosidade;
- f) a capacidade das almofadas em absorver rotações foi adequada.

2.2.4 Pesquisas relacionadas à aplicação da almofada em ligações

Além dos estudos específicos do material, em paralelo foi sendo estudada a utilização da almofada em algumas ligações viga-pilar e pilar-pilar.

Miotto (2002) utilizou o aparelho de apoio em sua pesquisa num tipo de ligação viga-pilar. Comparando os ensaios com e sem a almofada percebe-se que com a almofada, houve um retardo no início da fissuração e uma menor incidência na região de compressão do consolo, variações atribuídas à capacidade de acomodação da almofada utilizada como aparelho de apoio. Uma vantagem

observada foi a capacidade de moldar o aparelho de apoio conforme a forma e o modelo da ligação.

Barboza (2002) utilizou no seu estudo de ligações do tipo pilar-pilar as almofadas de argamassa, onde esta tende a ser uma situação intermediária entre a junta de argamassa e o contato direto entre os pilares. Observou-se que houve menor aproveitamento com modelos de almofada com PVA em relação ao valor teórico resistido pelo concreto pré-moldado. Houve ganho de ductilidade comparado ao modelo com junta de argamassa, verificando também que o comportamento das tensões é mais uniforme, ocorrendo menos deterioração dos elementos pré-moldados.

Baldissera (2006) ensaiou uma reformulação do modelo proposto por Miotto (2002). As variáveis analisadas foram semelhantes às da pesquisa anterior, mudando-se somente o chumbador utilizado, para se tentar criar uma ligação semi-rígida mais eficiente para elementos pré-moldados de concreto. O chumbador nessa pesquisa foi colocado com uma inclinação. A utilização da almofada de compósito foi motivada devido aos bons resultados encontrados na pesquisa de Miotto (2002) que concluiu que é recomendada, apesar de causar uma diminuição na rigidez da ligação.

Há alguns trabalhos em andamento que utilizam também em seus estudos as almofadas de compósito.

Sawasaki estuda um tipo de ligação viga-pilar utilizando essas almofadas e chumbadores para se obter a curva momento fletor \times rotação (em fase de elaboração)². A almofada utilizada é composta com fibras de vidro previamente estudadas e utilizadas na confecção das almofadas conforme Bellucio et al. (2009). Foi desenvolvido um modelo de projeto em análise de elementos finitos tanto da ligação quanto da distribuição de esforços em pórticos planos e também realizados ensaios experimentais. A pesquisa está em andamento, mas algumas análises já apontam que com a utilização da almofada e dos chumbadores utilizados pode se considerar uma semi-rigidez na ligação.

² Sawasaki, F.Y. Estudo teórico-experimental de ligação viga-pilar com almofadas de argamassa para estruturas de concreto pré-moldado. Dissertação de mestrado a ser defendida pela EESC/USP, 2010.

Aguiar faz um estudo teórico-experimental para avaliar os mecanismos de resistência e de deformabilidade mobilizados na ligação viga-pilar com comportamento parcialmente resistente a momento fletor mediante chumbadores grauteados (em fase de elaboração)³. Na pesquisa procura-se modelar o comportamento de chumbadores grauteados que foram utilizados por Miotto (2002) e Baldissera (2006). Para o estudo, o pesquisador utiliza almofadas de argamassa nas ligações, visto o bom resultado encontrado por Baldissera (2006) em sua pesquisa.

³ Aguiar, E.A.B. Análise teórico-experimental de ligações viga-pilar de concreto pré-moldado resistente a momento fletor. Tese de doutorado a ser defendida pela EESC/USP, 2010.

3 MATERIAIS UTILIZADOS

Este capítulo descreve as principais características dos materiais utilizados na confecção das almofadas e o estudo utilizado para a dosagem.

3.1. CIMENTO PORTLAND

Cimento Portland é um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, usualmente com uma ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto de adição (Metha & Monteiro, 1994).

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP-V-ARI. É um produto de alta resistência inicial e final, permitindo desmoldar de forma rápida, otimizando o ciclo produtivo. O desenvolvimento dessa propriedade é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer (que resulta em elevação dos conteúdos de alita e C_3A), e pela moagem mais fina do cimento. Assim, ao reagir com a água, o CP-V-ARI adquire elevadas resistências, com maior velocidade. Na Tabela 3.1 são apresentadas as características físico-químicas do cimento utilizado.

Tabela 3.1 - Características físico-químicas do cimento (Fonte: HOLCIM S.A.)

Finura	Resíduo peneira 75 microns (%)	0,2
	Área específica (cm ² /g)	4671
Tempo de início de Pega (h)		02:27
Expansibilidade a quente (mm)		< 2,0
Resistência a compressão	R1 (MPa)	26,0
	R3 (MPa)	40,5
	R7 (MPa)	46,8
	R28 (MPa)	54,2
Determinações Químicas	Resíduo Insolúvel (RI)	0,39
	Perda ao Fogo (PF)	2,48
	Óxido de Magnésio (MgO)	0,80
	Trióxido de Enxofre (SO ₃)	2,75
	Anidrico Carbônico (CO ₂)	0,90

3.2. AREIA

A areia das moldagens foi a mesma utilizada por Montedor (2004) e Siqueira (2007). A areia foi retirada do rio Mogi Guaçu, próximo a São Carlos. Foi realizada a caracterização do material através dos ensaios prescritos na ABNT NBR 7251:1996 e da ABNT NBR 9776:1987. A curva granulométrica está apresentada na Figura 3.1.

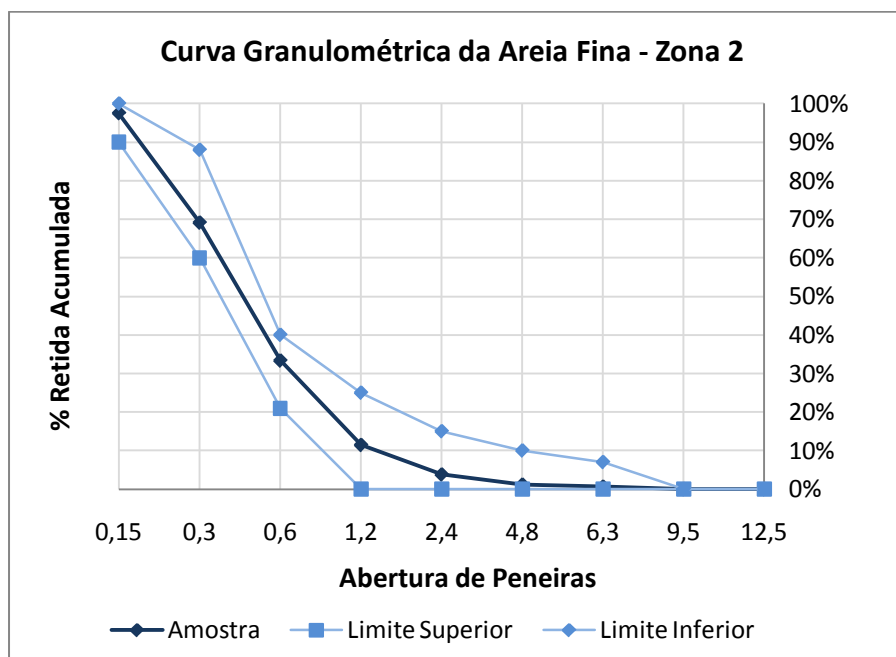


Figura 3.1 - Curva granulométrica da areia

O valor da massa específica da areia é de $2,63 \text{ g/cm}^3$. A massa unitária encontrada foi de $1,50 \text{ g/cm}^3$. O diâmetro máximo característico foi de 2,4 mm e seu módulo de finura equivale a 2,16.

Para as moldagens das almofadas e dos corpos-de-prova, toda a areia foi passada na peneira de 0,59mm, pois em Montedor (2004) concluiu-se que para essa granulometria propiciava um melhor resultado.

3.3. VERMICULITA TERMO-EXPANDIDA

A vermiculita é um mineral formado por hidratação de certos minerais basálticos, com fórmula química $(\text{MgFe,Al})_3(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. É um mineral semelhante à mica, formado essencialmente por silicatos hidratados de alumínio e magnésio. Quando submetida a um aquecimento adequado, a água contida entre as suas milhares de lâminas se transforma em vapor fazendo com que as partículas explodam e se transformem em flocos sanfonados. Cada floco expandido aprisiona

consigo células de ar inerte, o que confere ao material excepcional capacidade de isolamento. O produto obtido é inífungo, inodoro, não irrita a pele e nem os pulmões, apresenta baixa condutividade elétrica, é isolante térmico e absorvente acústico; não se decompõe, deteriora ou apodrece; não atrai cupins ou insetos; é somente atacado pelo Ácido Fluorídrico a quente; pode absorver até cinco vezes o seu peso em água, é lubrificante e tem as características necessárias aos materiais filtrantes.

A vermiculita utilizada nessa pesquisa foi do tipo termo-expandida (Figura 3.2), do mesmo lote utilizado por Montedor (2004) e Siqueira (2007) com diâmetro máximo de 4,8 mm. As propriedades da vermiculita são:

- não tóxica;
- absolutamente inorgânica;
- não abrasiva (dureza mohs: 1,5);
- não solúvel em bases e ácidos fracos e solventes orgânicos;
- ponto de fusão 1300°C;
- pH praticamente neutro.

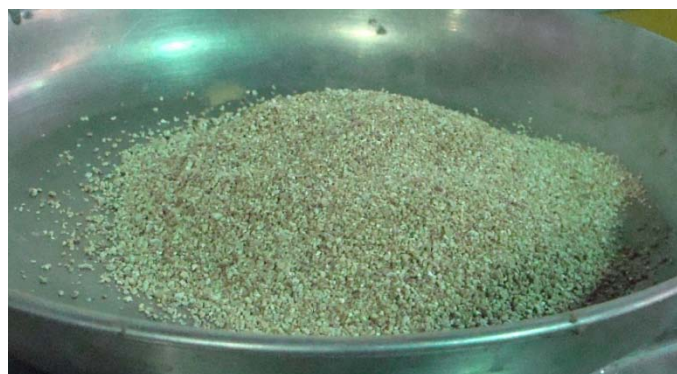


Figura 3.2 - (a) Fibra Brasilit (b) Fibra Concrefil

3.4. LÁTEX ESTIRENO-BUTADIENO

Látex é a designação usada para uma suspensão coloidal do polímero em água, contendo cerca de 50% em peso de partículas esféricas muito pequenas de polímero, mantidas em suspensão na água por agentes tenso-ativos (Metha & Monteiro, 1994).

O Látex utilizado para esta pesquisa foi a emulsão IMPRIMASTER da empresa Construquil. As especificações técnicas estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Propriedades do Latéx IMPRIMASTER - Contruquil

Aspecto do Produtos	Líquido branco esverdeado, leitoso, fluido, livre de griz, grumos e/ou materiais estranhos
Teor de sólidos (1g/1h/105oC), %	49,0 - 51,0
Viscosidade Brook. RVT 4/50 - 23oC, cP	300 - 1.500
pH à 25oC	8,0 - 9,0

3.5. FIBRAS DE POLIPROPILENO

Foram utilizados nessa pesquisa dois tipos de fibras de polipropileno (Figura 3.3), que foram escolhidas devido à disponibilidade no mercado. As fibras Concrefil foram especialmente cortadas para a pesquisa. As características das fibras são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Propriedades das fibras utilizadas.

Características	Brasilit - Saint Gobain	Concrefil - Orpec
Massa específica (g/cm ³)	0,91	0,91
Diâmetro (µm)	12	180
Comprimento (mm)	10	10
Alongamento (%)	21	20 - 25
Ponto de fusão	170°C	170 °C

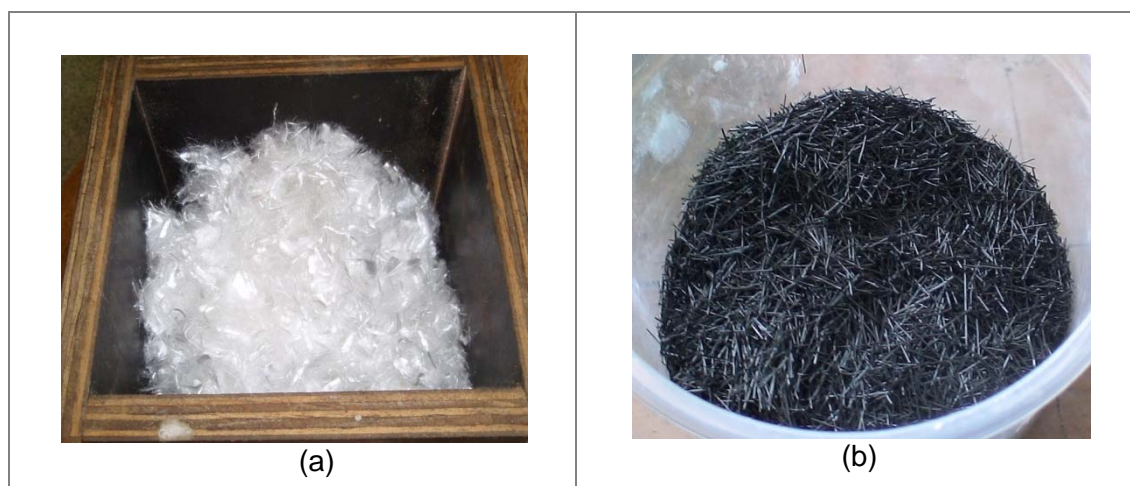


Figura 3.3 - (a) Fibra Brasilit (b) Fibra Concrefil

3.6. ADITIVO SUPERPLATIFICANTE

A aplicação de fibras na argamassa reduzia muito a trabalhabilidade, necessitando o uso de um aditivo superplastificante. Os aditivos superplastificantes geralmente são utilizados para que se possa promover uma redução de água de amassamento da mistura. A incorporação do aditivo foi utilizada conforme a necessidade de cada traço, de forma a adquirirem a trabalhabilidade adequada para serem moldados nas novas fôrmas, que serão apresentadas no Capítulo 4.

O superplastificante utilizado nesta pesquisa é o GLENIUM 51. Este tem base em uma cadeia de éter carboxílico modificado, é isento de cloretos, atende as prescrições da norma ASTM C 494 (tipos A e F), ASTM C 1017, e é compatível com todos os cimentos que atendem a ASTM 150. Suas propriedades são apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Dados técnicos do GLENIUM 51

Propriedades	Valores
Função principal	Superplastificante 3ª Geração
Base química	Policarboxilatos
Aspecto	Líquido Viscoso
Densidade	1,067 a 1,107 g/cm ³
pH	5 a 7
Sólidos	28,5 a 31,5 %
Viscosidade	95 a 160 cps

3.7. DOSAGEM

Para adotar os traços que seriam utilizados na pesquisa, fez-se um estudo dos traços utilizados nas pesquisas de Montedor (2004) e Siqueira (2007). Nesta pesquisa buscou-se produzir uma argamassa que atendesse aos critérios de resistência para que pudesse ser utilizada como almofada de apoio e também pudesse ser moldada nas novas fôrmas, como será melhor explicado no Capítulo 4. Portanto, a argamassa deveria ter uma fluidez suficiente para esta nova forma de moldagem.

O traço de referência utilizado nas pesquisas anteriores é apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Traço de referência em volume

Cimento	Areia	Látex	Água
1	0,3	0,3	0,1

O traço que apresentava melhores características na pesquisa de Siqueira (2007) foi o V10PP4L30, ou seja, utilizando 10% de vermiculita em relação à areia, 4% de fibra de polipropileno e 30% de látex.

Como as novas fibras a serem estudadas alteravam a trabalhabilidade da argamassa, foi preciso fazer alguns ajustes no traço para que se pudesse moldar e obter bons resultados, logo que procurava-se incorporar a máxima quantidade possível de fibras.

De imediato houve uma alteração na quantidade de látex. Na pesquisa foi utilizado outro látex onde o fabricante não recomendava mais que 20% na mistura. Como a emulsão de látex tem 50% de água, essa redução afetou significativamente a trabalhabilidade. Outro fator é que as fibras de 12 μ m de diâmetro também influenciavam muito na trabalhabilidade. Optou-se por diminuir a quantidade de vermiculita, pois esta retém muita água na mistura, portanto, adotou-se a quantidade de vermiculita em 5% da quantidade de areia. Mesmo com essas alterações, houve a necessidade de aumentar a quantidade de água.

Houve alguns testes preliminares, chegando a um traço base conforme a Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Traço base em volume

Cimento	Areia	Vermiculita	Látex	Água
1	0,285	0,015	0,20	0,25

As duas fibras de polipropileno utilizadas alteravam de forma bem diferente a trabalhabilidade da argamassa. As fibras com 12 μ m de diâmetro faziam com que a massa ficasse muito viscosa, sendo necessário a utilização de superplastificante (2%) e a quantidade máxima que se conseguiu incorporar foi de 2% de fibra em relação ao volume de cimento.

As fibras de 180 μ m de diâmetro não alteravam de forma significativa a argamassa, assim, utilizou-se apenas 1% de superplastificante e conseguiu-se

incorporar 9% de fibra. A Figura 3.4 demonstra a diferença entre a argamassa de fibra de 12 μ m e 180 μ m.



Figura 3.4 - Massa fresca com fibra de (a) 12 μ m e (b) 180 μ m

Depois de alguns testes, adotaram-se os traços conforme Tabelas 3.7 e 3.8.

Tabela 3.7 - Traço utilizando a fibra de 12 μ m em volume

Cimento	Areia	Vermiculita	Látex	Fibra	Superpl.	Água
1	0,285	0,015	0,20	0,02	0,02	0,25

Tabela 3.8 - Traço utilizando a fibra de 180 μ m em volume

Cimento	Areia	Vermiculita	Látex	Fibra	Superpl.	Água
1	0,285	0,015	0,20	0,09	0,01	0,25

Percebendo que as fibras de 180 μ m não alteravam muito a trabalhabilidade, fez-se um teste também com a mistura das duas fibras. Através do traço das fibras de 12 μ m adicionou-se 3% das fibras de 180 μ m. Portanto, um novo traço estudado segundo a Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Traço utilizando as duas fibras em volume

Cimento	Areia	Vermiculita	Látex	Fibra 12	Fibra 180	Superpl.	Água
1	0,285	0,015	0,20	0,02	0,03	0,01	0,25

Para que se pudesse fazer uma comparação dos resultados foram realizados, para cada teste do compósito, ensaios com uma argamassa de referência. Essa

argamassa era apenas composta de cimento, areia e água. Assim, pode-se avaliar a influência dos materiais adicionados. Para composição de tal traço foi utilizada como referência o traço da Tabela 3.5 retirando o látex. Como a emulsão continha 50% de água, adicionou-se essa quantidade no novo traço, portanto, na Tabela 3.10 tem-se o traço utilizado como referência. Como a argamassa ficou muito viscosa, o superplastificante foi utilizado para que a massa pudesse ser moldada nas novas fôrmas.

Tabela 3.10 - Traço de referência em massa

Cimento	Areia	Água	Superplast.
1	0,3	0,35	0,01

Portanto, foram estudados três traços com adições e um traço referência para comparação, assim denominados:

- **PP12** - Traço utilizando apenas fibras de 12 μ m – Tabela 3.7
- **PP180** - Traço utilizando apenas fibras de 180 μ m – Tabela 3.8
- **Mistura** - Traço utilizando as duas fibras – Tabela 3.9
- **Referência** - Traço sem adições – Tabela 3.10

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve os ensaios realizados para caracterização do compósito e análise do comportamento das placas. Procurou-se realizar ensaios com as mesmas especificações que Montedor (2004) e Siqueira (2007) para que se pudesse fazer uma comparação entre os resultados. Além dos ensaios realizados pelos autores citados foram feitos ensaios de flexão, para se ter um melhor entendimento sobre o comportamento do compósito. Como o objetivo da pesquisa era avaliar a rugosidade superficial da almofada, foram modificadas as fôrmas utilizadas que serão apresentadas também neste capítulo.

Para a mistura dos materiais foi utilizada uma bateadeira industrial BP 20C com capacidade de 20 litros (Figura 4.1). O processo de desmoldagem foi realizado com dois dias da moldagem, sendo colocados por mais 24 horas em câmara úmida. Após a câmara úmida as amostras foram colocadas em temperatura ambiente até o dia dos ensaios. Os ensaios foram todos realizados após 14 dias da moldagem.



Figura 4.1 - Bateadeira Industrial utilizada na mistura da argamassa

Na Tabela 4.1 é apresentado um quadro com um resumo do programa experimental realizado.

