

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

INDARA SOTO IZQUIERDO

Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para
alvenaria estrutural

São Carlos
2011

INDARA SOTO IZQUIERDO

Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para
alvenaria estrutural

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

Orientador: **Prof. Dr. Marcio A. Ramalho**

VERSÃO CORRIGIDA. A versão original se encontra disponível no Departamento de
Engenharia de Estruturas, EESC, USP.

São Carlos
2011

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

Soto Izquierdo, Indara
S718u Usos de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural /
Indara Soto Izquierdo ; orientador Marcio A. Ramalho. — São Carlos, 2011.

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, 2011.

1. Compósitos. 2. Fibra de sisal. 3. Blocos de concreto reforçados com fibras. 4. Alvenaria estrutural. 5. Módulo de elasticidade. 6. Resistência à compressão. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro INDARA SOTO IZQUIERDO.

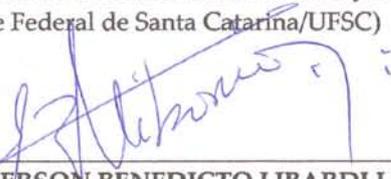
Dissertação defendida e julgada em 10/03/2011 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Titular **MARCIO ANTONIO RAMALHO** – (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADA

PARTICIPAÇÃO POR VIDEOCONFERÊNCIA

Prof. Titular **LUIZ ROBERTO PRUDENCIO JUNIOR**
(Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC) APROVADA



Prof. Dr. **JEFFERSON BENEDICTO LIBARDI LIBORIO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovada



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



Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Aos meus pais, Esperanza e Felipe,
pelo incentivo, carinho e apoio.
Vocês fazem parte deste trabalho.

Agradecimentos

A Deus por ser presença, fé e amor.

A meu pai Felipe, por ser o eixo central de minha vida, por ser minha inspiração e minha eterna guia; a minha mãe Esperanza, por estar sempre certa, por seu desvelo, desmedida preocupação e incondicional apoio.

A meu namorado Victor, pela confiança e eterno amor, pela ilusão de um futuro melhor juntos que soube sobrepuser à separação. A sua família pela força.

A minha irmã gêmea Orieta, por ser meu complemento, parte do meu corpo e alma; a metade de meus méritos, de cada logro, vitória e superação obtidas são para ela.

Ao meu orientador, professor Marcio Antonio Ramalho, pela ótima orientação durante todo o trabalho, pela pronta disponibilidade, paciência e contribuições.

Ao professor Márcio Correa pela orientação e ética profissional, por me atender nos momentos que sempre precisei.

A meu irmão Lian por ser meu protetor e resguardo no início da minha vida em São Carlos, por seu carinho e apoio; a minha cunhada Lianet, por seus apropriados conselhos que permitiram boa orientação, por compartilhar e fazer parte de minhas alegrias e tristezas e por fazer parte da minha família. A meu irmão Ariel pelo carinho.

Aos professores que transmitiram seus conhecimentos nas disciplinas.

Aos funcionários da secretaria, Sylvia, Eli, Toninho, Nadir e em especial a Rosi, pela colaboração, confiança, paciência e amabilidade.

Aos técnicos e estagiários do Laboratório de Estruturas: Amauri, Rodrigo, Fabiano, Eduardo, Romeu e ao professor Vareda, sempre dispostos em ajudar com os ensaios.

Aos técnicos do Laboratório de Informática: Masaki, Filipe e Faga, pela pronta contribuição e garantir os médios materiais para a realização do trabalho.

À fábrica Tatu, por ceder suas instalações para a fabricação dos blocos, agradecimento especial a Ederval por dedicar parte de seu tempo em me receber e auxiliar e ao engenheiro Rogério Durante, pela doação dos blocos.

À empresa Tecsal pelo fornecimento da fibra utilizada na pesquisa.

Ao professor Luiz Cláudio Ribeiro, docente da UFJF, por seu excelente curso de estatística, que foi de vital importância para a implementação dessa ferramenta neste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela concessão da bolsa de mestrado. Ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, pela permissão da realização do mestrado.

A minha tia e madrinha Fina, pelo amor desmedido e constante preocupação, por sofrer cada logro e derrota da minha vida. A minha prima-irmã Patry, por sua presença apesar da distância, pelos conselhos e dedicação imensa.

A minhas avós Allita e Carmen, por serem minha debilidade e preocupação, por serem a inspiração para ser cada dia melhor e continuar sendo o orgulho delas.

A meus tios Pepe e Mary pelo carinho, Kiki e Roxana pela preocupação e apoio, Jorge e Yamilet pela compreensão e confiança e Elo pelo amor e incentivo de adorar minha profissão.

A meus primos Yamy, Bety, Ale e Mayito pelas lindas lembranças, e Lucas por ser o mais novo integrante da família.

A Emilita e Sepúlveda, pais da Lianet, pelo apoio, constante preocupação e excelentes conselhos.

A minha amiga incondicional Elizabeth, pelos bons desejos, pelo carinho e pelas lembranças inesquecíveis nos tempos maravilhosos de estudantes universitárias.

A Dona Beth por seu esforço extraordinário de revisar o português da dissertação, por sua disponibilidade e generosidade, que foi de imensa ajuda.

A meu companheiro de sala Winston por sua ajuda e sempre disponibilidade, pelos momentos compartilhados e pelo convite a Manaus. A Daniel e ED por sua amizade e carinho.

A Charles por me fazer rir, por sua alegria e espontaneidade, a Rodrigo (Gaúcho) e Emerson pela ajuda e apoio quando sempre precisei, as meninas Juliana e Eunice pela amizade. Markus, Marcelo, Luiz, Davi, aos Rafeais: Camargo, Lins, Tamanini, a todos eles obrigada pelo companheirismo e por fazer minha estância no departamento mais feliz, como em casa.

Aos colegas mais experientes: Érica, Wagner e Ellen por estar sempre dispostos em ajudar, pela sua acolhida e conselhos. Aos colombianos Jesús Daniel, Jesús Sanchez e Fredy, pela amizade e longas conversas no café. Marcela Kataoka, Jefferson, Edmar, Hidelbrando, Denis, Fabio, Dorival, Walter, Marek, Socorro, Tatiana, Leandro, Prof. Vladimir, Leonardo, Luiz Álvaro, obrigada pelo companheirismo e colaboração.

A minha querida Marcela Filizola, por ser como uma madrinha para mim, por me brindar sua amizade, por seus conselhos experientes e práticos, pela força e ajuda sempre que foi necessária, por sua alegria e simpatia.

A Rodrigo da Mata pela ajuda e conselhos.

À estudante de graduação Heloisa, por sua ajuda constante, por sua preocupação e sempre disposição.

Aos cubanos Michel, Rosangela, Peko, Miguel, Lita, Karel (Peota), Katuiska, Leslie, por fazer de São Carlos uma cidade cubana, com dominó, salsa, festas e "rica" comida, por formar parte de uma família imensa que sempre estará unida e ligada a nossas queridas tradições nunca esquecidas. Aos argentinos, pela amizade e ser membros da "cubanada".

A Eugenia, nossa querida argentina, por me ensinar a ser melhor pessoa e mostrar o verdadeiro sentido da amizade, a Silvio por te amar e te fazer feliz.

A Regina, nossa doce professora de português, obrigada pelo carinho e extrema bondade.

A Ramona, Castellano, Karélia e Nereida, pelo carinho imenso, pelo apoio e bons desejos, por ser parte da minha família.

A Isabelita, Pedro e Rafaelito, por seu amor e constante preocupação.

Obrigada a todos!!!!!!!!!!!!!!!

Sumário

SUMÁRIO	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
Capítulo 1: Introdução	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Objetivo principal	2
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Justificativa	3
1.5 Metodologia	4
1.6 Apresentação da dissertação	4
Capítulo 2: Revisão bibliográfica	7
2.1 Planta do sisal	7
2.2 História do uso das fibras em compósitos	8
2.3 Classificação das fibras	8
2.4 Microestrutura das fibras vegetais	10
2.5 Materiais compósitos	11
2.6 Características da fibra de sisal	13
2.7 História da alvenaria	15
2.8 Bloco de concreto	19
2.9 Processo de fabricação dos blocos de concreto	19
2.10 Materiais constituintes	20
2.11 Avaliação da resistência à compressão das paredes	22
2.12 Argamassa de assentamento e sua influência na resistência à compressão da alvenaria	25
2.13 Mecanismo de ruptura dos elementos	26

Capítulo 3: Programa experimental	29
3.1 Materiais utilizados	29
3.2 Caracterização dos materiais empregados	31
3.2.1 Fibras de sisal	31
3.2.1.1 Massa específica real e aparente da fibra de sisal	32
3.2.1.2 Teor de umidade inicial da fibra de sisal	34
3.2.1.3 Absorção de água da fibra de sisal	35
3.2.2 Blocos com e sem adição de fibras.	36
3.2.2.1 Análise dimensional dos blocos	37
3.2.2.2 Absorção de água e área líquida dos blocos	38
3.2.2.3 Teor de umidade dos blocos	41
3.2.2.4 Massas específicas dos blocos	42
3.2.3 Argamassa de assentamento	42
3.3 Ensaio de resistência à compressão das unidades, componentes e elementos	44
3.3.1 Ensaio de resistência à compressão dos blocos com e sem adição de fibras	45
3.3.2 Ensaio de resistência à compressão dos prismas com e sem adição de fibras	47
3.3.3 Ensaio de resistência à compressão das mini-paredes com e sem adição de fibras	49
3.3.4 Ensaio de resistência à compressão da argamassa de assentamento	51
3.4 Módulo de deformação de prismas e mini-paredes	51
3.4.1 Módulo de deformação dos prismas	51
3.4.2 Módulo de deformação das mini-paredes	52
3.5 Produção dos blocos de concreto com e sem adição de fibras	53
Capítulo 4: Apresentação e análise dos resultados	59
4.1 Materiais utilizados na composição dos blocos de concreto	59
4.1.1 Fibras de sisal	59
4.1.2 Cimento dos blocos	61

4.1.3 Areia e pó de pedra dos blocos	62
4.1.4 Pedrisco natural e material reciclado dos blocos	64
4.2 Materiais utilizados na composição da argamassa	65
4.2.1 Cimento e cal da argamassa	65
4.2.2 Areia da argamassa	66
4.3 Propriedades físicas dos blocos	67
4.3.1 Análise dimensional dos blocos	67
4.3.2 Absorção de água dos blocos	69
4.3.3 Área bruta e área líquida dos blocos	69
4.3.4 Teor de umidade dos blocos	70
4.3.5 Massa específica dos blocos	70
4.4 Resistência à compressão dos blocos com e sem adição de fibras	71
4.5 Resistência à compressão da argamassa de assentamento	76
4.6 Ensaio dos prismas com e sem adição de fibras	76
4.6.1 Resistência à compressão dos prismas	76
4.6.2 Módulo de deformação dos prismas	80
4.7 Ensaio das mini-paredes com e sem adição de fibras	84
4.7.1 Resistência à compressão das mini-paredes	84
4.7.2 Módulo de deformação das mini-paredes	88
4.8 Análise geral sobre as unidades e elementos ensaiados	91
Capítulo 5: Conclusões e recomendações futuras	95
5.1 Principais conclusões	95
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	97
Referências bibliográficas	99
Apêndice A	109
Apêndice B	121

Lista de figuras

Figura 2.1	Planta do sisal	7
Figura 2.2	Classificação das fibras	9
Figura 2.3	Esquema de uma fibro-célula de uma fibra vegetal com dimensões aproximadas	10
Figura 2.4	Secção transversal de células da fibra vegetal	11
Figura 2.5	Pirâmides do Egito	16
Figura 2.6	Coliseu de Roma	16
Figura 2.7	Catedrais góticas	17
Figura 2.8	Resistência à compressão características da alvenaria, construída blocos vazados com relação h/t entre 2 e 4	23
Figura 2.9	Prisma de blocos de concreto ensaiado a compressão axial	24
Figura 2.10	Mini-paredes de blocos de concreto ensaiado a compressão axial	24
Figura 2.11	Mecanismo de ruptura de Hilsdorf	27
Figura 2.12	Tensões no tijolo e na junta de argamassa quando submetida à compressão axial	27
Figura 3.1	Fibras de sisal	29
Figura 3.2	Agregados utilizados para a fabricação dos blocos	30
Figura 3.3	Fibra de sisal Tipo 3 com tratamento à base de óleo mineral	32
Figura 3.4	Ensaio da fibra no frasco de 1000 ml	33
Figura 3.5	Fibras colocadas na estufa	34
Figura 3.6	Fibras de sisal submergidas em água	35
Figura 3.7	Geometria dos blocos de concreto (medidas em cm)	38
Figura 3.8	Pesagem dos blocos após o recebimento	39
Figura 3.9	Blocos sendo secos na estufa	39
Figura 3.10	Blocos imersos em água	40
Figura 3.11	Massa dos blocos determinada por meio da balança Hidrostática	41
Figura 3.12	Ensaio de consistência da argamassa	44
Figura 3.13	Corpos-de-prova da argamassa colocados na câmara úmida	44
Figura 3.14	Ensaio de resistência à compressão dos blocos	45

Figura 3.15	Ensaio de resistência à compressão dos prismas	48
Figura 3.16	Ensaio de resistência à compressão das mini-paredes	50
Figura 3.17	Ensaio de resistência à compressão da argamassa	51
Figura 3.18	Vista frontal e em planta da localização dos transdutores de deslocamento nos prismas	52
Figura 3.19	Vista frontal e em planta da localização dos transdutores de deslocamento nas mini-paredes	53
Figura 3.20	Colocação das fibras de sisal e o cimento no misturador	54
Figura 3.21	Vibro-prensa Piorotti- BLOCOPAC 1300 usada para a fabricação dos blocos	55
Figura 3.22	Descida dos contra-moldes ou pente com acionamento de vibração	56
Figura 3.23	Desmoldagem dos blocos	56
Figura 3.24	Blocos com fibras defeituosos	57
Figura 3.25	Blocos produzidos corretamente	57
Figura 3.26	Blocos colocados no interior da câmara de cura	57
Figura 4.1	Absorção de água das fibras de sisal ao longo do tempo	61
Figura 4.2	Comparação entre a areia utilizada e a areia especificada pela BS 1200 (1976).	67
Figura 4.3	Ruptura frágil dos blocos sem adição de fibras	74
Figura 4.4	Ruptura dúctil dos blocos com adição de fibras	74
Figura 4.5	Ruptura típica dos blocos sob compressão	75
Figura 4.6	Ruptura típica dos prismas sob compressão	79
Figura 4.7	Ruptura dos prismas sob compressão	80
Figura 4.8	Curva tensão – deformação do prisma sem fibras	81
Figura 4.9	Curva tensão – deformação do prisma PR20-0,5%	82
Figura 4.10	Curva tensão – deformação do prisma PR40-0,5%	82
Figura 4.11	Curva tensão – deformação do prisma PR20-1%	83
Figura 4.12	Curva tensão – deformação do prisma PR40-1%	83
Figura 4.13	Propagação de fissuras verticais de tração	87
Figura 4.14	Fissuras verticais ao longo dos septos laterais	87
Figura 4.15	Esmagamento da argamassa	88
Figura 4.16	Curva tensão – deformação da mini-parede de referência	89
Figura 4.17	Curva tensão – deformação da mini-parede MN20-0,5%	89

Figura 4.21	Curva tensão – deformação da mini-parede MN40-0,5%	90
Figura 4.22	Curva tensão – deformação da mini-parede MN20-1%	90
Figura 4.23	Curva tensão – deformação da mini-parede MN40-1%	91

Lista de tabelas

Tabela 2.1	Propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal	14
Tabela 2.2	Classificação dos blocos	19
Tabela 2.3	Resistência à compressão e traço em volume da argamassa (Fonte: BS 5628 part. 1, 1992)	26
Tabela 3.1	Série de blocos fabricados	36
Tabela 3.2	Características dos blocos e quantidade ensaiada	46
Tabela 3.3	Série dos prismas fabricados	48
Tabela 3.4	Série das mini-paredes fabricadas	50
Tabela 3.5	Características técnicas da vibro-prensa	55
Tabela 4.1	Massa específica real, aparente e teor de umidade das fibras de sisal	59
Tabela 4.2	Absorção de água das fibras no tempo	60
Tabela 4.3	Propriedades físicas e químicas do cimento empregado	62
Tabela 4.4	Características físicas da areia e do pó de pedra	62
Tabela 4.5	Análise granulométrica da areia e pó de pedra nos blocos	63
Tabela 4.6	Características físicas do pedrisco e agregado graúdo reciclado	64
Tabela 4.7	Análise granulométrica dos agregados naturais e reciclados usados nos blocos	65
Tabela 4.8	Características da argamassa de assentamento	65
Tabela 4.9	Massa específica e unitária do cimento e da cal usados na argamassa	66
Tabela 4.10	Características físicas da areia da argamassa	66
Tabela 4.11	Composição granulométrica do agregado miúdo utilizado na argamassa	66
Tabela 4.12	Largura, comprimento e altura real de cada tipo de bloco	67
Tabela 4.13	Espessuras reais das paredes longitudinais e transversais para os blocos	68
Tabela 4.14	Menor dimensão dos furos para cada tipo de bloco	68
Tabela 4.15	Absorção de água para cada tipo de bloco	69

Tabela 4.16	Valores de área líquida e bruta para os blocos	69
Tabela 4.17	Teor de umidade média para os blocos	70
Tabela 4.18	Massa específica para os blocos	71
Tabela 4.19	Resistência à compressão média e característica dos blocos com e sem adição de fibras	72
Tabela 4.20	Relação entre resistências de blocos com e sem fibras (referência)	72
Tabela 4.21	Resistência à compressão da argamassa	76
Tabela 4.22	Resistência à compressão dos prismas com e sem adição de fibras	77
Tabela 4.23	Relação entre resistências de prismas com e sem fibras (referência)	77
Tabela 4.24	Módulo de deformação dos prismas com e sem adição de fibras	80
Tabela 4.25	Resistência à compressão das mini-paredes com e sem adição de fibras	84
Tabela 4.26	Relação entre resistências das mini-paredes com e sem fibras (referência)	85
Tabela 4.27	Carga da primeira fissura e carga de ruptura das mini-paredes	86
Tabela 4.28	Módulo de deformação das mini-paredes	88

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANOVA	Análise de Variância
ARI	Altas Resistências Iniciais
a.C	Antes de Cristo
BE	Bloco estrutural
BS	British Standard
CP	Cimento Protland
C ₃ S	Silicato Tricálcico
d.C	Depois de Cristo
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
MN	Mini-parede
NBR	Norma Brasileira
PR	Prisma
PVA	Acetato de polivinila
RS	Resistência a sulfatos
SP	São Paulo
USP	Universidade de São Paulo

Lista de símbolos

A_{bruta}	Área bruta
cm	Centímetro
CV	Coeficiente de variação
E_p	Módulo de deformação dos prismas
E_{mp}	Módulo de deformação das mini-paredes
f_{bm}	Resistência média à compressão dos blocos
f_{bk}	Resistência característica à compressão dos blocos
f_p	Resistência média à compressão dos prismas
f_{mp}	Resistência média à compressão das mini-paredes
g	Grama
GPa	Giga Pascal
Kg	Kilograma
kN	Kilo Newton
MPa	Mega Pascal
m^3	Metro cúbico
mm	Milímetro
μm	Micrómetro
Sd	Desvio Padrão
V_f (%)	Percentual volumétrico em relação ao volume total
W_f (%)	Percentual em massa em relação ao volume total
V_i	Volume inicial
V_f	Volume final
°C	Grau Celsius
pH	Potencial hidrogeniônico
$\rho_{\text{água}}$	Massa específica da água
i	Argamassa de traço 1:0 a $\frac{1}{4}$:3
ii	Argamassa de traço 1: $\frac{1}{2}$: 4 a 4 $\frac{1}{2}$
iii	Argamassa de traço 1: 1 : 5 a 6
iv	Argamassa de traço 1: 2 : 8 a 9
%	Porcentagem

Resumo

IZQUIERDO, I. S. **Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

A utilização de fibras vegetais como reforço constitui um grande interesse na obtenção de novos materiais para a construção civil produto de seu baixo custo, alta disponibilidade e reduzido consumo de energia para sua produção. Este trabalho avalia a incorporação de fibras de sisal, de comprimento 20 e 40 mm, e fração volumétrica de 0,5 e 1%, em concretos para a alvenaria de blocos estruturais e determina o uso destas unidades na execução de prismas e mini-paredes. Foram realizados os testes de caracterização da fibra, blocos e argamassa de assentamento e os ensaios de resistência à compressão axial das unidades, prismas e mini-paredes. O sisal apresentou baixa massa específica aparente e elevada absorção de água, constituindo uma característica comum desse tipo de material pela grande incidência de poros permeáveis. As propriedades físicas dos blocos com e sem adição cumpriram com os requisitos das normas estabelecidas validando sua utilização. Os resultados do ensaio à compressão mostraram que as mini-paredes reforçadas com fibras obtiveram valores muito próximos ou mesmo superiores aos obtidos para as mini-paredes sem fibras, apresentando melhor desempenho que os blocos e prismas. Todos os elementos com adição mostraram um ganho da capacidade de deformação e ductilidade conferida pelas fibras, observado nas curvas tensão x deformação. O modo de ruptura dos blocos, prismas e mini-paredes de referência foi caracterizado por uma fratura brusca e catastrófica e os reforçados mantiveram suas partes unidas pelas fibras, não perdendo sua continuidade e tornando a ruptura um processo progressivo.

Palavras-chave: Compósitos. Fibra de sisal. Blocos de concreto reforçados com fibras. Alvenaria estrutural. Módulo de elasticidade. Resistência à compressão.

Abstract

IZQUIERDO, I. S. **Use of natural sisal fiber in concrete blocks for structural masonry**. 2011. Dissertation (Master of Engineering Structures) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo. São Carlos, 2011.

The use of natural fibers as reinforcement is a great interest in obtaining new materials for construction, owing of its low cost, high availability and reduced energy consumption for its production. This paper evaluates the incorporation of sisal fibers of 20 mm and 40 mm length and volume fraction of 0.5 and 1%, for concrete for masonry structural blocks, and determines the use of these units in making of prisms and mini-walls. The laboratory tests were carried to characterize physical properties the fiber, blocks and mortar, and besides axial compression tests of the units, prisms, and mini-walls. The sisal had low apparent density and high water absorption, constituting a common feature of such material by the high incidence of permeable pores. The physical properties of the blocks with and without addition complied with the requirements of standards established by validating their use. The axial compression test results showed that mini-walls reinforced with fibers obtained values very close to or even superior to those obtained for the mini-walls without fibers, showing better performance than the blocks and prisms. All elements with the addition had increased the deformation capacity and ductility afforded by the fibers, observed in the curves stress/strain. The rupture mode of blocks, prisms and mini-walls reference was characterized by an abrupt and catastrophic fracture, and elements reinforced maintained their shares together by the fibers, without losing its continuity and becoming a progressive rupture.

Keywords: Composites. Sisal fiber. Concrete block reinforced with fibers. Blockwork masonry. Modulus of elasticity. Compressive strenght.

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

O *Desenvolvimento Sustentável* é definido como um modelo econômico, político, social, cultural e ambiental equilibrado, que satisfaz as necessidades das gerações atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas próprias necessidades (EIRES, 2006).

Essa concepção começa a se formar e a se difundir juntamente com o questionamento do estilo de desenvolvimento adotado, que é ecologicamente predatório na utilização dos recursos naturais. Contudo, o desenvolvimento industrial, associado ao crescente vício de consumo, à obsessão pelos combustíveis fósseis, tais como petróleo, carvão e gás natural, e o desejo massificado pelo lucro a curto prazo, causam uma certa insensibilidade a alternativas mais sustentáveis.

A construção civil transforma entre 14% a 50% dos recursos naturais extraídos no planeta, sendo a segunda indústria responsável pela emissão de dióxido de carbono (FIORITI, 2002). Dessa forma, há a necessidade do desenvolvimento de materiais alternativos como um novo caminho para sustentabilidade. Felizmente verifica-se que gradualmente vai se fomentando a procura desses tipos de materiais e maior é a tendência dos pesquisadores de estimular a busca de novas matérias-primas que sejam provenientes de fontes renováveis e menos poluentes, seja porque está surgindo uma mudança de mentalidade da sociedade, seja por uma questão de moda ou mesmo pela simples necessidade de nova alternativa.

O custo dos materiais de construção tradicionais é bastante elevado no Brasil, o que pode ser explicado pelo alto consumo de energia e transporte. Dessa maneira, nos últimos anos, o crescente estudo de novos materiais com bom desempenho e baixo custo tem levado à utilização de fibras vegetais em substituição às fibras sintéticas, normalmente empregadas como reforço em compósitos. Os países de clima tropical, como o Brasil, apresentam abundância e diversidade de cultivos vegetais fornecedores de fibras, o que possibilita suas aplicações em elementos da

indústria da construção civil, melhorando características físicas e mecânicas e permitindo um melhor desempenho das estruturas.

Esta pesquisa tem como enfoque científico fundamental a aplicação de novos materiais alternativos para uma construção sustentável, designados por “materiais verdes” (*green materials*). Os elementos compósitos com fibras vegetais são um bom exemplo de materiais não convencionais.

O interesse pelo uso das fibras vegetais como reforço do concreto para a fabricação de blocos está vinculado ao seu baixo custo, alta disponibilidade e reduzido consumo de energia para sua produção. Além dos benefícios econômicos, elas melhoram o desempenho mecânico do material aumentando a resistência à tração, controlando a abertura e propagação das fissuras e aumentando a ductilidade, permitindo deformações relativamente grandes sem perda da integridade (SAVASTANO, 2000).

O Sisal, fibra estudada neste trabalho, é utilizada como reforço na matriz cimentícia dos blocos de concreto. Atualmente, o Brasil é o maior produtor de sisal do mundo e o estado de Bahia é responsável por 80% da produção da fibra nacional. Do sisal, utiliza-se principalmente a fibra das folhas que, após o beneficiamento, é destinada majoritariamente à indústria de cordoaria e artesanato para confecção de cordéis, sacos, alguns tipos de tecidos, reforço para cabo de arame, canos, redes, passadeiras e tapetes. Embora o uso da fibra seja mais popular na indústria de cordoaria, ela pode ter seu valor agregado multiplicado se for utilizada como reforço de compósitos. Entre outras vantagens, pode-se apontar sua abundância no Brasil, sua facilidade de cultivo, o fato de ser um material biodegradável que provém de fonte renovável, além de apresentar boas propriedades como isolante térmico e acústico. Estes fatores, aliados à alta tenacidade, resistência à abrasão e ao baixo custo, tornam o sisal uma das fibras naturais mais estudadas.

1.2 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a incorporação de fibras de sisal na produção de blocos de concreto e comparar a viabilidade do uso dessas unidades na execução de elementos de alvenaria estrutural.

1.3 Objetivos específicos

Os principais objetivos específicos deste estudo são:

- Caracterizar as propriedades físicas das fibras de sisal, visando sua aplicação como reforço de matrizes cimentícias para blocos de concreto.
- Produzir blocos estruturais de concreto ($f_{bk} > 4$ MPa) com adição e sem adição de fibras de sisal e caracterizá-los segundo as prescrições estabelecidas pelas normas.
- Realizar um estudo comparativo do comportamento mecânico dos blocos, prismas e mini-paredes com adição e sem adição de fibras de sisal através de ensaios à compressão axial.
- Avaliar a eventual melhoria do desempenho das unidades e elementos ensaiados causado pela inserção das fibras no concreto para blocos.