Tabela 4.1 - Quadro resumo dos ensaios realizados

Caracterização do compósito			
Traços	Compressão	Tração	Módulo de Elasticidade
PP12	6 corpos-de-prova cilíndricos de 50mm de diâmetro por 100mm de altura	6 corpos-de-prova cilíndricos de 50mm de diâmetro por 100mm de altura	6 corpos-de-prova cilíndricos de 50mm de diâmetro por 100mm de altura
PP180			
Mistura			
Referência			
Total de amostras	24 corpos-de-prova	24 corpos-de-prova	24 corpos-de-prova
Ensaio de Força Distribuída			
Carregamento monotônico - compressão		Carregamento cíclico - compressão*	
PP12	39 placas (13LL, 13LR e 13RR)	PP12	18 placas (6LL, 6LR e 6RR)
PP180	18 placas (6LL, 6LR e 6RR)	Referência	18 placas (6LL, 6LR e 6RR)
Mistura	18 placas (6LL, 6LR e 6RR)	-	-
Referência	18 placas (6LL, 6LR e 6RR)	-	-
Total de amostras	93 almofadas	Total de amostras	36 almofadas
* Aplicação de pressões com intensidade de 2,5MPa, 5,0MPa, 10,0MPa e 20,0MPa. Este ensaio foi o último a ser realizado na pesquisa			
Ensaio de força concentrada			
PP12	10 tiras de 25mm x 150mm cortadas das almofadas do compósito e ensaiadas com auxílio de dispositivo metálico para aplicação de força concentrada para cada traço		
PP180			
Mistura			
Referência			
Total de amostras	40 tiras de almofada		
Ensaio de flexão			
PP12	6 tiras de 30mm x 150mm cortadas das almofadas do compósito e ensaiadas com auxílio de dispositivo metálico para aplicação de força concentrada para cada traço		
PP180			
Mistura			
Referência			
Total de amostras	24 tiras de almofada		

4.1. DISPOSIÇÕES DE MOLDAGEM E DEFINIÇÃO DE FÔRMAS

Nas pesquisas realizadas por Montedor (2004) e Siqueira (2007), foram utilizadas fôrmas onde as almofadas de apoio eram moldadas na horizontal. Esse esquema de moldagem, além de ser trabalhoso (moldando cada almofada separadamente), não proporcionava controle de uma das superfícies da almofada, apenas passava por um processo de acabamento durante a cura da argamassa, além da superfície ficar exposta (Figura 4.2).



Figura 4.2 - Placas moldadas em fôrmas sem controle de uma das superfícies

Visto que para atingir o objetivo da pesquisa era necessário o controle das duas superfícies maiores da almofada, optou-se pela utilização de uma nova fôrma. As fôrmas são moldes-tipo que juntos formam uma espécie de bateria de placas (Figuras 4.3 e 4.4), que, além do controle das rugosidades, as novas fôrmas também tinham como objetivo facilitar a produção de almofadas em grande escala.

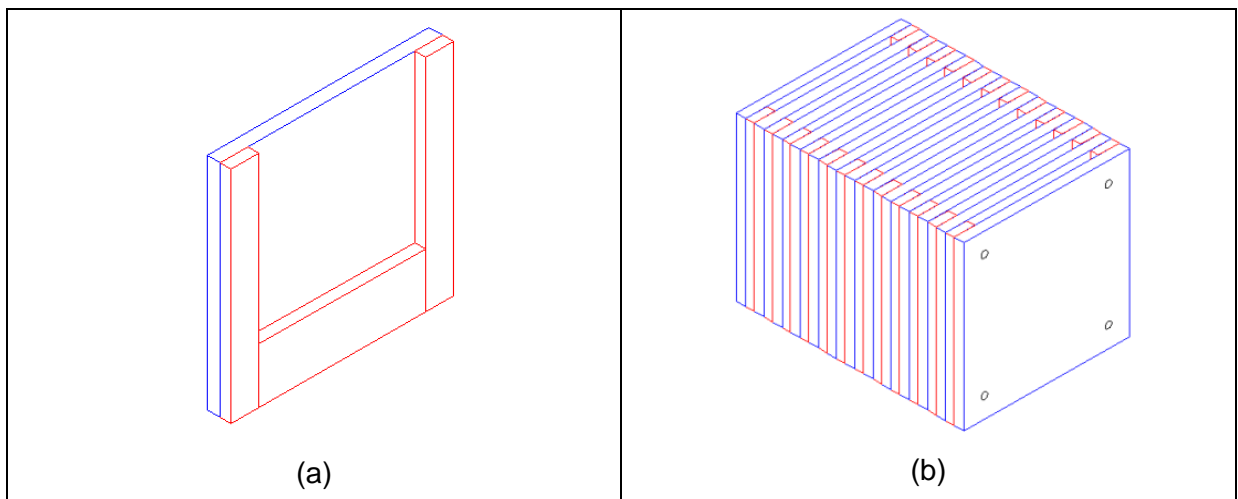


Figura 4.3 - (a) Desenho do molde de cada placa; (b) Desenho da fôrma completa – bateria;

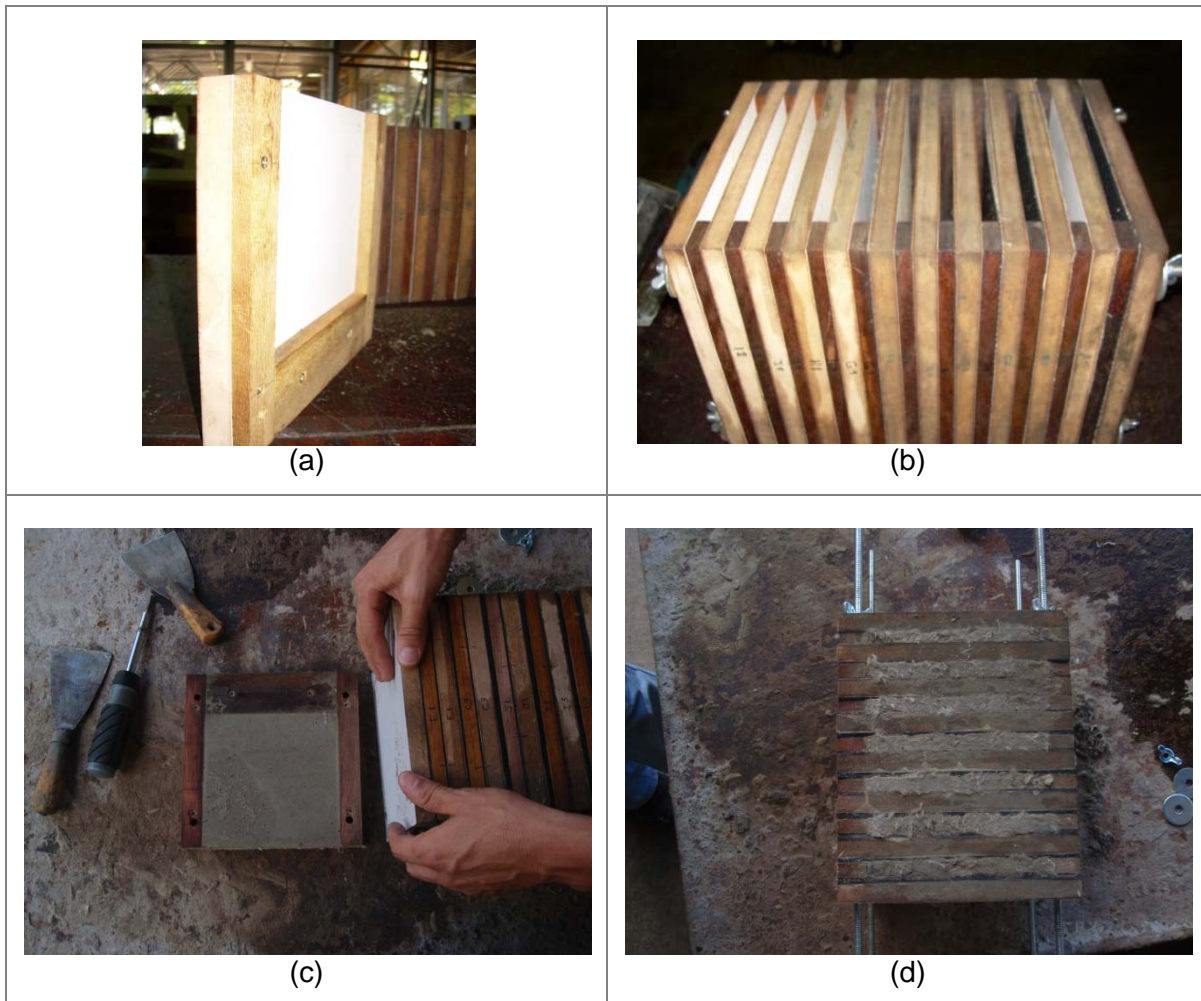


Figura 4.4 - (a) Foto de uma fôrma da almofada; (b) Foto da fôrma completa – Bateria; (c) desmoldagem de cada placa; (d) Bateria com as placas prontas para desmoldar.

Nos estudos de SIQUEIRA (2007), concluiu-se que as placas de 10mm de espessuras obtinham bons resultados nos ensaios. Porém, ao optar pela fôrma em bateria houve uma dificuldade muito grande de moldar, visto que a argamassa deveria ser introduzida nessa espessura. Assim, optou-se por utilizar espessuras de 12mm, testada previamente e visto que não teve diferenças significativas nos resultados e grande vantagem na moldagem. Foi feito um tipo de funil e ‘pente’ que pudesse auxiliar na moldagem (Figura 4.5), já que se tinha dificuldade de colocar a argamassa na fôrma devido a sua trabalhabilidade reduzida por causa das fibras. O adensamento foi realizado através do ‘pente’ e mesa vibratória.

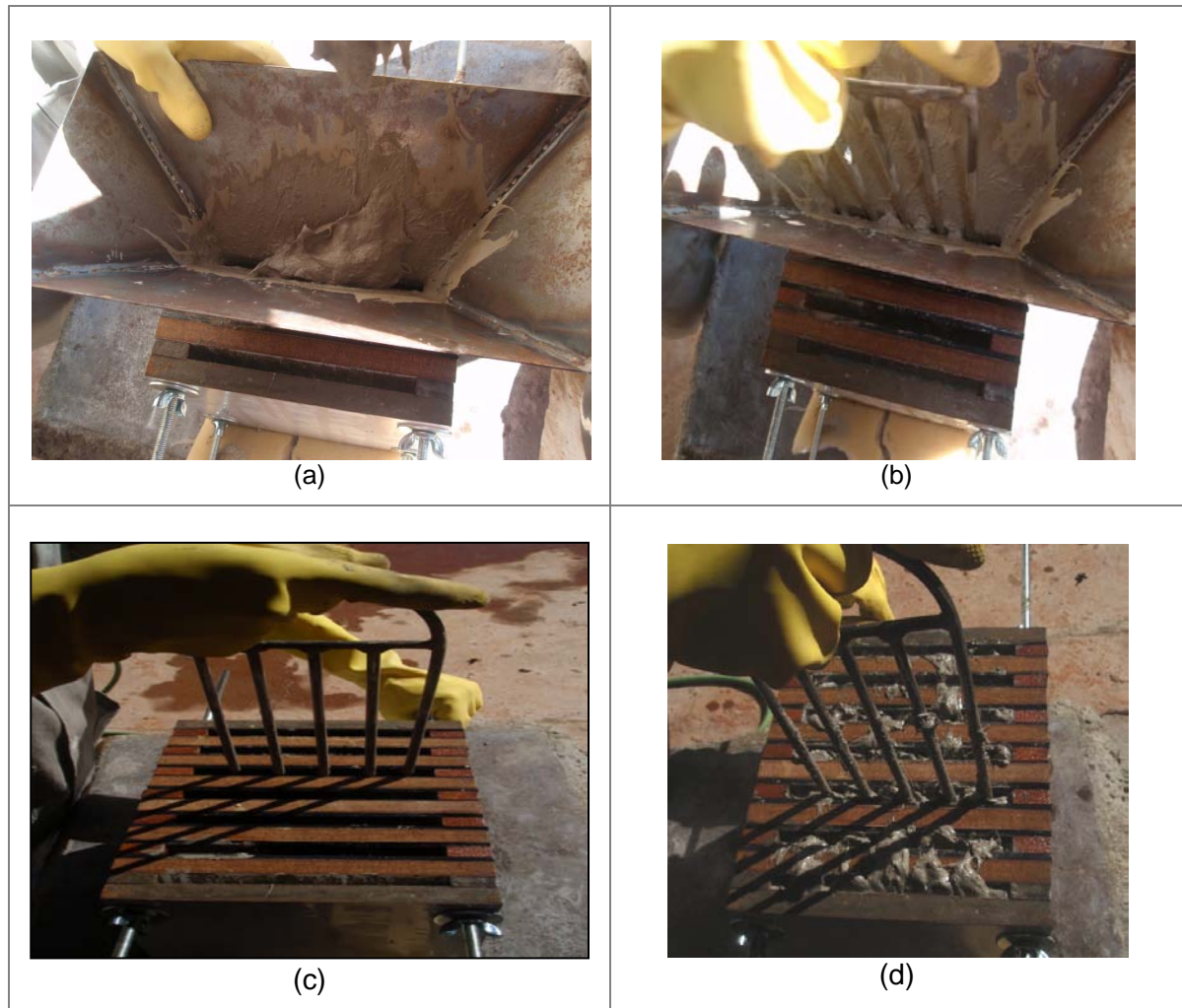


Figura 4.5 - Moldagem das placas utilizando o funil e o 'pente'

Após uma pesquisa dos materiais disponíveis foram escolhidas algumas rugosidades para serem testadas previamente quanto à sua moldagem, e posteriormente realizar ensaios de placas.

Inicialmente utilizaram-se três rugosidades disponíveis, que era de borracha de piso (Figura 4.6). Porém, havia uma dificuldade muito grande na desmoldagem das placas, o que não permitia uma rápida montagem e execução de todos os elementos e assim foram descartadas. Além disso, na desmoldagem, algumas placas acabaram perdendo parte da rugosidade que não se desprendia das fôrmas (Figura 4.7)

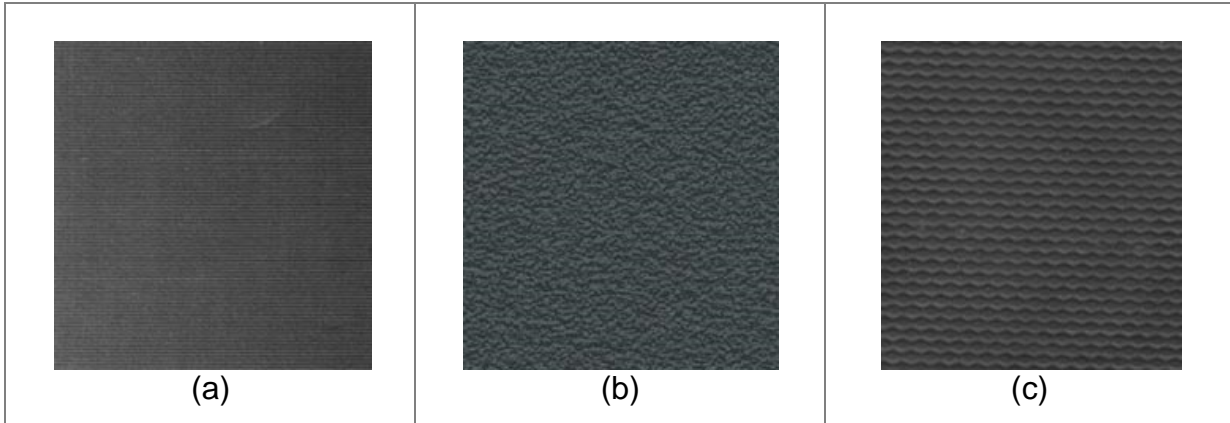


Figura 4.6 - (a) Borracha DF; (b) Borracha DCO; (c) borracha DMA

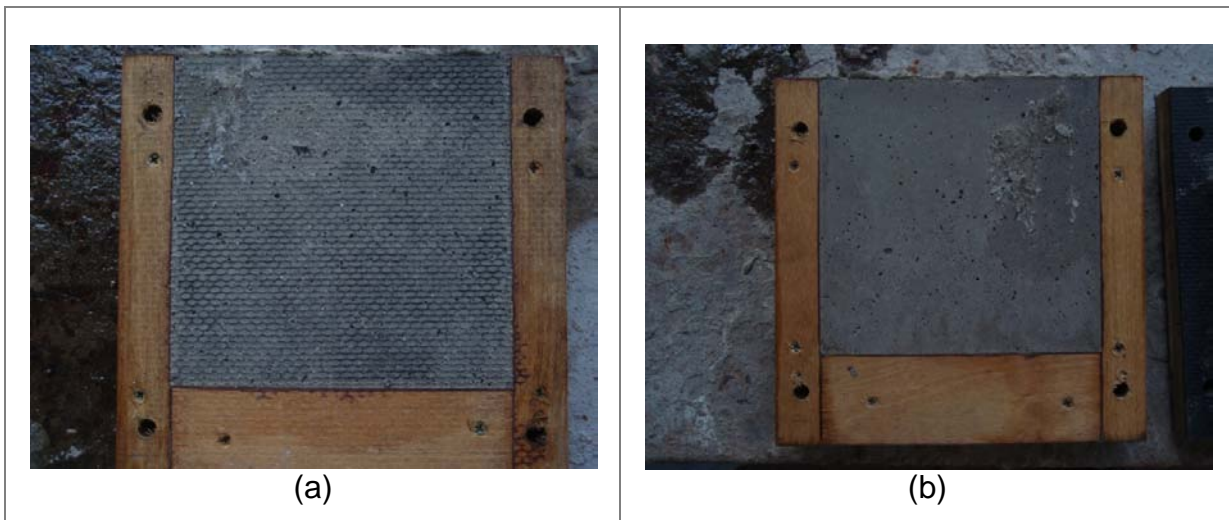


Figura 4.7 - Placas feitas nas fôrmas com placas de piso após a desmoldagem

Assim, optou-se por testar as placas com uma rugosidade aplicada com uma manta, que proporcionava facilidade na desmoldagem. As placas com a rugosidade foram coladas nas fôrmas conforme Figura 4.8. Para analisar os efeitos da rugosidade, realizaram-se ensaios comparando três moldagens: placas com ambos os lados lisos (LL); um lado liso e outro rugoso (LR) e ambos os lados rugosos (RR).

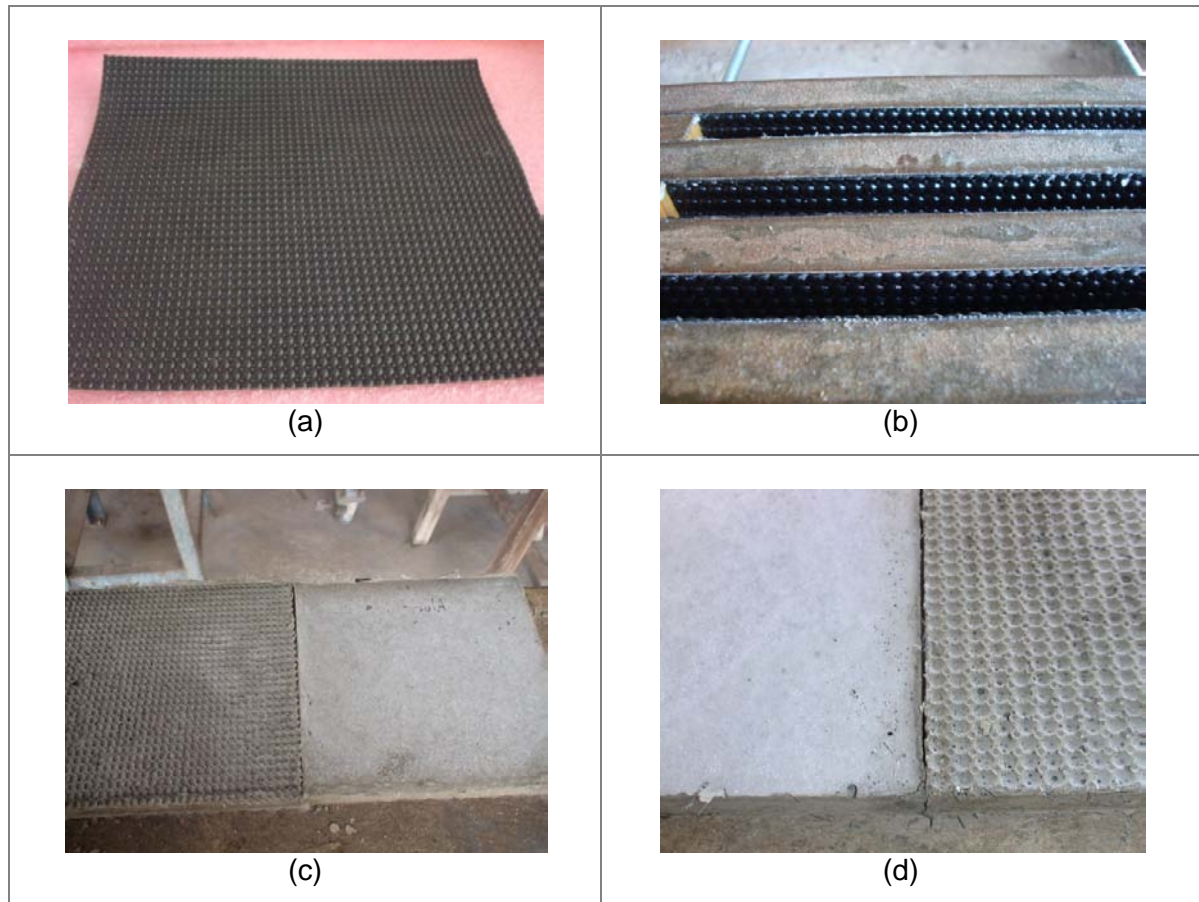


Figura 4.8 - (a) Manta utilizada nas fôrmas para conferir rugosidade nas placas; (b) Fôrma com a manta colada; (c) Almofada com superfície lisa e outra rugosa; (d) Detalhes das superfícies das almofadas

4.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Para os ensaios de caracterização foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 100mm x 50mm. Todos os corpos-de-prova foram retificados para que a aplicação da carga ocorresse uniforme por toda a região (Figura 4.9).

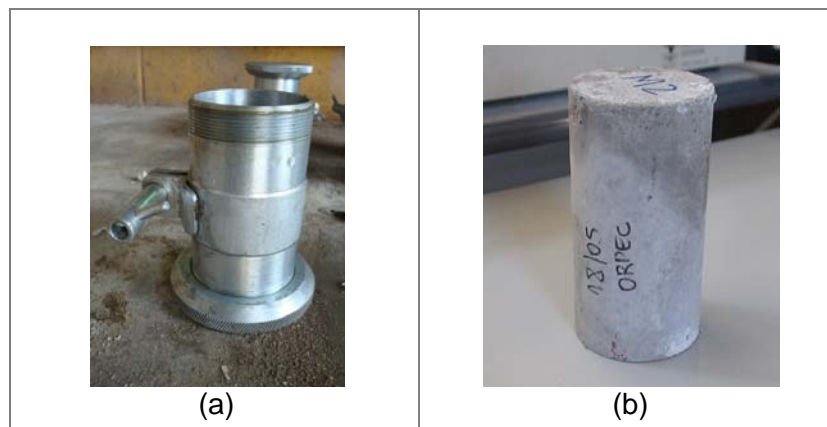


Figura 4.9 - (a) Molde dos corpos-de-prova; (b) Corpo-de-prova pronto para ensaio

4.2.1. Compressão Simples

Neste ensaio aplicou-se a carga controlando a velocidade de aplicação da máquina de 0,005mm/s até o ponto de ruptura ou força máxima. Calculou-se a tensão máxima para cada traço e construíram-se os gráficos para melhor comparação dos resultados.

Os valores das resistências médias à compressão dos corpos-de-prova foram calculados de acordo com a ABNT NBR 7215:1982.

4.2.2. Tração por Compressão Diametral

O cálculo da resistência à tração é realizado de forma indireta conforme ABNT NBR7222:1994. A força de compressão aplicada no sentido do diâmetro do cilindro gera uma tensão de tração transversal uniforme ao longo do diâmetro sendo o corpo-de-prova submetido a um estado duplo de tensões, que não romperá por compressão, mas por uma tração que pode ser calculada segundo a equação 2.

$$f_{t,d} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot h} \cdot 0,85 \quad (2)$$

Onde:

$f_{t,d}$ = tensão de resistência a tração por compressão diametral;

F = força máxima de ruptura;

d = diâmetro do corpo-de-prova;

h = comprimento do corpo-de-prova.

Para cada ensaio foi obtida a força de ruptura de cada corpo-de-prova, podendo-se calcular o valor da resistência do compósito de cada traço estudado. O esquema do ensaio está mostrado na Figura 4.10.



Figura 4.10 - Esquema de ensaio de tração por compressão diametral

4.2.3. Módulo de Elasticidade

Na obtenção do módulo de elasticidade, os corpos-de-prova cilíndricos foram ensaiados com transdutores de deslocamento com 50mm posicionados em lados opostos à aproximadamente 25mm de distância das bases (Figura 4.11). A carga foi aplicada com controle de deformação da máquina a uma taxa de 0,005mm/s. O cálculo do módulo de elasticidade tangente de cada traço foi obtido através da curva com a força aplicada e a média dos dois transdutores.

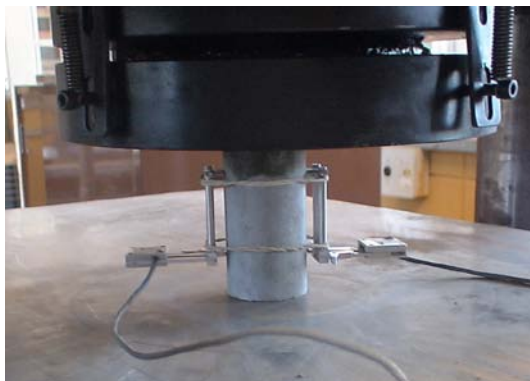


Figura 4.11 - Esquema do ensaio de módulo de elasticidade

Para o cálculo do módulo de elasticidade tangente foi traçada a curva tensão-deformação. Pegou-se parte da curva que corresponde 5% à 50% da tensão de ruptura e através da equação de segundo grau da regressão linear toma-se o valor do coeficiente do segundo termo. A Figura 4.12 exemplifica como foi o cálculo.

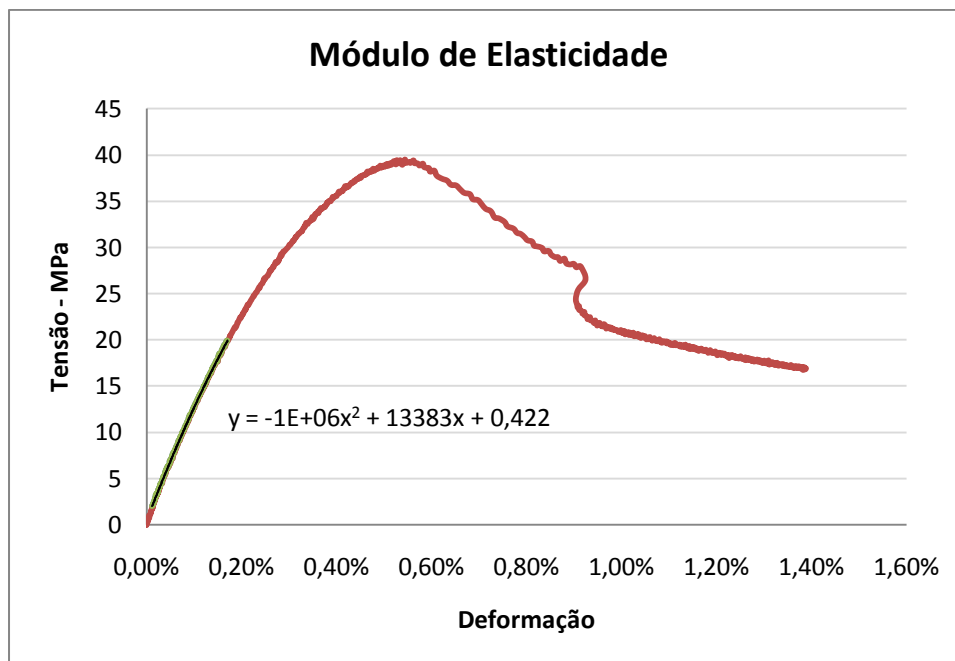


Figura 4.12 - Modelo para o cálculo do módulo de elasticidade

4.3. ENSAIOS DE PLACAS

Para os ensaios de placas foram moldadas placas de 150mmx150mm conforme Figura 4.13. Para melhor controle, a espessura inicial da placa foi medida antes dos ensaios com um paquímetro digital. Foram feitas duas medidas por lado e a espessura utilizada foi a média das oito lidas.



Figura 4.13 - (a) Placas na bateria após a moldagem; (b) Placa sendo desmoldada

Os ensaios foram realizados na Instron modelo 8506 e na Instron modelo 5595-300HVL (Figura 4.14).

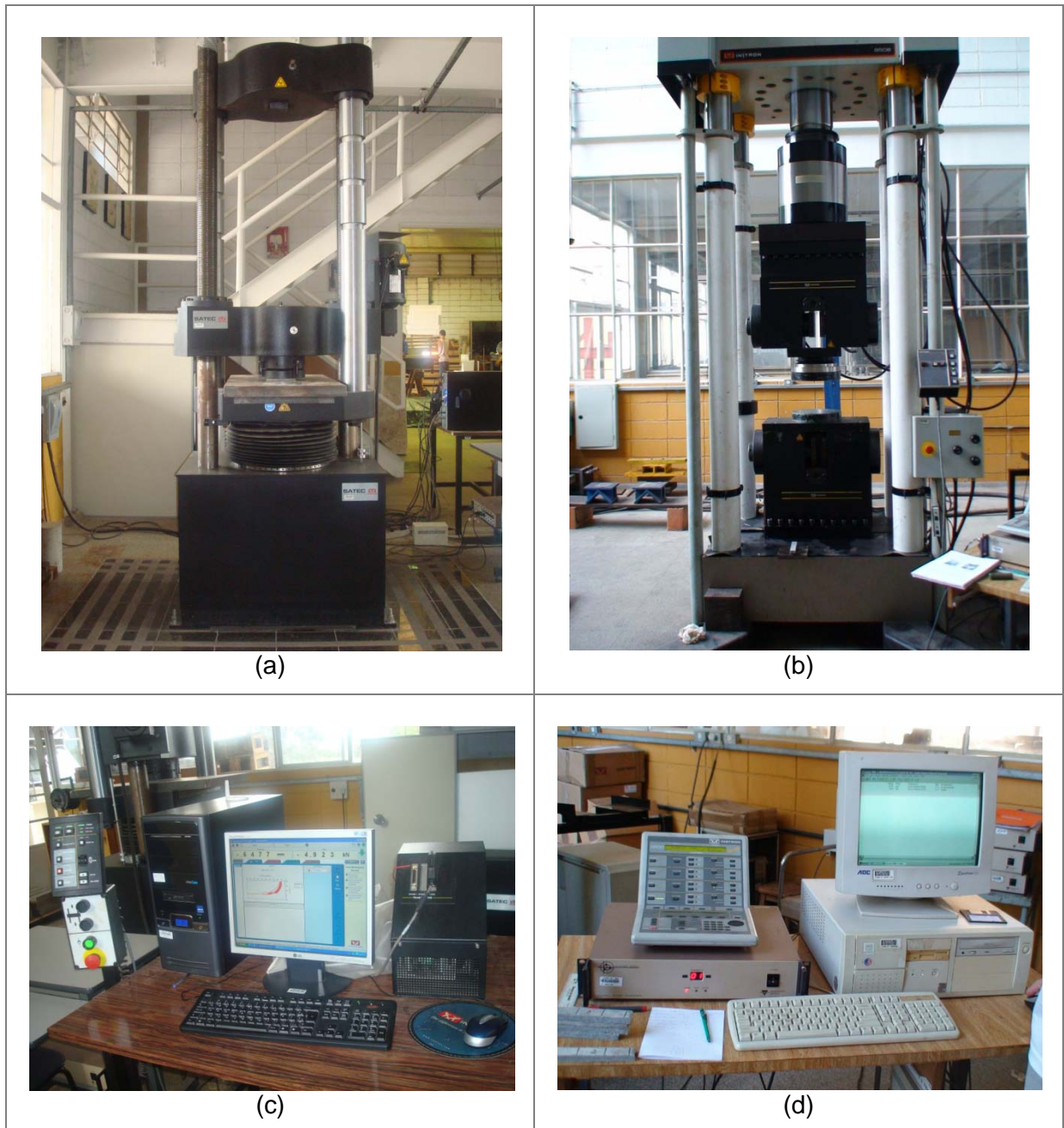


Figura 4.14 - (a) Instron modelo 5595-300HVL; (b) Instron modelo 8506; (c) Sistema de aquisição de dados na Instron 5595-300HVL; (d) Sistema de aquisição de dados na Instron 8506

4.3.1. Carregamento Monotônico

O ensaio de carregamento monotônico determina a rigidez da placa, ou seja, uma medida da capacidade de deformação das almofadas. O ensaio consiste em aplicar uma carga de compressão uniforme na almofada para determinar a rigidez. Esta relação foi chamada de rigidez por Montedor (2004) devido a forma de placa do

elemento e sua pequena espessura. Quando verificada sua deformação, esta possui valores maiores que os corpos-de-prova cilíndricos estudados para módulo de elasticidade, gerando uma redução significativa nos valores obtidos para a rigidez das placas, em relação ao módulo de deformação dos corpos-de-prova cilíndricos.

As almofadas foram ensaiadas na Instron modelo 5595-300HVL, a uma velocidade de 0,01mm/s e levadas até a carga de 1500kN. Nos ensaios realizados por Montedor (2004) e Siqueira (2007), essa carga era levada até 2000kN, porém, como verificou-se nos resultados encontrados por eles que a rigidez não se alterava depois da estabilização da curva, resolveu-se utilizar essa carga máxima, podendo assim utilizar a Instron modelo 5595-300HVL, que era mais disponível no laboratório.

Após a fase de acomodação das deformações iniciais foi traçada uma reta sobre estas curvas através de regressão linear (Figura 4.15), calculando-se a rigidez de cada uma das amostras como sendo o coeficiente angular de cada reta, ou seja, o primeiro termo da equação encontrada. Foi adotado esse método de regressão linear por ser mais preciso que o método utilizado por Siqueira (2007) e Montedor (2004).

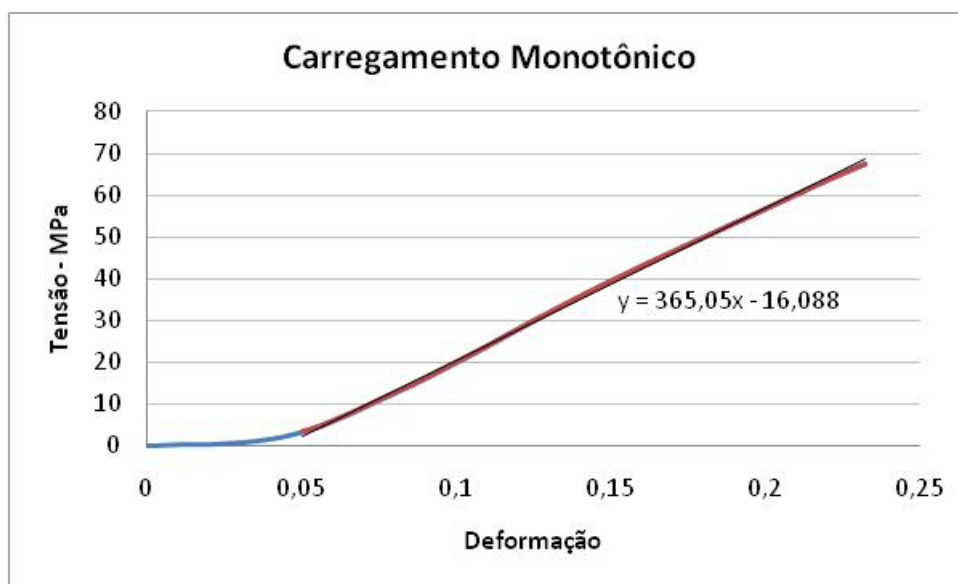


Figura 4.15 - Exemplo para o cálculo da rigidez das placas.

4.3.2. Força Concentrada

Este ensaio de força concentrada derivou dos ensaios de força concentrada realizados por Montedor (2004) e Siqueira (2007), visando-se medir a capacidade de acomodação de cargas pontuais de tiras de almofada do compósito, ou

afundamento. Nesta pesquisa optou-se por realizá-lo com o objetivo de comparar a influência dos tipos de fibras analisadas na capacidade de acomodação.

Este ensaio consistiu em cortar as almofadas de 150mmx150mm em fatias de 25mmx150mm, nas quais seriam aplicadas duas cargas pontuais em dois pontos localizados a 37,5mm da borda da fatia (Figura 4.16).

O ensaio consistiu na aplicação de carga com controle de deformação da máquina a uma taxa de 0,01mm/s. Este ensaio foi realizado utilizando a Instron modelo 8586.

Para cada traço, dez amostras de tiras de almofadas foram ensaiadas e pôde-se obter a curva força x deslocamento para cada amostra. Um exemplo dos gráficos obtidos para um traço é apresentado na Figura 4.17.



Figura 4.16 - (a) Amostra para o ensaio de força concentrada; (b) Esquema do ensaio de força concentrada

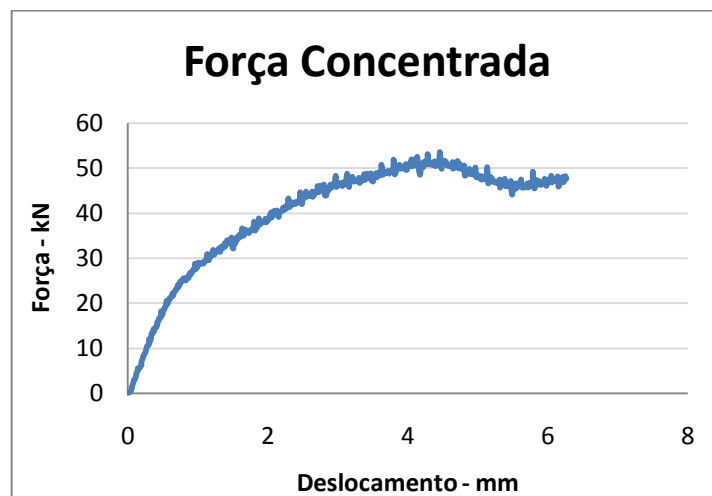


Figura 4.17 - Resultado de uma curva de força concentrada

Para melhor apresentação dos resultados, foram plotadas todas as curvas num gráfico e traçado a curva média. A partir das curvas médias foram analisadas as diferenças de cada fibra.

4.3.3. Ensaio de Flexão

Este ensaio foi realizado para verificar a resistência da argamassa à flexão e verificar a capacidade resistente após a fissuração devido a influência das fibras.

Para essa determinação procurou-se realizar o ensaio com uma amostra da própria placa, ou seja, retiraram-se tiras das placas como no ensaio de força concentrada. Assim, foram realizados seis ensaios de cada traço e cada amostra tinha 150mmx12mm, com 30mm de largura.

Para a aplicação do carregamento utilizou-se um atuador servo-hidráulico com controle de deformação. Como a carga de ruptura era muito baixa, foi utilizada uma célula de carga de 500kN acoplada a máquina para realização do ensaio.

Mesmo se tratando de um ensaio específico nas placas, verificaram-se as prescrições da ABNT NBR 12142:1991 para que se pudesse ter um padrão para o ensaio. Assim, optou-se por utilizar as mesmas medidas de distância de apoio e aplicação da carga (Figura 4.18), conforme a ABNT NBR 12142:1991.

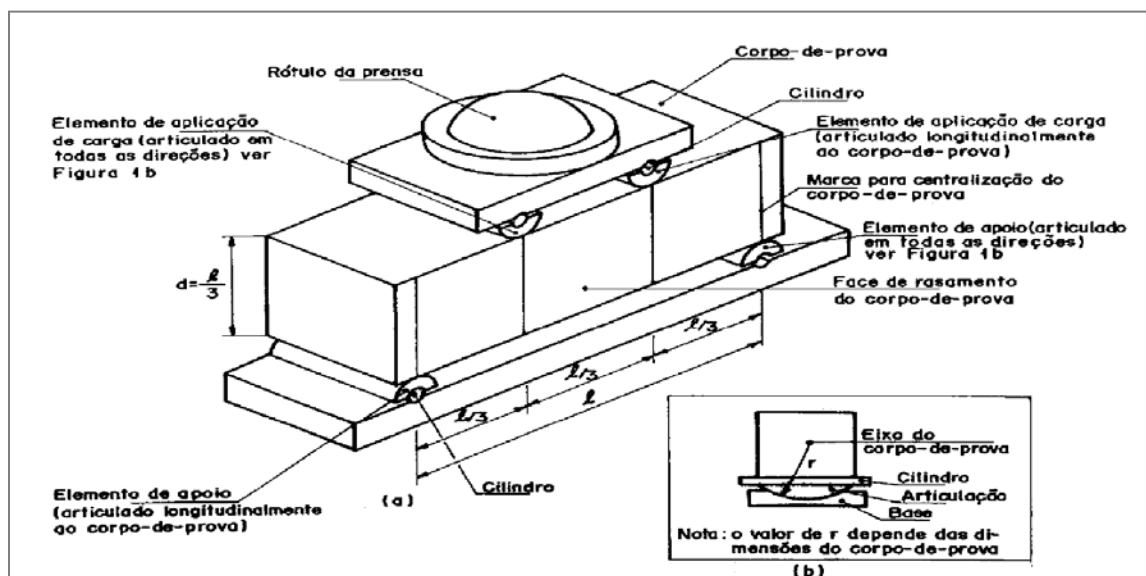


Figura 4.18 - Dispositivo de flexão (ABNT NBR 12142:1991)

Os apoios foram colocados a 1cm da borda da amostra e os pontos de aplicação da carga estavam a 1/3 da marca dos apoios. (Figuras 4.19 e 4.20).

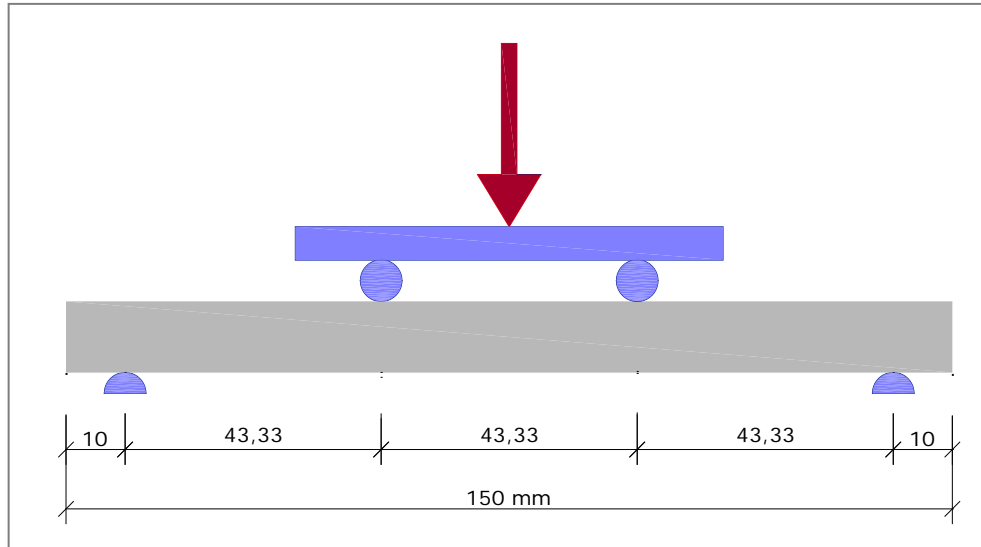


Figura 4.19 Distância dos pontos de aplicação de carga na amostra de flexão



Figura 4.20 - (a) Amostra para ensaio de flexão; (b) Esquema de ensaio de flexão

A carga foi aplicada até uma deformação onde a placa começava a perder carga.