1.4 Justificativa

A alvenaria estrutural com blocos de concreto promove a racionalização da construção, com redução do custo final da edificação, através da eliminação de fôrmas e redução do consumo de armaduras. Além disso, produzir um bloco com a combinação de concreto e fibra de sisal pode resultar em uma unidade que apresente características mais apropriadas de resistência mecânica, rigidez, ductilidade, capacidade de absorção de energia e comportamento pós-fissuração, em comparação com o bloco produzido com o concreto simples. As fibras naturais, como reforço de matrizes frágeis à base de materiais cimentícios têm despertado grande interesse nos países em desenvolvimento, devido ao seu baixo custo, disponibilidade, economia de energia e também no que se refere às questões ambientais.

A maioria dos trabalhos consultados sobre a produção de concretos e argamassas reforçados com fibras trata apenas da utilização de fibras de aço e de polipropileno. Entre eles pode-se citar a dissertação apresentada por Thiago Figueiredo (2005): *Estudo do comportamento de juntas de argamassa reforçadas com fibras de polipropileno* e a pesquisa feita por Karla Peitl (2008): *Estudo da fluência em vigas de concreto reforçado com fibras de aço*. Dessa forma, pode-se considerar que o tema da pesquisa apresenta certo aspecto de originalidade, o que o torna ainda mais interessante.

Para alvenaria de blocos de concreto a ruptura normalmente ocorre devido à surgimento de tensões de tração no bloco. Quando se adicionam fibras em matrizes cimentícias o desempenho com relação aos esforços de tração pode ser melhorado. Isso pode ocorrer por um retardo na fissuração, porque a mesma ocorre de forma mais distribuída ou até mesmo porque o compósito mantém uma parcela de sua capacidade resistente mesmo fissurado.

1.5 Metodologia

O primeiro passo para a elaboração do trabalho foi realizar uma extensa revisão bibliográfica relativa aos temas envolvidos na pesquisa. Dessa maneira, a partir de todo o material encontrado e estudado foram compostos os capítulos iniciais da dissertação, os quais sintetizam a fundamentação teórica e contém os principais conceitos relativos ao tema da investigação.

Em seguida, foi necessário providenciar a fabricação de blocos com fibras por uma empresa especializada, neste caso a Tatu Pré-Moldados, situada em Limeira, SP, que gentilmente cedeu suas instalações para a elaboração das unidades com e sem adição de fibras.

O passo seguinte, a partir dos objetivos estabelecidos e do embasamento teórico, foi realizar os ensaios de compressão axial em blocos, prismas e mini-paredes fabricados com e sem adição de fibras, para a avaliação das propriedades mecânicas desses elementos. Esses ensaios foram realizados no Laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP¹. Em última instância são apresentados os resultados e respectivas análises dos ensaios, visando-se especialmente uma comparação entre as características mecânicas da alvenaria estrutural produzida com e sem fibras vegetais de sisal.

1.6 Apresentação da dissertação

A dissertação foi dividida em cinco capítulos: Introdução, Revisão bibliográfica, Trabalho experimental, Análise dos resultados e Conclusões e Recomendações.

O **Capítulo 1** contém uma introdução ao tema da pesquisa, os objetivos do trabalho, a justificativa e a metodologia utilizada.

O **Capítulo 2** apresenta a informação necessária a respeito da fibra de sisal tais como a sua importância como reforço, sua classificação, microestrutura e suas

¹ www.set.essc.usp.br/labestr/

características principais. Também são abordados temas ligados à alvenaria como contextualização histórica do desenvolvimento do sistema construtivo; tipos, características e classificação dos blocos de concretos segundo as normas vigentes; processo de fabricação e mecanismos de ruptura das unidades (blocos), componentes (prismas) e elementos (mini-paredes).

O **Capítulo 3** detalha o trabalho experimental, detalhando a caracterização dos materiais e os procedimentos empregados.

No **Capítulo 4** são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados em mini-paredes, primas, blocos e argamassas.

O **Capítulo 5** é dedicado às conclusões obtidas com a realização do trabalho experimental. São apresentadas algumas sugestões para futuros trabalhos que possam dar continuidade ao estudo aqui desenvolvido.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Planta do sisal

O sisal (*Agave sisalana*, família Agavaceae) é uma planta originária do México que se espalhou rapidamente para outras regiões do mundo, como África, Europa e Ásia. Esta planta é resistente ao clima seco, ao sol intenso e é cultivada em regiões tropicais e subtropicais, sendo um cultivo comum no nordeste brasileiro, principalmente nos estados da Bahia e Paraíba, os principais produtores de sisal, com quase um milhão de trabalhadores dependendo diretamente dessa fibra para tirar seus sustentos.

O ciclo de transformação da folha de sisal em fios naturais tem início aos 3 anos de vida da planta ou quando suas folhas atingem até cerca de 140 cm de comprimento, que podem resultar em fibras de 90 cm a 120 cm (Figura 2.1). As fibras representam apenas 4% a 5% da massa bruta da folha do sisal. As folhas são cortadas a cada 6 meses durante toda vida útil da planta, que é de 6 a 7 anos. Ao final desse período é gerada a haste de florescimento, a flecha, onde são formadas as sementes de novas plantas, constituindo uma característica dessa família, sua morte após essa etapa.



Figura 2.1: Planta do sisal (Fonte: <http://www.sisalrugs.co.uk>)

A retirada das fibras é feita com a descarnação, esmagamento e raspagem do cerne das folhas em conjunto com um jato de água, seguida de secagem ao ar. Esses processos podem ser efetuados usando-se equipamentos mecânicos ou artesanalmente (PICANÇO, 2005).

2.2 História do uso das fibras em compósitos

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a história da utilização de compósitos reforçados com fibras como materiais de construção tem mais de 3000 anos. De acordo com Êxodo² 5:6, os egípcios usavam palha para reforçar tijolos de barro. Além disso, existem evidências que, há cerca de 5000 anos, foram utilizadas fibras de asbesto e crina de cavalo para reforçar potes de argila e materiais cimentados. Os Persas já usavam as fibras associadas ao solo para construções de habitações, resultando em paredes com bom isolamento térmico e boa aparência estética.

Existem, no Brasil, diversas experiências do uso de matrizes à base de cimento reforçado com fibras naturais para produção de componentes construtivos, como telhas, painéis de vedação vertical, caixas de água e pias de cozinha. Em todo o mundo esses fibrocimentos alternativos já fazem parte de programas de transferência tecnológica, especialmente no que se refere a sistemas de cobertura de baixo custo. Iniciativas dessa natureza encontram grande interesse econômico e ambiental nas situações direcionadas à construção rural (SAVASTANO, 2000).

2.3 Classificação das fibras

Com base em sua morfologia, as fibras podem ser classificadas como mostra a Figura 2.2.

² Segundo livro do Antigo Testamento, escritos por Moisés na segunda metade do 2º milênio a.C.

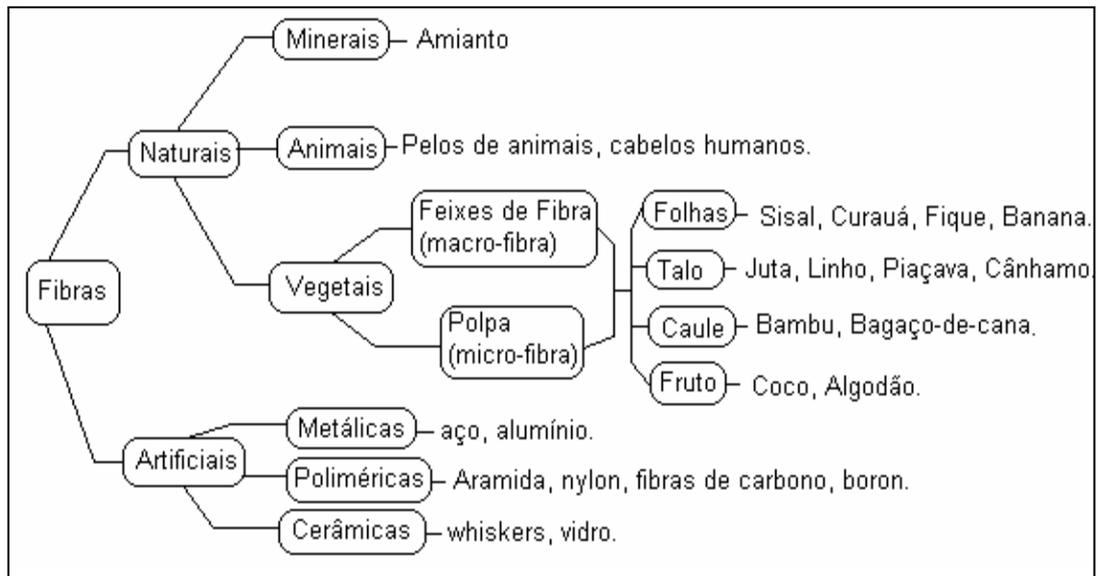


Figura 2.2: Classificação das fibras (Fonte: Picanço, 2005)

Como produto do avanço na área de engenharia dos materiais surgem as fibras artificiais, também denominadas de fibras sintéticas, decorrentes de pesquisas sobre as cadeias carbônicas dos derivados de petróleo, bem como do desenvolvimento da tecnologia têxtil. Na construção civil, as fibras que mais se destacam por seu uso em compósito são: a aramida, o nylon, o poliéster e o polipropileno.

As fibras classificadas como naturais podem ser subdivididas em vegetais, animais e minerais. As fibras minerais são formadas por cadeias cristalinas com grande comprimento, como as do asbesto. As de origem animal têm cadeias protéicas, enquanto as vegetais, natureza celulósica, tais como, as de sisal, bambu, coco e bananeira.

Os principais benefícios da utilização das fibras naturais consistem no reduzido consumo de energia envolvido em sua produção quando comparado ao necessário para a fabricação das fibras sintéticas, além da abundância e disponibilidade. Entretanto, sabe-se que a durabilidade das mesmas pode ser comprometida pelo caráter alcalino das matrizes cimentícias que, ao longo do tempo, afetam sua integridade. De forma a minimizar esses efeitos, as fibras naturais podem receber tratamentos superficiais que as protegerão da ação da água e de outros agentes agressivos e que podem ser projetados de forma a aumentar a aderência fibra-matriz (CAETANO et al., 2004).

2.4 Microestrutura das fibras vegetais

As fibras vegetais são constituídas por células individuais (microfibras) unidas umas às outras por meio de lamelas intermediárias, constituídas de hemicelulose e lignina.

As células da fibra têm de 10 a 25 μm de comprimento e, segundo Savastano (2000), são compostas por quatro camadas de microfibrilas formadas por cadeias moleculares de celulose. Essas microfibrilas estão presentes em cada camada sob a forma de espiral com ângulos de inclinação variáveis que têm influência sobre o desempenho mecânico da fibra.

A Figura 2.3 apresenta um esquema de uma célula individual, no qual se observa as camadas primária e secundária, sendo esta última dividida em três subcamadas (S1, S2 e S3). A camada primária, mais externa, apresenta uma estrutura reticulada, assim como a camada secundária S1. A camada secundária S2, as microfibrilas estão orientadas segundo um ângulo θ com relação ao eixo longitudinal da célula, em espiral. A camada secundária S3, mais interna, também possui as microfibrilas em forma de espiral. A camada S2 é a de maior espessura e também a de maior teor de celulose (GRAM, 1983).

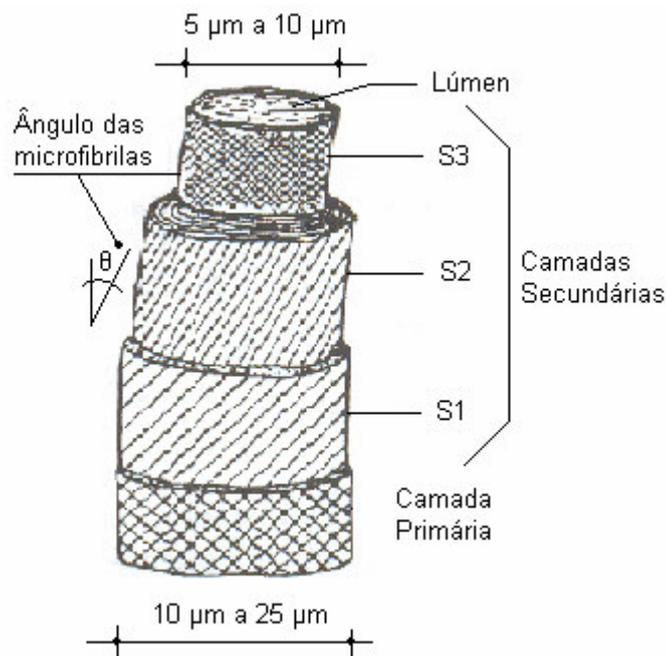


Figura 2.3: Esquema de uma fibro-célula de uma fibra vegetal com dimensões aproximadas (Fonte: Savastano, 2000)

A região central da fibra apresenta uma cavidade denominada lúmen, onde substâncias agressivas costumam penetrar em compósitos com matriz cimentícia, causando degradações dos componentes da fibra. Esses compostos podem ainda sofrer cristalização nessa cavidade central e nos demais vazios das fibras, causando enrijecimento desse reforço e sua consequente fragilização (PICANÇO, 2005).

As diversas células que compõem a fibra ou macrofibras (expressão utilizada para identificar claramente o feixe de filamentos) encontram-se aglomeradas pela lamela intercelular, composta de hemicelulose, pectina e, principalmente, lignina (70%, em média). A região central da fibra também pode apresentar uma cavidade que se chama lacuna. A Figura 2.4 ilustra, esquematicamente, a secção transversal do aglomerado de células da fibra vegetal.

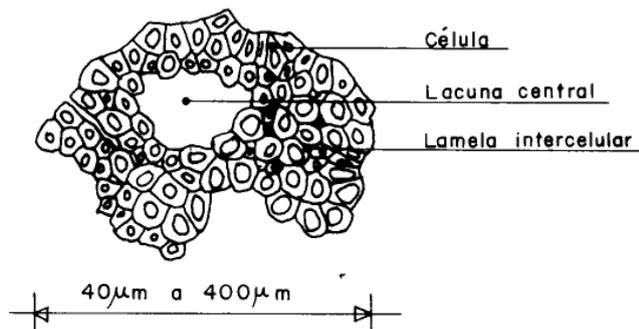


Figura 2.4: Secção transversal de células da fibra vegetal (Fonte: Savastano, 1992)

Em consequência da grande incidência de poros permeáveis que incluem as lacunas e os lumens, as fibras vegetais apresentam grande absorção de água (maior que 90%) e massa específica aparente muito inferior à real.

2.5 Materiais compósitos

Segundo Santiago (2002), os materiais compósitos são caracterizados como sendo uma combinação de pelo menos dois materiais, os quais, após a mistura, ainda podem ser perfeitamente identificados.

O compósito é normalmente formado por duas fases: a matriz e o elemento de reforço. As matrizes são compostas de aglomerantes minerais e de agregados que dão origem a concretos, argamassas ou pastas, conforme as necessidades de uso. De forma simplificada, o componente matricial serve como meio de transferência e homogeneização dos esforços suportados pelos componentes de reforço. Por outro lado, as fibras atuam como elementos de reforço com a finalidade de impor

obstáculos à propagação de fissuras, além de funcionar como ponte de transferência dos esforços, absorvendo parte das solicitações, garantindo, assim, uma capacidade resistente após a abertura da mesma e tornando a ruptura um processo progressivo (CAETANO et al., 2004).

A interface fibra-matriz permite um trabalho conjunto para que ocorra uma adequada transferência dos esforços entre o reforço e a matriz, devido à aderência entre a matriz e o componente. Por esse motivo, um fator importante para o desempenho do compósito é garantir a qualidade da interface.

Outras características como quantidade, volume relativo, comprimento, fator de forma e orientação das fibras também influenciam no desempenho dos materiais compósitos.

Se a quantidade de fibras for maior, o número de microfissuras interceptadas pelas fibras será maior, melhorando assim a resistência e a tenacidade. Conseqüentemente, melhor será o desempenho do conjunto, retardando a propagação das fissuras e propiciando um aumento na tensão máxima, devido ao aumento de contribuição de resistência mecânica das fibras nas propriedades mecânicas do compósito. Isso ocorre porque o carregamento imposto à matriz é parcialmente transferido às fibras que passam a absorver parte das tensões internas.

Por outro lado, o aumento da quantidade de fibras está intrinsecamente ligado a uma redução da trabalhabilidade da mistura, produto da absorção de água pelas mesmas e ao acréscimo da área superficial de molhagem, o que pode causar problemas de homogeneidade. Por essa razão foi introduzido o conceito de volume máximo de fibras, ou seja, máxima quantidade de fibras que pode ser adequadamente incorporada à matriz de modo a se obter uma dispersão uniforme.

O conteúdo de fibras em uma matriz de concreto é comumente indicado através de seu percentual volumétrico em relação ao volume total de concreto ou argamassa, denominado V_f (%). Outro modo é através do percentual em massa de fibras em relação ao volume de concreto, representado por W_f (%).

Em relação ao fator de forma (razão entre o comprimento da fibra e o seu diâmetro), quanto maior seu valor, para um determinado comprimento, maior será a quantidade de fibras presente na matriz, garantindo um reforço mais eficiente. A forma da ruptura das fibras vai depender fundamentalmente da dimensão longitudinal. Fibras mais longas são rompidas enquanto que, em fibras curtas, a

ruptura geralmente ocorre por arrancamento, pois o comprimento de ancoragem é insuficiente, ocasionando o escorregamento da fibra do interior da matriz cimentícia. (CAETANO et al., 2004).

2.6 Características da fibra de sisal

Devido à grande incidência de poros permeáveis, que incluem as lacunas e os lumens, as fibras vegetais, e conseqüentemente, as fibras de sisal, possuem massa específica aparente inferior à real e apresentam grande absorção de água (maior que 90%), fato que afeta o grau de aderência com a matriz cimentícia. A absorção calculada com base na norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 9778 (2005) ocorre, nos primeiros 15 minutos, pelo menos 60% da absorção total, atingindo, após 24 horas, cerca de 85% do total (SAVASTANO, 1992).

As fibras de sisal apresentam também baixo módulo de elasticidade e grandes mudanças em sua secção transversal, ao longo do comprimento.

A perda de ductilidade em meio úmido e alcalino, a elevada absorção de água e a heterogeneidade de suas propriedades físicas e mecânicas são os fatores mais importantes que interferem negativamente no desempenho das fibras vegetais, quando aplicadas para reforço de matrizes à base de cimento Portland.

A Tabela 2.1 mostra propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal segundo vários pesquisadores.

Tabela 2.1: Propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal

Fonte	Umid (%)	Massa esp real (kg/m ³)	Massa esp aparen (kg/m ³)	Vol de vazios permeáveis (%)	Abs máx 24 h (%)	Alongam na rupt (%)	Resist à tração (MPa)	Mód de elastic (GPa)
Toledo								
Filho et al. (1997).	14,6	1100	760	-	193	7,7 - 3,6	535 - 539	-
Savastano (1992)	-	1370	564	60,9	110	4,9 - 5,4	347 - 378	15,2
Savastano (2000)	-	1387	400	72,4	151	-	-	-
Guimarães, (1984)	-	-	-	-	-	4,3	458	15,2

As fibras de sisal, apesar de apresentarem características que podem afetar o reforço de pastas de cimento Portland, apresentam outras favoráveis que interferem no bom desempenho do compósito. Esses fatores positivos poderão ser bem aproveitados com o desenvolvimento de técnicas de produção e de conservação dos compósitos fibrosos adequadas a essas fibras. Existem também muitas alternativas para minimizar problemas como sua deterioração, o alto teor de absorção de água e a presença de impurezas.

Como procedimentos de aplicação viável para melhorar a durabilidade em presença de meio alcalino e de umidade, pode-se mencionar a substituição parcial ou total do cimento Portland por outros aglomerantes alternativos menos alcalinos, como pozolanas. Também pode ser utilizada a impregnação das fibras ou imersão em sílica antes da mistura com a matriz. Agopyam (1991) sugere proteção das fibras com polímeros hidro-repelentes, resinas, óleos e asfaltos ou ainda agentes bloqueadores de reação de decomposição das fibras, como silicatos e sulfatos de sódio ou de magnésio. John et al. (1990) obtiveram bons resultados com aglomerante composto por mais de 80% de escória de alto-forno, além de cal hidratada e gipsita, e demonstraram a viabilidade de argamassas à base de escória reforçadas com fibras de coco para produção de painéis. Oliveira (1989) conseguiu melhoria da durabilidade de argamassa de cimento reforçada com fibras de malva, quando essas fibras foram previamente lavadas com detergente comum. Guimarães (1990) submeteu fibras de sisal à impregnação com acetato de polivinila (PVA) e obteve melhoria sensível do desempenho do compósito resultante após envelhecimento acelerado.

Para diminuir a elevada absorção de água Toledo Filho et al. (1990) submeteram as fibras a um tratamento impermeabilizante utilizando produtos líquidos. As fibras vegetais, após dois dias de secagem, foram mergulhadas por alguns segundos nesses produtos impermeabilizantes. Outros tratamentos à base de óleo mineral também podem interferir na impermeabilização.

Para eliminação de impurezas, as fibras podem ser tratadas previamente com lavagem e/ou fervura, técnicas de mineralização ou mesmo de delignificação. Também podem ser imersas em água destilada por 1 hora, sendo em seguida secas em estufa com circulação de ar a 105°C por 30 minutos. Além disso podem ser tratadas em uma solução aquosa de hidróxido de sódio 2% sob agitação por 1 hora

à temperatura ambiente, lavadas em água destilada até alcançarem pH neutro e então secas em estufa.

2.7 História da alvenaria

Segundo Ramalho e Corrêa (2003), a alvenaria é um sistema construtivo muito tradicional tendo sido muito utilizado desde o início da atividade humana de executar estruturas para os mais variados fins. Com a utilização de blocos de diversos materiais foram produzidas obras que desafiaram o tempo, atravessando séculos ou mesmo milênios e chegando até nossos dias como verdadeiros monumentos de grande importância histórica.

Na antigüidade foram construídas obras utilizando-se alvenaria que constituem atualmente testemunhos das culturas antigas e medievais. Entre elas se encontram as pirâmides do Egito (Figura 2.5), representando a arquitetura egípcia (2800-2000 a.C), que foram construídas em alvenaria de pedras através da colocação de blocos, uns sobre os outros, de maneira a produzirem a forma piramidal. Na arquitetura Romana e Romanesca com os seus templos, palácios, colunas, igrejas, pontes e aquedutos (0-1200 d.C), destaca-se o grande anfiteatro romano Coliseu (Figura 2.6), suportado por pórticos formados por pilares e arcos. No período Gótico (1100-1500 d.C), que atinge seu esplendor na arte de talhar a pedra, destacam-se as catedrais góticas que aproveitavam muito bem o sistema estrutural já mencionado, com seus arcos e abóbadas, que sustentam o teto sendo apoiados em pilares esbeltos e constituindo uma alternativa viável para a execução de grandes vãos e obtenção de amplos espaços internos (Figura 2.7).



Figura 2.5: Pirâmides do Egito (Fonte: www.portalsaofrancisco.com.br)



Figura 2.6: Coliseu de Roma (Fonte: www.viaje.info/tag/coliseo-de-roma)

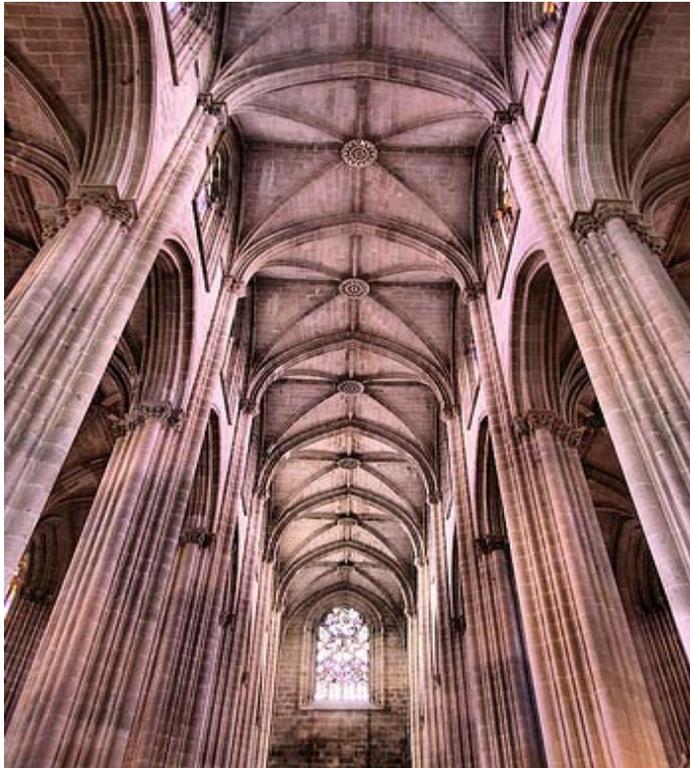


Figura 2.7: Catedrais góticas (Fonte: www.soarquitectura.com.br)

Além da pedra, outros materiais foram utilizados na alvenaria ao longo dos tempos. As áreas mais populosas dos tempos antigos testemunharam o aparecimento dos tijolos de barro secos ao sol (adobe). A necessidade de materiais de construção combinada com a abundância de argila, o clima quente e seco necessário para secar o tijolo e a falta de madeira e pedra para construção conduziram ao desenvolvimento do tijolo de barro. Os tijolos podiam ser facilmente

moldados, eram mais leves do que a pedra e formavam uma parede durável e resistente ao fogo (LOURENÇO, 1999).

Segundo o mesmo autor foi apenas durante o império Romano (27 a.C. a 395 d.C.) que a produção de tijolos se generalizou a toda a civilização. Este fato deveu-se não só à facilidade de se obter a matéria prima, mas também à vontade de marcar o domínio e de homogeneizar a arquitetura, a indústria de construção, a sociedade e a economia. Os edifícios Romanos, devido ao clima desta região, eram construídos essencialmente com tijolos secos ao sol assentados sobre juntas de barro. As faces exteriores eram rebocadas para melhorar o aspecto e também para dar uma melhor proteção contra a chuva. No norte da Europa, já durante a era medieval, as construções eram quase todas dominadas pelo tijolo devido à escassez de pedra nestas regiões. Também na Inglaterra, durante os séculos XIV e XV, a alvenaria de tijolo teve certo incremento que foi provocado, sobretudo, pelo aumento dos preços da madeira. A produção de tijolos aumentou, passando a existir uma diversidade de cores disponíveis que iam do bege ao cinzento, passando por vários tons de vermelho.

A alvenaria chegou à América do Norte trazida pelos europeus. No início do século XX surge a figura de Jesse Besser, considerado o principal responsável pelo avanço dos blocos de concreto no mercado norte-americano. Ele foi o que iniciou a produção de máquinas semi-automáticas destinadas à fabricação de blocos de concreto.

As máquinas produtoras de blocos de concreto são chamadas de vibroprensas, devido ao tipo de mecanismo que é empregado para se fazer com que o material de dosagem penetre e preencha as fôrmas a elas acopladas.

Os blocos de concreto chegaram ao Brasil na década de 1950, quando se importou dos Estados Unidos uma máquina para produção desses componentes. Em 1966 foi instalada em São Paulo a primeira fábrica de blocos de concreto de alvenaria estrutural, mas foi somente na década de 1970 que esses blocos consolidaram-se no mercado brasileiro, principalmente devido à divulgação das primeiras obras de alvenaria armada em blocos de concreto (BUTTLER, 2007). Nessa década a alvenaria foi utilizada principalmente em obras públicas, em edifícios com quatro a cinco pavimentos. Isso acarretou uma imagem negativa para esse sistema estrutural, como se fosse uma solução a ser utilizada exclusivamente

para habitações populares de poucos pavimentos e com pouca flexibilidade na concepção arquitetônica.