Para comparar os resultados encontrados, traçaram-se as curvas tensão-deformação onde calculou-se a tenacidade de cada amostra. Para determinar essa tenacidade, optou-se por utilizar o método do *ASTM 1018*, onde são determinados os denominados Índices de Tenacidade, que são valores adimensionais representados pela letra *I*, calculados pela relação entre a área sob a curva carga x deslocamento vertical, Figura 4.21, até um determinado valor de flecha (sempre múltiplo da superfície relativa à primeira fissura) e a área sob esta mesma curva até a flecha correspondente à primeira fissura (δ_{cr}).

Essa primeira fissura é estimada no ponto onde a curva *carga-deslocamento vertical* deixa de ser linear, e a referida área representa a energia absorvida para uma dada flecha.

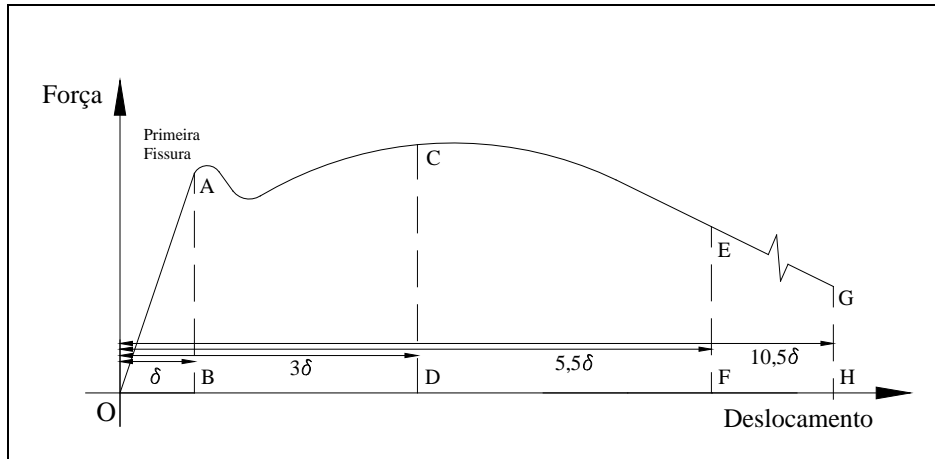


Figura 4.21 Curva Força x Deslocamento para calcula da tenacidade

De maneira geral, escreve-se;

$$I_N = \frac{\text{Energia absorvida para um múltiplo da flecha relativa à primeira fissura}}{\text{Energia absorvida para a flecha relativa à primeira fissura}}$$

$$I_5 = \frac{\text{ÁreaOACD}}{\text{ÁreaOAB}} \quad I_{10} = \frac{\text{ÁreaOAEF}}{\text{ÁreaOAB}} \quad I_{20} = \frac{\text{ÁreaOAEGH}}{\text{ÁreaOAB}}$$

Os valores indiciais em I são relações de áreas obtidas num gráfico força x deslocamento padrão elasto-plástico perfeito exibido na Figura 4.22.

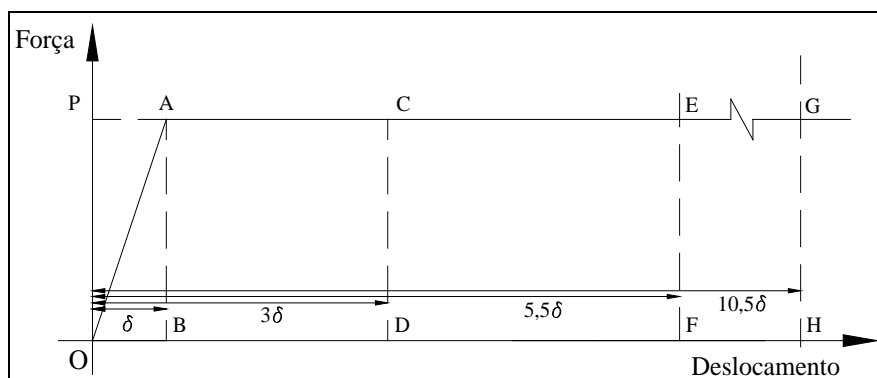


Figura 4.22 Curva Força x Deslocamento padrão elasto-plástico para cálculo da tenacidade

$$I_5 = \frac{\text{ÁreaOACD}}{\text{ÁreaOAB}} = \frac{\frac{P\delta}{2} + 2P\delta}{\frac{P\delta}{2}} = 5$$

$$I_{10} = \frac{\text{Área}OAEF}{\text{Área}OAB} = \frac{\frac{(5,5\delta + 4,5\delta)P}{2}}{\frac{P\delta}{2}} = 10$$

$$I_{20} = \frac{\text{Área}OAEFGH}{\text{Área}OAB} = \frac{\frac{(10,5\delta + 9,5\delta)P}{2}}{\frac{P\delta}{2}} = 20$$

Para o cálculo da tenacidade nesta pesquisa utilizou-se o recurso de regressão linear para cada trecho, como descrito na ASTM 1018. A Figura 4.23 apresenta um gráfico encontrado no ensaio que exemplifica o cálculo de cada área.

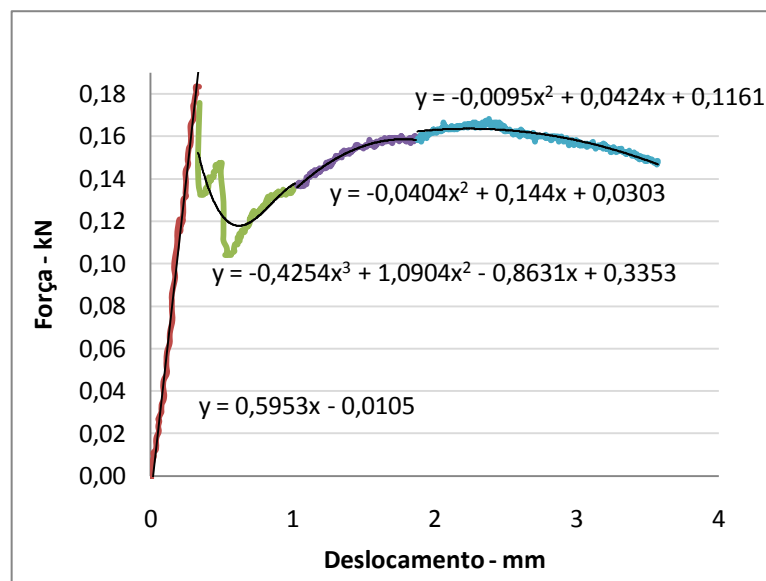


Figura 4.23 - Gráfico com as curvas de regressão linear para cálculo das áreas

A norma de consulta prescreve que a ruptura ocorra no terço médio da distância entre os elementos de apoio ou a uma distância deste não superior a 5% de L (Figura 4.24).

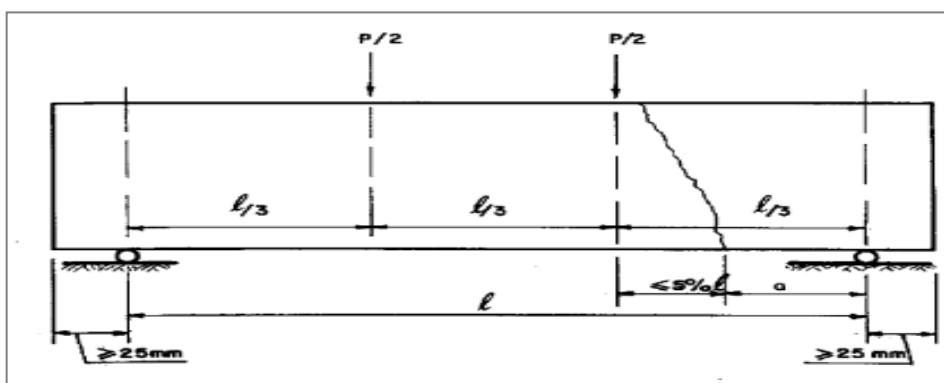


Figura 4.24 - Seção de ruptura para ensaio de flexão (ABNT NBR 12142:1991)

Onde:

a = distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, obtida com a aproximação de 1 mm, mediante a tomada de, pelo menos, três medidas ($a \geq 0,283L$).

Eventualmente, se a ruptura ocorrer além dos 5% ($a \leq 0,283L$), o ensaio não tem validade.

4.3.4. Carregamento Cíclico

No ensaio de carregamento cíclico procurou-se obter uma visualização da evolução da rigidez com um regime de cargas repetitivas.

O esquema básico do ensaio cíclico foi o mesmo utilizado para o ensaio monotônico, sendo que as almofadas utilizadas neste ensaio possuíam as mesmas dimensões das do ensaio anterior, ou seja, 150mmx150mm de base e espessura de 12mm. A diferença ficou por conta dos carregamentos que foram repetidos ciclicamente, até cargas que promovessem pressões de contato da mesma ordem de grandeza do que se poderia verificar em situações práticas de utilização das almofadas de apoio.

As tensões adotadas para este ensaio foram as mesmas de Siqueira (2007) de 2,5MPa, 5,0MPa, 10,0MPa e 20,0MPa. Com a adoção destes valores de tensões, as forças nas respectivas fases dos ensaios foram de aproximadamente 55kN, 112kN, 225kN e 450kN. Para cada valor de tensão foram realizados ciclos de 50 repetições para cada carregamento correspondente com velocidade de 0,02mm/s. As cargas foram aplicadas até os valores limites e levados a um valor próximo de zero.

Neste ensaio foram analisadas as rigidezes com a evolução do carregamento e o afundamento acumulado dos ciclos. A rigidez é calculada como nos ensaios de carregamento monotônico (Figura 4.25). O afundamento acumulado é a consolidação do material, ou seja, o deslocamento sofrido pela placa durante cada ciclo. O afundamento é calculado através da diferença entre o valor final e o inicial de deslocamento do ciclo (Figura 4.26).

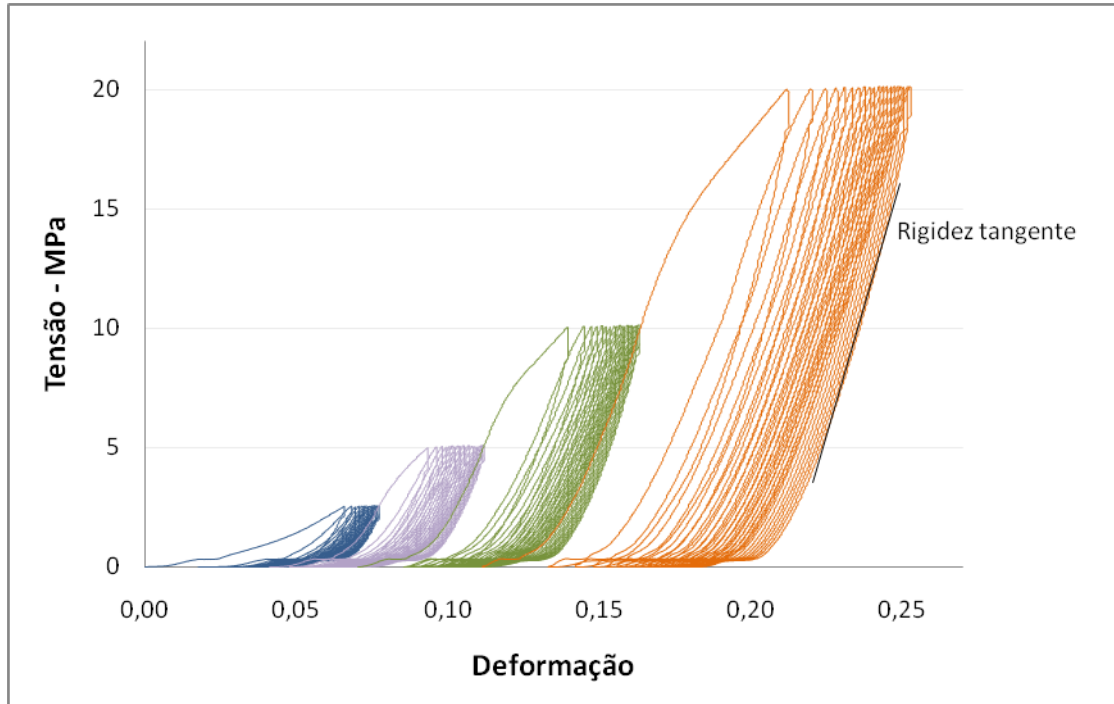


Figura 4.25 - Gráfico do ensaio cíclico demonstrando o cálculo da rigidez para tensão de 20MPa

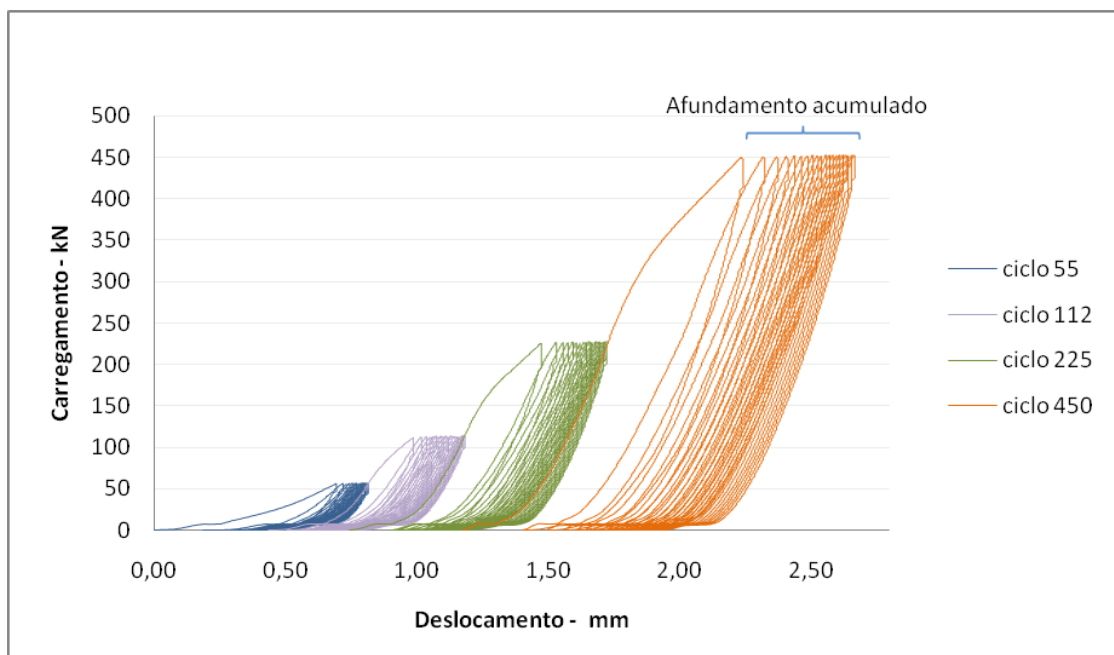


Figura 4.26 - Gráfico do ensaio cíclico demonstrando o afundamento acumulado para o ciclo de 450kN

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados encontrados para os ensaios de caracterização e ensaios das placas. O objetivo é comparar o desempenho das duas fibras estudadas e uma análise da influência da rugosidade aplicada na superfície da almofada. Também será realizada uma comparação com os resultados encontrados na pesquisa anterior feita por Siqueira (2007).

Os ensaios foram realizados em duas etapas: primeiro os ensaios de caracterização e carregamento monotônicos, e na segunda etapa os ensaios de força concentrada, flexão e carregamento cíclico.

Os resultados obtidos de todos os ensaios realizados são apresentados detalhadamente no Apêndice A.

5.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

5.1.1. Compressão Simples

Foram ensaiados seis corpos-de-prova de três moldagens diferentes. Os resultados das médias dos resultados estão apresentados na Tabela 5.1 e na Figura 5.1.

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de compressão simples

Traços	Resistência - MPa
PP12	40,9
PP180	41,8
Mistura	40,2
Referência	79,5

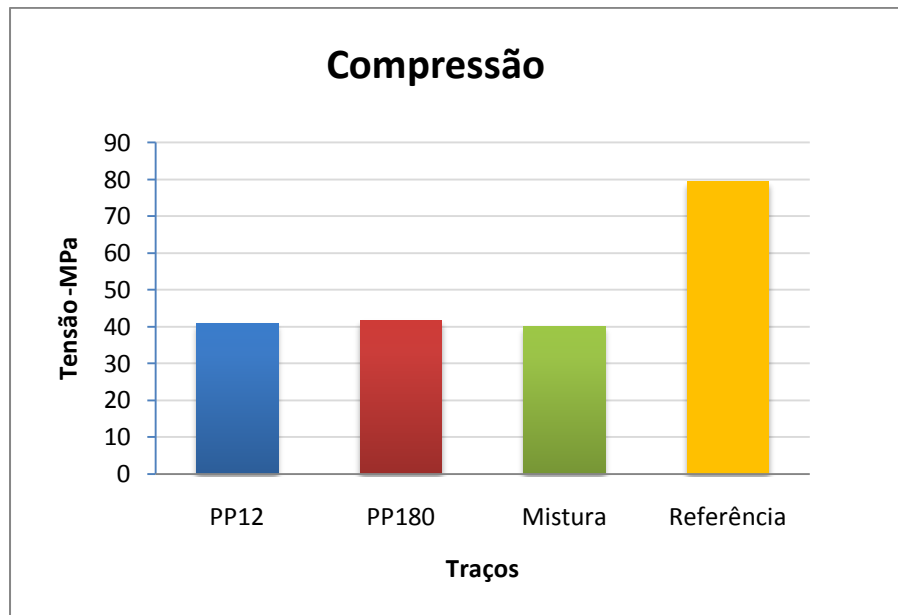


Figura 5.1 - Resultados dos ensaios de compressão simples

Analisando os resultados verifica-se que a adição de materiais diminui cerca de 48% da resistência da argamassa. Não houve uma variação significativa nos valores entre os traços modificados. Portanto, a variação do tipo de fibra não alterou os resultados do compósito.

Comparando os resultados encontrados com os valores obtidos por Siqueira (2007), que estão apresentados na Figura 2.15, observa-se que os valores estão consistentes, e que mesmo com valores reduzidos de compressão, estes são o suficiente para serem utilizados nas almofadas.

Os corpos-de-prova dos traços modificados não apresentaram ruptura frágil, devido a presença de fibras, continuando íntegros após o ensaio, como mostra a Figura 5.2.



Figura 5.2 - Corpo-de-prova PP12 após ensaio de compressão simples

5.1.2. Tração por Compressão Diametral

Para o ensaio de tração também foram ensaiados seis corpos-de-prova de três moldagens diferentes. As médias dos resultados estão apresentadas na Tabela 5.2 e na Figura 5.3.

Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral

Traços	Resistência - MPa
PP12	3,1
PP180	2,8
Mistura	3,4
Referência	3,6

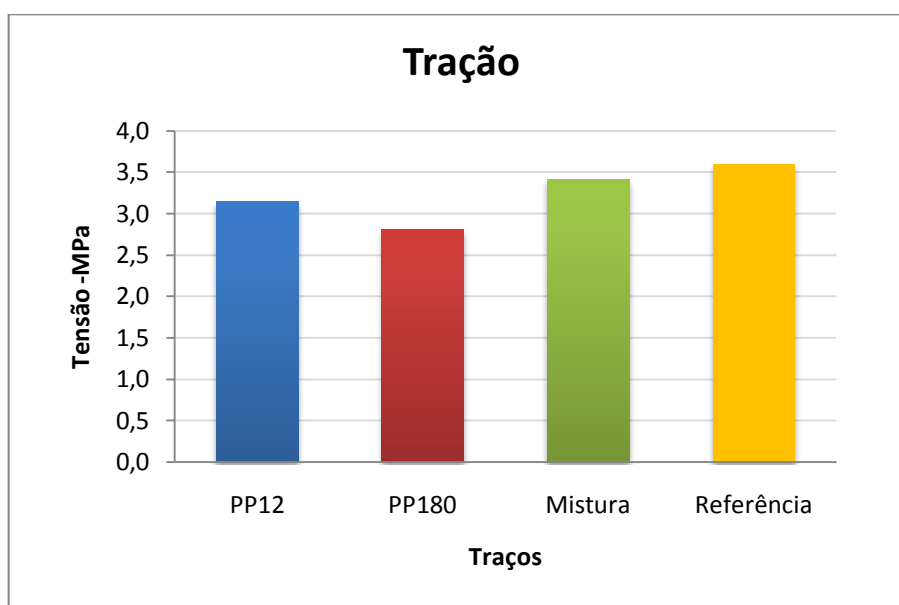


Figura 5.3 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral

Analisando os resultados verifica-se que não há diferenças significativas entre as resistências à tração. Há uma tendência dos resultados da argamassa de referência ser um pouco maiores que os demais.

Comparando com os resultados encontrados por Siqueira (2007) na Figura 2.16, verifica-se que os valores encontrados nos ensaios estão próximos, diferindo basicamente apenas o da argamassa de referência.

O que foi observado no ensaio é que as amostras dos traços modificados apresentavam uma fissura e depois sofriam uma deformação devido ao dispositivo de ensaio, como mostra a Figura 5.4.



Figura 5.4 - Corpo-de-prova após ensaio de Tração

5.1.3. Módulo de Elasticidade

Para este ensaio também foram ensaiados seis corpos-de-prova de três moldagens diferentes. As médias dos resultados estão apresentadas na Tabela 5.3 e na Figura 5.5.