As construções de alvenaria apresentam diversas vantagens e simplicidade no processo de execução. Entretanto, necessitam desenvolvimentos constantes, principalmente no sentido da racionalização, da industrialização, da produtividade e da qualidade. Atualmente no Brasil, o sistema construtivo em alvenaria tem experimentado um grande impulso. A estabilização da economia e a concorrência têm feito com que um número crescente de empresas passe a se preocupar mais com os custos, acelerando as pesquisas e a utilização de novos materiais (RAMALHO; CORRÊA, 2003).

2.8 Bloco de concreto

Segundo Medeiros e Sabbatini (1993), a maioria das normas define blocos de concreto de maneira incompleta, buscando o conceito dos materiais constituintes ou utilizando as dimensões e geometria destas unidades. No Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, elaborado pelos autores mencionados anteriormente, bloco de concreto é definido como “a unidade de alvenaria constituída pela mistura homogênea, adequadamente proporcionada, de cimento Portland, agregados miúdo e graúdo, conformada através de vibrações e prensagem, possuindo dimensões superiores a 250x120x55 mm (comprimento x largura x altura)”.

Como componentes básicos da alvenaria estrutural, as unidades são as principais responsáveis pela definição das características resistentes dos elementos estruturais. Podem ser encontrados em uma gama variada de formas, tamanhos, padrões, texturas e cores.

Segundo a classificação dos blocos quanto ao material componente, as unidades mais utilizadas no Brasil para edificações de alvenaria estrutural são: unidades de concreto, unidades cerâmicas e unidades sílico- calcáreas (Tabela 2.2). Quanto à forma as unidades podem ser maciças ou vazadas, sendo denominadas tijolos ou blocos, respectivamente. São consideradas maciças aquelas que possuem um índice de vazios de no máximo 25% da área total. Se os vazios excederem esse limite, a unidade é classificada como vazada.

Tabela 2.2: Classificação dos blocos

Material			Forma	
Concreto	Cerâmicas	Sílico- calcáreas	Maciça (tijolo)	Vazadas (blocos)
				

2.9 Processo de fabricação dos blocos de concreto

Medeiros e Sabbatini (1993) especificam que as características dos blocos de concreto dependem fundamentalmente dos fatores: natureza dos materiais constituintes, umidade do material usado na moldagem, proporção dos materiais, grau de compactação conferido pelo equipamento e método de cura empregado.

O concreto empregado na produção de blocos é de consistência seca, levemente umedecido, devido à menor quantidade de água empregada em sua mistura. Isso faz com que esses concretos possuam abatimento zero e não é válida a Lei de Abrams, sendo necessário o uso de máquinas especiais que confirmam compacidade à mistura quando inserida nas formas. O desempenho do maquinário e do processo produtivo é fundamental para que se alcance a resistência e as características desejadas. A resistência dos blocos é proporcional à energia de compactação utilizada na vibração, sendo a eficiência da vibro-prensa a responsável direta pela qualidade final das unidades produzidas (BUTTLER, 2007).

Essa vibração governa as operações de moldagem e colabora diretamente para a prensagem dos blocos. De acordo com Holanda (2000), a melhor vibração é aquela que permite obter, em um tempo mínimo, blocos de qualidade homogênea em todos os pontos da fôrma, provocando assim uma ótima compactação.

Hoje, a fabricação de blocos de concreto é um processo altamente automatizado, sendo que uma máquina pode produzir até 2000 blocos por hora. A produção em série de blocos de concreto contribuiu, de forma considerável, para a diminuição dos seus custos e melhoria da qualidade.

O processo de fabricação dos blocos envolve a moldagem de concreto de consistência rija em moldes com as dimensões pré-estabelecidas do bloco,

compactados e vibrados por máquinas automáticas, depois levados para cura e armazenagem até o momento da entrega.

2.10 Materiais constituintes

Conforme destacou Holanda (2000), os principais materiais empregados na fabricação dos blocos de concreto são cimento, agregados miúdos e graúdos e água, moldados através de vibro-prensas detentoras de alto poder de vibração e prensagem. Dependendo de requisitos específicos, a dosagem do concreto poderá também empregar outros componentes, tais como adições minerais, pigmentos e outros aditivos. Todos esses materiais devem possuir características próprias e específicas para serem empregados na produção de blocos.

Agregado

Entende-se por agregado o material granular, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em obras de engenharia (SALVADOR FILHO, 2007).

As propriedades dos agregados são fundamentais na produção de blocos de concreto, pois interferem na aderência com a pasta de cimento, na homogeneidade e na resistência e compactação do concreto.

Usualmente, para a fabricação de blocos, são utilizados agregado miúdo (areia natural/artificial e/ou pó-de-pedra) e agregado graúdo (pedrisco). O uso do pó-de-pedra no concreto é uma tendência cada vez maior pela dificuldade dos areais para atender as exigências ambientais e pela grande possibilidade da extinção de reservas minerais naturais. Com isso, aparece outra desvantagem: o frete. Cada vez mais os areais se afastam dos centros consumidores e o transporte, em muitos casos, tem um custo maior que o próprio material. Porém, o pó-de-pedra tem este inconveniente do material pulverulento, que até certo ponto é desejável, pois ajuda a preencher corretamente os vazios do concreto.

A escolha adequada dos agregados é de fundamental importância para a preparação do concreto dos blocos e alguns cuidados devem ser observados. Por exemplo, devem ter grãos duros, compactos, duráveis e com o menor grau de impurezas. É importante levar em conta que em blocos vazados, a dimensão máxima característica do agregado deve ser menor do que metade da menor espessura da parede do bloco, segundo a NBR 6136 (2007).

Cimento Portland

Em geral, todos os tipos de cimento Portland são utilizados na produção dos blocos de concreto.

O cimento pode ser definido como um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, obtido através da calcinação e clínquerização da mistura de calcário e argila.

Segundo o mesmo autor, o cimento Portland pode ser considerado como um material com propriedades adesivas e coesivas quando misturado com água, capaz de unir e aglomerar fragmentos de minerais entre si, como areia e outros agregados, de modo a formar um todo compacto. Isso é possível pela reação química do cimento com a água que gera produtos que possuem propriedades de pega e endurecimento. Essa reação é chamada hidratação do cimento

Existem vários tipos de cimento Portland produzidos no Brasil, diferentes entre si principalmente, em função de sua composição. Dentre os tipos existentes, os cimentos de alta resistência inicial (CPV ARI e CPV ARI RS) são os mais empregados na produção de componentes pré-moldados de concreto, inclusive na fabricação de blocos para alvenaria, blocos para pavimentação e em todas as aplicações que necessitam de resistência inicial elevada e desforma rápida.

O cimento CP V de Alta Resistência Inicial (ARI) constitui um tipo particular entre os tipos de cimentos, com a peculiaridade de atingir altas resistências nos primeiros dias de aplicação. Essa característica é devida a uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, que aumenta a quantidade de C_3S em sua composição, e pela moagem mais fina do cimento. Assim, ao reagir com a água, ele adquire elevada resistência com maior velocidade, aumentando a produtividade na indústria de pré-moldados através de uma reutilização mais rápida dos moldes.

Aditivos

Holanda (2000) relatou também que para facilitar a moldagem dos blocos, alguns fabricantes utilizam aditivos plastificantes e incorporadores de ar, possibilitando a redução do fator água/cimento, o aumento da coesão do concreto, diminuição da exsudação, fácil acabamento, além de facilitar a limpeza das partes da máquina que entram em contato com a mistura e proporcionar aumento da produtividade do equipamento.

Define-se o aditivo como um produto que, agregado à mistura do concreto em teores não maiores que 5% em relação à massa de cimento, permite a modificação de algumas de suas propriedades físicas e químicas, proporcionando efeitos benéficos como: melhoria da trabalhabilidade, menor segregação, aumento na resistência mecânica, aumento da durabilidade, etc.

Água

Seguindo a mesma recomendação para uso em concreto convencional, a água para uso na fabricação de blocos de concreto deve ser isenta de impurezas e de matéria orgânica.

2.11 Avaliação da resistência à compressão das paredes

A principal característica da alvenaria estrutural é a sua resistência à compressão. Esse é o conceito crucial a ser levado em conta quando se discute a alvenaria como processo construtivo para elaboração de estruturas.

A resistência dos blocos é a que exerce maior influência na resistência à compressão da alvenaria, ou seja, quanto mais resistente o bloco, mais resistente será a alvenaria. Entretanto, cabe ressaltar que o aumento de resistência dos blocos não resulta em incrementos proporcionais de resistência da alvenaria como é mostrado na Figura 2.8:

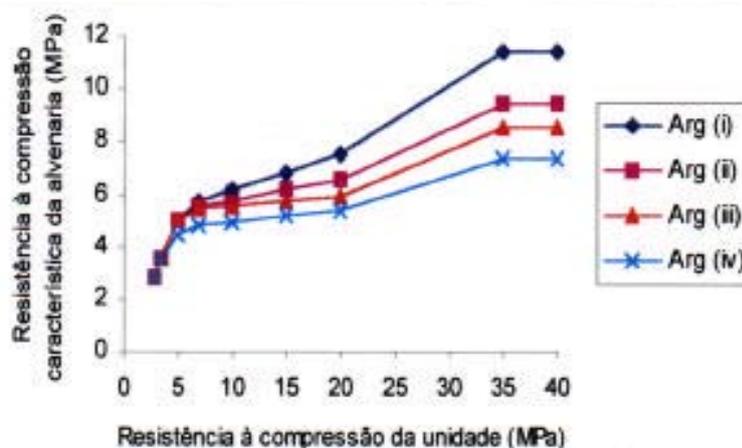


Figura 2.8: Resistência à compressão características da alvenaria, com blocos vazados com relação h/t entre 2 e 4 (Fonte: BS 5628 part 1: 1992)

A eficiência é normalmente definida como a relação entre a resistência de um elemento, por exemplo uma parede, e a resistência do bloco que o compõe. Esse

conceito é muito importante para avaliar o desempenho das unidades e os valores usuais de eficiência parede/bloco de concreto que variam de 0,40 a 0,60.

A avaliação da resistência à compressão da alvenaria pode ser realizada por vários procedimentos como: estimativa através da resistência de prismas, de mini-paredes e de paredes em escala real. Em alguns casos também podem ser utilizadas estimativas através dos componentes; procedimento utilizado, por exemplo, pela norma britânica BS 5628 (1992); e até mesmo modelos teóricos de ruptura que foram elaborados por vários pesquisadores.

O prisma de alvenaria estrutural é um corpo-de-prova normalmente formado pela justaposição de dois blocos unidos por junta de argamassa e destinado ao ensaio de compressão axial (Figura 2.9). A estimativa da resistência de paredes através do ensaio de prisma é o procedimento adotado pela NBR 10837 (1989) e apresenta algumas vantagens importantes. É um ensaio mais simples e econômico do que os ensaios de paredes, pode ser realizado por qualquer laboratório minimamente equipado e é um método de dimensionamento válido para qualquer condição de unidade, argamassa e graute. A eficiência, nesse caso, é a relação entre a resistência do prisma e do bloco que o compõem, variando de 0,5 a 0,9 para os blocos de concreto. Também existe um valor de eficiência que se define como a relação entre a resistência da parede e do prisma, sendo muito importante porque o que interessa em última instância é a resistência da parede, mesmo sendo o dimensionamento e o controle através da resistência dos prismas. O valor da eficiência situa-se por volta de 0,7 tanto para blocos de concreto como cerâmicos.



Figura 2.9: Prisma de blocos de concreto ensaiado a compressão axial

Outro corpo-de-prova é a mini-parede, que apesar de possuir pequenas dimensões, é maior que os prismas. Embora os valores obtidos pelo ensaio desses corpos-de-prova sejam bem mais próximos dos obtidos com as paredes, ainda assim existe a necessidade de estudos experimentais que estabeleçam os valores dessa correlação (Figura 2.10).

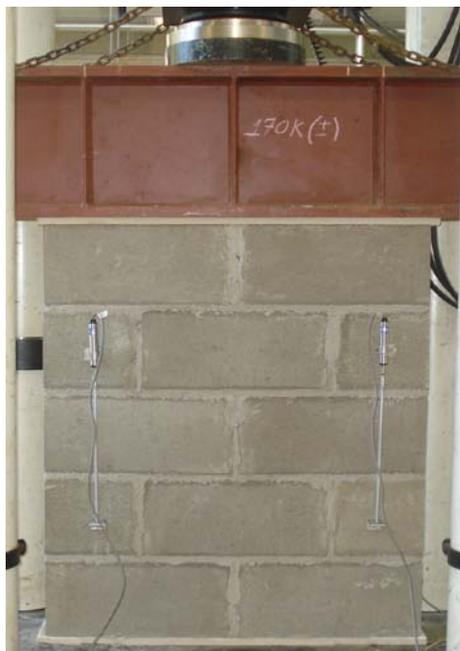


Figura 2.10: Mini-paredes de blocos de concreto ensaiado à compressão axial

2.12 Argamassa de assentamento e sua influência na resistência à compressão da alvenaria

A argamassa é o elemento de ligação das unidades de alvenaria. Os tipos de argamassa utilizados no assentamento das unidades podem ser à base de cal, cimento ou cimento com aditivos. As argamassas mistas (constituídas de cimento, cal e areia) são as mais adequadas para o uso em alvenaria estrutural. O tipo de argamassa a ser utilizado depende principalmente da função que a parede exercerá, das condições de exposição da parede e do tipo de bloco empregado (RAUBER, 2005).

A argamassa deve possuir módulo de elasticidade adequado e reunir boas características de trabalhabilidade, resistência, plasticidade e durabilidade para o desempenho de suas funções. As suas principais funções são: unir solidamente as unidades de alvenaria, transmitir e uniformizar as cargas atuantes na parede por toda a área resistente dos blocos; absorver pequenas deformações naturais a que a alvenaria estiver sujeita e prevenir a entrada de água e de vento nas edificações.

Dessa forma, as argamassas mais adequadas para alvenaria estrutural são as mistas de cal e cimento. Materiais como cal, incorporados nas argamassas, diminuem a rigidez das mesmas e permitem a acomodação das movimentações intrínsecas à alvenaria. Além disso, a cal favorece a trabalhabilidade, independentemente das modificações nas demais propriedades.

A resistência à compressão da argamassa não influi de forma tão significativa na resistência à compressão da parede. De fato, ela é secundária se comparada à resistência de tijolos e blocos por ocupar aproximadamente 20% do volume total da parede. Além disso, existe o fato da argamassa estar submetida a um estado uniaxial de tensões nos ensaios à compressão em cilindros ou cubos, diferentemente do estado triaxial a que fica submetida na alvenaria. É por isso que vários autores concordam que a escolha de uma argamassa adequada para uma determinada alvenaria estrutural dependerá do bloco utilizado e de sua resistência à compressão. A argamassa não pode ser usada como parâmetro representativo no controle da resistência da parede.

Assim, a resistência da argamassa não pode ser menor do que 30% ou 40% da resistência dos blocos com relação à área bruta. Entretanto, argamassas exageradamente resistentes, excessivamente ricas em cimento, podem apresentar até mesmo um efeito contrário ao desejado, reduzindo a resistência final da parede e causando problemas de trabalhabilidade, retração excessiva e fissuração.

A Tabela 2.4 mostra a resistência à compressão esperada das argamassas, extraída da BS 5628 part. 1 (1992).

Tabela 2.3: Resistência à compressão e traço em volume da argamassa (Fonte: BS 5628 part. 1, 1992)

Tipo	Traço em Volume	Resistência	
		Laboratório	Situ
i	1:0 à ¼:3	16 MPa	11 Mpa
ii	1:1/2: 4 à 4,5	6,5 MPa	4,5 MPa
iii	1:1:5 à 6	3,6 MPa	2,5 MPa
iv	1:2:8 à 9	1,5 MPa	1,0 MPa

2.13 Mecanismo de ruptura dos elementos

Em elementos de alvenaria estrutural podem ocorrer esforços de toda ordem, como os esforços de compressão, tração, flexão e cisalhamento. Por tanto, a função da argamassa de assentamento é a de absorver e transmitir uniformemente esses esforços.

Medeiros (1993) cita a Teoria de Hilsdorf para explicar a ruptura típica de elementos de alvenaria sob compressão e executados com argamassa apenas nas paredes laterais dos blocos. O autor explica que a ruptura ocorre através da propagação de fissuras verticais na região dos cantos dos blocos (Figura 2.11). Segundo essa teoria, também conhecida como Mecanismo de Fratura por Tração Transversal, a ruptura é causada pela diferença de rigidez entre a argamassa e o bloco. Com essa diferença, quando a parede está submetida à compressão, a deformação da argamassa confinada lateralmente gera tensões transversais nos blocos, ocorrendo a ruptura citada.

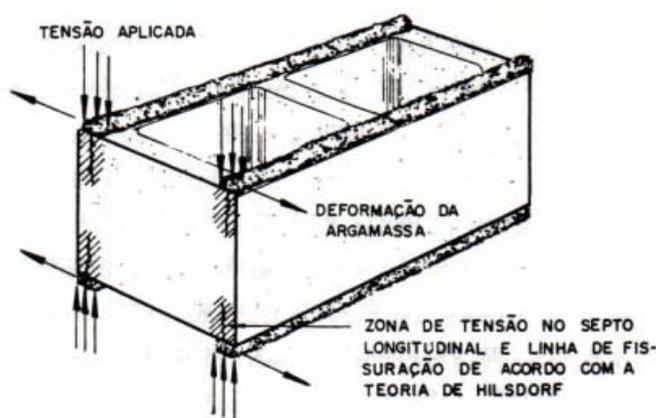


Figura 2.11: Mecanismo de ruptura de Hilsdorf, (Fonte: Medeiros, 1993)

Segundo Solórzano (1994), autores como Lenczner (1972), Sutherland (1981) e Hendry & Sinha (1987) apresentam total concordância no fato de que esse comportamento conjunto entre a argamassa e os blocos é realmente verificado em casos reais, quando são executados também elementos com argamassamento total.

A Figura 2.12 apresenta o estado de tensão de compressão triaxial na argamassa e tração axial lateral nos blocos.

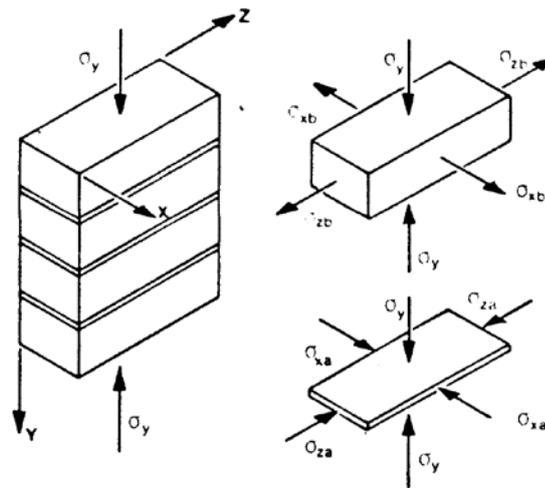


Figura 2.12: Tensões no tijolo e na junta de argamassa quando submetida à compressão axial (Fonte: Sabbatini, 1984)

Para alvenaria de blocos de concreto a ruptura normalmente ocorre devido à ruptura por tração do bloco. Dessa maneira, a função das fibras existentes nos blocos de concreto seria a de permitir as transferências dos esforços de tração, diminuindo a propagação de fissuras, controlando suas aberturas e podendo trazer uma ruptura retardada das unidades de alvenaria.

3 Programa experimental

Neste capítulo serão descritos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do programa experimental. O objetivo geral é obter informações para o estudo do comportamento mecânico de blocos de concreto com adição de fibras de sisal. Foram realizados ensaios à compressão axial, não só das unidades propriamente ditas, mas também de prismas e mini-paredes produzidos com essas unidades. Unidades e elementos sem adição de fibras também foram ensaiados e analisados para comparação dos resultados.

São apresentados os equipamentos e procedimentos utilizados durante os ensaios executados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), bem como a caracterização detalhada dos materiais. Posteriormente são expostos os principais detalhes referentes à produção dos blocos de concreto com e sem adição de fibras.

3.1 Materiais utilizados

Na produção dos compósitos foram utilizadas fibras de sisal fornecidas pela empresa Tecelagem de Sisal (Tecsál)³ localizada no estado de Bahia (Figura 3.1).



Figura 3.1: Fibras de sisal

³ www.tecsalbr.com.br

Os blocos de concreto foram fabricados com resistência característica de 4 MPa na empresa Tatu Pré-Moldados⁴ localizada em Limeira, São Paulo.

O cimento utilizado foi o CPV ARI PLUS da empresa Holcim. As características físicas, químicas e mecânicas atendem os requisitos especificados pela NBR 5733 (1991): Cimento Portland de alta resistência inicial.

Os agregados empregados foram pedrisco, areia e pó de pedra (Figura 3.2). O pedrisco e o pó de pedra foram fornecidos pela Carvinato, localizada em Limeira, São Paulo e a areia proveniente da empresa Bom Retiro, na cidade de Leme, São Paulo. Também foi utilizado, como parte da política ambiental da empresa, um agregado reciclável em substituição de 30% do total de agregados naturais. O agregado reciclável é originário de elementos rejeitados pelo controle de qualidade, sobras de concreto fresco e unidades danificadas durante o transporte e estocagem. Para todos esses agregados foi determinada a massa específica unitária no estado seco de acordo com a NBR NM 45 (2006), a massa específica real e aparente de acordo com a NBR NM 52 (2009) e a composição granulométrica de acordo com a NBR NM 248 (2003).



a-) Pedrisco



b-) Pó de pedra



c-) Areia



d-) Agregado reciclável

Figura 3.2: Agregados utilizados para a fabricação dos blocos

Para a produção dos blocos foi empregado um aditivo plastificante Rheomix 610 da BASF. Constitui um produto líquido livre de cloreto usado na fabricação de artefatos de concreto (blocos, pavers etc) com características plastificantes e redutor de água. Esse produto permite maior trabalhabilidade e durabilidade e atende aos requisitos da NBR 11768 (1992).

A água utilizada foi obtida da rede de abastecimento da cidade de Limeira, São Paulo.

A argamassa escolhida para a produção dos prismas e mini-paredes é do tipo mista de cimento, cal e areia, comumente utilizada nas obras de alvenaria estrutural.

3.2 Caracterização dos materiais empregados

Nos itens a seguir são descritos os ensaios adotados para a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa.

3.2.1 Fibras de sisal

Segundo a Norma de Identidade, Qualidade, Apresentação e Embalagem da Fibra Beneficiada de Sisal ou Agave e seus Resíduos de Valor Econômico existem quatro tipos de fibras de sisal: Tipo superior, Tipo 1, Tipo 2 e Tipo3.

A fibra de sisal usada no trabalho experimental foi do Tipo 3 impregnada com emulsão à base de óleo mineral. Esse tipo de fibra é usado para fazer fios em geral e Bale Twine (fios agrícolas para exportação). Caracteriza-se por serem fibras secas, bem batidas ou escovadas, em bom estado de maturação, com brilho e resistências normais, ásperas, umidade máxima de 13,5%, soltas, desembaraçadas e isentas de impurezas como mostra a Figura 3.3. O tratamento à base de óleo mineral das fibras pode diminuir a elevada capacidade de absorção de água, protegê-las contra a agressão do meio alcalino e reduzir impurezas e pó residual.

⁴ www.tatu.com.br



Figura 3.3: Fibra de sisal Tipo 3 com tratamento à base de óleo mineral

Logo após o recebimento do material foi determinada a massa específica das fibras, a absorção de água e o teor de umidade para se obter as informações necessárias para a utilização das mesmas como reforço no concreto para blocos.

3.2.1.1 Massa específica real e aparente da fibra de sisal

As fibras foram cortadas com o auxílio de uma tesoura em comprimentos médios de 30 mm, aferidos com auxílio de uma régua de precisão 0.5 mm.

Foi colocada uma quantidade suficiente para o ensaio em um depósito adequado com água durante 24 horas. Após a saturação dos poros permeáveis, a amostra foi disposta sobre uma superfície plana exposta a uma suave corrente de ar. A mesma foi pesada em uma balança com sensibilidade de 0,001 g e foi obtida a massa saturada seca ao ar (M_{sat}). Em seguida colocou-se a amostra em uma proveta graduada com um volume inicial de 600 ml de água (V_i), e fez-se a leitura do volume final (V_f).



Figura 3.4: Ensaio da fibra no frasco de 1000 ml

A amostra saturada, colocada em uma bandeja, foi seca em estufa por 24 horas a 60°C. Neste período o material perdeu toda água que se encontrava nos poros permeáveis. Posteriormente a amostra foi pesada na balança e se obteve a massa seca (M_s).

A massa específica real foi calculada pela Equação 1:

$$\rho_{\text{espec real}} = \frac{M_s}{(V_f - V_i) - [(M_{\text{sat}} - M_s) / \rho_{\text{água}}]} \quad (1)$$

na qual:

$\rho_{\text{espec real}}$: massa específica real da fibra de sisal, em gramas por centímetro cúbico

M_s : massa seca da fibra de sisal após 24 horas na estufa, em gramas

M_{sat} : massa saturada seca ao ar da fibra de sisal, em gramas

V_i : volume inicial do frasco, em centímetros cúbicos

V_f : volume final do frasco, em centímetros cúbicos

$\rho_{\text{água}}$: massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico

A massa específica aparente foi calculada pela Equação 2:

$$\rho_{\text{espec apar}} = \frac{M_s}{(V_f - V_i)} \quad (2)$$

na qual:

$\rho_{\text{espec apar}}$: massa específica aparente da fibra de sisal, em gramas por centímetro cúbico.

M_s : massa seca da fibra de sisal após 24 horas na estufa, em gramas.

V_i : volume inicial do frasco, em centímetros cúbicos.

V_f : volume final do frasco, em centímetros cúbicos.

3.2.1.2 Teor de umidade inicial da fibra de sisal

Foi determinado o teor de umidade que a fibra de sisal apresenta quando é exposta ao ar no ambiente de laboratório. As fibras foram cortadas em comprimentos de 30 mm e secas em estufa a 60°C até constância de massa, obtendo-se a massa seca (M_s) como mostra a Figura 3.5.



Figura 3.5: Fibras colocadas na estufa

Em seguida foram retiradas da estufa e deixadas expostas ao ar por 24 horas, obtendo-se a massa seca ao ar (M_{sa}).

O teor de umidade das fibras foi calculado pela Equação 3:

$$U = \frac{M_{sa} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3)$$

na qual:

U : teor de umidade das fibras, em porcentagem.

M_{sa}: massa seca ao ar das fibras, em gramas.

M_s: massa seca da fibra de sisal após 24 horas na estufa, em gramas.

3.2.1.3 Absorção de água da fibra de sisal

Para a determinação da absorção da água, as fibras de 30 mm de comprimento foram colocadas na estufa a 60°C até a constância de massa (M_s). Então foram imersas em água (Figura 3.6) e tiveram suas massas determinadas. Para essa determinação foi utilizado papel absorvente para retirar o excesso de água das amostras.



Figura 3.6: Fibras de sisal submergidas em água

Procedeu-se então às determinações de massa em intervalos de 5 minutos, 30 minutos, 60 minutos e 120 minutos. A partir daí foram feitas as determinações em intervalos de 24 horas até o sexto dia. Para calcular a absorção foi utilizada a Equação 4:

$$A = \frac{M_{ht} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (4)$$

na qual:

A: absorção de água da fibra, em porcentagem.

M_{ht}: massa úmida da fibra no tempo t, em gramas.

M_s: massa seca da fibra de sisal após 24 horas na estufa, em gramas.

3.2.2 Blocos com e sem adição de fibras.

O correto desempenho das unidades é garantido desde que atendam aos limites impostos pelas normas técnicas quanto às propriedades físicas como: análise dimensional, absorção de água, teor de umidade, área líquida e massa específica.

Os ensaios foram realizados em blocos do lote de cada série escolhidos aleatoriamente. Cada série diferenciava-se uma da outra pelo teor de fibras adicionado em relação ao volume do concreto e o comprimento delas. A Tabela 3.1 apresenta a nomenclatura adotada para os blocos estruturais de cada série.

Tabela 3.1: Série de blocos fabricados

Nomenclatura do Bloco Estrutural	Teor de fibras (%)	Comprimento das fibras (mm)
BE	-	-
BE20 – 0,5%	0,5	20
BE40 – 0,5%	0,5	40
BE20 – 1%	1	20
BE40 – 1%	1	40

Estudos realizados por Toledo Filho (1997), Rodrigues (1999) e Picanço (2005) demonstraram, através de ensaios experimentais, que os teores e comprimentos próximos aos considerados ótimos para esse tipo de fibra são 2% e 3% e os comprimentos 15 mm, 25 mm e 45 mm. Segundo Sales (2006), a presença das fibras em maior escala garante que mais processos de interação com a matriz possam consumir energia, garantindo um maior montante de energia absorvida. Mas esse aumento da fração volumétrica tem um limite, acima do qual há prejuízo em propriedades importantes como: trabalhabilidade, homogeneidade e coesão entre fibra e matriz. Isso pode levar à diminuição da resistência mecânica e da tenacidade.

O concreto utilizado neste trabalho pode ser considerado como um material especial devido o tipo de características que apresenta. O referido concreto é de consistência seca, levemente umedecido, com abatimento zero e não é válida a Lei de Abrams. Portanto, a quantidade de água utilizada é menor em comparação a um concreto comum. Por outro lado, a introdução das fibras está ligada a uma redução da trabalhabilidade da mistura, produto da absorção de água pelas mesmas e ao acréscimo da área superficial de molhagem, podendo causar problemas de

homogeneidade. Por isso, os teores usados para esta pesquisa foram menores que os usados por outros pesquisadores, ou seja, 0,5% e 1%. Para fundamentar isso foi necessário realizar um teste no laboratório elaborando um concreto com características similares ao concreto produzido na fábrica para a obtenção dos blocos. Assim foi comprovado que um teor maior de 1% afetava consideravelmente a consistência, o que impedia a obtenção de blocos com as características desejadas.

Com relação ao comprimento, a idéia foi produzir um compósito com fibras curtas distribuídas aleatoriamente na matriz cimentícia. O objetivo disso foi reproduzir o comportamento real destas na maior parte das aplicações práticas. As fibras precisam ter um comprimento adequado que garanta a ancoragem necessária e que permita a transferência de tensões para a matriz. Segundo Toledo Filho (1997), o comprimento mínimo das fibras de sisal para que ocorra a falha por ruptura é de 20 mm. Por outro lado, a qualidade dos concretos reforçados com fibras depende, entre outras coisas, da relação entre o comprimento e o diâmetro (relação de aspecto). Dessa forma, quanto maior for esse fator melhor será o seu desempenho. Conforme sugerido por Coutts (1988), a relação comprimento/diâmetro adequada para as fibras vegetais é em torno de 100. Segundo Savastano (2000) e Toledo Filho (1990), as fibras de sisal apresentam diâmetro de aproximadamente 0,202 mm. Os comprimentos adotados nesta pesquisa foram de 20 e 40 mm, e a relação de aspecto para os comprimentos escolhidos foi 99 e 198, respectivamente, constituindo valores próximos aos sugeridos por Coutts. As fibras foram cortadas com auxílio de uma tesoura e aferidas com uma régua de precisão 0.5 mm.

Foram fabricados 5 tipos de meios-blocos para a construção das mini-paredes. A produção destas unidades foi feita nas mesmas condições dos blocos, utilizando o mesmo traço, a mesma máquina e adicionando a mesma quantidade de fibras para o caso dos meios-blocos reforçados. Dessa forma, não foi realizada a caracterização das propriedades físicas dos meios-blocos.

3.2.2.1 Análise dimensional dos blocos

Para a avaliação das dimensões reais dos blocos estruturais com e sem adição de fibras foi recebido um lote por cada série de blocos fabricados. Cada lote apresentou aproximadamente 105 blocos em função da capacidade de moldagem

do equipamento utilizado na fábrica. Seguindo as prescrições da norma NBR 6136 (2007) foram controlados os aspectos visuais dos blocos, não apresentando defeitos sistemáticos como: trincas, rachaduras, quebras, superfícies irregulares ou deformações que impedissem a sua utilização.

Os blocos pedidos ao fabricante apresentaram dimensões reais de 140 mm x 190 mm x 390 mm (largura, altura, comprimento). Segundo a norma NBR 6136 (2007), as tolerâncias são de ± 2 mm para a largura e ± 3 mm para a altura e o comprimento. A espessura das paredes transversais e longitudinais deve ser de no mínimo 25 mm para os blocos estruturais da classe M-15 e a menor dimensão dos furos devem ser ≥ 70 mm.

Utilizou-se uma amostra de seis blocos para cada série escolhidos aleatoriamente para determinar largura, comprimento, altura, espessura mínima das paredes e dimensões dos furos. Para cada dimensão dos blocos foram realizadas pelo menos três determinações em pontos distintos de cada face. Para isso foram usadas réguas metálicas com graduação de 1 mm e um paquímetro digital com precisão de 0,1 mm. A dimensão final foi obtida pela média dessas determinações. Na Figura 3.7, é apresentado um croqui típico dessas unidades.

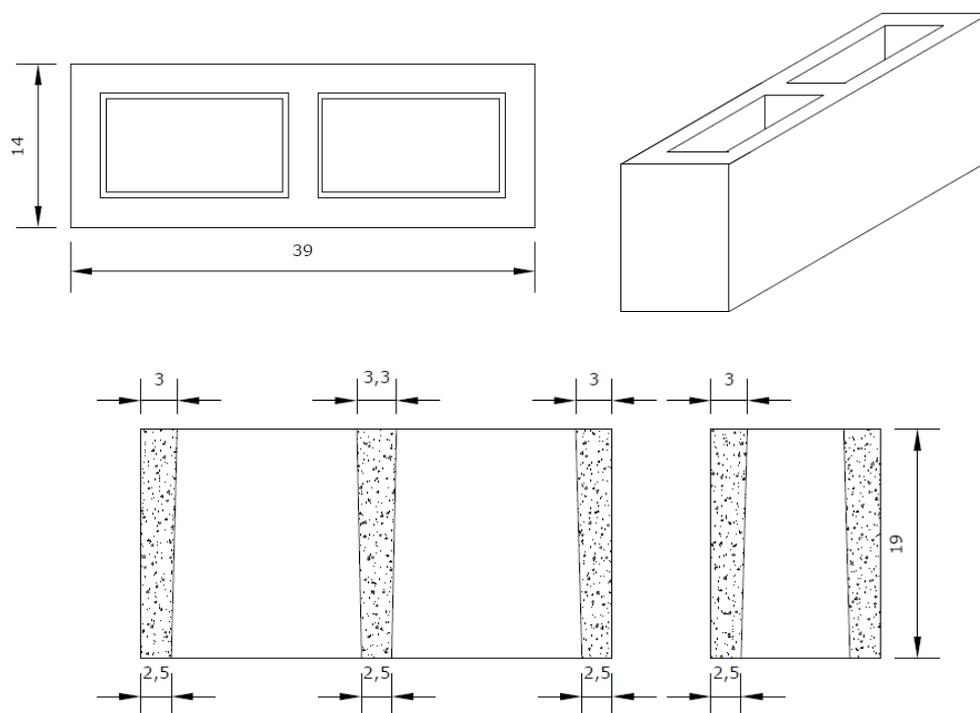


Figura 3.7: Geometria dos blocos de concreto (medidas em cm)

3.2.2.2 Absorção de água e área líquida dos blocos

O processo de ensaios para a determinação da absorção de água e da área líquida foi baseado na NBR 12118 (2007). Para cada série de blocos foi ensaiada uma amostra de três unidades.

Após o recebimento dos blocos no laboratório, os mesmos foram pesados numa balança de marca Mettler Toledo, modelo SB24001 Delta Range, com precisão de 1g e capacidade 24 000g, obtendo-se assim a massa denominada M_3 . Na Figura 3.8 pode ser observado o bloco no momento de sua pesagem.



Figura 3.8: Pesagem dos blocos após o recebimento

Após a pesagem, as unidades foram levadas à estufa à temperatura $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ para o processo de secagem, permanecendo lá por 24 horas como especifica a NBR 12118 (2007). Após resfriamento, cada bloco teve sua massa determinada e foi colocado novamente na estufa por duas horas. Repetiu-se a operação de pesagem dos blocos resfriados, e constatado diferença de massa inferior a 0,5% da anterior foi anotada então a sua massa seca denominada M_1 .



Figura 3.9: Blocos sendo secos na estufa

Em seguida os blocos foram imersos em água à temperatura de $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ por 24 horas (Figura 3.10).



Figura 3.10: Blocos imersos em água

Então, as unidades foram retiradas da água, pesadas e submergidas novamente na água. Essa operação foi repetida a cada duas horas até que em duas pesagens sucessivas não ocorreu registro de diferença de massa superior a 0.5%. Dessa forma foi obtida a massa saturada denominada M_2 .

O valor da absorção de água, expresso em porcentagem de cada bloco (A%), foi calculada através da Equação 5:

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (5)$$

na qual:

A: absorção de água dos blocos, em porcentagem.

M_1 : massa do bloco seco em estufa, em gramas.

M_2 : massa do bloco saturado, em gramas.

A NBR 6136 (2007) especifica que para blocos de concreto com função estrutural a absorção de água deve ser menor ou igual a 10%.

A área líquida foi determinada pela Equação 6. A altura do bloco e o valor de M_2 foram obtidos como explicado nos itens anteriores. O bloco saturado foi imerso em água à temperatura de $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ por meio da balança hidrostática (Figura 3.11) e o valor encontrado foi denominado massa aparente M_4 .

$$A_{liq} = \frac{M_2 - M_4}{H \times \rho_a} \times 1000 \quad (6)$$

na qual:

A_{liq} : Área líquida dos blocos, em milímetros quadrados

M_2 : massa do bloco saturado, em gramas

M_4 : massa aparente do bloco, em gramas

H : altura média do bloco, em milímetro

ρ_a : massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico

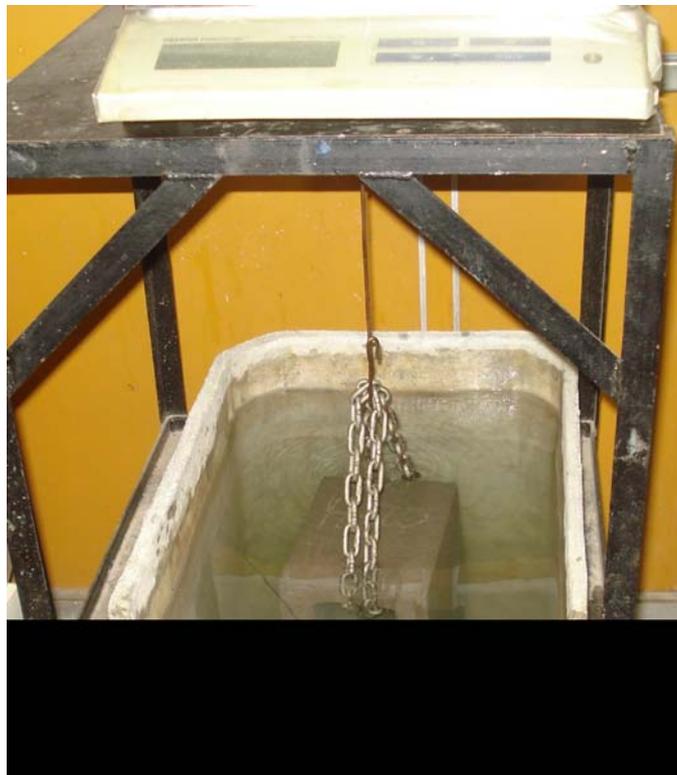


Figura 3.11: Massa dos blocos determinada por meio da balança hidrostática

3.2.2.3 Teor de umidade dos blocos

A porcentagem de umidade de cada unidade foi determinada conforme ao descrito por Romagna (2000), através da Equação 7:

$$U = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100 \quad (7)$$

na qual:

U : umidade dos blocos, em porcentagem.

M_3 : massa do bloco seco ao ar, em gramas.

M_1 : massa do bloco seco em estufa, em gramas

M_2 : massa do bloco saturado, em gramas.

3.2.2.4 Massas específicas dos blocos

As massas específicas da amostra seca e saturada foram determinadas utilizando a NBR 9778 (2005). Essa norma é aplicável para argamassas e concretos endurecidos e foi adaptada para as unidades de alvenaria.

$$Y_{\text{espec sec a.}} = \frac{M_3}{(M_2 - M_4)/\rho_a} \quad (8)$$

$$Y_{\text{espec sat.}} = \frac{M_2}{(M_2 - M_4)/\rho_a} \quad (9)$$

na qual:

$\gamma_{\text{espec seca}}$: massa específica seca dos blocos, em gramas por centímetro cúbico.

$\gamma_{\text{espec sat.}}$: massa específica saturada dos blocos, em gramas por centímetro cúbico.

M_3 : massa do bloco seco ao ar, em gramas.

M_2 : massa do bloco saturado, em gramas.

M_4 : massa aparente do bloco, em gramas.

ρ_a : massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico

3.2.3 Argamassa de assentamento

Para confecção dos prismas e das mini-paredes foi utilizado apenas um tipo de argamassa de assentamento. A argamassa é do tipo mista, de cimento, cal e areia. Como foi explicado no Capítulo 2, esse tipo de argamassa é o mais adequado para o uso em alvenaria estrutural.

Os traços empregados foram os prescritos pela norma britânica BS 5628: Part 1:(1992) como tipo (ii) e (iii) e são comumente utilizados em obras de alvenaria no Brasil. O traço em volume é 1:0,5:4,5 para argamassa de média resistência e 1:1:6 para argamassa de baixa resistência.

A resistência à compressão da argamassa, estimada através do ensaio de corpos de prova feita em moldes cilíndricos, constitui-se em um parâmetro de referência da real resistência da junta de argamassa. Isso se deve ao fato de que a

argamassa, ensaiada através de corpos de prova cilíndricos, estar submetida a um estado uniaxial de tensões, portanto muito diferente do estado triaxial a que a argamassa fica submetida quando na alvenaria. Além disso, também a absorção de água pelo bloco e as diferenças nas condições de adensamento e cura produzem diferenças significativas entre as condições do ensaio e as condições de utilização.

Segundo Mohamad (1998) deve haver uma compatibilidade entre a resistência argamassa e a resistência do bloco. O referido autor recomenda que a resistência à compressão da argamassa varie entre 0,7 e 1 a resistência à compressão do bloco na área bruta. Assim, o tipo de argamassa escolhida para a pesquisa dependeu da resistência dos blocos. As unidades com e sem adição de fibras apresentaram resistências médias variando de 6 MPa a 11 MPa (resultados mostrados no Capítulo 4) e a argamassa escolhida foi do tipo (ii), de média resistência.

Ainda para a produção da argamassa, utilizou-se o cimento CII-Z-32 da marca Itaú e cal hidratada classe CH-II, também da marca Itaú, fabricados de acordo com a NBR 11578 (1991) e a NBR 7175 (2003), respectivamente.

O agregado miúdo usado foi areia fina proveniente do Rio Mogi-Guaçu, da cidade de São Carlos, no estado de São Paulo. A determinação da massa específica real e massa específica aparente foram feitas conforme a NBR NM 52 (2009) usando o frasco Chapman, e a massa unitária obtida segundo o procedimento da NBR NM 45 (2006). A composição granulométrica do agregado miúdo foi determinada de acordo com a NBR NM 248 (2003).

A mistura das argamassas foi realizada manualmente pelo pedreiro obedecendo a seguinte ordem de colocação dos materiais: adição do cimento e areia, mistura dos materiais e adição de 50% da água, adição gradual e mistura da cal, colocação do restante de água. A consistência da argamassa foi determinada conforme a NBR 7215 (1996). Foram obtidos valores entre 280 mm e 290 mm após 15 minutos do início do amassamento.



Figura 3.12: Ensaio de consistência da argamassa

Após o amassamento da argamassa foram moldados 6 corpos-de-prova para determinação da resistência à compressão com dimensões de 10 cm x 5 cm, por cada série de blocos, totalizando 30 unidades. Os corpos-de-prova foram retirados das formas após 24 horas, identificados e levados na câmara úmida até o instante do ensaio de compressão (Figura 3.13).



Figura 3.13: Corpos-de-prova da argamassa colocados na câmara úmida.

3.3 Ensaio de resistência à compressão das unidades, componentes e elementos.

A ruptura de elementos de alvenaria de blocos de concreto submetidos à compressão normalmente ocorre devido às tensões de tração, explicadas pelo mecanismo de ruptura já mencionado no Capítulo 2. Dessa forma, esta pesquisa tem como hipótese que a introdução de fibras no concreto dos blocos pode trazer um melhor desempenho aos elementos de alvenaria, pois permitem as transferências

dos esforços à tração e diminuem a propagação de fissuras. Para avaliar o uso das fibras nos blocos de concreto e cumprir com o objetivo proposto da investigação foi necessário realizar o ensaio de resistência à compressão das unidades e elementos: prismas e mini-paredes.

3.3.1 Ensaio de resistência à compressão dos blocos com e sem adição de fibras

A NBR 12118 (2007) prescreve o método de determinação da resistência à compressão em blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural. A caracterização dos blocos foi feita em termos de resistência média (f_{bm}) e de resistência característica (f_{bk}). A norma especifica que para a realização do ensaio é necessária uma prensa equipada com dois pratos de aço que são usados como apoio. Por esse motivo utilizou-se a máquina computadorizada marca ELE e Modelo Autotest 2000, com capacidade de 2000 kN e velocidade de imposição de carregamento 2,03 kN/s. Os blocos foram ensaiados secos ao ar como mostra a Figura 3.14.



Figura 3.14: Ensaio de resistência à compressão dos blocos

Segundo NBR 12118 (2007), a regularização das faces dos blocos de concreto deve ser feita com um material que ofereça resistência no mínimo igual à do bloco a ser ensaiado. O capeamento tradicional é realizado com enxofre, gesso ou uma fina camada de pasta de cimento a fim de minimizar as concentrações de tensões

durante o ensaio. No entanto, nesta pesquisa o capeamento do bloco foi substituído por placas utilizadas em forros de edificações comumente conhecida como forro pacote da empresa Facimaq, em São Carlos.

A utilização deste tipo de capeamento é justificada pela dificuldade encontrada em realizar o capeamento com enxofre, além da vantagem de diminuição do tempo de preparo do corpo-de-prova para o ensaio. As placas possuem espessuras de 16 mm e são constituídas de um material bastante deformável que permite corrigir os efeitos das imperfeições do bloco e distribuir uniformemente o carregamento ao longo da área da seção atuante.

Realizou-se o ensaio de resistência à compressão em 18 blocos por cada série, totalizando 90 blocos (cinco séries). A carga foi aplicada na direção do esforço que o bloco deve suportar durante o seu emprego. O alinhamento do bloco na prensa é um item de extrema importância, sendo o seu centro de gravidade coincidente com o alinhamento do centro de carga dos pratos de aço usados como apoio na prensa.

Antes do ensaio determinou-se a área bruta dos blocos. Ela foi calculada como o valor médio de pelo menos três determinações em pontos distintos: um em cada extremidade e um no meio, sem desconto das áreas dos furos. A resistência de cada bloco, expressa em MPa, foi obtida dividindo a carga pela área bruta.

A Tabela 3.2 expõe a terminologia dos blocos e a quantidade ensaiada por série.

Tabela 3.2: Características dos blocos e quantidade ensaiada

Denominação dos blocos por série	Quantidade ensaiada	Características
BE	18	Unidades sem adição de fibras
BE20 – 0,5%	18	Unidades com 0,5% de teor de fibras de 20mm
BE40 – 0,5%	18	Unidades com 0,5% de teor de fibras de 40mm
BE20 – 1%	18	Unidades com 1% de teor de fibras de 20mm
BE40 – 1%	18	Unidades com 1% de teor de fibras de 40mm

3.3.2 Ensaio de resistência à compressão dos prismas com e sem adição de fibras.

A NBR 10837 (1989) adota prismas de dois blocos como os elementos que podem ser utilizados para estimar resistência à compressão de paredes de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto. Assim, o estudo de prismas compostos por unidades com adição de fibras permitiu esclarecer se essa adição influencia na resistência à compressão e módulo de deformação desses elementos e, por consequência, nas características da própria alvenaria. Isso foi feito através da comparação como os resultados obtidos para prismas de referência compostos por blocos sem adição de fibras.

Foram ensaiados um total de 60 prismas (12 para cada série) com dimensões totais de 14 cm x 19 cm x 39 cm (espessura x largura x altura), sendo de 1 cm de espessura a junta de argamassa.

Foram moldados diretamente no piso do laboratório sempre controlando o nível, o prumo e a espessura da junta. A produção foi iniciada pelo nivelamento do bloco inferior com auxílio de nível de bolha e posterior disposição dos cordões de argamassa nas paredes transversais e longitudinais. A cura foi feita no ambiente do laboratório até a data de ensaio aos 28 dias.

Os prismas foram ensaiados na máquina servo-controlada INSTRON modelo 8506 e utilizou-se o SYSTEM 5000 para a aquisição de dados. Na parte superior dos corpos-de-prova foi disposta uma placa de aço de espessura de 35 mm para distribuição uniforme do carregamento. Também foi colocado, nas duas extremidades dos prismas, a placa de forro pacote como material de capeamento.



Figura 3.15: Ensaio de resistência à compressão dos prismas

A terminologia adotada para os prismas por cada série é apresentada na Tabela 3.2 e significa que foram feitos com blocos com ou sem adição de fibras de teor 0,5% ou 1%, e comprimento 20 mm ou 40 mm.

Tabela 3.3: Série dos prismas fabricados

Denominação dos prismas por série	Quantidade ensaiada	Características
PR	12	Prismas compostos por unidades sem adição de fibras
PR20 – 0,5%	12	Prismas compostos por unidades com 0,5% de teor de fibras de 20mm
PR40 – 0,5%	12	Prismas compostos por unidades com 0,5% de teor de fibras de 40mm
PR20 – 1%	12	Prismas compostos por unidades com 1% de teor de fibras de 20mm
PR40 – 1%	12	Prismas compostos por unidades com 1% de teor de fibras de 40mm

3.3.3 Ensaio de resistência à compressão das mini-paredes com e sem adição de fibras

As mini-paredes também são elementos que podem ser utilizados como estimativa da resistência de paredes de alvenaria. As novas normas brasileiras de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos (NBR 15812 :2010) e de blocos de concreto (atualmente em consulta pública) mencionam as mini-paredes, inclusive indicando que a resistências das paredes seriam iguais a 85% da sua resistência. Além disso, a NBR 15812-2 (2010) traz em seu anexo B todas as recomendações necessárias à montagem do corpo de prova e ensaio das mini-paredes.

Foram construídas 3 mini-paredes com os blocos de cada série totalizando 15 elementos a ensaiar. O número de fiadas foi de 5, constituindo um total de oito blocos e 4 meio-blocos por paredes. As dimensões totais são 14 cm x 79 cm x 99 cm (espessura x largura x altura), com 1 cm de espessura para as juntas da argamassa vertical e horizontal.

As mini-paredes foram construídas sobre uma base de madeira possibilitando seu futuro transporte. Foi posicionada, antes do assentamento da primeira fiada, uma faixa de forro pacote sobre a base com as mesmas dimensões da mini-parede em planta com o objetivo de impedir a adesão do corpo de prova à madeira. A construção foi feita por um pedreiro experiente, iniciando pelo nivelamento de dois blocos inferiores com auxílio do nível de bolha. Posteriormente foi feita a disposição dos cordões de argamassa nas paredes transversais e longitudinais e na junta vertical. Em seguida foram assentadas as fiadas superiores verificando-se o nível, o prumo e a planeza. A cura foi feita no ambiente do laboratório até a data de ensaio.

Os ensaios foram realizados na máquina servo-controlada INSTRON, modelo 8506 e utilizou-se o SYSTEM 5000 para a aquisição de dados. Um perfil de aço no topo da parede garantiu a distribuição uniforme do carregamento sobre o corpo-de-prova como mostra a Figura 3.16.



Figura 3.16: Ensaio de resistência à compressão das mini-paredes

A terminologia adotada para as mini-paredes por série é apresentada na Tabela 3.3. Esses elementos foram feitos com blocos com ou sem adição de fibras de teor 0,5% ou 1%, e comprimento 20 mm ou 40 mm.

Tabela 3.4: Série das mini-paredes fabricadas

Denominação das mini-paredes por série	Quantidade ensaiada	Características
MN	3	Mini-paredes compostas por unidades sem adição de fibras
MN20 – 0,5%	3	Mini-paredes compostas por unidades com 0,5% de teor de fibras de 20mm
MN40 – 0,5%	3	Mini-paredes compostas por unidades com 0,5% de teor de fibras de 40mm
MN20 – 1%	3	Mini-paredes compostas por unidades com 1% de teor de fibras de 20mm
MN40 – 1%	3	Mini-paredes compostas por unidades com 1% de teor de fibras de 40mm

3.3.4 Ensaio de resistência à compressão da argamassa de assentamento

A argamassa moldada nos corpos-de-prova cilíndrico de 5 cm x 10 cm foi ensaiada à compressão segundo a NBR 13279 (2005), aos 28 dias, na mesma data dos ensaios das mini-paredes correspondentes. O ensaio foi realizado na máquina computadorizada da marca ELE e Modelo Autotest 2000, com capacidade de 2000 kN e velocidade de imposição de carregamento de 2,03 kN/s (Figura 3.17).

Para o capeamento dos corpos de prova da argamassa optou-se pela retificação de suas superfícies através de máquina adequada a esse tratamento. Isso traz como resultado superfícies bem reguladas e lisas, ideal para distribuição uniforme da carga nas superfícies dos corpos-de-prova.



Figura 3.17: Ensaio de resistência à compressão da argamassa

3.4 Módulo de deformação de prismas e mini-paredes

O módulo de deformação foi calculado para os prismas e as mini-paredes de acordo com as prescrições do ACI 530-92 (1995). Segundo esse texto, o módulo é dado pela inclinação da reta secante no diagrama tensão x deformação entre 5% e 33% da tensão de ruptura.

As curvas de tensão x deformação foram traçadas tomando-se a tensão na área bruta e calculando-se a deformação específica dividindo-se a média dos deslocamentos pelo comprimento da haste dos transdutores.

3.4.1 Módulo de deformação dos prismas

A instrumentação consistiu de dois transdutores de deslocamento conhecidos como LVDT (Linear Variable Differential Transformer) de base de medida igual a

20 mm e resolução de 0,001 mm. A velocidade de imposição de deslocamento foi de 0,005 mm/s e os registros foram feitos a cada 1,5 segundos. As leituras e o armazenamento de dados foram realizados pelo sistema de aquisição SYSTEM 5000.

A Figura 3.18 ilustra a posição da instrumentação onde foram colocados os transdutores de deslocamento.

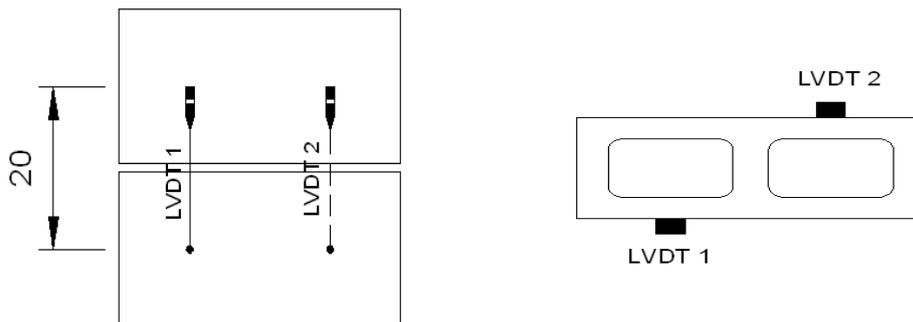


Figura 3.18: Vista frontal e em planta da localização dos transdutores de deslocamento nos prismas

Foram realizados ciclos de carga e descarga com o objetivo de acomodar e diminuir prováveis excentricidades do corpo-de-prova. A carga aplicada para a acomodação foi igual a 10% da carga de ruptura prevista para os prismas. Assim, os corpos-de-prova foram submetidos a essa carga e descarregados totalmente, sendo essa operação repetida novamente. Em seguida, os prismas foram submetidos a carregamentos até alcançarem a ruptura obtendo-se a resistência à compressão.