Tabela 5.3 - Resultados dos ensaios de Módulo de elasticidade

Traços	Módulo de Elasticidade - GPa
PP12	12,8
PP180	13,9
Mistura	13,2
Referência	23,2

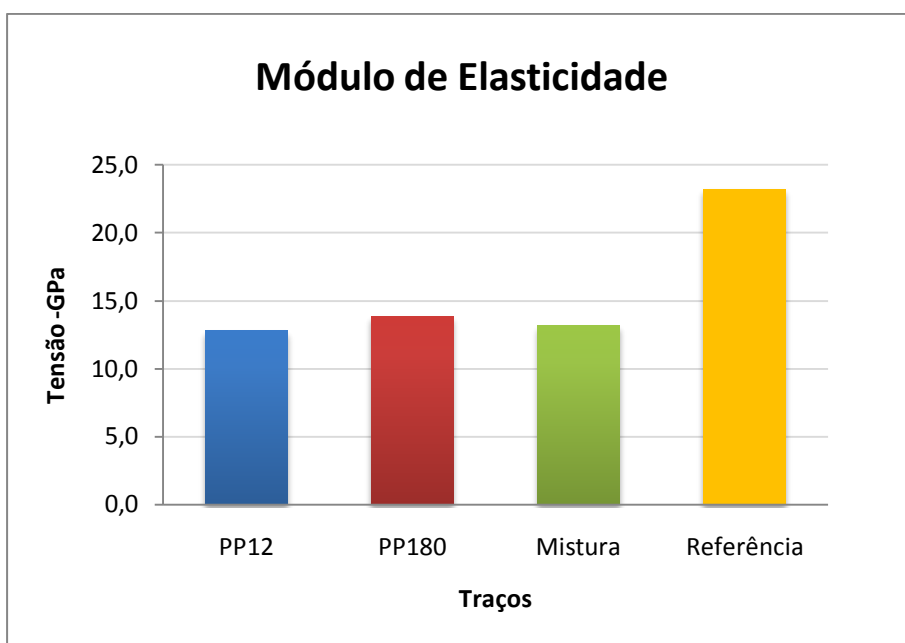


Figura 5.5 - Resultados dos ensaios de Módulo de elasticidade

Comparando os resultados das argamassas modificadas com o traço referência, observa-se uma redução do módulo de 45%. Este é o foco principal da pesquisa, que o material seja o mais deformável possível para ser utilizada como almofada de apoio.

Comparando os resultados entre os traços modificados verifica-se que os valores são bem próximo. Sendo que para o traço PP12 o resultado é um pouco menor que para o traço PP180, observando ainda que o traço de mistura apresenta valores intermediários.

Nos resultados encontrados por Siqueira (2007), o pesquisador obteve para o traço que concluiu como o mais adequado (V10PP4L30) o valor de 13,1GPa, sendo bem próximos dos valores encontrados para as argamassas modificadas. Assim, conclui-se que os resultados estão satisfatórios.

5.2. ENSAIOS DE PLACAS

5.2.1. Carregamento Monotônico

Com este ensaio foi analisado, através da rigidez, a diferença entre os traços estudados e a influência da rugosidade superficial aplicada nas placas. A rigidez é a relação tensão x deformação das almofadas, onde quantifica a capacidade de deformação elástica do material.

Para facilitar, adotou-se a identificação LL para placas com ambos os lados lisos, LR para placas com um lado liso e outro rugoso e RR para ambos os lados rugosos.

Primeiramente foi analisado o traço PP12. Para este ensaio foram moldadas 18 placas, sendo confeccionadas em duas etapas: nove placas numa primeira moldagem (3LL, 3LR e 3RR) e mais nove placas numa segunda moldagem. Porém, ao verificar os resultados, observou-se que os resultados entre as duas moldagens estavam diferentes. Assim, optou-se por moldar mais nove placas para conferir os resultados. Os valores de rigidez encontrados estão apresentados na Figura 5.6.

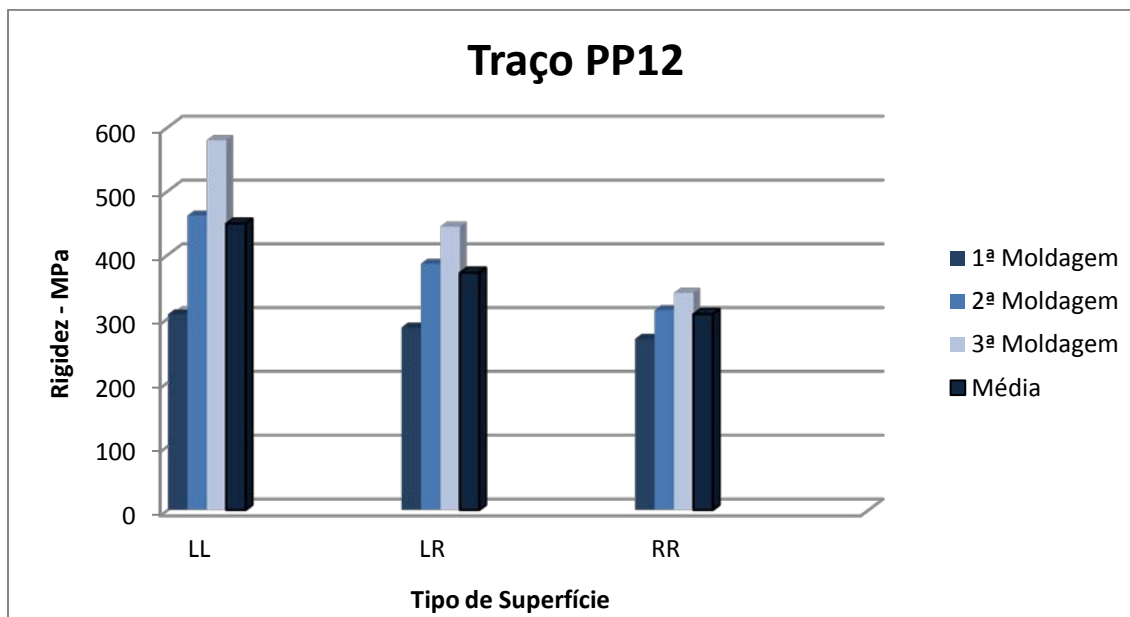


Figura 5.6 - Resultados de rigidez do traço PP12

Mesmo com uma nova moldagem os valores de rigidez foram diferentes, principalmente para as placas LL e LR. A Tabela 5.4 mostra as médias dos valores encontrados.

Tabela 5.4 - Resultados das médias das rigidezes do ensaio monotônico para traço PP12 (MPa)

	1ª Moldagem	2ª Moldagem	3ª Moldagem	Média
LL	307	461	580	449
LR	286	386	444	372
RR	268	313	340	307

Com base nos resultados, verificam-se que as diferenças entre os resultados das placas RR eram menores que as demais. Além disso, esses resultados apresentavam valores de rigidez 30% menores comparados com as placas LL e LR. Portanto, como o objetivo da pesquisa é reduzir a rigidez das placas, os resultados foram satisfatórios, concluindo que mesmo com resultados diferentes entre as moldagens, as placas RR apresentam bons resultados tendo em vista a aplicação.

Para os traços PP180, Mistura e Referência foram realizadas duas moldagens, com nove placas (3LL, 3LR e 3RR) de cada traço.

Para o traço PP180 temos os resultados apresentados na Tabela 5.5 e na Figura 5.7:

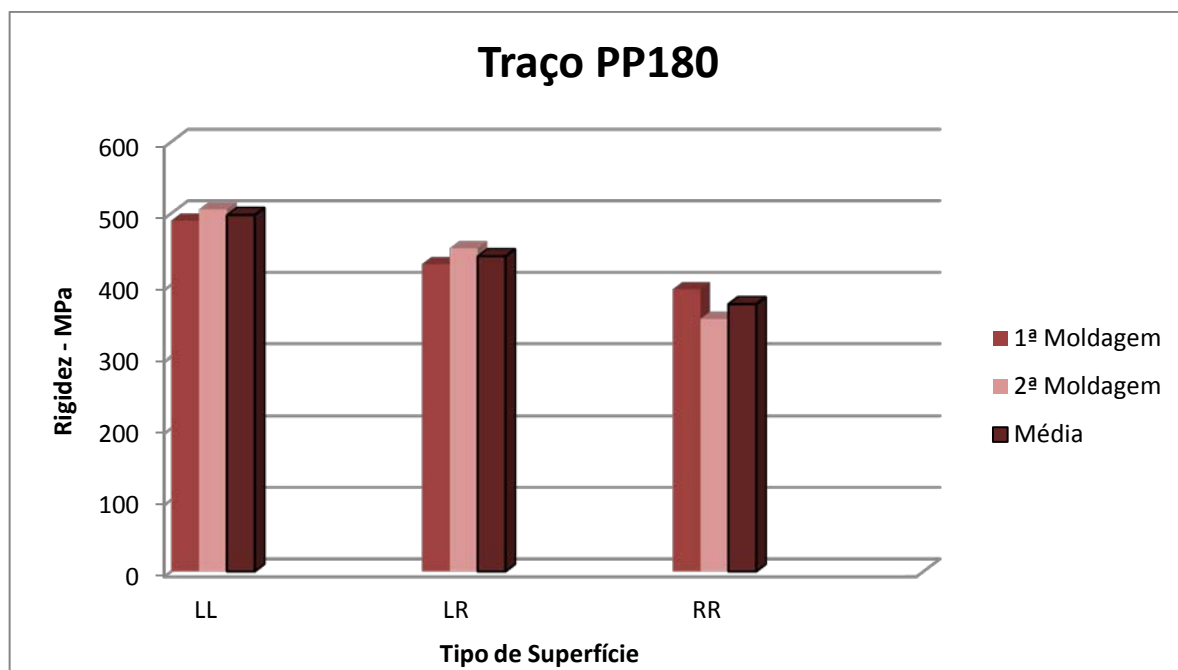


Figura 5.7 - Resultados de rigidez do traço PP180

Tabela 5.5 - Resultados das médias das rigidezes do ensaio monotônico para traço PP180 (MPa)

	1ª Moldagem	2ª Moldagem	Média
LL	490	506	498
LR	429	451	440
RR	394	352	373

Para este tipo de fibra verificou-se uma coerência nos resultados entre as duas moldagens, não havendo uma grande diferença entre eles. Também percebe-se uma redução da rigidez com a aplicação da rugosidade superficial nas placas.

Para o traço de Mistura, os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 5.6 e na Figura 5.8.

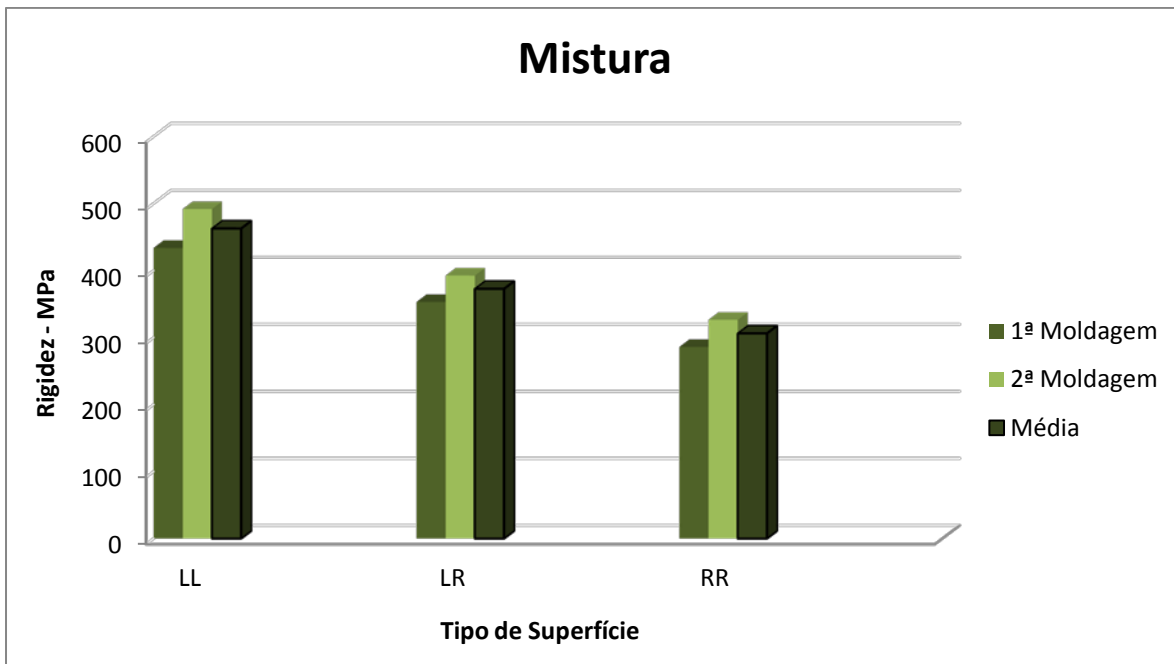


Figura 5.8 - Resultados de rigidez do traço Mistura

Tabela 5.6 - Resultados das médias das rigidezes do ensaio monotônico para traço Mistura (MPa)

	1ª Moldagem	2ª Moldagem	Média
LL	434	492	463
LR	353	392	373
RR	286	326	306

Para este traço houve uma variação um pouco maior entre os resultados, quando comparados com as diferenças entre o traço PP180. Porém, menos discrepantes do que os encontrados pelo traço PP12. Também percebe-se uma redução significativa da rigidez entre a aplicação ou não da rugosidade.

Para o traço de referência foram encontrados os resultados expostos na Figura 5.9 e Tabela 5.7.

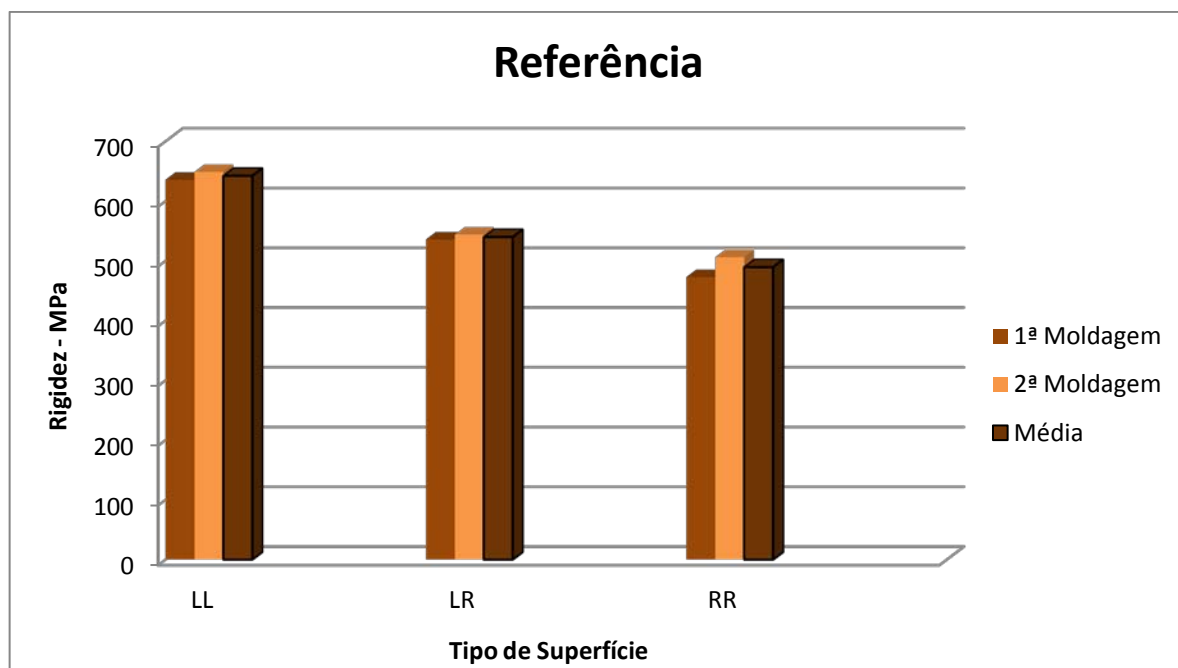


Figura 5.9 - Resultados de rigidez do traço de referência

Tabela 5.7 - Resultados das médias do ensaio monotônico para traço Referência

	1ª Moldagem	2ª Moldagem	Média
LL	636	649	642
LR	536	544	540
RR	473	506	490

Não houve diferença significativa entre as duas moldagens. Com isso, pode-se concluir que as diferenças encontradas nos traços modificados são referentes à adição dos novos materiais. O que pode ter influenciado nos resultados é a diferença entre o lote de cimento ou a temperatura do ambiente no dia das moldagens, já que todas as outras condições foram mantidas iguais para todas as moldagens.

Fazendo uma comparação da rigidez entre os traços estudados temos na Figura 5.10:

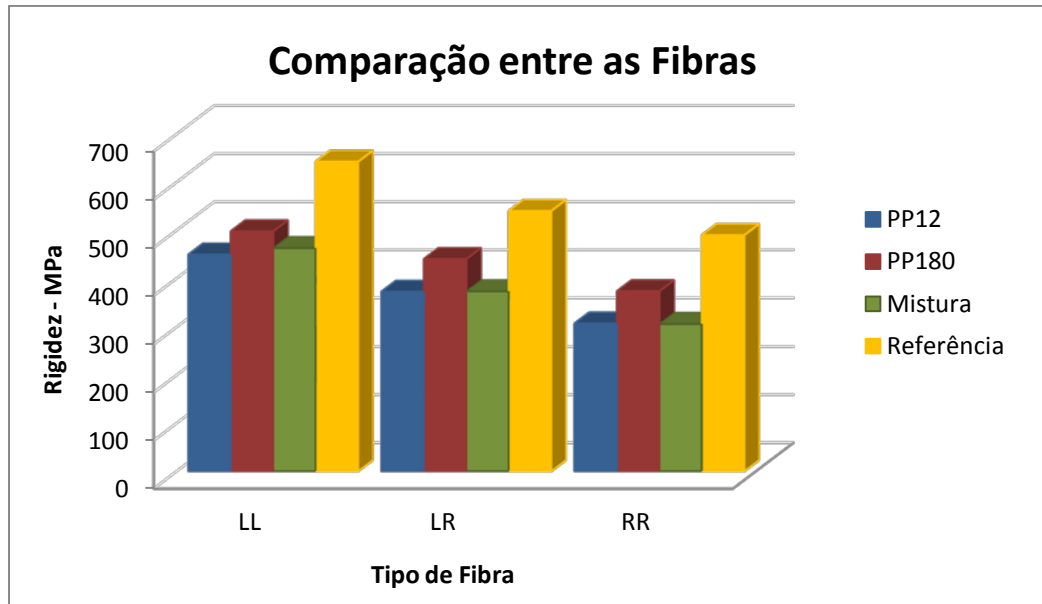


Figura 5.10 - Comparação dos resultados de rigidez

Percebe-se neste gráfico a redução significativa da rigidez das almofadas com a adição das fibras, látex e vermiculita. Como verificado, a melhor redução se deu nos traços PP12 e Mistura, com redução de mais de 30% na rigidez enquanto para o traço PP180 houve uma redução em torno de 20%.

Como os valores entre esses dois traços foram muito próximos, podemos concluir que as fibras de 180 μ m não contribuíram muito nos resultados da mistura.

Comparando os resultados entre as rugosidades aplicadas tem-se na Figura 5.11:

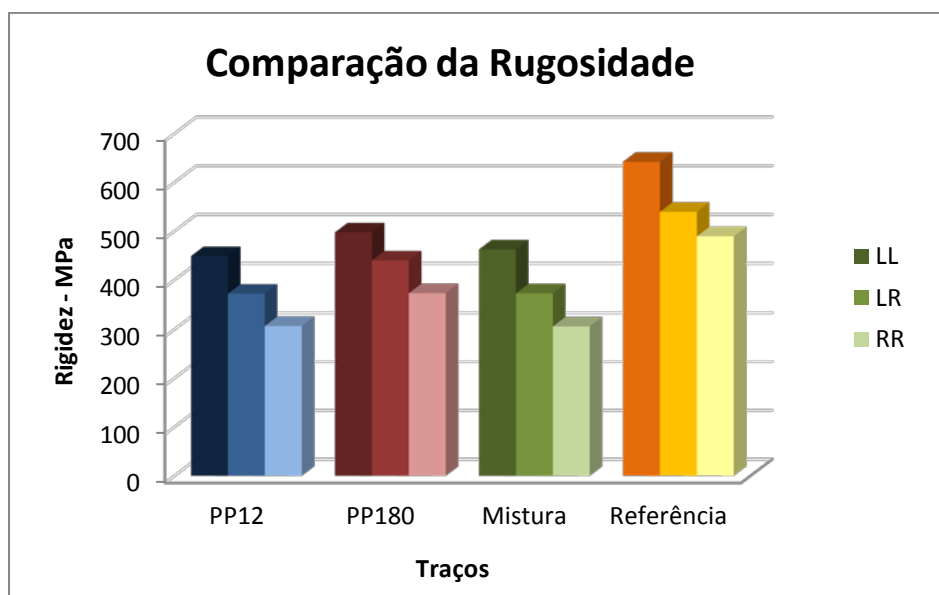


Figura 5.11 - Comparação da rigidez conforme a rugosidade aplicada

Em todos os traços a aplicação da rugosidade na superfície reduziu a rigidez, portanto, com as placas RR tem-se um melhor resultado. A diferença entre as placas LL e RR chega a 30% de redução de rigidez.

Analisando novamente o gráfico do traço PP12 na Figura 5.6, por mais que se tenha uma diferença entre os valores nas moldagens, verifica-se que para as placas RR não há uma diferença tão grande entre os valores de rigidez. Assim, para este ensaio, pode-se concluir que o traço PP12 com rugosidade RR é a melhor opção para utilizar na fabricação das almofadas.

As placas após os ensaios se mantiveram íntegras, apenas as placas do traço de referência apresentavam algumas trincas. Nas placas com rugosidade verificou-se um esmagamento superficial conforme apresenta a Figura 5.12.

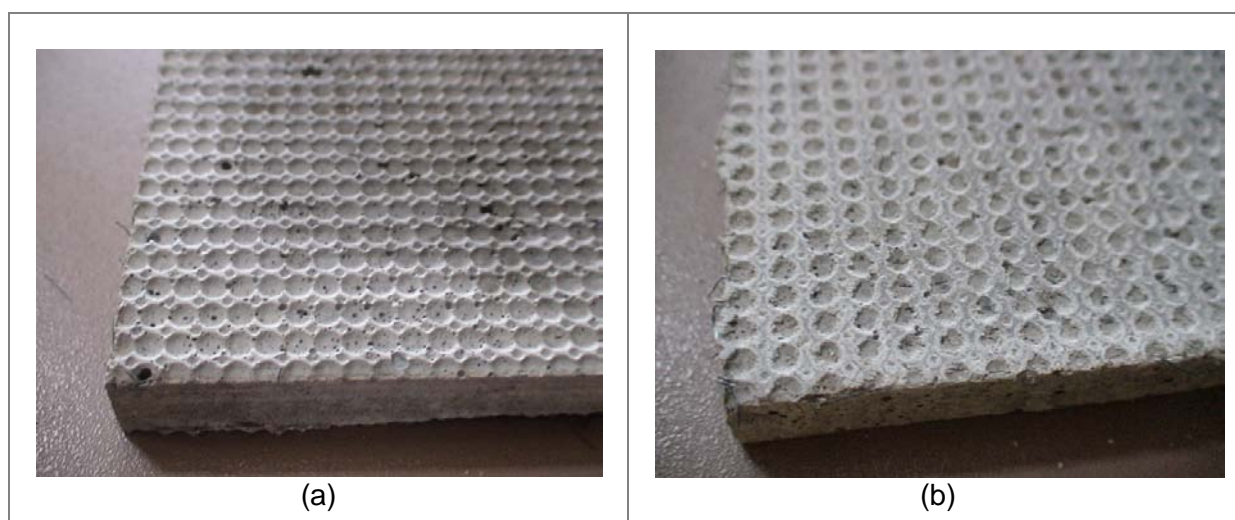


Figura 5.12 - Detalhe da placa (a) antes e (b) depois do ensaio

5.2.2. Ensaio de Força Concentrada

Para os testes de força concentrada, o objetivo era avaliar a capacidade de acomodar imperfeições nas almofadas para cada traço.

Foram ensaiados os três traços especificados e o traço de referência para comparação. Para análise foram ensaiadas dez tiras de cada traço e realizou-se uma análise dos gráficos força x deslocamento. Os resultados de cada traço são apresentados separadamente nas Figura 5.13, Figura 5.14 e Figura 5.15.

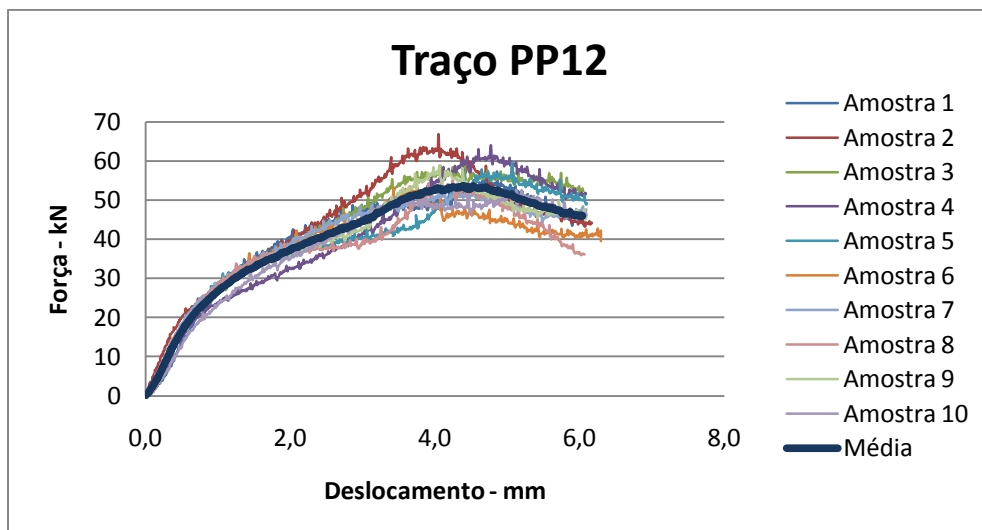


Figura 5.13 - Resultados de força concentrada para o traço PP12

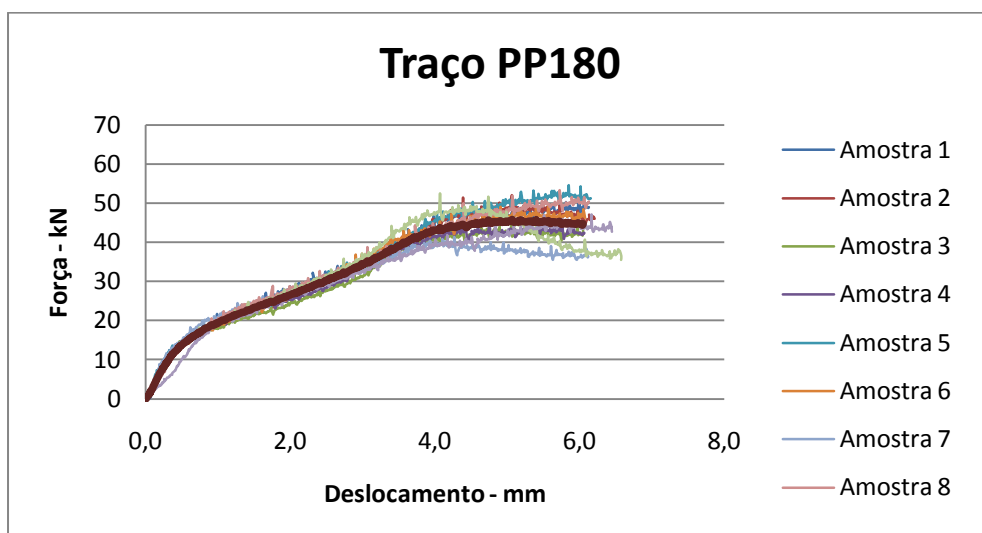


Figura 5.14 - Resultados de força concentrada para o traço PP180

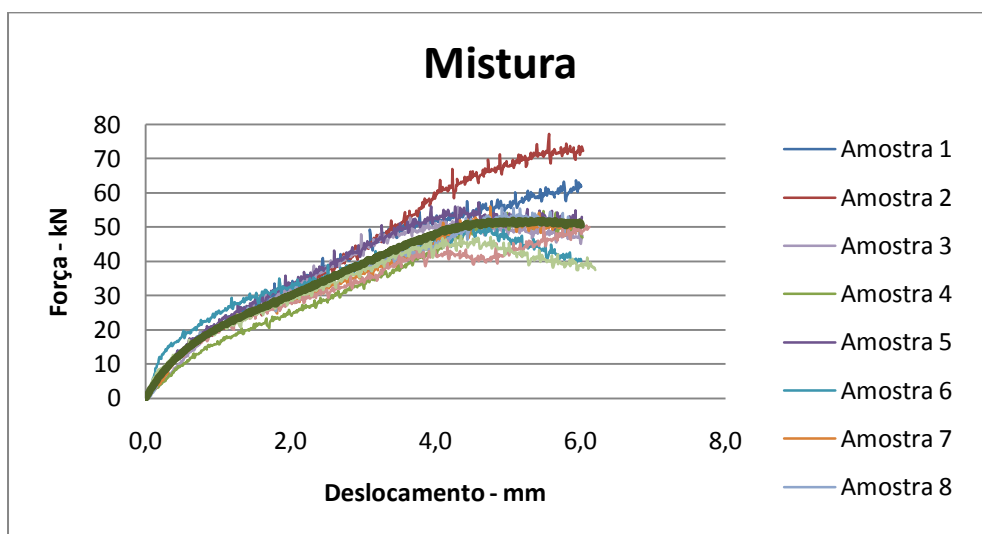


Figura 5.15 - Resultados de força concentrada para o traço Mistura

Os três traços tiveram comportamentos bem parecidos no ensaio, sendo que a Figura 5.16 mostra as tiras no momento do ensaio. Na Figura 5.16(d) percebe-se fissuras no vão central da tira. Essas fissuras surgiram devido à tensão de tração que passa a atuar devido ao confinamento da parte central.

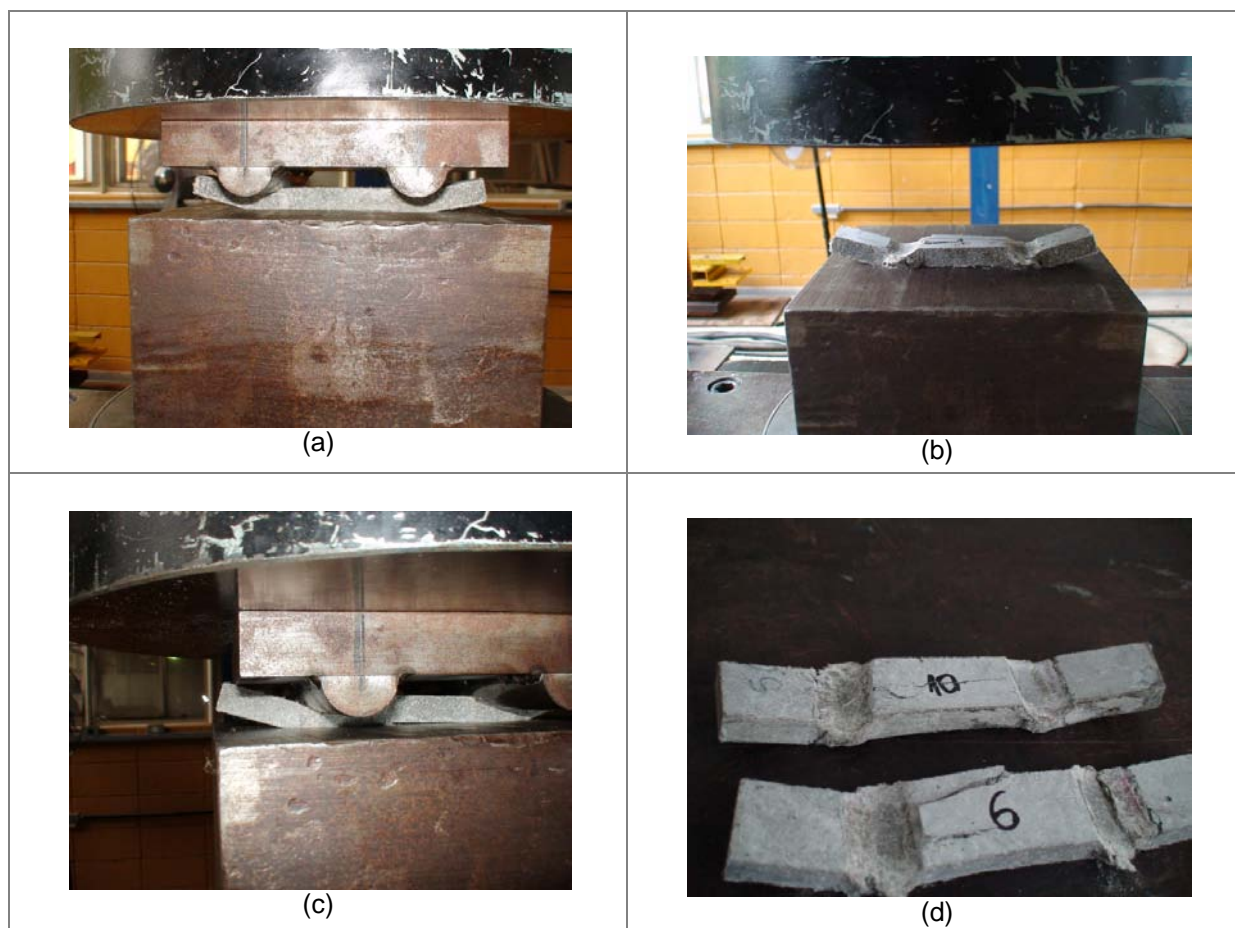


Figura 5.16 - (a) Amostra no ensaio; (b) Amostra após o ensaio; (c) Detalhe do ensaio na amostra; (d) Detalhe da amostra após o ensaio

O traço de referência foi ensaiado como os outros traços e os resultados estão apresentados no gráfico 5.17.

Analisando o gráfico percebe-se que a partir de 1mm de deslocamento, as curvas passam a ser diferenciadas. Isso ocorre porque no traço de referência há pouca tenacidade, e logo nos primeiros deslocamentos aparecem trincas na placa nos pontos de aplicação da carga. A Figura 5.18 mostra a evolução do ensaio com as tiras do traço de referência.

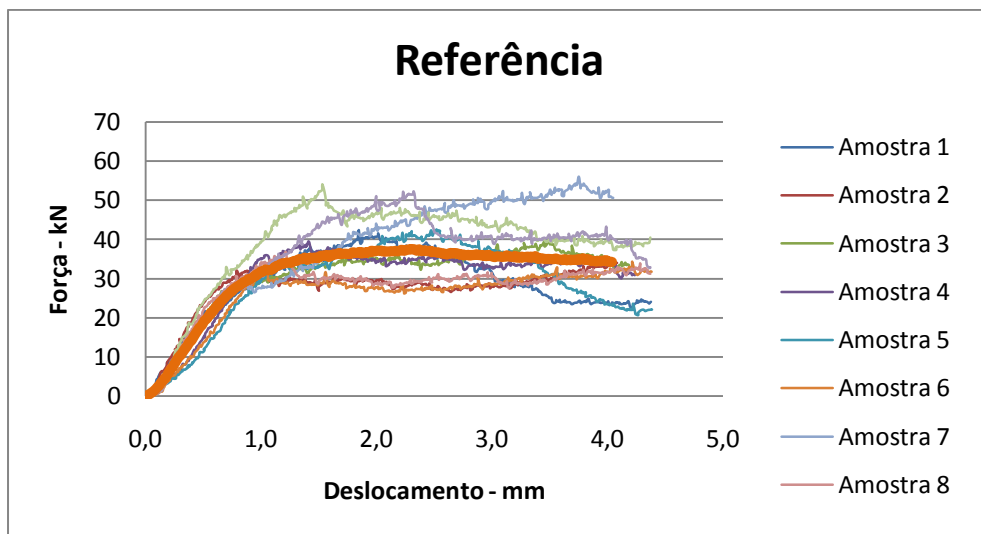


Figura 5.17 - Resultados de força concentrada para o de referência

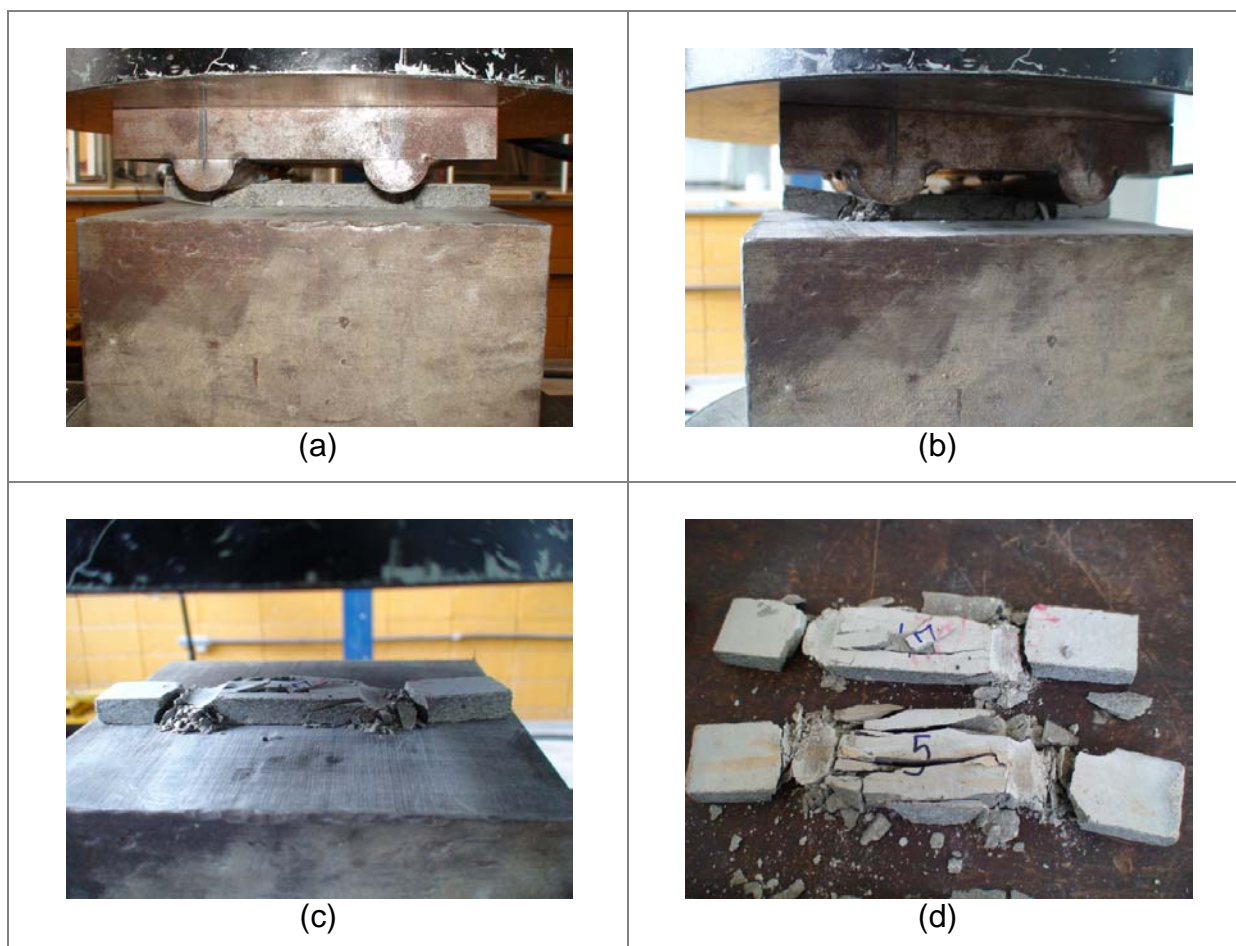


Figura 5.18 - (a) Amostra no ensaio; (b) amostra após o ensaio; (c) detalhe do ensaio na amostra; (d) detalhe da amostra após o ensaio

Para comparação dos resultados montou-se um gráfico com as médias dos valores encontrados nos traços. (Figura 5.19)

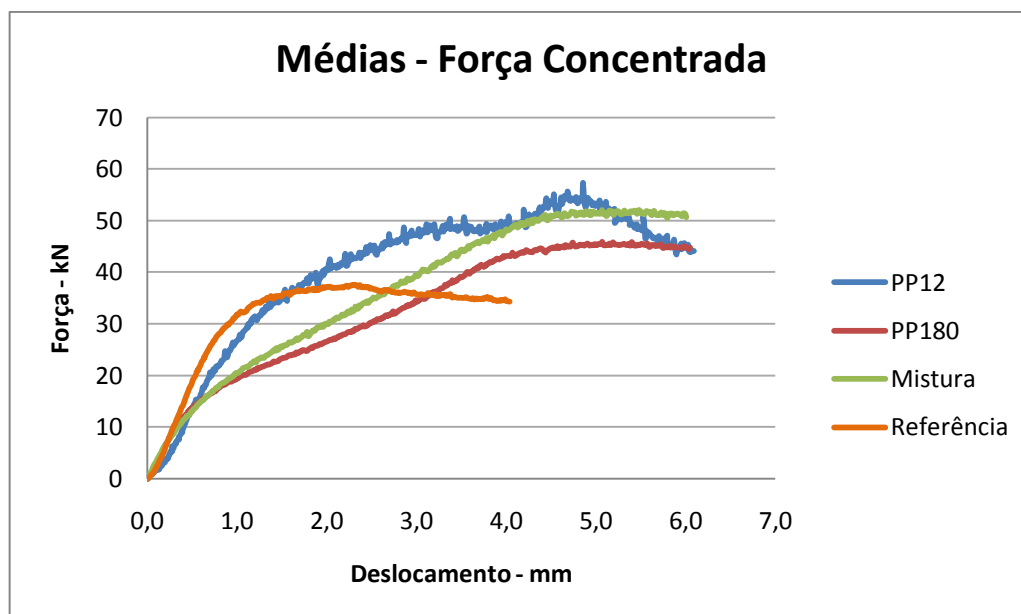


Figura 5.19 - Curvas médias dos resultados de força concentrada

Os traços de PP180 e Mistura obtiveram um comportamento parecido. O traço PP12 obteve um comportamento melhor que os outros dois, já que este resistiu a uma carga maior na evolução do carregamento. Além disso, teve um comportamento bem parecido com o início do carregamento do traço de referência (até o ponto da primeira trinca) e depois seguiu absorvendo mais carregamento.

As curvas dos traços PP12 e PP180 tendem a estabilizar a partir dos deslocamentos de 4,5 mm, concluindo que a partir deste ponto apresenta o valor de carga última de compressão. Tomando o valor de 4,5mm como referência, tem-se para os valores de carga última para os traços apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Resultado da força última (kN)

PP12	PP180	Mistura
53,7	44,6	50,9

Comparando os valores percebe-se que o traço PP12 obtém o melhor resultado, resistindo a um carregamento maior que os demais. Observa-se também que as curvas PP180 e Mistura sofrem uma mudança de inclinação no início do carregamento. Acredita-se que houve o início de fissuração neste ponto, o que não foi observado no traço PP12, tendo assim um melhor comportamento.