3.4.2 Módulo de deformação das mini-paredes

A instrumentação consistiu em transdutores de deslocamento conhecidos como LVDT de base de medida igual a 20 mm e resolução de 0,001 mm. A velocidade de imposição de deslocamento foi de 0,005 mm/s e os registros foram feitos a cada 1,5 segundos. As leituras e o armazenamento de dados foram realizados pelo sistema de aquisição SYSTEM 5000.

A instrumentação para a determinação dos deslocamentos foi colocada exatamente nas regiões centrais das cavidades das unidades como mostra a Figura 3.19.

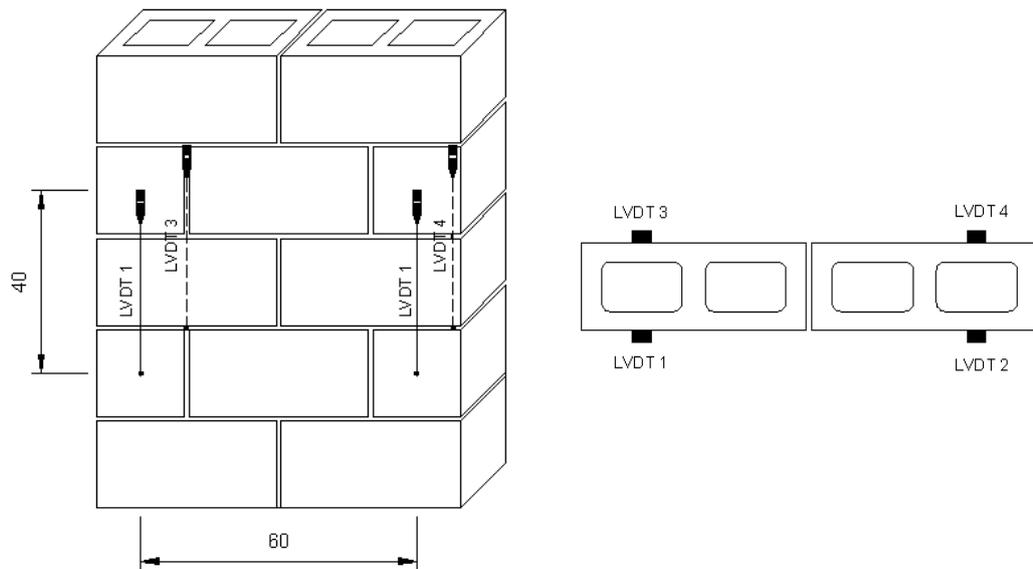


Figura 3.19: Vista frontal e em planta da localização dos transdutores de deslocamento nas mini-paredes

Foram realizadas etapas de carga e descarga com o mesmo objetivo explicitado anteriormente. A carga aplicada para a acomodação foi igual a 10% da carga de ruptura prevista para as mini-paredes. Assim, os corpos-de-prova foram submetidos a essa carga e descarregados totalmente, sendo essa operação repetida novamente. Em seguida, as mini-paredes foram submetidas a carregamentos até alcançarem a ruptura obtendo-se a resistência à compressão.

3.5 Produção dos blocos de concreto com e sem adição de fibras

O processo de fabricação dos blocos com e sem adição de fibras na fábrica Tatu Pré-Moldado foi realizado segundo as etapas descritas no Capítulo 2.

Os materiais como agregados e cimento foram recebidos e armazenados em lugares adequados: baias de armazenagem para o caso do pedrisco e da areia e silos para o caso do cimento. Foram realizados os ensaios correspondentes para a caracterização como determinação da curva granulométrica, massa específica, massa unitária no estado solto e massa unitária no estado compactado.

Todos os insumos, com exceção do cimento e as fibras, foram dosados em volume. As fibras de sisal e o cimento foram pesados separadamente e colocados diretamente no misturador (Figura 3.20).



Figura 3.20: Colocação das fibras de sisal e o cimento no misturador

O misturador possuía eixo horizontal, cuba fixa e pás móveis, com capacidade aproximada de 2500 kg. Esse tipo de equipamento de eixo horizontal é mais eficiente para a mistura de um concreto considerado seco. O ajuste da umidade foi feito visualmente por um funcionário da fábrica porque não há sensor de umidade. O tempo mínimo de mistura foi de três minutos, suficiente para obtenção da perfeita homogeneidade do concreto.

Os blocos foram produzidos em uma máquina vibro-prensa de marca Piorotti e modelo BLOCOPAC 1300 com regulagem dos tempos de produção (Figura 3.21). Trata-se de um equipamento indicado para produção em escala industrial compacta. É definida como uma máquina semiautomática dotada de silo para concreto, gaveta para enchimento da fôrma e alimentador de paletes com comando hidráulico centralizado. A instalação envolve ainda o misturador de eixo horizontal e a esteira transportadora de concreto. A vibro-prensa usada para a produção das unidades permite obtenção de resistência elevada, bom acabamento, baixo consumo de cimento e bom adensamento do concreto.



Figura 3.21: Vibro-prensa Piorotti- BLOCOPAC 1300 usada para a fabricação dos blocos (<http://www.piorotti.com.br>)

A Tabela 3.4 mostra os dados técnicos de esse tipo de equipamento

Tabela 3.5: Características técnicas da vibro-prensa

Características Técnicas	
Moldagem	
Área de moldagem	1254 x 480 mm
Altura útil de moldagem	De 40 até 300 mm
Potência instalada	
Vibradores	2 x 12,5 = 25 cv
Agitadores	5 cv
Sistema hidráulico	75 cv
Total	105 cv
Unidade hidráulica	
Capacidade do tanque	750 litros
Vazão total	430 litros/min
Peso líquido aproximado	22 000 kg

A ordem de colocação dos materiais seguiu uma sequência adequada aos equipamentos utilizados. Inicialmente foi feita a dosagem de todos os agregados.

Depois, a introdução do cimento e das fibras (no caso dos blocos com fibras), e mistura dos materiais por cerca de um minuto. Então, após acréscimo da água e aditivo foi feita a mistura final por cerca de três minutos. Depois da mistura, os materiais foram despejados em uma correia transportadora que abasteceu o recipiente de alimentação, conhecido como gaveta, encarregada de abastecer as fôrmas de aço com o material. Estando a gaveta posicionada sobre a fôrma dos blocos, foi iniciada a vibração para permitir o preenchimento delas. Quando a fôrma encontrou-se totalmente preenchida, a gaveta deslocou-se para que as hastes metálicas ou contra-moldes comprimissem a massa no interior da fôrma até o ponto em que os blocos atingissem a altura desejada (Figura 3.22 e 3.23).



Figura 3.22: Descida dos contra-moldes ou pente com acionamento de vibração



Figura 3.23: Desmoldagem dos blocos

A moldagem dos blocos foi realizada pelo ajuste dos tempos de alimentação, vibração, agitação, sobre-vibração e desforma da máquina vibro-prensa. Na definição desses tempos a experiência do operador de moldagem foi fundamental. Caso a primeira chapa de blocos não fosse produzida corretamente, ou seja, se houvesse coesão insuficiente, quebra de cantos e altura superior à especificada, o operador interrompia o processo e ajustava novos tempos de produção no painel da máquina. Isso aconteceu fundamentalmente na primeira dosagem com fibras (Figura 3.23). Dessa forma foi necessário dobrar os tempos de alimentação e vibração até a obtenção de blocos com as características desejadas (Figura 3.25).



Figura 3.24: Blocos com fibras defeituosos



Figura 3.25: Blocos produzidos corretamente

Finalizada a prensagem os blocos recém-moldados, foram transferidos para o interior das câmaras de cura como mostra a Figura 3.26. A cura térmica foi aplicada no período noturno constituída de um ciclo com duração de quatro a cinco horas e regime isotérmico de 60°C.



Figura 3.26: Blocos colocados no interior da câmara de cura

Após a cura, as unidades foram dispostas em pallets, numeradas de acordo com o tipo de bloco em função do teor e comprimento da fibra e estocadas no pátio da fábrica. Vários dias após a produção as unidades foram transportadas para o Laboratório de Estruturas.

4 Apresentação e análise dos resultados

Este capítulo é dedicado à apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios correspondentes ao programa experimental. O objetivo principal é avaliar a influência da fibra de sisal como reforço em blocos de concreto, através do estudo comparativo do comportamento mecânico dos blocos, prismas e mini-paredes com e sem adição da fibra. Para uma melhor compreensão dos resultados e obtenção de conclusões satisfatórias foram formulados testes estatísticos mencionados neste capítulo e explicados e apresentados no Apêndice A. Todas as tabelas indicadas neste capítulo mostram os valores médios dos resultados obtidos nos ensaios e os resultados individuais podem ser consultados no Apêndice B.

4.1 Materiais utilizados na composição dos blocos de concreto

A seguir são apresentadas as análises dos resultados da caracterização dos materiais utilizados na composição dos blocos: cimento, areia, pó de pedra, pedrisco e material reciclado. Também são mostradas as propriedades das fibras de sisal que constitui o reforço da matriz cimentícia das unidades de concreto.

4.1.1 Fibras de sisal

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores dos ensaios da caracterização física das fibras como massa específica real e aparente e teor de umidade.

Tabela 4.1: Massa específica real, aparente e teor de umidade das fibras de sisal

Valores	Massa específica real (kg/m ³)	Massa específica aparente (kg/m ³)	Teor de umidade (%)
Média	970,62	740,22	10,47
Sd	31,42	30,52	0,59
CV (%)	3,24	4,12	5,68

Segundo Campos (2008), a massa específica real é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis; e a massa específica aparente é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis. Dessa forma, a baixa massa específica aparente e a elevada absorção de água constituem características comuns das fibras vegetais pela grande incidência de poros permeáveis que incluem as lacunas e os lumens. Savastano (2000) obteve em seus ensaios valores de massa específica aparente entre 400 kg/m^3 e 500 kg/m^3 , inferiores aos obtidos na fibra usada para este trabalho. A razão de isso pode estar relacionada com o tratamento à base de óleo mineral com que foram impregnadas as fibras, produzindo a uma menor quantidade de poros.

Em relação ao teor de umidade, este apresentou um valor inferior à umidade máxima de 13,5% estabelecida pela Norma de Identidade, Qualidade, Apresentação e Embalagem da Fibra de Sisal (1984). Também foi inferior aos 14,6% obtidos por Toledo Filho (1997). O motivo desse resultado pode ser a diferença nas condições ambientais em que as fibras ficaram expostas, com valores baixos de umidade ambiental no interior do laboratório.

A Tabela 4.2 e Figura 4.1 mostram a absorção de água das fibras medidas em tempos pré-estabelecidos com relação à massa seca.

Tabela 4.2: Absorção de água das fibras no tempo

Tempos	Absorção de Água (%)
5 min	62
30 min	83
1 hora	90
2 horas	101
24 horas	139
48 horas	144
72 horas	149
96 horas	152

Nos primeiros 30 minutos ocorreu pelo menos 55% da absorção total, atingindo cerca de 90% do total após 24 horas. A partir das 36 horas de imersão fica evidente a estabilização do processo.

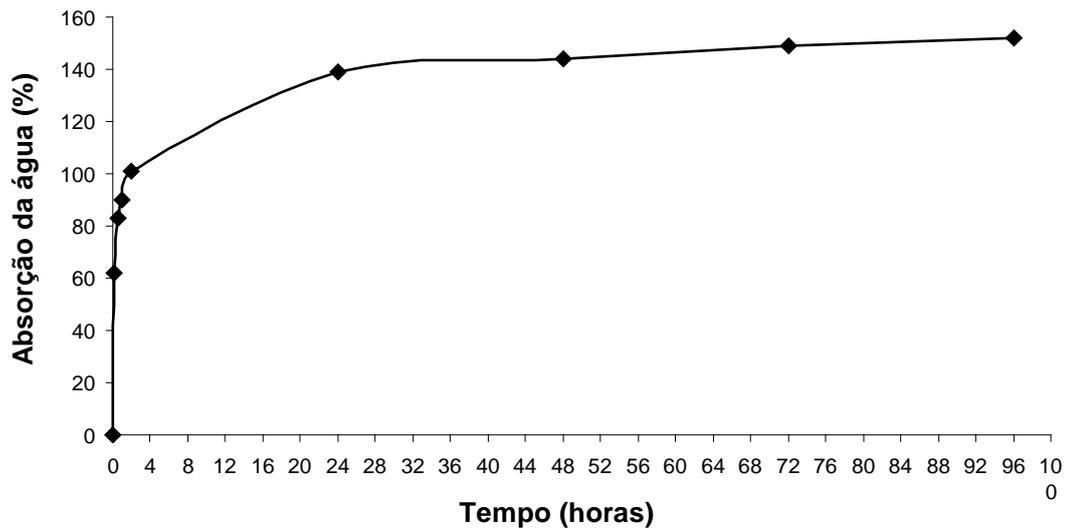


Figura 4.1: Absorção de água das fibras de sisal ao longo do tempo

Os valores de absorção máxima em 24 horas foram inferiores aos obtidos por Toledo Filho (1997) e Savastano (2000) de 193% e 151%, respectivamente. Esse fato confirma que o tratamento de óleo nas fibras contribuiu para diminuição da alta absorção e porosidade que caracteriza esse tipo de material.

Apesar das fibras estudadas terem capacidade de absorção menor em relação a outras analisadas por diferentes pesquisadores, continua apresentando valores de absorção significativos, o que podem afetar o grau de aderência com a matriz cimentícia e comprometer a trabalhabilidade da mistura. Por esse motivo, foi preciso dobrar os tempos de alimentação e de vibração da vibro-prensa para a produção dos blocos com fibras.

4.1.2 Cimento dos blocos

Utilizou-se para a fabricação dos blocos o cimento CP V ARI como foi mencionado no Capítulo 3. O cimento ARI (Alta Resistência Inicial) é caracterizado por altas resistências nas primeiras idades e se utiliza, principalmente, para a produção de elementos pré-moldados.

O relatório técnico que apresenta a análise química e física desse cimento, referente ao mês de maio de 2010, é apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Propriedades físicas e químicas do cimento empregado

Propriedades físicas	
Blaine (m ² /kg)	4488
Início de pega (min)	140
Fim de pega (min)	197
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	28,2
Resistência à compressão 3 dia (MPa)	41,6
Resistência à compressão 7 dia (MPa)	46,3
Resistência à compressão 28 dia (MPa)	54,4
Propriedades químicas	
CO ₂ (%)	1,15
Perda ao fogo 500°C (%)	0,64
SO ₃	2,89

4.1.3 Areia e pó de pedra dos blocos

A Tabela 4.4 mostra as características físicas dos agregados miúdos usados na fabricação dos blocos.

Tabela 4.4: Características físicas da areia e do pó de pedra

Materiais	Massa específica (g/cm³)		Massa unitária (g/cm³)		Mod. de finura	Dim. max. caract. (mm)
	Real	Aparente	Estado solto	Estado compactado		
Areia	2,65	2,59	1,68	1,77	1,54	1,2
Pó de pedra	2,87	2,80	1,72	1,92	3,15	4,8

Segundo Buttler (2007), a massa específica nos agregados é empregada principalmente para transformação do traço em massa para volume absoluto e cálculo do consumo de cimento. A massa específica aparente desses materiais foi menor que a real, como aconteceu com as fibras.

As massas unitárias dos agregados (estado solto e compactado) dependem da distribuição de tamanho e forma das partículas. Seu emprego destina-se, fundamentalmente, à escolha da mistura de agregados que seja mais compacta e apresente menor índice de vazios para produção de concretos. A massa unitária em

estado solto é a relação entre a massa do agregado e seu volume sem compactação. Já a massa unitária em estado compactado é definida como a relação entre sua massa e seu volume compactado (BUTTLER, 2007). Ambos agregados apresentaram o mesmo empacotamento das partículas e distribuição granulométrica. Isso pode ser comprovado quando a massa unitária compactada é dividida por a massa aparente de cada material, resultando o mesmo número em porcentagem (68%).

De acordo com a NBR 7211 (1987), a areia utilizada foi classificada na zona 1, constituindo uma areia muito fina e apresentando valores de módulo de finura menores quando comparada com o pó de pedra. É importante que exista um equilíbrio entre o consumo desses dois materiais na definição dos traços para a produção dos blocos. A areia muito fina ajudará na coesão e na textura superficial das unidades, mas uma quantidade alta desses finos poderão afetar a resistência mecânica dos blocos. Por outro lado, um consumo elevado do pó de pedra prejudica a trabalhabilidade da massa e exige maior quantidade de água por apresentar grãos angulosos de textura superficial áspera.

A análise granulométrica dos materiais antes mencionados encontra-se na Tabela 4.5

Tabela 4.5: Análise granulométrica da areia e pó de pedra utilizados nos blocos

Peneiras (mm)	Areia		Pó de pedra	
	% Retida Acumulada	%Passante Acumulada	% Retida Acumulada	%Passante Acumulada
4,8	0	100	0,6	100
2,4	0,06	99,94	34,12	65,88
1,2	1,77	98,23	51,87	48,13
0,6	10,94	89,06	65,80	34,20
0,3	46,33	53,67	76,77	23,23
0,15	95,07	4,93,	85,98	14,02
Fundo	100	0	100	0

Como se nota na Tabela 4.5, o pó de pedra possui uma quantidade de finos (<0,3 mm) menor do que a areia, 23,23% do total no pó de pedra e 53,67% na areia. Uma quantidade excessiva dessa fração pode afetar negativamente a resistência mecânica dos blocos (alta superfície específica do material demandando quantidades elevadas de água e pasta de cimento).

4.1.4 Pedrisco natural e material reciclado dos blocos

A Tabela 4.6 mostra as características físicas do agregado graúdo natural e reciclado usados na fabricação dos blocos.

Tabela 4.6: Características físicas do pedrisco e agregado graúdo reciclado

Materiais	Massa específica (g/cm ³)		Massa unitária (g/cm ³)		Mod. de finura	Dim. max. caract. (mm)
	Real	Aparente	Estado solto	Estado compactado		
Pedrisco natural	2,75	2,70	1,49	1,68	5,73	9,5
Agregado reciclado	2,36	2,28	1,41	1,70	4,68	9,5

As massas específicas (real e aparente) do agregado reciclado foram menores que as do agregado natural. Isso se deve à grande quantidade de argamassa aderida ao material reciclado e, conseqüentemente, maior porosidade.

Com relação à massa unitária, o agregado reciclado apresentou uma diminuição da massa unitária no estado solto, comparativamente ao agregado natural, em razão da argamassa aderida as partículas do agregado. Com relação à massa unitária no estado compactado, foi maior para o reciclado. Provavelmente isso aconteceu pelo processo de compactação de cada camada realizado durante o ensaio, o que provocou a desagregação das partículas devido à fragilidade do agregado gerando, conseqüentemente, maior quantidade de finos que ocasionaram um aumento da massa unitária no estado compactado.

Apesar dos dois agregados terem a mesma dimensão máxima, o reciclável apresenta menor módulo de finura que o natural, o que deve ter sido provocado pelo processo de britagem. Esse tipo de processo ocasiona a desagregação das partículas, por se tratar de resíduo de bloco e ser um material frágil.

Os resultados granulométricos obtidos para o agregado graúdo natural e reciclado encontram-se na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Análise granulométrica dos agregados naturais e reciclados usados nos blocos

Peneiras (mm)	Pedrisco natural		Material reciclado	
	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
12,5	0	100	0,16	100
9,5	1,10	98,90	1,30	98,70
6,3	33,38	66,62	11,15	88,85
4,8	74,37	25,63	22,09	77,91
2,4	97,40	2,60	44,38	55,62
Fundo	100	0	100	0

Observando-se a Tabela 4.7, nota-se que o agregado reciclado apresentou maior quantidade de material fino (<4,8 mm) do que o natural. De fato, os finos no agregado reciclado são 78% do total e aproximadamente 25% do total no pedrisco natural. O material reciclado não é enquadrado na classificação de brita zero, empregada normalmente para a produção de blocos de concreto. O pedrisco natural cumpre com os limites indicados para essa graduação de agregado graúdo.

4.2 Materiais utilizados na composição da argamassa

A Tabela 4.8 apresenta o traço em volume, a relação água/cimento e a consistência utilizada na argamassa.

Tabela 4.8: Características da argamassa de assentamento

Traço em volume	Consumo de materiais (kg/m ³)				Relação a/c	Consistência (mm)
	Cimento	Cal	Areia	Água		
1:0,5:4,5	200	88	796	266	1,33	280 ± 10

A seguir são apresentadas as análises dos resultados da caracterização dos materiais utilizados na composição da argamassa: areia, cal, e cimento.

4.2.1 Cimento e cal da argamassa

Os valores de massa específica real e aparente e massa unitária desses materiais foram determinados de acordo com a NBR NM 23 (2000) e NBR NM 45 (2006), respectivamente.

Tabela 4.9: Massa específica e unitária do cimento e da cal usados na argamassa

Materiais	Massa específica real (g/cm³)	Massa específica aparente (g/cm³)	Massa unitária no estado solto (g/cm³)
Cimento	2,96	1,32	1,09
Cal	2,63	0,70	0,75

4.2.2 Areia da argamassa

A Tabela 4.10 apresenta as características físicas da areia da argamassa.

Tabela 4.10: Características físicas da areia da argamassa

Material	Massa específica (g/cm³)		Massa unitária (g/cm³)		Mod. de finura	Dim. max. caract. (mm)
	Real	Aparente	Estado solto	Estado compactado		
Areia	2,62	2,56	1,48	1,62	2,00	2,4

O agregado miúdo foi classificado como areia fina (zona 2) segundo a NBR 7211 (1987). Sabbatini (1984) recomenda limite entre 1,80 e 2,80 para o módulo de finura do agregado e a areia utilizada enquadrou-se dentro deste limite.

A composição granulométrica do agregado miúdo foi determinada de acordo com a NBR NM 248 (2003) e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Composição granulométrica do agregado miúdo utilizado na argamassa

Peneiras (mm)	Areia fina	
	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
4,8	0	100
2,4	0	100
1,2	5,28	94,72
0,6	28,39	71,61
0,3	69,64	30,36
0,15	97,17	2,83
Fundo	100	0

A Figura 4.2 mostra que a areia está classificada entre os limites inferiores e superiores estipulados pela norma britânica BS 1200 (1976).

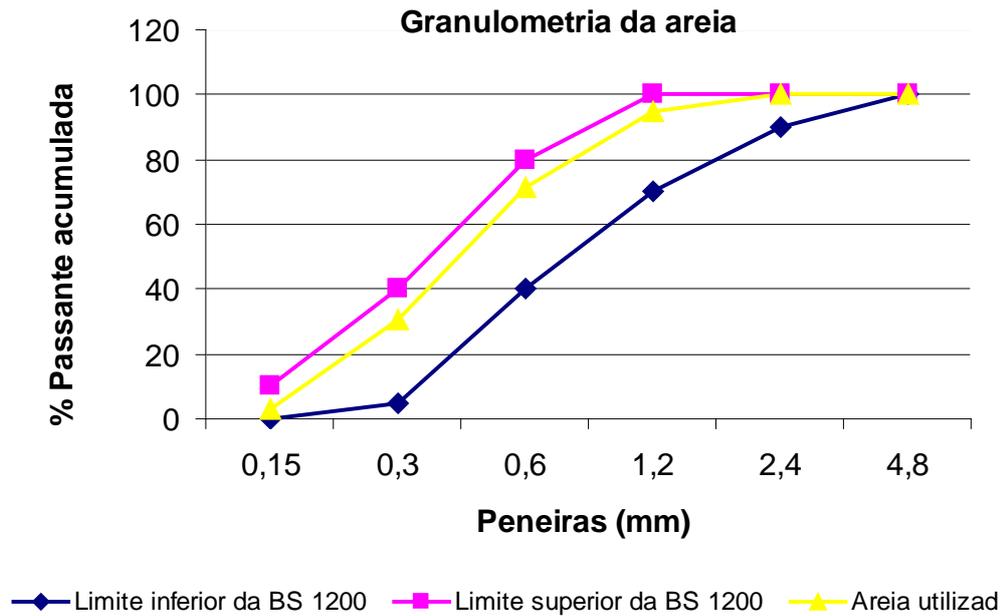


Figura 4.2: Comparação entre a areia utilizada e a especificada pela BS 1200 (1976).

4.3 Propriedades físicas dos blocos

4.3.1 Análise dimensional dos blocos

Conforme relatado no Capítulo 3, as dimensões dos blocos estruturais estabelecidas pelos códigos normativos são condições essenciais para um correto desempenho das unidades. Dessa forma poderá ser evitado o surgimento de futuras patologias. É por essa razão que todas as unidades produzidas com ou sem fibras de sisal têm que obedecer a esses limites.

Largura, comprimento e altura.

A Tabela 4.12 mostra os resultados do comprimento, largura e altura real para cada tipo de bloco.

Tabela 4.12: Largura, comprimento e altura real de cada tipo de bloco

Tipo de Bloco	Largura (mm)			Comprimento (mm)			Altura (mm)		
	Média	S _d	C.V (%)	Média	S _d	C.V (%)	Média	S _d	C.V (%)
BE	139,81	0,22	0,16	391,35	0,49	0,12	189,98	1,08	0,57
BE20-0,5%	140,05	0,51	0,37	391,40	0,61	0,16	191,37	0,86	0,45
BE40-0,5%	140,02	0,36	0,26	391,14	0,82	0,21	190,53	1,03	0,54
BE20-1%	140,11	0,48	0,34	391,28	0,72	0,18	193,54	1,17	0,60
BE40-1%	140,40	1,00	0,71	391,64	0,57	0,15	191,79	1,50	0,78

Todas as unidades com dimensões nominais de 140 mm x 190 mm x 390 mm (largura, altura, comprimento) satisfizeram os requisitos da NBR 6136 (2007), a qual especifica tolerâncias máximas de fabricação: ± 2 mm para a largura e ± 3 mm para altura e comprimento.

Espessura mínima das paredes.

As espessuras reais das paredes longitudinais e transversais medida nos blocos ensaiados são apresentadas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Espessuras reais das paredes longitudinais e transversais para os blocos

Tipo de Bloco	Espessuras reais das paredes (mm)					
	Paredes longitudinais			Paredes transversais		
	Média	S _d	C.V (%)	Média	S _d	C.V (%)
BE	31,00	0,74	2,38	31,79	1,45	4,56
BE20-0,5%	30,62	0,94	3,08	31,84	1,59	4,98
BE40-0,5%	31,03	0,95	3,07	31,54	1,16	3,67
BE20-1%	31,16	0,77	2,47	31,89	1,60	5,00
BE40-1%	31,09	0,87	2,80	31,77	1,49	4,70

Segundo os resultados da Tabela 4.13, os blocos analisados apresentam valores médios superiores aos mínimos prescritos pela NBR 6136 (2007), cumprindo as exigências da norma.

Dimensões dos furos.

A NBR 6136 (2007) exige que para este tipo de bloco o menor diâmetro deve ser maior que 70 mm. A Tabela 4.14 mostra que os blocos ensaiados cumprem com esse requisito.