5.2.3. Ensaio de Flexão

Foram ensaiados os três traços especificados e o traço de referência para comparação. Para análise foram ensaiadas 6 tiras de cada traço e realizou-se uma análise dos gráficos força x deslocamento. Os resultados de cada traço serão apresentados separadamente, depois, através das médias dos resultados, uma comparação entre eles. O objetivo era observar o comportamento da argamassa modificada após as fissurações. Os resultados encontrados para cada amostra estão expostos nas Figura 5.20, Figura 5.21 e Figura 5.22.

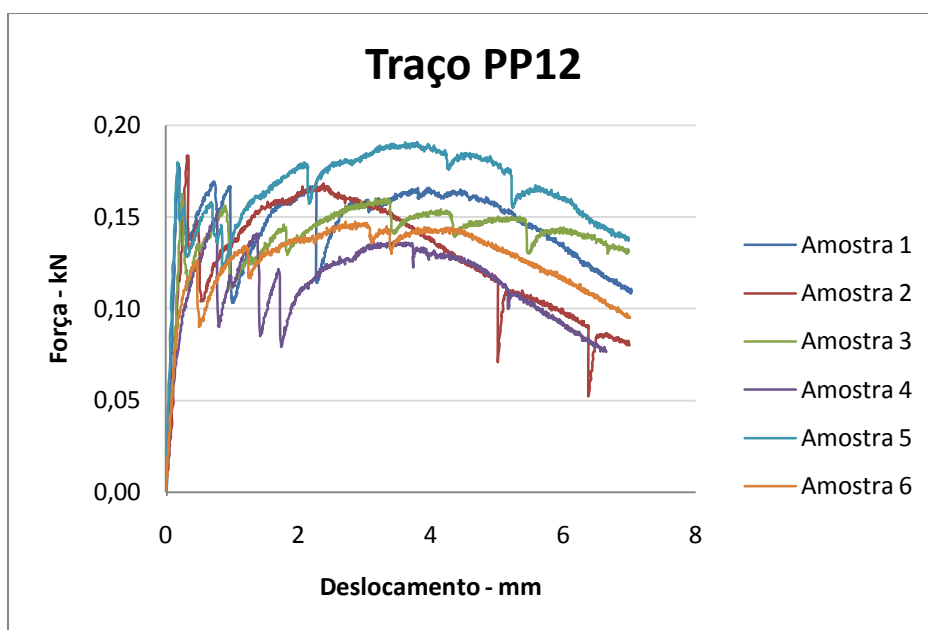


Figura 5.20 - Resultados de flexão para o traço PP12

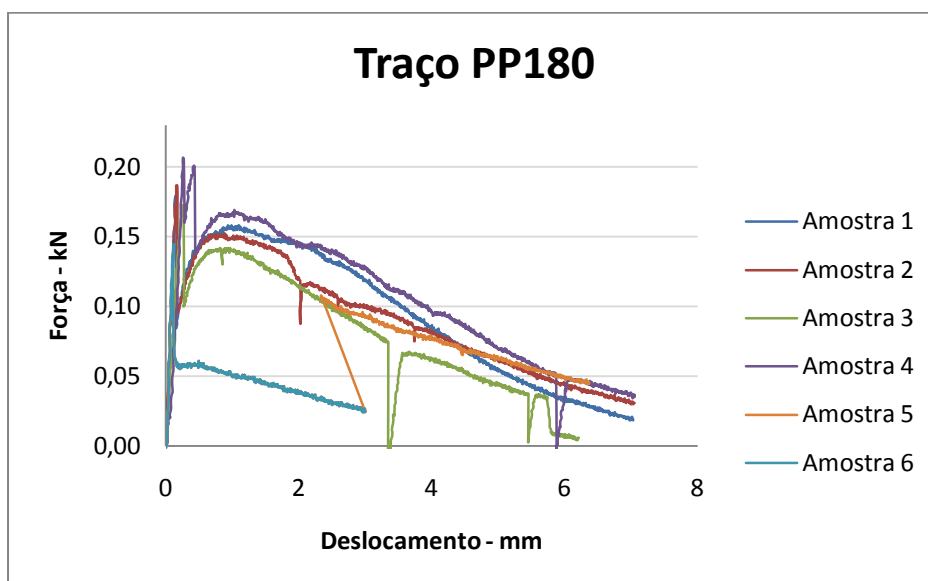


Figura 5.21 - Resultados de flexão para o traço PP180

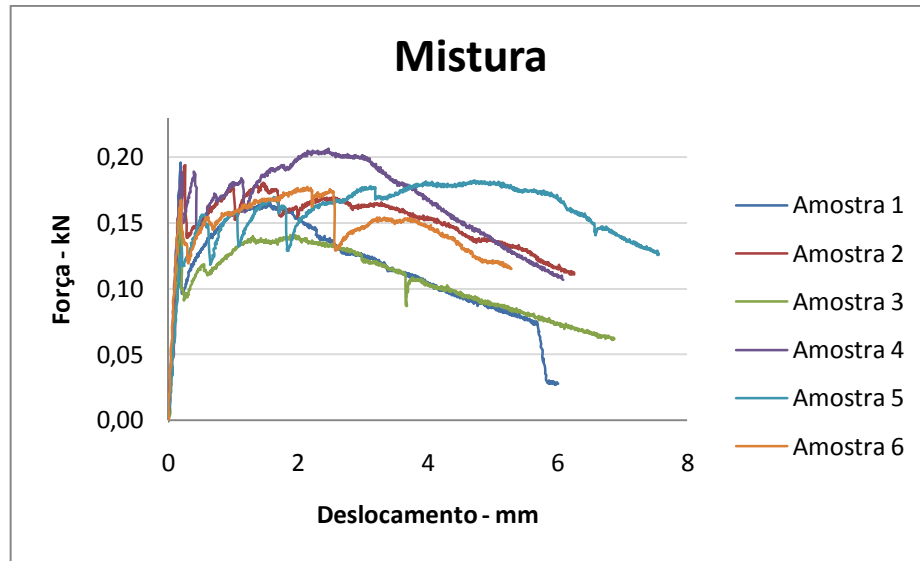


Figura 5.22 - Resultados de flexão para o traço Mistura

Como pode-se observar, todos os traços modificados apresentaram um aumento de força após a primeira fissura. Os traços PP12 e Mistura apresentam melhores resultados, observando um maior ganho de carregamento com a evolução do ensaio.

Em duas amostras do traço PP180 verificou-se no ensaio que a amostra não conseguiu recuperar o carregamento após a primeira fissura. Acredita-se que houve escorregamento das fibras no local da fissura.

Realizou-se o ensaio com o traço de referência para se obter o valor da carga da primeira fissura, e compará-la com os traços modificados. Assim, tem-se na Figura 5.23 esses resultados (para melhor visualização tem-se uma ampliação na escala horizontal).

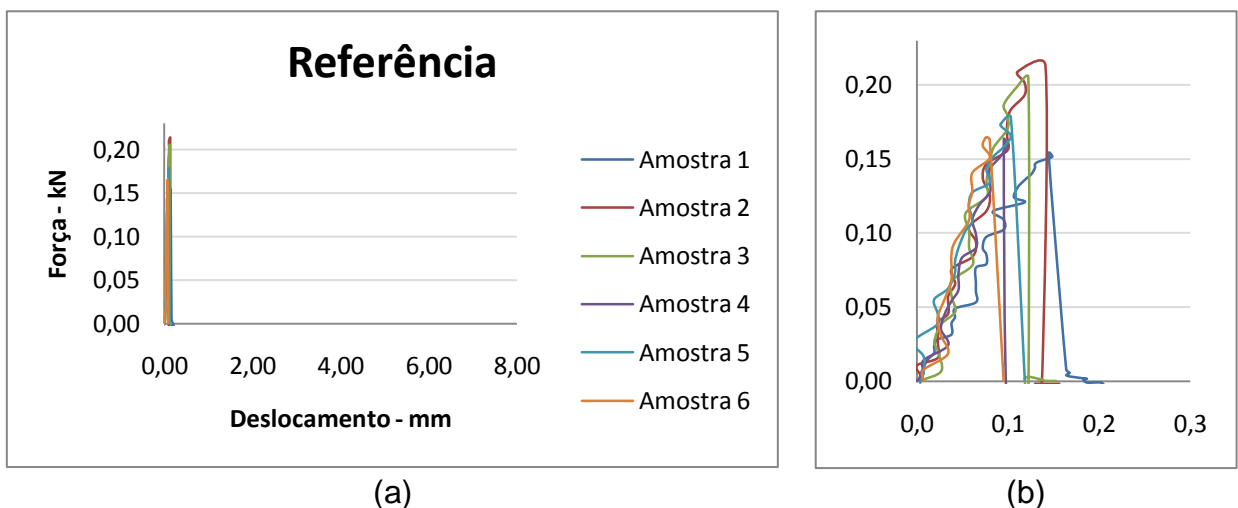


Figura 5.23 - (a) Resultados de flexão para o traço de referência; (b) Detalhe do gráfico nos primeiros deslocamentos

Comparando os valores de carga última com os traços modificados, percebe-se que os valores são bem próximos, sendo então o aparecimento das primeiras fissuras nos traços modificados provenientes da ruptura da matriz cimentícia.

As Figura 5.24 mostra uma amostra do traço PP12 sendo ensaiada.



Figura 5.24 – Foto do ensaio de flexão

Para se ter uma melhor comparação entre os traços modificados, foi calculada a tenacidade de cada amostra. Os resultados são apresentados na Tabela 5.9 e na Figura 5.25.

Tabela 5.9 - Resultado dos índices de tenacidade

	PP12	PP 180	Mistura
I5	7,29	4,89	4,06
I10	14,44	9,81	8,37
I20	28,03	18,68	17,60

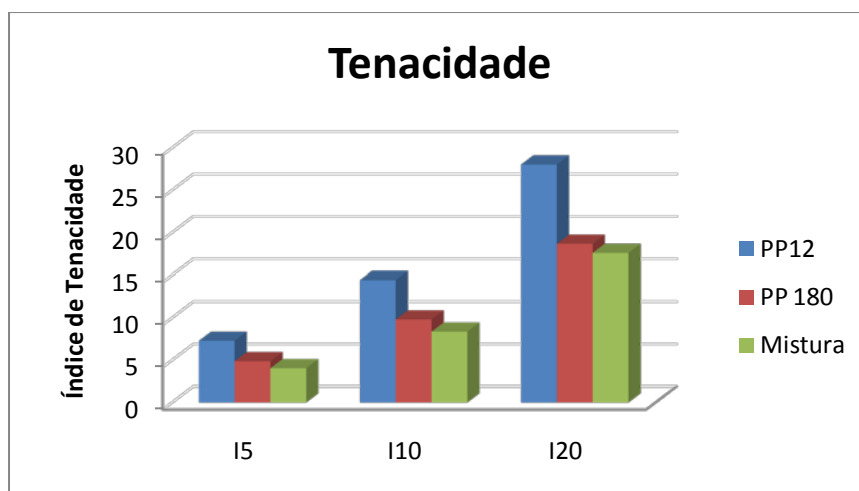


Figura 5.25 - Resultados dos índices de tenacidade

Verifica-se claramente que os valores encontrados para o traço PP12 são maiores quando comparados com os valores dos outros traços, chegando a um aumento de 40%. Este comportamento é satisfatório para a argamassa.

5.2.4. Carregamento Cíclico

Os resultados deste ensaio estão sendo apresentados por último, pois a escolha do traço estudado foi baseada nos resultados dos ensaios anteriores. Como era um ensaio muito demorado, não teria como fazê-lo com os quatro traços, optou-se por acompanhar apenas o comportamento do traço que obteve melhor resultado em função das resistências dos corpos-de-prova cilíndricos e das rigidezes apresentadas nos ensaios monotônicos. Portanto, o ensaio foi realizado apenas para o traço PP12 e o para o traço de referência para comparação dos resultados.

Para este ensaio foram ensaiadas 18 placas de cada traço, sendo seis placas de cada rugosidade.

Como mencionado no capítulo 4, estudou-se a rigidez encontrada para o carregamento de 450kN (20MPa) e 225 kN (10MPa). Na Figura 5.26 apresenta-se um dos resultados encontrados no ensaio com o cálculo das rigidezes.

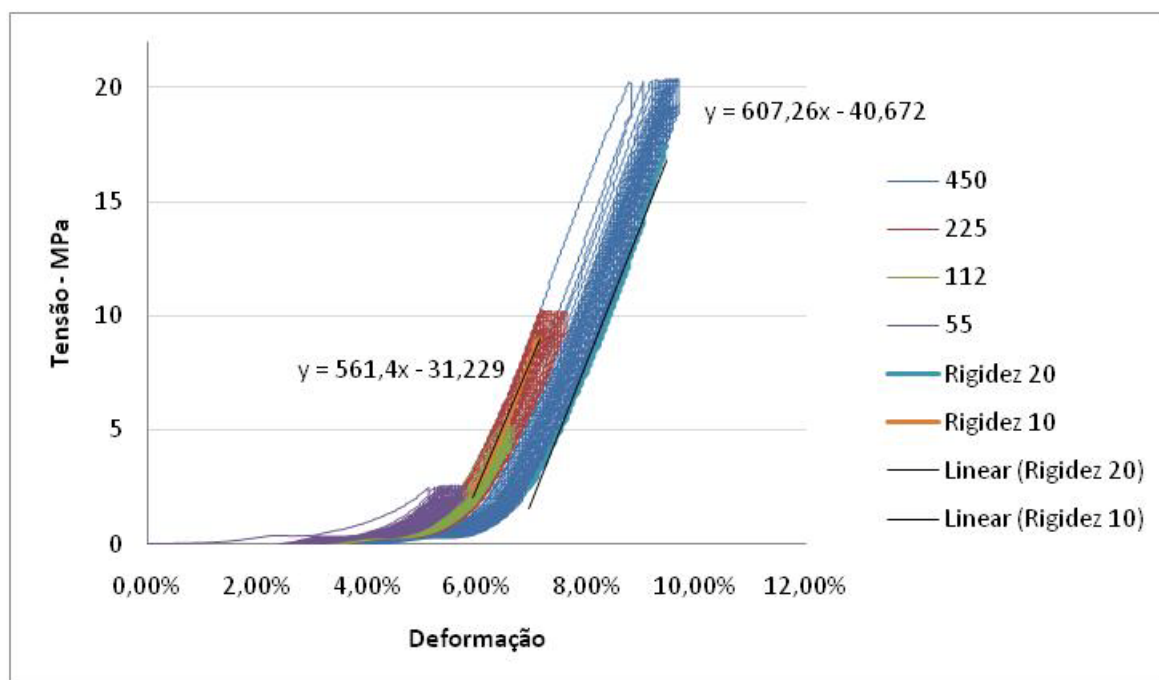


Figura 5.26 - Exemplo do cálculo de rigidez para ensaio cíclico

Primeiramente, analisam-se as rigidezes encontradas. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Resultados das rigidezes para o ensaio de carregamento cíclico

Placas	Referência		PP12		
	Rigidez 10 Mpa	Rigidez 20 Mpa	Rigidez 10 Mpa	Rigidez 20 Mpa	
LL	1	597,4	577,8	532,6	555,1
	2	598,6	597,7	565,1	575,8
	3	579,2	555,1	561,5	569,3
	4	555,7	577,6	541,3	581,9
	5	556,8	577,3	499,7	556,7
	6	-	-	491,4	559,7
		577,5	577,1	531,9	566,4
LR	1	575,3	644,3	559,5	609,2
	2	561,3	630,1	561,1	607,3
	3	622,3	596,9	522,4	543,4
	4	562,8	636,6	532,6	585,3
	5	601,7	602,8	571,4	603,9
	6	576,3	604,7	604,8	573,7
		583,3	619,2	558,6	587,1
RR	1	551,7	674,3	592,7	654,3
	2	571,1	628,8	577,3	637,7
	3	681,2	650,2	588,2	592,2
	4	631,9	633,2	589,7	595,6
	5	622,4	624,5	497,2	574,6
	6	610,9	625,9	498,5	578,5
		611,5	639,5	557,3	605,5

Os valores foram próximos uns dos outros, portanto, para se ter uma noção melhor dos valores encontrados, optou-se por colocar na Tabela todos os resultados encontrados.

Para uma melhor visualização tem-se os gráficos de comparação entre os traços da rigidez de 10MPa e de 20MPa (Figura 5.27).

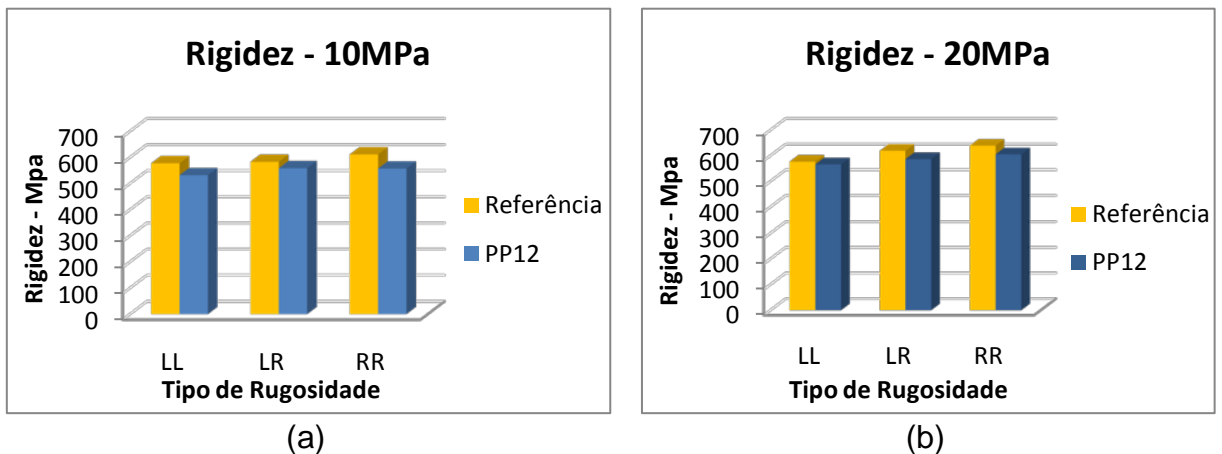


Figura 5.27 - Resultados de rigidez com carregamento de 10MPa e 20MPa

Observando as médias dos valores encontrados verifica-se que o traço PP12 obteve rigidez menor que o traço de referência.

Analisando a Figura 5.28 tem-se a diferença entre as rigidezes de 10MPa e 20MPa.

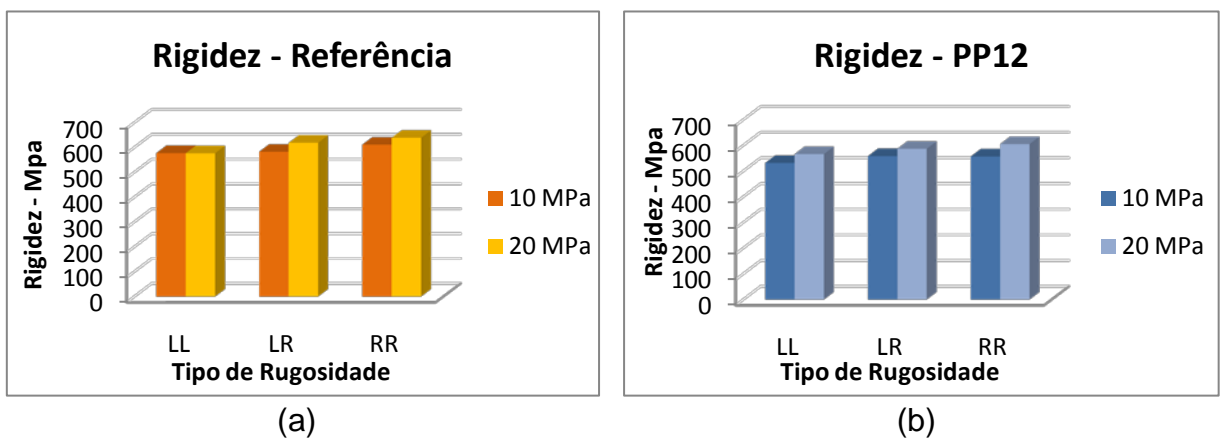


Figura 5.28 - Resultados de rigidez para o traço de referência e PP12

As rigidezes encontradas para o carregamento de 20MPa são maiores que as de 10MPa. Isso se deve porque a amostra, além de ter sofrido os carregamentos cíclicos de 2,5MPa e 5MPa igual a de 10MPa, também recebeu todo o cíclico de 10MPa, portanto, a amostra está mais compactada.

Analisando os valores encontrados, comparando as rugosidades, observa-se na Figura 5.29 que praticamente não houve diferença.

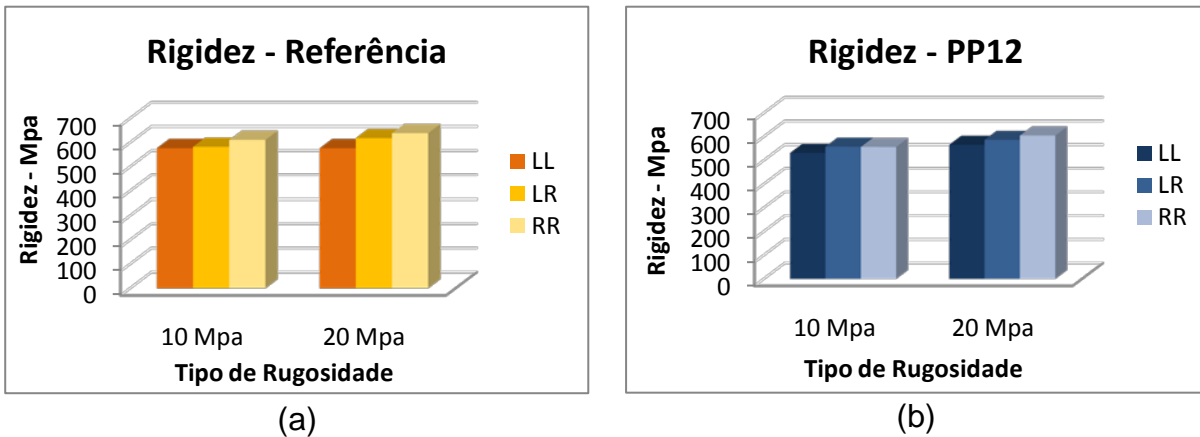


Figura 5.29 - Resultados de rigidez comparando as rugosidades aplicadas

Acredita-se que essa diferença foi baixa devido as placas já terem sofrido acomodações dos carregamentos anteriores, portanto a rugosidade não influenciou tanto nos resultados. Fazendo uma análise da Tabela 5.10 percebe-se que os valores encontrados não sofreram diferenças por causa da rugosidade.