Tabela 4.14: Menor dimensão dos furos para cada tipo de bloco

Tipo de Bloco	Menor dimensão dos furos (mm)		
	Média	S _d	C.V (%)
BE	88,36	0,68	0,77
BE20-0,5%	88,16	0,56	0,64
BE40-0,5%	88,35	0,53	0,61
BE20-1%	88,34	0,59	0,66
BE40-1%	89,04	0,68	0,76

4.3.2 Absorção de água dos blocos

A realização do ensaio para o cálculo da absorção de água dos blocos foi a partir da determinação da massa saturada e a massa seca em estufa. A Tabela 4.15 apresenta a absorção para cada tipo de bloco utilizado nesta pesquisa.

Tabela 4.15 Absorção de água para cada tipo de bloco

Tipo de Bloco	Absorção de água (%)		
	Média	S _d	C.V (%)
BE	7,78	0,26	0,03
BE20-0,5%	10,17	0,12	0,01
BE40-0,5%	10,61	0,34	0,03
BE20-1%	10,00	1,03	0,10
BE40-1%	8,91	0,66	7,43

A NBR 6136 (2007) estabelece que a absorção de água, para blocos estruturais de concreto, deve ser menor ou igual a 10%. Os blocos sem fibras apresentaram menor absorção em comparação aos blocos com fibras, cumprindo com o requisito da norma. A presença de fibras no concreto provocou uma maior absorção das unidades indicando maior incidência de poros permeáveis. Entretanto, os valores obtidos para algumas unidades com fibras são apenas ligeiramente maiores que o limite, podendo ser considerados aceitáveis.

4.3.3 Área bruta e área líquida dos blocos

As áreas bruta e líquida para cada um das séries dos blocos avaliados, assim como a relação entre área líquida e área bruta é apresentada na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Valores de área líquida e bruta para os blocos

Tipo de Bloco	Área bruta (mm ²)			Área líquida (mm ²)			A _{liq} /A _{br} (%)
	Média	S _d	C.V (%)	Média	S _d	C.V (%)	
BE	54773,2	90,19	0,16	29214,11	93,72	0,32	53,34
BE20-0,5%	54974,4	74,48	0,14	29156,92	45,48	0,16	53,04
BE40-0,5%	54853,4	154,67	0,28	29123,37	153,92	0,53	53,09
BE20-1%	54941,7	172,24	0,31	29381,81	317,27	1,08	53,48
BE40-1%	55254,7	261,31	0,47	28791,12	724,27	2,52	52,11

Todas as unidades apresentaram valores de área líquida muito parecidos, uma vez que foram produzidas na mesma máquina com o mesmo molde.

De maneira geral, a relação entre área líquida e bruta foi 53% aproximando-se ao valor adotado normalmente para o cálculo da alvenaria estrutural (50%). Ressalta-se que as unidades enquadram-se dentro da classificação de blocos vazados.

4.3.4 Teor de umidade dos blocos

A NBR 6136 (1994) expressa que o máximo valor de umidade que podem apresentar os blocos é de 40% com variação da umidade relativa anual entre 50% e 75%. Esse é o caso do Laboratório de Estruturas localizado em São Carlos no estado de São Paulo. Por tanto, os blocos cumprem amplamente com as exigências da norma como mostra a Tabela 4.17.

Tabela 4.17: Teor de umidade média para os blocos

Tipo de Bloco	Teor de umidade (%)		
	Média	S _d	C.V (%)
BE	31,89	1,11	3,47
BE20-0,5%	25,71	0,73	2,82
BE40-0,5%	17,56	1,44	8,20
BE20-1%	18,27	1,56	8,54
BE40-1%	22,94	0,95	4,13

4.3.5 Massa específica dos blocos

Na Tabela 4.18 encontram-se os resultados das massas específicas seca ao ar e saturada para cada tipo de bloco.

Tabela 4.18: Massa específica para os blocos

Tipo de Bloco	Massa específica seca ao ar (g/cm ³)			Massa específica saturada (g/cm ³)		
	Média	S _d	C.V (%)	Média	S _d	C.V (%)
BE	2,18	0,04	1,63	2,33	0,01	0,20
BE20-0,5%	2,12	0,01	0,65	2,27	0,02	0,67
BE40-0,5%	2,08	0,01	0,67	2,26	0,01	0,31
BE20-1%	2,11	0,05	0,03	2,28	0,03	1,48
BE40-1%	2,18	0,03	1,15	2,33	0,01	0,61

Os valores de massa específica seca ao ar e saturada são menores para os blocos com fibras que para os blocos sem fibras. Isso se dá devido às fibras e aos vazios introduzidos por elas, além de agirem como agentes incorporadores de ar. Esses efeitos não foram tão significativos nos blocos com maior teor e dimensão das fibras. As causas desse comportamento podem estar relacionadas com o processo de fabricação desse tipo de unidade. A moldagem foi realizada com um aumento nos tempos de alimentação, vibração e agitação da máquina por causa da presença de maior quantidade de fibras. Dessa forma foram diminuídos os vazios e o ar incorporado nesse tipo de unidade.

4.4 Resistência à compressão dos blocos com e sem adição de fibras

O ensaio de resistência à compressão foi feito em 18 unidades para cada série (5 tipos de blocos), totalizando 90 blocos ensaiados.

Os valores de resistência à compressão média e características de cada tipo de bloco são apresentados na Tabela 4.19. Esses resultados foram calculados em função da área bruta das unidades.

Tabela 4.19: Resistência à compressão média e característica dos blocos com e sem fibras

Tipo de Bloco	Resistência à compressão dos blocos (MPa)			
	Média (f_{bm}) (MPa)	S_d (MPa)	C.V (%)	Caract. (f_{bk}) (MPa)
BE	11,26	1,06	9,42	9,43
BE20-0,5%	7,11	0,48	6,79	6,25
BE40-0,5%	6,00	0,61	10,24	4,81
BE20-1%	7,16	1,22	13,03	6,10
BE40-1%	6,43	0,78	12,12	5,22

Nota-se que os resultados de resistência à compressão média para os cinco tipos de blocos apresentaram um coeficiente de variação aceitável, inferior a 15%. Essa resistência foi cerca de 19% maior do que a resistência característica.

Todas as unidades apresentaram valores característicos de resistência à compressão que se enquadraram na classe de blocos estruturais de 4 MPa, que havia sido solicitada ao fabricante. As unidades sem adição de fibras podem até ser enquadradas na classe de blocos estruturais de 8 MPa. Já as unidades com adição de fibras de comprimento 20 mm podem ser enquadradas na classe de blocos estruturais de 6 MPa. As unidades com fibras de 40 mm são mesmo classificadas na classe de 4 MPa.

A Tabela 4.20 mostra a relação entre a resistência média à compressão dos blocos com adição de fibras e a resistência média dos blocos sem fibras, tomados como referência.

Tabela 4.20: Relação entre resistências de blocos com e sem fibras (referência)

Tipo de unidade	f_{bm} (MPa)	Relação c/ a referência	Varição c/ a referência
BE	11,26	1	0
BE20-0,5%	7,11	0,63	-37%
BE40-0,5%	6,00	0,53	-47%
BE20-1%	7,16	0,64	-36%
BE40-1%	6,43	0,57	-43%

Como pode ser observado, os blocos com fibras apresentaram diminuição da resistência à compressão em uma média de 41% em relação aos blocos de referência, apesar de terem alcançado a resistência característica pretendida. A análise de variância (ANOVA), realizada com os resultados dos ensaios e mostrado no Apêndice A deste trabalho, mostra que as médias das amostras são diferentes. Para um nível de confiança de 95%, a resistência à compressão do bloco sem adição de fibra é significativamente maior que para os blocos com adição, comprovado pelo Teste de Tukey.

Todas as unidades foram fabricadas a escala industrial na fábrica TATU Pré-Moldados utilizando o mesmo traço. A única diferença foi a introdução de diferentes teores e comprimentos de fibras. Nesse caso é muito importante se discutir os motivos pelos quais os blocos com fibras apresentaram menor resistência que os sem fibras. Provavelmente, a presença de sisal no concreto provocou falhas no material, menor compactação e maior índice de vazios. Isso pode ser comprovado pela diminuição das massas específicas dos blocos com fibras quando comparados com os blocos de referência.

Na Tabela 4.20 pode-se observar que os blocos com fibras de comprimento 20 mm apresentaram maior resistência do que os blocos com fibras de 40 mm. Esse resultado pode estar relacionado ao fato de que as fibras de menor dimensão se acomodaram e se distribuíram melhor nas relativamente pequenas dimensões dos blocos, o que não ocorreu com as fibras maiores deixando algumas falhas na estrutura do material. Pelo teste de ANOVA com dois fatores pode-se afirmar que o comprimento influenciou na resistência à compressão dos blocos reforçados. Para um nível de significância de 0,05, as unidades com adição de fibras de 20 mm apresentaram maior resistência com relação às unidades com fibras de 40 mm, para um mesmo teor.

Quanto ao teor de fibras não ocorreu diferença significativa entre as amostras, sendo aproximadamente as mesmas as resistências dos blocos com teores de fibras de 0,5% e 1%, seja para o comprimento de 20 mm ou de 40 mm. O teor de 1% apresentou uma resistência ligeiramente maior que o teor de 0,5%. Porém, o teste de ANOVA com dois fatores apontou que não existe diferença estatística nas médias dos blocos com 0,5% e 1% de adição de fibras, na resistência à compressão dos blocos.

De todos os blocos compostos o BE20-1% foi o que apresentou melhor desempenho em relação ao bloco sem fibras.

Foi observado durante o ensaio de compressão que nas unidades sem reforço ocorreu um colapso instantâneo, como mostra a Figura 4.3. O rompimento brusco é produto da maior resistência à compressão que apresentaram esses blocos, tornando-os mais frágil. Já os blocos reforçados com fibras mostraram ausência de ruptura frágil, como se apresenta na Figura 4.4.



Figura 4.3: Ruptura frágil dos blocos sem adição de fibras



Figura 4.4: Ruptura dúctil dos blocos com adição de fibras

As unidades reforçadas, mesmo quando já rompidas, mantiveram suas partes unidas pelas fibras, não perdendo sua continuidade e tornando a ruptura um processo progressivo. Segundo Campos (2008), isso comprova o papel das fibras como materiais capazes de unir as faces das fissuras. Elas conferem ao material certa capacidade, embora pequena, de carregamento após a fissuração que pode contribuir para o aumento da tenacidade do elemento.

De forma geral, a maioria dos blocos apresentou rupturas em forma de cone, típicas de compressão, com fissuras verticais nas paredes transversais.



Figura 4.5: Ruptura típica dos blocos sob compressão

4.5 Resistência à compressão da argamassa de assentamento.

Os prismas e mini-paredes foram feitos com um único tipo de argamassa do tipo (ii) de média resistência, conforme o que já foi dito no Capítulo 3.

Foram moldados 6 corpos-de-prova com dimensões de 10 cm x 5 cm (comprimento x diâmetro) para cada série de blocos, totalizando 30 unidades.

Na Tabela 4.21 são mostradas as resistências à compressão da argamassa.

Tabela 4.21: Resistências à compressão da argamassa

Tipo de bloco	Num. de CP's	Média (f_a) (MPa)	S_d (MPa)	C.V (%)	f_a/f_{bm}
BE	6	6,08	0,54	11,83	0,54
BE20-0,5%	6	5,93	0,35	7,25	0,83
BE40-0,5%	6	6,15	0,58	6,52	1,03
BE20-1%	6	7,02	0,79	7,54	0,98
BE40-1%	6	6,23	0,56	4,19	0,97
Resistência média geral		6,28			

Segundo a Tabela 4.21, a resistência média à compressão da argamassa foi similar à especificada pela norma BS 5628 - Part 1 (1992) para esse tipo de traço (6,5 MPa).

A relação entre a resistência à compressão da argamassa e do bloco sem fibras foi um pouco mais baixa que o limite recomendado por vários autores, entre eles Mohamad (1998), que estabelece valores entre 0,7 e 1. Isso, em tese, poderia influenciar na resistência à compressão dos elementos executados com os blocos sem fibras.

4.6 Ensaio dos prismas com e sem adição de fibras

As propriedades estudadas para os prismas foram: resistência à compressão e módulo de deformação. Assim, procurou-se avaliar se a incorporação das fibras de sisal influenciou essas características.

4.6.1 Resistência à compressão dos prismas

O ensaio de resistência à compressão foi feito em 12 corpos-de-prova por tipo de bloco, totalizando 60 prismas ensaiados na idade de 28 dias.

Os resultados de resistência à compressão correspondente à área bruta dos prismas são apresentados na Tabela 4.22. São mostrados também os fatores de eficiência prisma/bloco.

Tabela 4.22: Resistência à compressão dos prismas com e sem adição de fibras

Tipo de prisma	Média (f_p) (MPa)	S_d (MPa)	C.V (%)	Eficiência (f_p/f_{bm})
PR	5,19	1,02	14,56	0,46
PR20-0,5%	3,49	0,41	11,67	0,49
PR40-0,5%	3,25	0,35	10,86	0,54
PR20-1%	4,37	0,41	9,34	0,61
PR40-1%	3,82	0,75	13,69	0,59

Segundo a Tabela 4.22, os resultados da resistência à compressão média dos prismas apresentaram um coeficiente de variação aceitável, inferior a 15%. Observa-se também que os prismas contendo fibras apresentaram uma resistência à compressão menor que os prismas sem fibras, resultado para o qual a análise será apresentada posteriormente. Com relação ao fator de eficiência (f_p/f_{bm}), o valor médio geral obtido foi 0,54, um pouco abaixo do esperado quando se considera a resistência dos blocos utilizados. Possivelmente, o forro pacote, material utilizado como capeamento para os prismas, interferiu na baixa eficiência obtida.

A Tabela 4.23 mostra a relação entre a resistência média dos prismas com adição de fibras e a resistência média dos prismas sem fibras (referência).

Tabela 4.23: Relação entre resistências de prismas com e sem fibras (referência)

Tipo de umidade	f_p (MPa)	Relação c/ a referência	Varição c/ a referência
PR	5,19	1	0
PR20-0,5%	3,49	0,67	-33%
PR40-0,5%	3,25	0,63	-37%
PR20-1%	4,37	0,84	-16%
PR40-1%	3,82	0,74	-26%

Segundo os resultados da Tabela 4.23 e a análise de variância apresentada no Apêndice A, existem diferenças estatisticamente significativas entre as médias das cinco amostras apresentadas. O teste de Tukey verifica que, para um nível de confiança de 95%, a resistência à compressão dos prismas sem fibras é maior que a

dos prismas com fibras. De fato, os prismas reforçados com fibras apresentaram uma diminuição média de 28% da resistência em relação aos prismas sem fibras.

A Tabela 4.23 confirma o resultado observado para os blocos, sendo o prisma com fibras mais resistente o composto por blocos com adição de fibras de comprimento 20 mm e teor de 1%. De fato, foram eles que apresentaram a menor redução da resistência à compressão em comparação com os prismas sem fibras.

Os corpos-de-prova com fibras de comprimento 20 mm apresentaram melhor desempenho, ou seja, maior resistência que os prismas com fibras de 40 mm para os mesmos teores. No teste de ANOVA com dois fatores feitos para os componentes com adição de sisal, é rejeitada a hipótese de igualdade (hipótese nula). O comprimento da fibra influenciou na resistência à compressão dos prismas reforçados. Foi comprovado estatisticamente, para um nível de significância de 0,05, que os prismas compostos com fibras de 20 mm apresentaram maior resistência que os prismas com fibras de 40 mm, para um mesmo teor.

Quanto à fração volumétrica das fibras, os componentes com 1% de adição de sisal, para um mesmo comprimento, apresentaram melhor comportamento. Esse fator foi mais significativo nos prismas que nos blocos, contribuindo mais para a capacidade resistente do elemento. Esse fato pode ser comprovado através da análise estatística, concluindo-se que o teor das fibras realmente influenciou na resistência à compressão desses corpos-de-prova.

Na maioria dos casos a ruptura ocorreu através do desenvolvimento de fissuras verticais ao longo dos septos laterais. Elas se iniciaram próximo às juntas de argamassa e a partir daí se espalharam por toda a altura do elemento, com ruptura característica por tração na região próxima da junta. A Figura 4.6 mostra como isso ocorreu de forma típica para cada tipo de prisma.

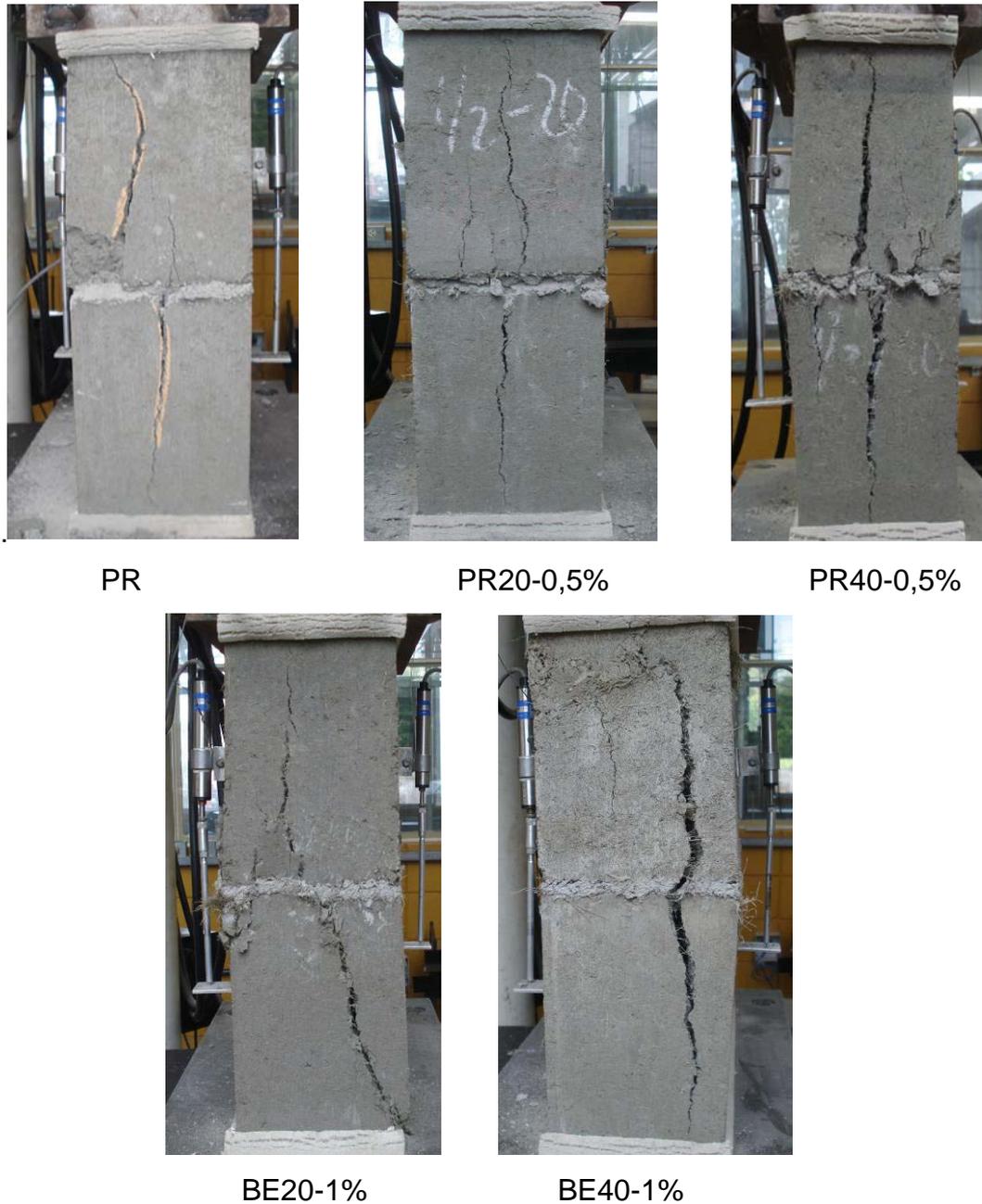


Figura 4.6: Ruptura típica dos prismas sob compressão

Segundo La Rovere (2001), devido ao fato da argamassa ser menos rígida que os blocos, ela tem a tendência de deformar-se mais do que as unidades. Essa deformação acaba sendo impedida pela aderência entre os componentes, o que provoca o surgimento de tensões de tração nas unidades transversalmente ao eixo vertical de compressão

Foi observada também, durante o ensaio de compressão dos prismas com fibras, uma ruptura dúctil dos elementos, mantendo-se suas partes unidas pelas fibras devido à aderência entre estas e a matriz. Entretanto, nos elementos sem

fibras ocorreu um rompimento brusco, característico de um comportamento frágil. A maior resistência à compressão dos blocos que formam os prismas de referência também pode contribuir para esse tipo de ruptura.



Ruptura frágil dos prismas sem fibras Ruptura dúctil dos prismas com fibras

Figura 4.7: Rupturas dos prismas sob compressão

4.6.2 Módulo de deformação dos prismas

O módulo de deformação dos prismas foi calculado de acordo com as prescrições da norma ACI 530-92 (1995), conforme mencionado no Capítulo 3.

Os resultados de módulo de deformação desses elementos são apresentados na Tabela 4.24. Ressalta-se que tanto a tensão quanto os módulos estão referidos à área bruta dos elementos. A coluna Def. 33% apresenta a deformação referente a 33% da tensão de ruptura, sendo a coluna Def. Última a deformação no momento da ruptura.

Tabela 4.24: Módulo de deformação dos prismas com e sem adição de fibras

Tipo de prisma	f_p (MPa)	Módulo (E_p) (MPa)	Def. 33% (‰)	Def. Última (‰)	Relação E_p/f_p
PR	5,19	5283,86	0,28	1,18	1018
PR20-0,5%	3,49	3528,03	0,31	2,10	1011
PR40-0,5%	3,25	3084,64	0,55	3,93	949
PR20-1%	4,37	4484,49	0,31	2,22	1026
PR40-1%	3,82	3916,51	0,32	2,20	1025

Analisando-se os resultados, nota-se que houve redução da rigidez dos prismas com adição de fibras comparados com os prismas sem fibras. Esse resultado era de certa forma esperado já que resistências maiores tendem a produzir um conjunto mais rígido. Em estudos realizados por Picanço (2005) foi observada a mesma tendência em compósitos com adição de fibras vegetais. Nos resultados desta pesquisa pode-se observar uma redução média de 29% do módulo de deformação dos prismas com fibras em relação aos prismas sem fibras.

A Tabela 4.24 apresenta também a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência média à compressão dos prismas, com valores em torno de 1000. Pedreschi (1998) cita ensaios realizados com prismas feitos com diferentes blocos, tipos de argamassa, padrões de assentamento e direções de carregamentos, obtendo-se uma relação também em torno de 1000.

Para melhor visualização dos resultados foram traçadas as curvas de tensão x deformação para cada prisma estudado. Elas se encontram organizadas, por tipo de prisma, nos gráficos apresentados nas Figuras 4.8 a 4.12.

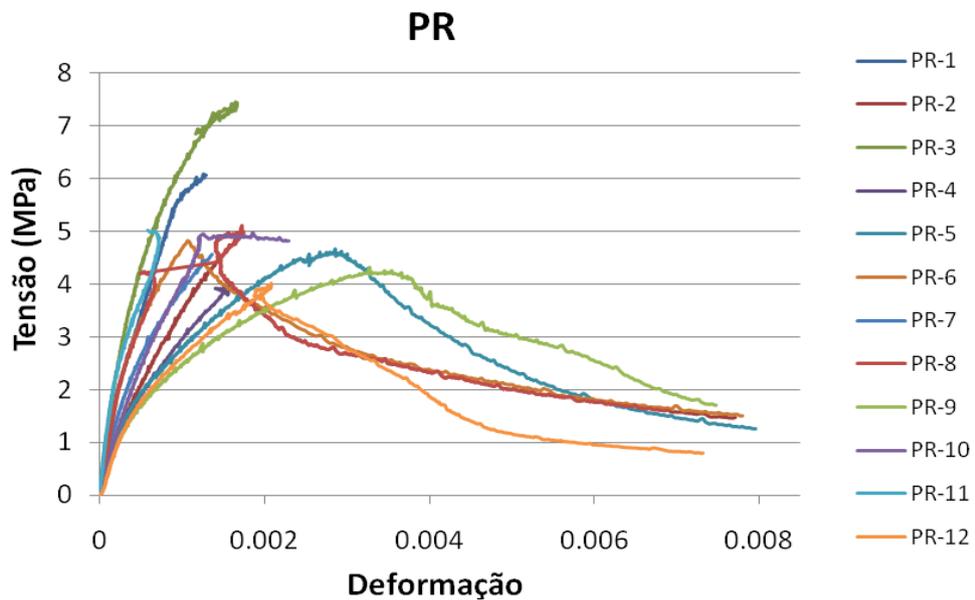


Figura 4.8: Curva tensão – deformação do prisma sem fibras

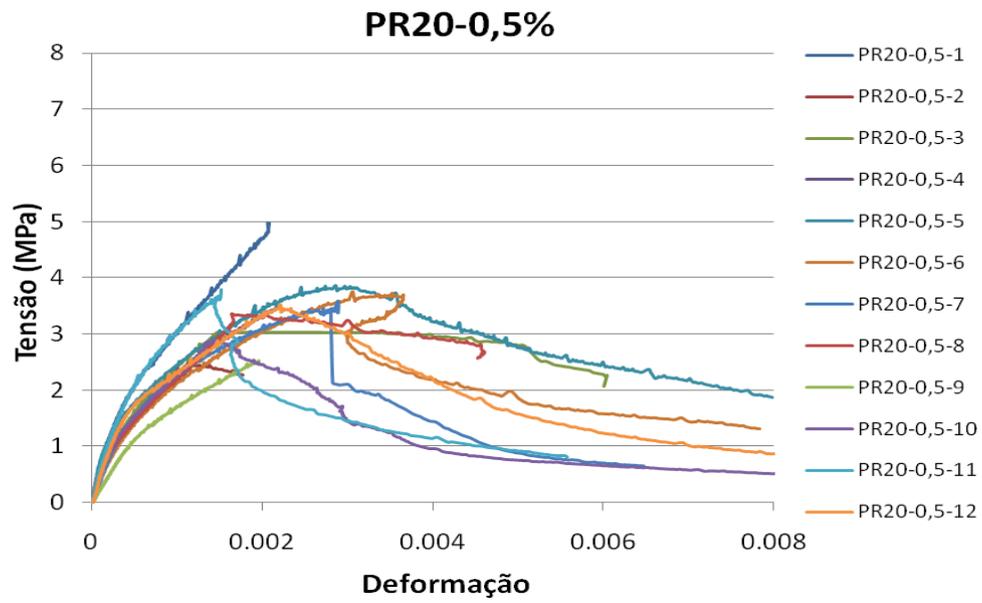


Figura 4.9: Curva tensão – deformação do prisma PR20-0,5%

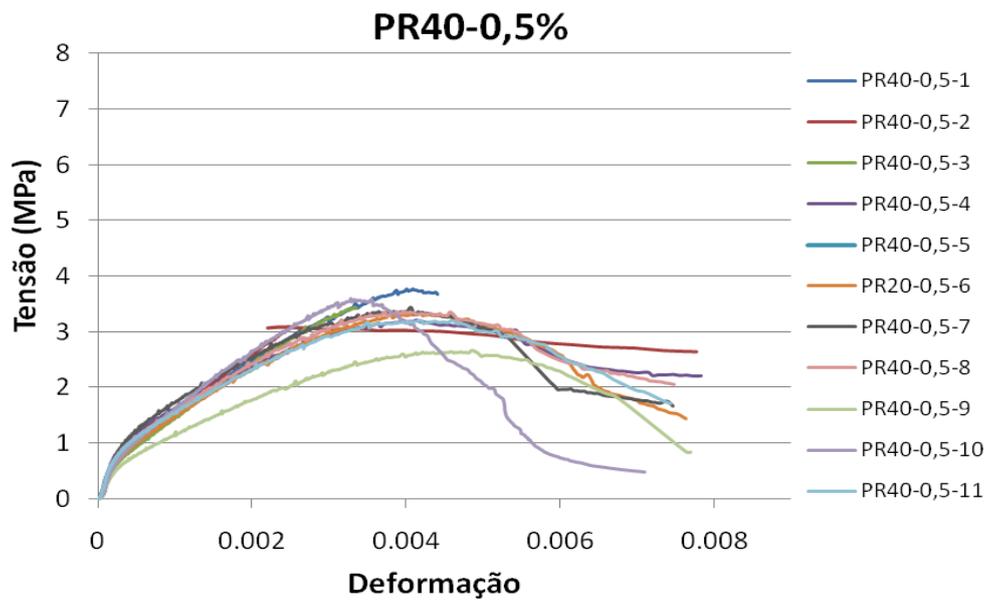


Figura 4.10: Curva tensão – deformação do prisma PR40-0,5%

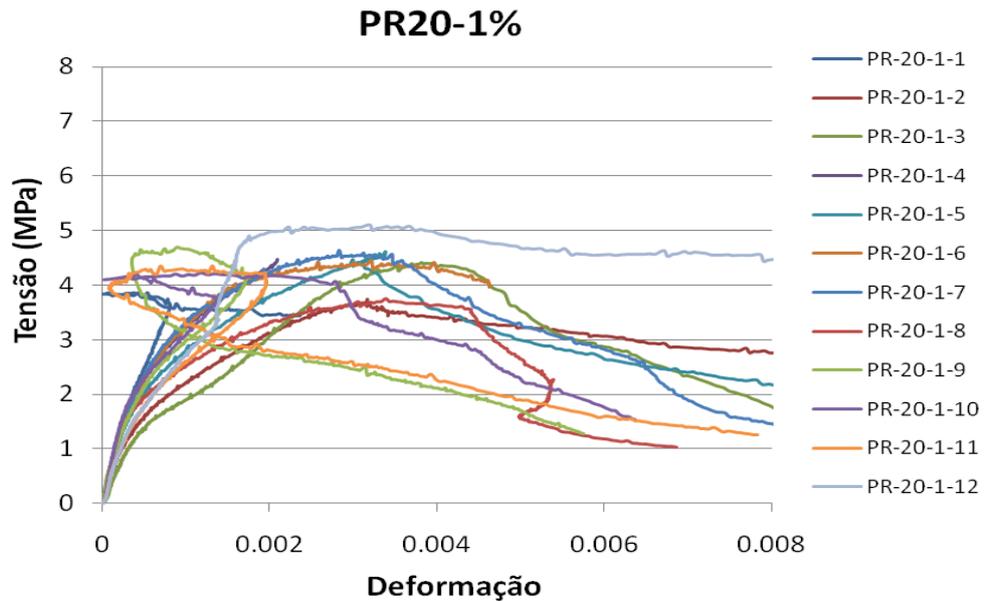


Figura 4.11: Curva tensão – deformação do prisma PR20-1%

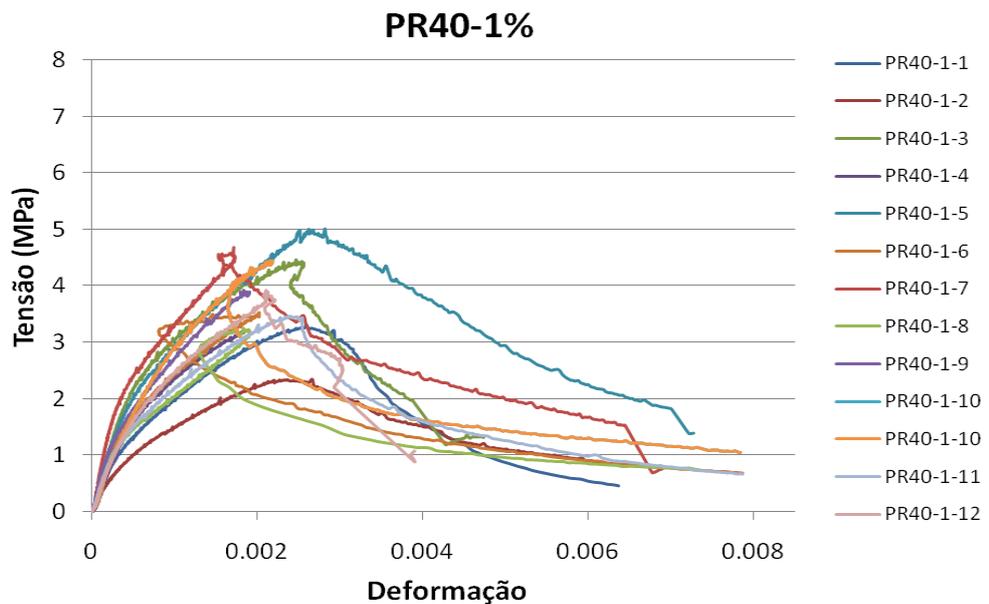


Figura 4.12: Curva tensão – deformação do prisma PR40-1%

Embora haja redução da resistência á compressão dos prismas com adição da fibra de sisal, percebe-se ganho na capacidade de absorver deformações porque a maioria deles apresentaram os trechos pós-pico das curvas. Isso mostra o papel das fibras, que torna os compósitos vantajosos em termos de ductilidade e capacidade de resistência residual após a fissuração da matriz. Dessa forma, é confirmado o modo de ruptura típico dos prismas com fibras, os quais mostraram maior

capacidade de absorção de energia em lugar do colapso frágil, observado para os prismas sem fibras.

4.7 Ensaio das mini-paredes com e sem adição de fibras

Conforme descrito no Capítulo 3 foram ensaiadas, aos 28 dias, 3 mini-paredes para cada série de blocos, totalizando 15 elementos. As propriedades avaliadas para esses elementos foram resistência à compressão e módulo de deformação. Foi utilizada a mesma argamassa empregada nos prismas.

4.7.1 Resistência à compressão das mini-paredes

Os resultados de resistência à compressão, em relação à área bruta, das mini-paredes ensaiadas são apresentados na Tabela 4.25. Também são mostrados os fatores de eficiência mini-parede/bloco e mini-parede/prisma. O f_{mp} representa a resistência média das mini-paredes.

Tabela 4.25: Resistência à compressão das mini-paredes com e sem adição de fibras

Tipo de elemento	Média (f_{mp}) (MPa)	S_d (MPa)	C.V (%)	f_{mp} / f_{bk}	f_{mp} / f_p
MN	3,08	0,70	22,68	0,33	0,59
MN 20-0,5%	2,95	0,37	12,41	0,47	0,81
MN 40-0,5%	2,96	0,19	6,57	0,62	0,91
MN 20-1%	3,30	0,31	9,49	0,54	0,76
MN 40-1%	3,07	0,22	7,04	0,59	0,80

Nota-se que não houve mudança significativa na resistência à compressão das mini-paredes com fibras de sisal, obtendo-se valores muito próximos ou mesmo superiores aos obtidos para as mini-paredes sem fibras. De fato, o elemento constituído de blocos com adição de fibras de 20 mm e teor de 1% apresentou maior resistência que a parede sem fibras.

Com relação ao fator de eficiência mini-parede/bloco, Romagna (2000) cita que, para blocos vazados de concreto, esse fator varia de 0,40 a 0,60 considerando-se argamassas usuais. Os elementos reforçados encontram-se nesse intervalo, sendo o valor médio obtido igual a 0,56. Nas mini-paredes sem fibras a relação ficou mais

baixa, já que a eficiência tende a ser menor quando a resistência do bloco resulta maior, como ocorreu nesse tipo de unidade sem adição de fibras.

A Tabela 4.26 mostra a relação entre a resistência média medida na área bruta das mini-paredes com adição de fibras e a resistência média das mini-paredes de referência.

Tabela 4.26: Relação entre resistências das mini-paredes com e sem fibras (referência)

Tipo de elemento	f_{mp} (MPa)	Relação c/ a referência	Variação c/ a referência
MN	3,08	1	0
MN 20-0,5%	2,95	0,95	-5%
MN 40-0,5%	2,96	0,96	-4%
MN 20-1%	3,30	1,07	7%
MN 40-1%	3,07	0,99	-1%

As mini-paredes com fibras apresentaram uma diminuição da resistência à compressão pouco significativa, sendo a média igual a 3%. No caso da MN20-1%, a resistência média foi superior à mini-parede sem fibras. Segundo o teste de ANOVA realizado, as médias das amostras não são diferentes. Para um nível de significância de 0,05, as resistências à compressão dos cinco tipos de mini-paredes são semelhantes.

De forma semelhante ao caso dos blocos e prismas, os elementos compostos por unidades com fibras de comprimento 20 mm apresentam maior resistência devido a uma melhor acomodação e distribuição das fibras. Quanto ao teor de fibras, o melhor desempenho foi para as mini-paredes com 1% de adição de sisal.

A análise de variância com dois fatores apresentado no Apêndice A revela que tanto o comprimento quanto o teor de fibras não influenciaram significativamente na resistência à compressão. Dessa forma, conclui-se que o aumento da resistência à compressão dos elementos com adição de fibras de comprimento 20 mm não foi estatisticamente significativo em comparação com os elementos com fibras de 40 mm, para um mesmo teor. Também, o acréscimo da resistência à compressão das mini-paredes com adição de fibras de 1% não foi estatisticamente significativo em

comparação com as mini-paredes com adição de 0,5%, para um mesmo comprimento.

Segundo Thiago (2005) as fibras provocam o retardamento da fissuração e ruptura, proporcionando melhor desempenho do sistema. A Tabela 4.27 mostra a carga da primeira fissura e a relação dela com a força última das mini-paredes. Como pode ser observado, a carga da primeira fissura das mini-paredes com fibras apresentou uma porcentagem maior em relação à tensão última, portanto existiu um retardamento da fissuração desses elementos.

Tabela 4.27: Carga da primeira fissura e carga de ruptura das mini-paredes

Tipo de elemento	Carga 1ª fissura (P1) (kN)	Carga ruptura (PR) (kN)	Relação P1 / PR (%)
MN	261,26	340,16	77,06
MN 20-0,5%	263,29	318,54	82,43
MN 40-0,5%	275,04	327,13	84,05
MN 20-1%	332,95	364,56	91,33
MN 40-1%	302,51	339,06	89,22

Quanto ao estado de fissuração, foram observadas fissuras verticais de tração que começaram nas juntas verticais, progrediram cortando os blocos e provocaram a ruptura deles. O surgimento desse tipo de fissuras pode ser explicado pela presença das juntas verticais nas mini-paredes. A Figura 4.13 mostra esse comportamento.





Figura 4.13: Propagação de fissuras verticais de tração

De forma geral, surgiram também, fissuras verticais ao longo dos septos laterais, ocorrendo ruptura por tração transversal nos blocos.



Figura 4.14: Fissuras verticais ao longo dos septos laterais

Na maioria das mini-paredes sem fibras ocorreu o esmagamento localizado entre a argamassa da junta vertical e horizontal, como mostra a Figura 4.15.



Figura 4.15: Esmagamento da argamassa

4.7.2 Módulo de deformação das mini-paredes

O módulo de deformação das mini-paredes foi calculado de acordo com as prescrições da norma ACI 530-92: 1995, conforme mencionado no Capítulo 3.

Os resultados de módulo de deformação desses elementos são apresentados na Tabela 4.28. Ressalta-se que tanto a tensão quanto os módulos estão referidos à área bruta dos elementos. A coluna Def. 33% apresenta a deformação referente a 33% da tensão de ruptura, sendo a coluna Def. Última a deformação no momento da ruptura.

Tabela 4.28: Módulo de deformação das mini-paredes.

Tipo de umidade	f_{mp} (MPa)	Módulo (E_{mp}) (MPa)	Def. 33% (%)	Def. Última (%)	Relação E_{mp}/f_{mp}
MN	3,08	5332	0,19	1,30	1403
MN 20-0,5%	2,95	4720	0,23	1,68	1600
MN 40-0,5%	2,96	4444	0,25	1,71	1501
MN 20-1%	3,30	5243	0,20	1,47	1588
MN 40-1%	3,07	4347	0,22	2,01	1416

Analisando-se os resultados, nota-se que houve uma pequena diminuição da rigidez das mini-paredes com adição de fibras comparativamente às mini-paredes

sem fibras. Essa redução é igual a 12%, aproximadamente, considerando-se a média geral.

A Tabela 4.28 apresenta também a razão entre o módulo de deformação e a resistência média à compressão das mini-paredes. Segundo esses valores, a relação ficou em torno de 1500. Buttler (2007) obteve valores próximos a 1400 em mini-paredes com resistência de 6,48 MPa, assentadas com argamassa média de resistência de 5,63 MPa e compostas por unidades de 11,50 MPa.

Para melhor compreensão foram traçadas as curvas de tensão x deformação, para todas as mini-paredes ensaiadas. Elas estão organizadas para cada tipo de corpo-de-prova e são apresentadas da Figura 4.16 à Figura 4,20.

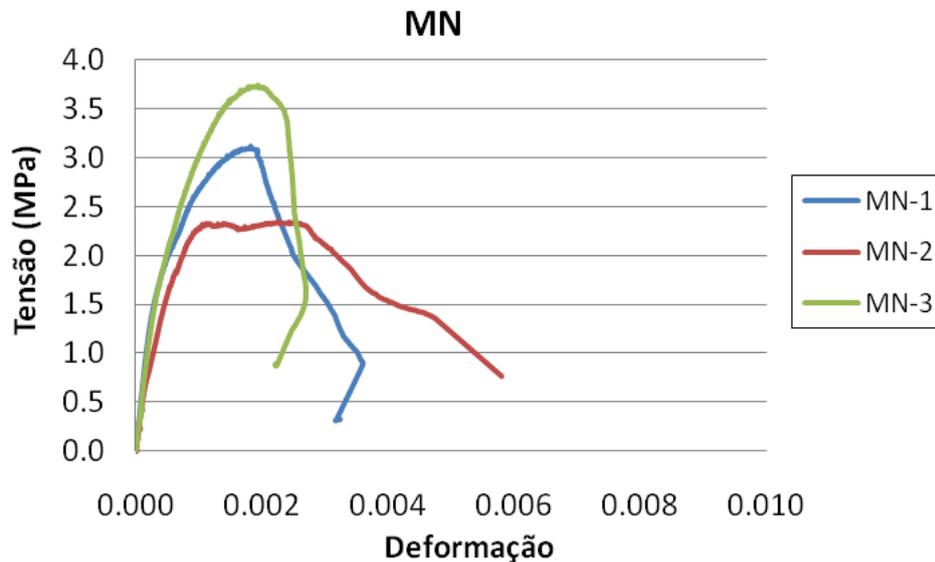


Figura 4.16: Curva tensão – deformação da mini-parede de referência

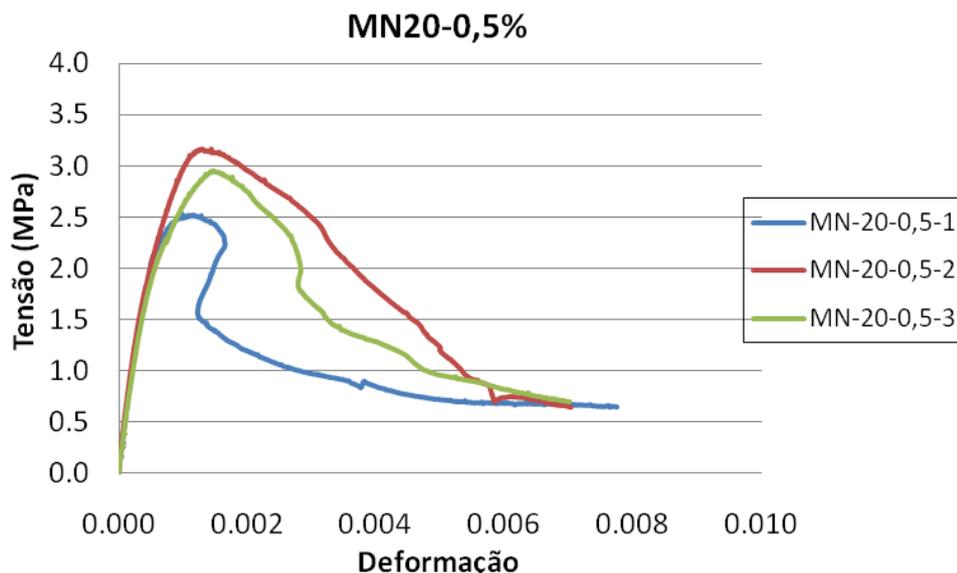


Figura 4.17: Curva tensão – deformação da mini-parede MN20-0,5%

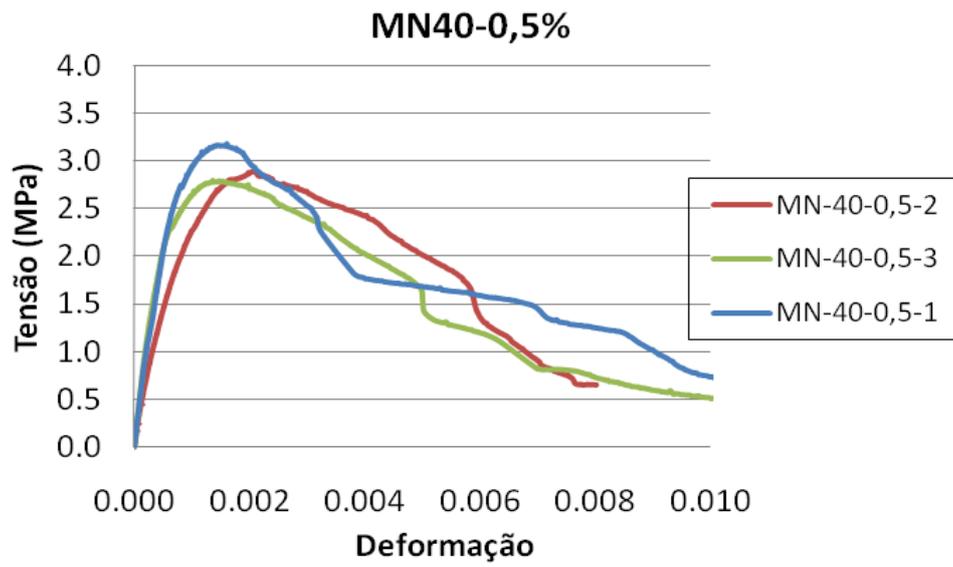


Figura 4.18: Curva tensão – deformação da mini-parede MN40-0,5%

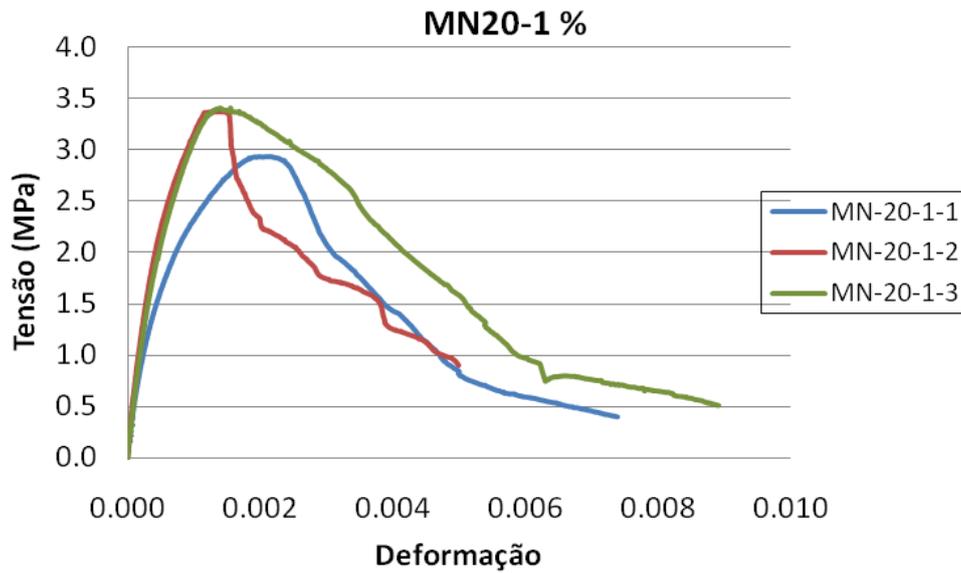


Figura 4.19: Curva tensão – deformação da mini-parede MN20-1%

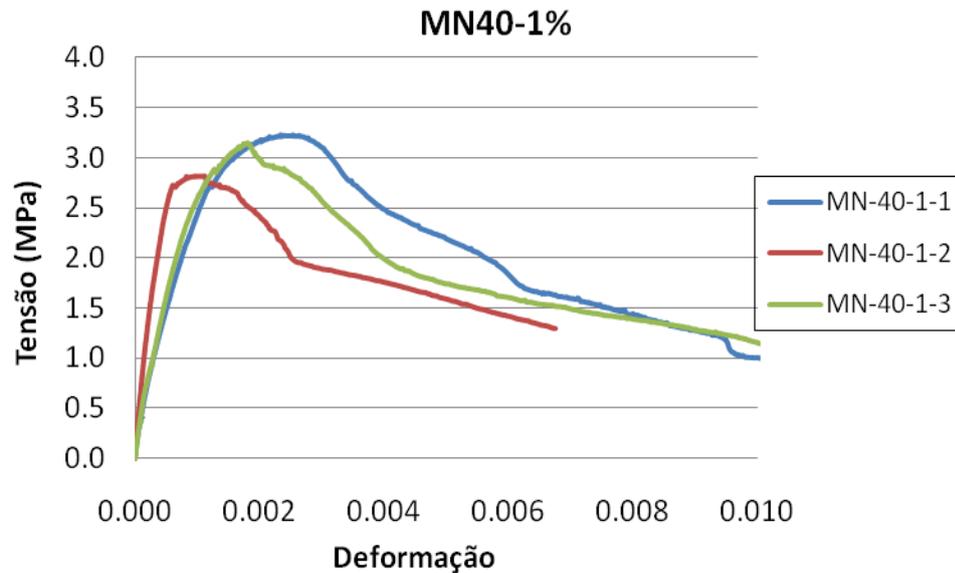


Figura 4.20: Curva tensão – deformação da mini-parede MN40-1%

Pode-se notar que as curvas das mini-paredes reforçadas com fibras de sisal apresentam formas similares às curvas obtidas para as mini-paredes sem fibra. A resistência à compressão das paredes não mostraram marcada diferença, apresentando valores muito próximos. Pode-se notar o ganho de capacidade de deformação para os elementos constituídos com blocos com adição de sisal. As fibras mantiveram as faces das fissuras unidas, não permitindo a perda da continuidade do material.

Segundo Savastano (1992), as fissuras têm início em falhas do compósito e têm seu crescimento limitado pela presença das fibras. A partir do estágio em que essas fissuras começam a se juntar, a soma de seus efeitos exerce influência sobre a tenacidade em decorrência das grandes deformações sofridas pelo material. Tem-se, nesse caso, justificativa para o aumento de ductilidade conferida pelas fibras, uma vez que elas são responsáveis pela incorporação de vazios e descontinuidades que aumentam a energia absorvida durante a fissuração e ao mesmo tempo limitam a sua propagação.

4.8 Análise geral sobre as unidades e elementos ensaiados

Como observado nos itens anteriores, as paredes tiveram um melhor desempenho que os prismas e os blocos, quando são comparados as unidades e elementos com e sem fibras, sendo esses últimos tomados como referência. A análise revela que os blocos com fibras apresentaram diminuição da resistência

média geral igual a 41% em relação aos blocos sem fibras. Para os prismas, essa diminuição foi de 28% e para as mini-paredes a redução média foi muito pequena, apenas 3%. Pode-se imaginar que esse fato está associado ao comportamento mecânico, que é diferente para cada tipo de componente ou elemento estudado, e ao grau de desenvolvimento das tensões de tração.

O ensaio à compressão dos blocos é sempre caracterizado por um certo efeito de confinamento. Segundo Barbosa (2008), esse efeito é oriundo da restrição nas extremidades das unidades causada pelos pratos da prensa de ensaio, mesmo com a utilização de capeamento adequado, e a baixa relação altura/espessura. Dessa forma ocorre um aumento das tensões de compressão transversais, permitindo que os blocos alcancem uma resistência maior que a do próprio material que os constitui, quando solicitados por uma compressão apenas axial.

Os prismas são componentes constituídos por dois blocos ligados por juntas de argamassa horizontais. Segundo Mohamad (2007), as tensões verticais aplicadas nos prismas distribuem-se ao longo de toda a seção do bloco e da argamassa, induzindo, devido à diferença de rigidez, tensões horizontais de tração. Essas tensões de tração se desenvolvem nos blocos, próximas da junta, e diminuem à medida que se afastam da mesma.

Por outro lado, as mini-paredes estão constituídas por um conjunto de unidades de alvenaria ligadas por argamassa através de juntas horizontais alinhadas e verticais defasadas de meio bloco. Tal disposição é denominada de junta amarrada. Esse tipo de corpo-de-prova é o que melhor representa o modo de ruptura da alvenaria, por se tratar de um corpo de prova que representa uma pequena parcela do material com todas as suas características principais.

Nas mini-paredes, as fibras de sisal tiveram melhor desempenho porque provavelmente foram desenvolvidas maiores tensões de tração nas unidades. Essa situação se explica por dois motivos principais. O primeiro é que o corpo de prova apresenta maiores dimensões, sendo submetido a um menor confinamento produzido pelo aparato de ensaio. Além disso, maiores trações nos blocos também podem ser explicadas pelo fato de existirem juntas verticais defasadas, o que não ocorre nos prismas. É relativamente fácil se justificar esse tipo de comportamento quando se observa, por exemplo, as Figuras 4.13 e 4.15. Nelas podem ser claramente observadas fissuras que romperam blocos e se originaram sob juntas verticais. Segundo Mohamad (1998), essas fissuras verticais que cortam os blocos

são fissuras de tração, que normalmente constituem a continuidade da fissura provocada pela abertura da junta vertical. Sob esse tipo de solicitação, as fibras atuam como reforço eficiente e podem efetivamente contribuir para melhorar a capacidade resistente do material.

5 Conclusões e recomendações futuras

5.1 Principais conclusões

A pesquisa teve como principal objetivo estudar a incorporação de fibras de sisal em concretos destinados à produção de blocos estruturais e comparar a viabilidade do uso dessas unidades na execução de elementos de alvenaria estrutural. Assim, podem ser obtidos materiais alternativos visando aplicações ecologicamente sustentáveis. Para lograr esse objetivo foram realizados ensaios à compressão axial, não só das unidades propriamente ditas, mas também de prismas e mini-paredes produzidos com essas unidades. Foi preciso também realizar os ensaios das unidades e dos elementos sem fibras, sendo tomados como referência para um estudo comparativo com aqueles que possuíam adições de fibras.

Basicamente o trabalho experimental foi dividido em três etapas. A primeira consistiu na produção dos blocos com fibras na fábrica Tatu Pré-Moldado. A segunda parte teve como finalidade a caracterização física de todos os materiais usados na pesquisa, como as fibras de sisal, os blocos de concreto e a argamassa de assentamento. A última etapa consistiu na realização dos ensaios à compressão de blocos, prismas e mini-paredes com ou sem adição das fibras.

Com relação às propriedades físicas das fibras, as mesmas apresentaram baixa massa específica aparente e elevada absorção de água. De fato constituem características comuns das fibras vegetais pela grande incidência de poros permeáveis. É importante mencionar que uma das grandes desvantagens desse tipo de material natural é a alta variabilidade de suas propriedades, porque não passam por processos industriais sofisticados que os padronizam, além de serem oriundos de seres vivos sujeitos à alterações inerentes à sua própria natureza.

As propriedades físicas dos cinco tipos de blocos de concreto como: absorção de água, área líquida e massas específicas, cumpriram com os requisitos estabelecidos pelos códigos normativos.