Portanto, este ensaio não possibilitou concluir sobre a rigidez das almofadas em relação às rugosidades. O que se pode afirmar é que a rigidez aumenta com o aumento dos ciclos de carregamento e que as placas com traço PP12 são mais deformáveis.

Além da rigidez, também foram analisados os afundamentos acumulados conforme exemplificado no capítulo 4. Analisando primeiramente a diferença entre as tensões de 20MPa e 10MPa tem-se na Figura 5.30:

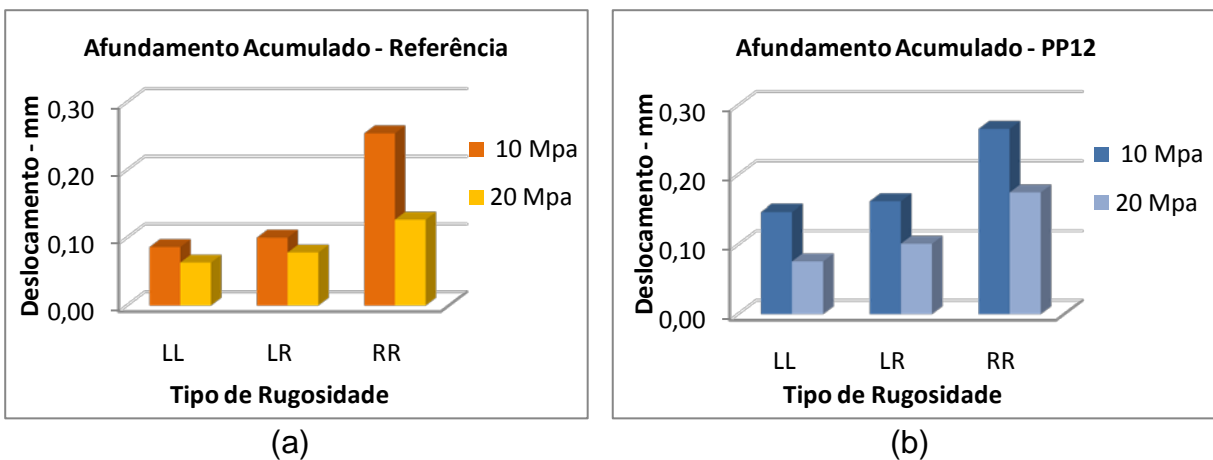


Figura 5.30 - Resultados de afundamento acumulado para o traço de referência e PP12

Através dos resultados percebe-se que como o carregamento de 10MPa sofreu uma maior plastificação, isso se deve porque esse carregamento foi aplicado antes do carregamento de 20MPa, portanto, para o carregamento de 20MPa a amostra já estava bem deformada. Isso também se concluiu nos resultados de rigidez que foram maiores para o carregamento de 20MPa.

Comparando os traços com e sem modificação, pode-se observar o comportamento na Figura 5.31.

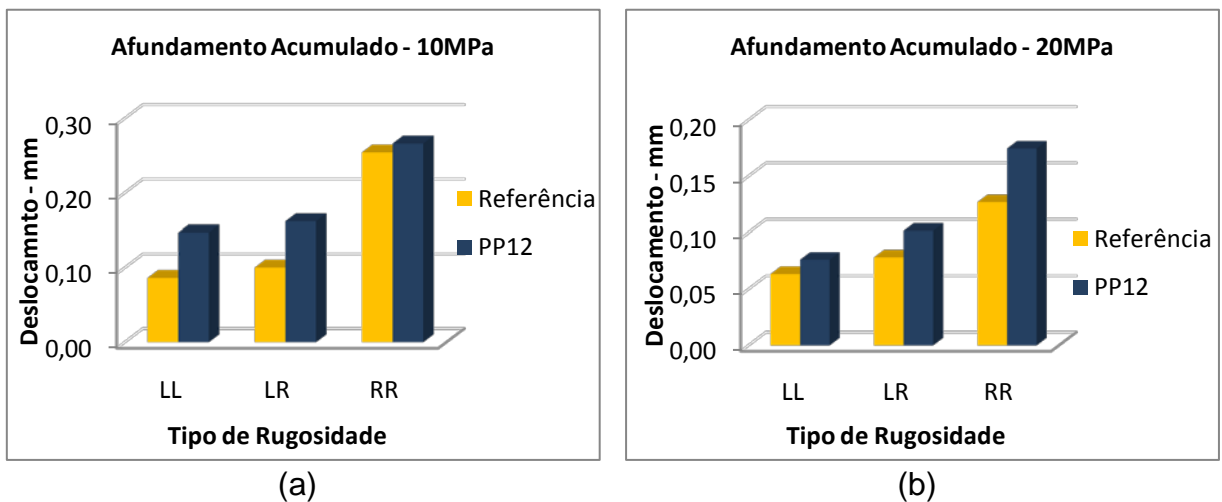


Figura 5.31 - Resultados de afundamento acumulado com carregamento de 10MPa e 20MPa

Analisando os gráficos percebe-se uma deformação maior nas placas de traço PP12, como se esperava, já que seu propósito é ser mais deformável.

Com os resultados encontrados de afundamento, também fez-se uma comparação entre as rugosidades na Figura 5.32.

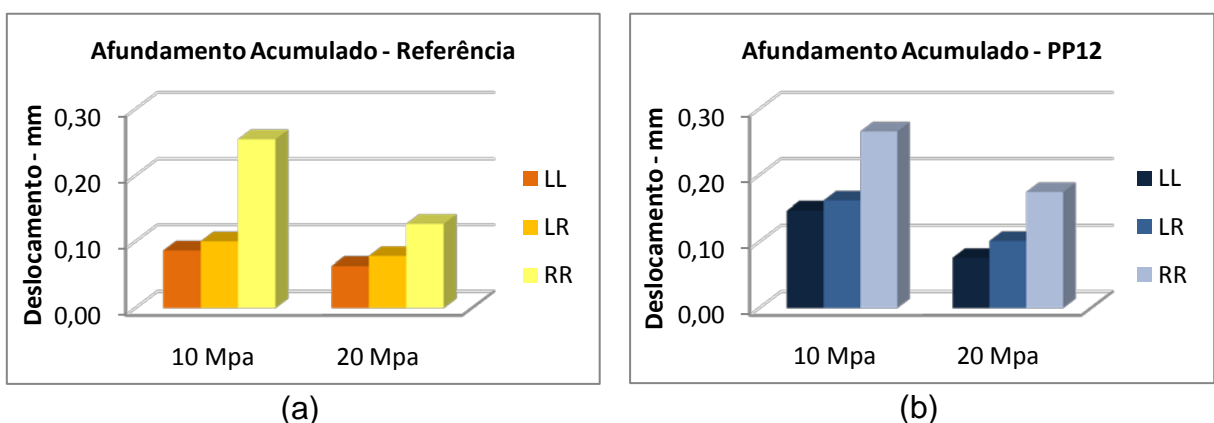


Figura 5.32 - Resultados do afundamento acumulado comparando as rugosidades aplicadas

Entre os dois carregamentos houve um deslocamento bem maior nas placas com rugosidade aplicada, sendo isso um ponto bem positivo para ser utilizada nas placas.

Comparando esses resultados de rigidez com os encontrados por Siqueira (2007), percebe-se que os valores deles são bem menores. Comparando com o traço considerado por Siqueira (2007) como o melhor para aplicação (que obteve 363MPa de rigidez), percebe-se que este valor para o traço PP12 é bem maior (566MPa). Uma possível explicação por essa diferença é que SIQUEIRA (2007) modificou a velocidade de carregamento para cada ciclos de carregamento, aumentando a velocidade e mantendo constante o tempo de cada carregamento, ou seja, para o carregamento de 5MPa utilizou-se o dobro da velocidade utilizada pelo carregamento de 2,5MPa. Porém, para esta pesquisa considerou a velocidade constante para todos os carregamentos, pretendendo assim aproximar mais o ensaio da realidade dos carregamentos em almofadas de apoio.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões da pesquisa estão sendo apresentadas separadamente em relação ao material compósito e ao comportamento da almofada.

Das análises dos ensaios de caracterização observa-se que os valores encontrados para os traços modificados não apresentaram grandes diferenças. As conclusões estão relacionadas a seguir.

- a) Os valores de resistência à compressão das amostras dos compósitos estão em torno de 41MPa e para o traço de referência é de 79,5MPa. Assim, houve uma redução de aproximadamente 48% do valor de resistência do traço modificado em relação ao traço de referência. Para a utilização como almofada de apoio, este valor em torno de 41MPa pode ser considerado suficiente;
- b) para os ensaios de tração, os valores encontrados para os traços modificados e o traço de referência estão bem próximos, da ordem de 3,0MPa, sendo sua diferença pouco significativa;
- c) os módulos de elasticidade dos compósitos chegaram a uma redução de 45% em relação ao traço de referência, chegando a 12,8MPa. Esse resultado foi satisfatório em função da redução obtida.

Dos ensaios de placas, pode-se concluir que:

- a) para os ensaios de carregamento monotônico nas placas observou-se claramente a redução da rigidez da almofada com a aplicação da rugosidade em ambos os lados (RR). Comparando as placas LL e as RR a diferença chegou a mais de 30%, o que permite concluir que a aplicação da rugosidade em ambos os lados possibilita uma redução significativa deste parâmetro;
- b) com relação aos traços utilizados, no caso do carregamento monotônico, o melhor comportamento foi observado com o traço PP12. Apesar deste traço apresentar uma variação nos resultados entre as moldagens, para a

rugosidade RR essas diferenças não foram muito grande ou seja, para os resultados do traço PP12 e rugosidade RR os valores encontrados foram satisfatórios. Para este traço, PP12 com rugosidade RR, obteve 307MPa, que é 37% menor que a encontrada para o traço de referência, RR (490MPa);

- c) nos resultados de força concentrada e flexão, também o traço PP12 apresenta melhores resultados. No ensaio de flexão este traço resultou tenacidade 55% maior que os outros compósitos. Observa-se uma melhor capacidade de carga do traço PP12 em relação aos outros traços, no ensaio de força concentrada;
- d) no ensaio de carregamento cíclico, pretendia-se observar o comportamento da amostra com repetidos carregamentos. Com um maior ciclo de carregamento a rigidez tende a aumentar, ou seja, perder a capacidade de deformação elástica. Para as rigidezes do traço PP12 esse aumento é em torno de 5% para as placas com rugosidades;
- e) através dos afundamentos acumulados observou-se que o traço PP12 apresentou boa deformação comparada com o traço de referência, chegando a 37% maior que o traço de referência. Observa-se também que com o aumento dos ciclos de carregamento o material tende a deformar menos elasticamente. Para este ensaio também se conclui que houve melhor comportamento das placas com rugosidade RR, sendo 120% maior o afundamento acumulado comparado com as placas LL.

Assim, com base em todos os resultados, conclui-se que o traço PP12 foi o que se comportou melhor para ser utilizado como argamassa na confecção de almofadas de aparelho de apoio, e que o melhor comportamento se deu com a aplicação de rugosidade em ambos os lados da almofada.

Sugestões para trabalhos futuros:

- a) estudar a adição de fibras de polipropileno mais curtas, da ordem de 6mm, verificando se melhora a trabalhabilidade da argamassa.
- b) estudar a influência de incorporadores de ar, visando tornar o material mais deformável.

REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **Introdução a materiais reforçados com fibras e a tecnologia de CVR**. Simpósio Internacional – Componentes pré-moldados em cimento reforçado com fibras de vidro. São Paulo : EPUSP / IBRACON, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)**, ASTM C1018/94^a, Philadelphia, USA.

ARAÚJO, C. T. F. **Estudo do Comportamento de Juntas de Argamassa Reforçadas com Fibras de Polipropileno**. 2005. 94p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**, ABNT NBR 9776:1987, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassas e concretos - Determinação da resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos: método de ensaio**, ABNT NBR 7222:1994, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**, ABNT NBR 7215:1996, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismático**, ABNT NBR 12142:1991, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto: método de ensaio**, ABNT NBR 5739:1994, Rio de Janeiro.

BALAGURU, P. **Contribution of fibers to crack reduction of cement composites during the initial and final setting period**. ACI materials Journal, 1994.

BALDISSERA, A. **Estudo experimental de uma ligação viga-pilar de concreto pré-moldado parcialmente resistente a momento fletor**. 2006. 149f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

BARBOZA, A. S. R. (2002). **Comportamento de juntas de argamassa solicitadas à compressão na ligação entre elementos pré-moldados**. São Carlos. 154p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.

BARBOZA, A. S. R.; SOARES, A. M. M. ; EL DEBS, M. **A new material to be used as bearing pad in precast concrete connections**. In: Perspectives on innovation in architecture, engineering and construction, 2001, Loughborough.: CICE/Loughborough University, 2001. p. 81-91.

BELLUCIO, E. K. ; Lima, V. S. G.; EL DEBS, M.K. . **Análise da rugosidade superficial em almofadas de argamassas para ligações de concreto pré-moldado**. In: 51º Congresso Brasileiro do Congresso, 2009, Curitiba - PR. Anais do 51º Congresso Brasileiro do Congresso, 2009.

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

DANTAS, F.A.S. **Concreto de baixo consumo de cimento reforçados com fibras: Propriedades e análise da fissuração devido à retração**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

EI DEBS, M. K.; BARBOZA, A. S. R. ; SOARES, A. M. M. **An alternative material for bearing pad in precast concrete connections.** In: 17th International Congress Of The Precast Concrete Industry, Istanbul. 2002.

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

FIGUEIREDO. A. D. **Concreto com fibras de aço.** Boletim Técnico, BT/PCC/260 – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JELIDI, A. et al.. **Development of compisites reinforced by polyester fibres.** **Mateial Research Society**, vol. 211, p275-281, 1991.

JIANG, W.; ROY, D. M. **Mechanical behaviour of advanced cementitious materials.** 9th International Congress on the Chemistry of Cement. p. 268-74. 1992.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** Editora PINI. São Paulo, 1994.

MIOTTO, A. M. **Ligações viga-pilar de estruturas de concreto pré-moldado: análise com ênfase na deformabilidade ao momento fletor.** 2002. São Carlos. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

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.

SHAH, S. P. **Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrixes?.** ACI Materials Journals. 88(6). p. 595-602. 1991.

SILVA, R. P. **Argamassas com adição de fibras de polipropileno -estudo do comportamento reológico e mecânico.** 2006. 191p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

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.

TAYLOR, G. D. **Materials in construction.** 2ed. London: Longman Scientific and Technical, 1994.

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Resultados dos Ensaios de Caracterização

a) Compressão Simples

Tabela A.1 – Resultados dos ensaios de compressão simples

PP12		PP180		Mistura		Referência	
1ª Mold.	31,2	1ª Mold.	45,2	1ª Mold.	38,9	1ª Mold.	83,1
1ª Mold.	33,3	1ª Mold.	45,1	1ª Mold.	38,8	1ª Mold.	79,6
2ª Mold.	45,3	2ª Mold.	40,9	2ª Mold.	39,3	1ª Mold.	78,6
2ª Mold.	49,6	2ª Mold.	40,7	2ª Mold.	38,6	1ª Mold.	86,2
3ª Mold.	44,2	3ª Mold.	39,3	3ª Mold.	43,2	2ª Mold.	68,9
3ª Mold.	41,5	3ª Mold.	39,6	3ª Mold.	42,6	2ª Mold.	80,4
Média	40,9	Média	41,8	Média	40,2	Média	79,5

b) Tração por Compressão Diametral

Tabela A.2 – Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral

PP12		PP180		Mistura		Referência	
1ª Mold.	2,64	1ª Mold.	3,11	1ª Mold.	3,29	1ª Mold.	3,2
1ª Mold.	2,71	1ª Mold.	2,81	1ª Mold.	3,75	1ª Mold.	3,0
2ª Mold.	3,05	2ª Mold.	3,06	2ª Mold.	2,95	1ª Mold.	3,3
2ª Mold.	3,40	2ª Mold.	2,68	2ª Mold.	3,19	2ª Mold.	4,2
3ª Mold.	3,58	3ª Mold.	2,38	3ª Mold.	3,64	2ª Mold.	3,7
3ª Mold.	3,50	3ª Mold.	2,81	3ª Mold.	3,65	3ª Mold.	4,2
Média	3,15	Média	2,81	Média	3,41	Média	3,60

c) Módulo de Elasticidade

Tabela A.3 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade

PP12		PP180		Mistura		Referência	
1ª Mold.	11,4	1ª Mold.	13,4	1ª Mold.	13,9	1ª Mold.	24,0
1ª Mold.	11,3	1ª Mold.	15,7	1ª Mold.	13,6	1ª Mold.	24,6
2ª Mold.	13,7	2ª Mold.	13,4	2ª Mold.	12,7	2ª Mold.	23,5
2ª Mold.	13,4	2ª Mold.	13,9	2ª Mold.	13,4	2ª Mold.	21,4
3ª Mold.	13,8	3ª Mold.	13,3	3ª Mold.	12,5	2ª Mold.	24,3
3ª Mold.	13,4	3ª Mold.	13,5	3ª Mold.	12,9	3ª Mold.	21,6
Média	12,8	Média	13,9	Média	13,2	Média	23,2

Resultados dos Ensaios de Placas

a) Carregamento Monotônico

Tabela A.4 – Resultados dos ensaios de carregamento monotônico - Traço PP12

1ª Moldagem			Média
1		314,61	
2	LL	328,39	306,54
3		276,61	
4		260,80	
5	LR	314,71	286,03
6		282,58	
7		273,01	
8	RR	274,58	268,16
9		256,88	
2ª Moldagem			Média
1		476,67	
2	LL	433,96	461,27
3		473,17	
4		399,90	
5	LR	377,68	385,92
6		380,18	
7		328,69	
8	RR	271,82	313,12
9		338,85	
3ª Moldagem			Média
1		476,67	
2	LL	433,96	579,53
3		473,17	
4		399,90	
5	LR	377,68	444,09
6		380,18	
7		328,69	
8	RR	271,82	340,10
9		338,85	

Tabela A.5 – Resultados dos ensaios de carregamento monotônico - Traço PP180

1ª Moldagem			Média	2ª Moldagem			Média
1		503,29		1		429,33	
2	LL	371,78	489,83	2	LL	488,04	505,58
3		594,42		3		599,37	
4		442,83		4		448,83	
5	LR	430,42	428,97	5	LR	460,29	451,14
6		413,65		6		444,31	
7		354,50		7		346,52	
8	RR	419,19	393,70	8	RR	335,68	352,38
9		407,40		9		374,95	

Tabela A.6 – Resultados dos ensaios de carregamento monotônico - Traço Mistura

1ª Moldagem			Média	2ª Moldagem			Média
1		494,54		1		417,81	
2	LL	409,51	433,65	2	LL	554,39	491,80
3		396,90		3		503,20	
4		378,65		4		414,71	
5	LR	342,56	352,98	5	LR	396,98	392,47
6		337,72		6		365,72	
7		287,69		7		321,91	
8	RR	277,94	285,93	8	RR	296,94	326,48
9		292,15		9		360,60	

Tabela A.7 – Resultados dos ensaios de carregamento monotônico - Traço Referência

1ª Moldagem			Média	2ª Moldagem			Média
1		693,72		1		677,36	
2	LL	579,20	635,80	2	LL	636,15	648,97
3		634,47		3		633,40	
4		519,77		4		554,90	
5	LR	561,65	535,80	5	LR	519,90	544,12
6		525,99		6		557,55	
7		479,14		7		540,13	
8	RR	494,17	472,92	8	RR	458,53	506,26
9		445,45		9		520,12	

Tabela A.8 – Resultados dos ensaios de carregamento cíclico – afundamento acumulado

		Referência		PP12	
		10 Mpa	20 Mpa	10 Mpa	20 Mpa
LL	1	0,0577	0,0699	1	0,0762
	2	0,1016	0,0635	2	0,2032
	3	0,0889	0,0572	3	0,1715
	4	0,1080	0,0508	4	0,1397
	5	0,0762	0,0761	5	0,1270
	6			6	0,1651
		0,0865	0,0635	0,1471	0,0762
LR	1	0,0952	0,0762	1	0,0635
	2	0,0445	0,0382	2	0,1524
	3	0,1460	0,1079	3	0,1397
	4	0,1333	0,0825	4	0,1270
	5	0,1010	0,1079	5	0,2223
	6	0,0826	0,0572	6	0,2667
		0,1004	0,0783	0,1619	0,1016
RR	1	0,0889	0,0317	1	0,2603
	2	0,1651	0,1016	2	0,2386
	3	0,1969	0,1651	3	0,2350
	4	0,5039	0,1715	4	0,2096
	5	0,2794	0,1398	5	0,2794
	6	0,2921	0,1524	6	0,3747
		0,2544	0,1270	0,2662	0,1746