No ensaio à compressão, as unidades com fibras apresentaram diminuição da resistência em uma média de 41% em relação aos blocos de referência, apesar de terem alcançado a resistência característica pretendida. Isso provavelmente ocorreu pelo fato dos blocos com adição de sisal apresentarem menor massa específica, devido a um aumento do índice de vazios, maior percentagem de ar incorporado e menor compactação da massa.

Os prismas com fibras mostraram melhor desempenho que os blocos com fibras, com diminuição média da resistência de 28% com relação aos prismas sem fibras. Já as mini-paredes com fibras quase não apresentaram diminuição da resistência à compressão, quando comparadas com os elementos sem fibras. A redução média foi 3%, sendo que em pelo menos em um caso de parede com fibras a resistência resultou um pouco maior que os elementos sem fibras.

Isso certamente está associado ao comportamento mecânico, que difere para cada tipo de componente ou elemento ensaiado. As mini-paredes são os corpos-de-prova que melhor representam o modo de ruptura na alvenaria, no qual surgem maiores tensões de tração nas unidades devido, principalmente, às juntas verticais defasadas. Sob esse tipo de esforço, as fibras atuam como reforço eficiente e podem efetivamente contribuir para melhoria da capacidade resistente do material. Nos prismas, surgem tensões horizontais de tração, de menor intensidade que nas mini-paredes, sendo estas produzidas apenas da diferença de rigidez entre o bloco e argamassa. Além disso, nos prismas, e principalmente nos blocos, o ensaio à compressão é sempre caracterizado por um certo efeito de confinamento que contribui para uma redução das trações nas unidades.

Tanto as mini-paredes quanto os prismas apresentaram ganhos de capacidade de deformação quando constituídos por blocos com adição de sisal, mostrados nas curvas tensão x deformação. Isso foi produzido pelas fibras, que mantiverem as faces das fissuras unidas devido à aderência entre estas e a matriz cimentícia, não permitindo a perda da continuidade do material e tornando os compósitos vantajosos em termos de ductilidade.

De fato, o modo de ruptura ficou bem caracterizado em todos os corpos-de-prova ensaiados nesta pesquisa. No caso de unidades e elementos com adição de fibras obteve-se sempre uma ruptura dútil. Entretanto, nos blocos e nos elementos sem fibras ocorreu sempre um rompimento brusco, característico de um comportamento frágil. Importante ressaltar que o funcionamento das fibras, devido

ao seu baixo módulo de deformação, ocorre fundamentalmente após fissuração da matriz. Isso leva a uma maior absorção de energia e confere ao material certa capacidade de absorver carregamentos após a fissuração, contribuindo para o aumento de sua tenacidade e ductilidade (BRANDT, 1995)

O comprimento da fibra de melhor desempenho foi de 20 mm. Ele é que conferiu maior resistência em blocos, prismas e mini-paredes, quando comparados com os elementos reforçados com as fibras de 40 mm. Provavelmente as fibras de menor dimensão acomodaram-se melhor nas relativamente pequenas dimensões dos blocos, o que não ocorreu com as fibras maiores, deixando algumas falhas na estrutura do material.

Em relação ao teor de fibras em relação ao volume, blocos com 1% de adição de sisal apresentaram melhor eficiência para um mesmo comprimento, melhorando a capacidade resistente do compósito.

De forma geral, tendo em conta o comprimento e o teor em volume, o compósito com fibras de 20 mm e 1% de adição apresentou melhor desempenho tanto para blocos e prismas quanto para as mini-paredes.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Ainda há muito para ser estudado sobre a fibra de sisal de forma a poder viabilizar sua aplicação como reforço em concretos para blocos. Um dos grandes problemas que apresentam as fibras vegetais é sua degeneração em contato com meios alcalinos pela decomposição da lignina. Também sofrem o efeito da deposição em seus vazios internos de produtos de hidratação, que se cristalizam e conferem efeito análogo ao da petrificação.

Um dos temas a serem pesquisados em trabalhos futuros é o estudo da durabilidade de fibra de sisal na matriz cimentícia, que será fundamental para se alcançar as vantagens desejadas nos materiais reforçados. Um exemplo desses trabalhos poderia ser o estudo da sua microestrutura, que possibilitaria a identificação dos mecanismos de degradação.

É necessário ainda o cuidadoso ajuste do processo produtivo, adotando-se uma tecnologia para incorporar corretamente as fibras na massa fresca de concreto, visando a homogeneidade do material e também adequando as proporções dos materiais em função das características físicas das fibras vegetais. Um exemplo importantíssimo dessa adequação é o ajuste da quantidade de água a ser

adicionada à mistura durante a produção dos blocos. Sem dúvida, ela deve permitir a completa hidratação do cimento, já considerando a absorção de certa quantidade pelas fibras.

Finalmente, deve-se ressaltar que existe um escasso número de pesquisas sobre o uso de fibras vegetais reforçando blocos para alvenaria estrutural. Assim, é importante o investimento para viabilizar novas investigações que visem à obtenção de um material compósito com tecnologia apropriada para países em desenvolvimento.

Referências Bibliográficas

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. 1991, 204 p. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52**: agregado miúdo - determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 6136**: blocos vazados de concreto simples para alvenaria - requisitos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7211**: agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 7215**: cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 9778**: argamassas e concretos endurecidos: determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 8949**: paredes de alvenaria estrutural: ensaio à compressão simples. Rio de Janeiro, 1985.

_____. **NBR 10837**: cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto. Projeto de Norma Técnica. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 12118**: blocos vazados de concreto simples para alvenaria- Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimentos de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 1985.

_____. **NBR 15812-1**: Alvenaria estrutural - Blocos cerâmicos Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2010.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 530-92: building code requirements for masonry. structures and specifications for masonry structures**. Detroit. 1995.

BARBOSA, C.S. **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto, prismas e paredes e suas correlações com as propriedades mecânicas dos materiais constituintes**. 2008, 122 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

BESSER COMPANY. How to produce concrete masonry units. 2006. Disponível em: <<http://www.besser.com>>. Acesso em: 3 dez. 2010.

BRANDT, A.M. **Cement based composites: materials, mechanical properties and performace**. London, E&FN Spon, 1995.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 5628: Part 1. Code of practice for use of masonry – Structural use of unreinforced masonry**. London, 1992.

_____. **BS 1200: Specifications for building sands from natural sources**. London, 1976.

BUTTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. 2007, 98 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CAETANO, L. F. et al. **Compósito de matriz cimentícia reforçada com fibras**. In: II Seminário de Patologia das edificações. 2004, Porto Alegre. **Anais** Porto Alegre: UFRGS, 2004. p. 4.

CAMPOS, R. E. **Desempenho à compressão de compósitos reforçados por fibras de coco**. 2008, 7 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2008.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007, 54p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo. São Carlos-SP, 2007.

CHAND, N.; TIWARY, R.K.; ROHATGI, P.K. **Bibliography: resource structure properties of natural cellulosic fibres - an annotated bibliography**. –Journal of Materials Science, v.23, n.2, p.381-7, Feb. 1988

CORRÊA, M. R. S; RAMALHO, M. A. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. São Paulo: Editora Pini, 1a edição, 2003. 2p.

EIRES, R.G. **Materiais não convencionais para uma Construção Sustentável utilizando cânhamo, pasta de papel e cortiça**. 2006. 74 p. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho, Portugal, 2007.

FIORITI, C. F. **Avaliação de compósitos de concreto com resíduos de borracha na produção de blocos para alvenaria**. 2002, 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2002.

FRASSON, A.J; OLIVEIRA, A.L; PRUDÊNCIO, L. J. **Metodologia de dosagem para blocos de concreto empregados em alvenaria estrutural**. Caderno técnico alvenaria estrutural – CT10. Revista Prisma, São Paulo, 2010.

FRASSON JUNIOR, A. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2000. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

GRAM, H.-E. **Durability of natural fibres in concrete**. Stockholm, CBI, 1983.

GUIMARÃES, S.S. **Vegetable Fiber-cement composites**. In: International Symposium on Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials, 2., Salvador, 1990. Proceedings. London, Chapman and Hall, 1990. p.98-107. (RILEM Proceedings, 7).

GUIMARÃES, S.S. **Experimental mixing and moulding with vegetable fibre reinforced cement composites**. In: International Conference on Development of low-cost and Energy Saving Construction Materials and Applications, Rio de Janeiro, 1984. Proceedings. s.l., Envo Publishing, 1984. v.1, p.37-51.

HOLANDA, O. G. J. **Blocos de Concreto Para Alvenaria Estrutural**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 42, 2000, Fortaleza, CE. Anais... Fortaleza: Instituto Brasileiro do Concreto, 2000. (CD-ROM).

JOHN, V.M.; AGOPYAN, V.; DEROLLE, A. **Durability of blast furnace-slag-based cement mortar reinforced with coir fibres**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON VEGETABLE PLANTS AND THEIR FIBRES AS BUILDING MATERIALS, 2., Salvador, 1990. Proceedings. London, Chapman and Hall, 1990. p.87-97. (RILEM Proceedings, 7).

JUSTE, A. E. **Estudo da resistência e da deformabilidade da alvenaria de blocos de concreto submetida a esforços de compressão**. São Carlos, 2001. 38p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LA ROVERE. **Alvenaria Estrutural**. 2001. Notas de aula, curso de pós-graduação em Engenharia Civil., Universidade Federal de Santa Catarina.

LOURENÇO, P. B. **Dimensionamento de Alvenarias Estruturais**. Relatório 99-DEC/E-7. Dezembro 1999.

MACHADO, F.A.M. (2001). **Análise crítica do uso de um sistema racionalizado: o caso da alvenaria estrutural em blocos de concreto em edifícios habitacionais**. 2001, 25p. Dissertação (Mestrado em Habitação) Instituto de Arquitetura e Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2001.

MATA, R.C. **Influência do padrão de argamassamento na resistência à compressão de prismas e mini-paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto**. 2006. 55p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

MEDEIROS, J.S; SABBATINI, F.H. **Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP- Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1993.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. **Evolução em Tecnologia do Concreto**. In:_____. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.

MILLER, K. P. **Estudo da fluência em vigas de concreto reforçado com fibras de aço, com aplicações de conceitos da mecânica da fratura**. 2008, 31 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

McLAUGHLIN, E.C.; TAIT, R.A. **Fracture mechanism of plant fibres**- Journal of Materials Science, v.15, n.1, p.89-95, Jan. 1980.

MOHAMAD, G. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto**. 1998. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

_____. **Mecanismo de ruptura da alvenaria de blocos à compressão**. 2007. 74 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade do Minho, Portugal, 2007.

NORMAS DE IDENTIDADE, QUALIDADE, APRESENTAÇÃO E EMBALAGEM DA FIBRA BENEFICIADA DE SISAL OU AGAVE E SEUS RESÍDUOS DE VALOR ECONÔMICO. Brasília, 1984.

OLIVEIRA, M.J.E. **A influência dos tratamentos simples para as fibras de malva empregadas em reforço de argamassa de cimento Portland**. 1989, 170p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

PASQUALI, I. **Influencia do tipo de argamassamento na resistência à compressão de pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica**. Santa Maria, 2007. 41p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2007.

PICANÇO, M. S. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá**. 2005. 25 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PEDRESCHI, R.F. **O potencial da alvenaria protendida em países em desenvolvimento.** In: Curso Internacional de Alvenaria Estrutural, 1., São Paulo, 9-11 set. 1998. Proceeding. ABCP- Associação Brasileira de Cimento Portland/Sinprocim- Sindicato da Indústria de Produtos de Cimento do Estado de São Paulo.

RAMALHO, M.A.; CORRÊA, M.R.S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural.** 1.ed. São Paulo: Editora Pini, 1a edição, 174 p. 2003.

RAUBER, F. C. **Contribuições ao projeto arquitetônico de edifícios em alvenaria estrutural.** 2005. 30p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2005.

RODRIGUES, P. P. F. **Fabricação de blocos pré-moldadas de concreto para pavimentação: prática recomendada.** São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1995, 8p. (Boletim Técnico 103).

ROMAGNA, R.H. **Resistência à compressão de prismas de blocos de concreto grauteados e não grauteados.** 2000. 193p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

SABBATINI, F.H. **Processo construtivo de edifícios de alvenaria sílicocalcária.** 1984, 298 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

SALES, A. T. C. **Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu.** 2006, 38p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SALVADOR FILHO, J. A. A. **Blocos de concreto para alvenaria em construções industrializadas.** 2007, 22 p, 48p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SANTIAGO, M. O. Aplicações do GRC- cimento reforçados com fibras de vidro em novos estádios de Sevilha, Espanha. In.: **Arquimacom'2002.** São Paulo, 2002.

SAVASTANO, H. J. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo.** 2000, 7p, 22 p. Tese (Livre-Docência em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

_____. **Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland: Caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito.** 1992, 21 p. Tese (Doutor em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

SILVA, V.M. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa.** 2002, 6 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SOLÓRZANO, M. G. **Características e desempenho de juntas de argamassa na alvenaria estrutural de blocos de concreto.** 1994, 60p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

THIAGO, C. F. **Estudo do comportamento de juntas de argamassa reforçadas com fibras de polipropileno.** 2005. 24 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2005.

TOLEDO FILHO, R. D. **Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental.** 1997, 93p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

TOLEDO FILHO, R.D.; BARBOSA, N.P. e GHAVAMI, K. **Application of sisal and coconut fibres in adobe blocks.** In: Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials (RILEM Proceedings of the Second International Symposium-Salvador, BA, Brazil, September 1990). SOBRAL, H.S.(ed.). London, Chapman and Hall,1990. p.139-149.

Apêndices

Apêndice A: Formulação dos testes estatísticos

A.1 Considerações iniciais

Neste apêndice são apresentados os testes estatísticos que vão contribuir na tomada de decisões, obter conclusões satisfatórias e melhorar a compreensão dos resultados, permitindo uma análise rigorosa da influência da adição da fibra de sisal na resistência à compressão dos blocos, prismas e mini-paredes. Tais análises foram realizadas utilizando-se o programa OriginPro 7.5.

Em continuação, é feita uma breve explicação dos diferentes tipos de testes utilizados nesta pesquisa.

A.1.1 Teste de Análise de variância (ANOVA: ANalysis Of VAriance)

A Análise de Variância (ANOVA) é um procedimento utilizado para comparar a média de três ou mais grupos a um só tempo utilizando variáveis aleatórias contínuas. O teste é paramétrico, a variável de interesse deve ter distribuição normal e os grupos têm que ser independentes. Um dos pressupostos de ANOVA é que não existem diferenças significativas entre as variâncias dos vários grupos.

O teste tem a característica de avaliar a influências dos fatores isoladamente ou em conjunto sobre a variável resposta. O primeiro caso refere-se quando é verificada a influência separada dos parâmetros, e o segundo, quando os parâmetros são avaliados dois a dois, três a três, ou mais.

A tabela ANOVA fornece um valor F , obtido da distribuição F de probabilidades, a partir do qual será tomada a decisão de aceitar ou rejeitar a hipótese nula. A tomada de decisão é feita após comparar o $F_{\text{observado}}$ (F_o) com o $F_{\text{crítico}}$ (F_c) correspondente ao nível de significância alfa adotado, sendo $F_o < F_c$ a condição que deve ser satisfeita para aceitação da hipótese de igualdade. Também podem ser comparados o valor p e o nível de significância. Quanto menor o valor p , mais significativa é a diferença entre as amostras, ou seja, para aceitação da hipótese nula esse valor deve ser maior que alfa.

Se ocorrer o caso de rejeitar a hipótese nula de igualdade de médias para um nível de significância, o procedimento adequado, quando é de interesse do pesquisador, é de comparar as médias de tratamentos utilizando algum teste de

comparação de médias para identificar qual ou quais tratamentos é ou são diferente(s). Neste caso é usado o Teste de Tukey para comparação de médias.

A.1.1.1 Teste de ANOVA com um fator

Será utilizado para conhecer se as diferenças observadas entre as médias da resistência à compressão das amostras dos blocos, prismas ou mini-paredes com e sem adição de fibras são estatisticamente significantes. Nesse caso é avaliado *um fator* que influi na variável dependente: o tipo de corpo-de-prova em função da adição ou não da fibra de sisal (CP referência, CP20-0,5%, CP40-0,5%, CP20-1%, CP40-1%), sendo os CP: bloco, prisma ou mini-parede.

A.1.1.2 Teste de ANOVA com dois fatores

Esse teste avalia dois fatores de interesse que podem influir na variável dependente, seja de forma isolada ou simultaneamente. Aplicando esse teste na pesquisa são definidos dois fatores de análise, o fator comprimento da fibra com dois níveis de análises (20 e 40 mm), e o fator teor em volume da fibra com dois níveis de análises (0,5% e 1%). Esse teste só será aplicado aos corpos-de-prova com adição de fibra de sisal.

A.1.2 Teste de Tukey

Após concluir que existe diferença significativa entre amostras, por meio do teste de ANOVA com um fator, pode haver interesse em avaliar a magnitude dessas diferenças utilizando um teste de comparações múltiplas. Será aplicado o teste de Tukey que permite conhecer qualquer contraste, sempre, entre duas médias de tratamentos. O teste baseia-se na Diferença Mínima Significativa (DMS). A estatística do teste é dada da seguinte forma:

$$\Delta = q\sqrt{\frac{QMRes}{r}},$$

Na qual:

q: a amplitude total studentizada (tabelado)

QMRes: quadrado médio do resíduo

r: número de repetições

Também nesse tipo de teste de comparações de médias deve-se determinar um nível de significância α . Normalmente utiliza-se o nível de 5% ou 1% de significância. Se o contraste for maior do que Δ então as médias diferem ao nível α de significância.

A.2 Análise estatística dos resultados da resistência à compressão dos blocos com e sem adição de fibras.

A seguir serão realizados os testes estatísticos explicados. Eles são feitos com os valores obtidos na resistência à compressão dos diferentes tipos de blocos, para fazer um melhor análise dos resultados.

A.2.1 Teste de ANOVA com um fator

Na Tabela A.1 são apresentados os resultados do teste ANOVA com um fator para a resistência à compressão dos blocos sem e com adição de fibras.

Tabela A.1: Teste ANOVA com um fator para a resistência à compressão dos blocos com e sem adição de fibras

Tipo de blocos	Nº observ	Soma	Média (MPa)	Variância
BE	18	202,736	11,263	1,127
BE20-0,5%	18	128,062	7,115	0,233
BE40-0,5%	18	106,978	5,943	0,402
BE20-1%	18	128,968	7,165	1,488
BE40-1%	18	115,661	6,426	0,606

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	323,386	4	80,846	104,824	4,972E-32	2,479
Dentro dos grupos	65,557	85	0,771			
Total	388,943	89				

$F > F_{\text{crit}}$ e $P < 0,05$: é rejeitada H_0 , as médias das amostras não são iguais. Portanto, para um nível de significância de 0,05, as resistências à compressão dos blocos com e sem adição de fibras são diferentes.

A.2.2 Teste de Tukey para a comparação das médias

É utilizado para testar quais tipos de bloco diferem entre si, ou seja, quais unidades são significativamente diferentes de outra comparando todos os pares possíveis dos grupos. A Tabela A.2 começa a comparar a resistência dos blocos de referência com relação aos blocos com adição de fibras.

Tabela A.2: Comparação entre o bloco de referência e os blocos com adição de fibras

Tipo de blocos	Médias (MPa)	Diferenças das médias	Intervalo de confiança		Diferença ou não para um nível de 0,05
			Limite inferior	Limite superior	
BE	11,260				
BE20-0,5%	7,110	4,150	3,330	4,960	Sim
BE40-0,5%	5,720	5,320	4,500	6,140	Sim
BE20-1%	7,160	4,090	3,280	4,910	Sim
BE40-1%	6,430	4,840	4,020	5,650	Sim

Segundo a Tabela A.2, existe diferenças entre os blocos de referência e os blocos compostos com fibras. Portanto, para um nível de confiança de 95%, a resistência à compressão do bloco sem adição de sisal é significativamente maior que os blocos com adição dessa fibra.

Tabela A.3: Comparação entre BE20-0,5% e o resto dos blocos

Tipo de blocos	Médias (MPa)	Diferenças das médias	Intervalo de confiança		Diferença ou não para um nível de 0,05
			Limite inferior	Limite superior	
BE20-0,5%	7,110				
BE40-0,5%	5,720	1,390	0,355	1,987	Sim
BE20-1%	7,160	-0,050	-0,867	0,765	Não
BE40-1%	6,430	0,680	-0,127	1,505	Não

O bloco BE20-0,5% difere do bloco BE40-0,5% e não difere dos blocos BE20-1% e BE40-1%. Portanto, para um nível de confiança de 95%, a resistência média à compressão do BE20-0,5% é significativamente superior à resistência à compressão do BE40-0,5% e semelhante aos blocos BE20-1% e BE40-1%.

Tabela A.4: Comparação entre BE40-0,5% e o resto dos blocos

Tipo de blocos	Médias (MPa)	Diferenças das médias	Intervalo de confiança		Diferença ou não para um nível de 0,05
			Limite inferior	Limite superior	
BE40-0,5%	5,720				
BE20-1%	7,160	-1,440	-2,038	-0,406	Sim
BE40-1%	6,430	-0,710	-1,298	0,334	Não

O bloco BE40-0,5% difere do bloco BE20-1% e não difere do bloco BE40-1%. Portanto, para um nível de confiança de 95%, a resistência média à compressão do BE40-0,5% é significativamente inferior à resistência à compressão do BE20-1% e semelhante ao bloco BE40-1%.

Tabela A.5: Comparação entre BE20-1% e BE40-1%

Tipo de blocos	Médias	Diferenças das médias	Intervalo de confiança		Diferença ou não para um nível de 0,05
			Limite inferior	Limite superior	
BE20-1%	7,160				
BE40-1%	6,430	0,730	-0,076	1,556	Não

O bloco BE20-1% não difere do bloco BE40-1%. Portanto, para um nível de confiança de 95%, a resistência média à compressão do BE20-1% é semelhante ao bloco BE40-1%.

A.2.3 Teste de ANOVA com dois fatores

Na Tabela A.6 são apresentados os resultados do teste ANOVA com dois fatores para a resistência à compressão dos blocos com adição de fibras. Este teste analisa se o fator comprimento e o fator teor de fibra tiveram influência ou não na resistência à compressão dos blocos reforçados.

Tabela A.6: Teste ANOVA com dois fatores para a resistência à compressão dos blocos com adição de fibras

Fatores	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor F	Valor P
Comprimento	1	16,438	16,440	24,079	0,000
Teor de fibra	1	1,280	1,280	1,875	0,175
Comp x teor fib	1	0,837	0,837	1,227	0,272

Comprimento: $P < 0,05$ é rejeitada a H_0 , portanto, existe diferença nas médias dos blocos adicionados com fibras de comprimento 20 e 40 mm. Pode-se concluir que o comprimento da fibra influenciou na resistência à compressão dos blocos com adição. Existe evidência estatística, estabelecendo-se um nível de significância de 0,05, que os blocos com adição de fibras de 20 mm apresentaram maior resistência que os blocos com fibras de 40 mm, para um mesmo teor.

Teor de fibra: $P > 0,05$ é aceita a H_0 , portanto, não existe diferença nas médias dos blocos com adição de 0,5% e 1% do volume de fibras. Pode-se concluir que o teor de fibra não influenciou de forma tão significativa na resistência à compressão dos blocos com adição. Existe evidência estatística, estabelecendo-se um nível de significância de 0,05, que o aumento da resistência à compressão dos blocos com 1% de adição de fibras não foi tão significativo em comparação com a resistência à compressão dos blocos com 0,5% de adição, para um mesmo comprimento.

Comprimento x teor volume: $P > 0,05$ é aceita a H_0 , portanto, não existe diferenças nas médias dos blocos com a combinação dos fatores comprimento e teor de fibra. Pode-se concluir que a interação desses parâmetros não influenciou na resistência à compressão dos blocos reforçados.

A.3 Análise estatística dos resultados da resistência à compressão dos prismas com e sem adição de fibras.

Foi realizada para os prismas a mesma análise estatística realizada para os blocos, facilitando uma melhor compreensão dos resultados.

A.3.1 Teste de ANOVA com um fator

Os resultados do teste ANOVA com um fator para a resistência à compressão dos prismas com e sem adição de fibras são apresentados na Tabela A.7.

Tabela A.7: Teste ANOVA com um fator para a resistência à compressão dos prismas sem e com adição de fibras

Tipo de Prismas	Nº observ	Soma	Média	Variância
PR	11	57,095	5,190	1,030
PR20-0,5%	12	41,924	3,494	0,151
PR40-0,5%	12	38,973	3,248	0,124
PR20-1%	12	52,454	4,371	0,166
PR40-1%	12	45,856	3,821	0,566

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	27,489	4	6,872	17,339	3,33E-09	2,543
Dentro dos grupos	21,402	54	0,396			
Total	48,891	58				

$F > F_{\text{crít}}$ e $P < 0,05$: é rejeitada à H_0 . Portanto, para um nível de significância de 0,05, as médias das amostras são significativamente diferentes.

A.3.2 Teste de Tukey para a comparação das médias

O teste define que tipo de prisma difere entre si, comparando todos os pares possíveis dos grupos.

Tabela A.8: Comparação entre o prisma de referência e os prismas com adição de fibras

Tipo de Prisma	Médias	Diferenças das médias	Intervalo de confiança		Diferença ou não para um nível de 0,05
			Limite inferior	Limite superior	
PR	5,190				
PR20-0,5%	3,494	1,697	0,957	2,439	Sim
PR40-0,5%	3,248	1,943	1,202	2,684	Sim
PR20-1%	4,371	0,819	0,080	1,562	Sim
PR40-1%	3,821	1,369	0,630	2,112	Sim

Segundo a Tabela A.8, existe diferença entre os prismas de referência e os prismas compostos com fibras. Portanto, para um nível de confiança de 95%, a resistência à compressão do prisma referência é maior que os prismas com adição dessa fibra.

Tabela A.9: Comparação entre PR20-0,5% e o resto dos prismas

Tipo de prismas	Médias	Diferenças das médias	Intervalo de confiança		Diferença ou não para um nível de 0,05
			Limite inferior	Limite superior	
PR20-0,5%	3,494				
PR40-0,5%	3,248	0,246	-0,480	0,970	Não
PR20-1%	4,371	-0,877	-1,602	-0,152	Sim
PR40-1%	3,821	-0,328	-1,052	0,398	Não

O prisma PR20-0,5% difere do prisma PR20-1% e não difere dos prismas BE40-0,5% e PR40-1%. Portanto, para um nível de confiança de 95%, a resistência média à compressão do PR20-0,5% é inferior à resistência à compressão do PR20-1% e semelhante aos prismas PR40-0,5% e PR40-1%.

Tabela A.10: Comparação entre PR40-0,5% e o resto dos prismas

Tipo de prismas	Médias	Diferenças das médias	Intervalo de confiança		Diferença ou não para um nível de 0,05
			Limite inferior	Limite superior	
PR40-0,5%	3,248				
PR20-1%	4,371	-1,123	-1,847	-0,397	Sim
PR40-1%	3,821	-0,574	-1,297	0,153	Não

O prisma PR40-0,5% difere do prisma BE20-1% e não difere do prisma PR40-1%. Portanto, para um nível de confiança de 95%, a resistência média à compressão do PR40-0,5% é inferior à resistência à compressão do PR20-1% e semelhante ao PR40-1%.

Tabela A.11: Comparação entre PR20-1% e PR40-1%.

Tipo de prismas	Médias	Diferenças das médias	Intervalo de confiança		Diferença ou não para um nível de 0,05
			Limite inferior	Limite superior	
PR20-1%	4,371				
PR40-1%	3,821	0,550	-0,175	1,275	Não

O prisma PR20-1% não difere do prisma PR40-1%. Portanto, para um nível de confiança de 95%, a resistência média à compressão do PR20-1% é semelhante ao prisma PR40-1%.

A.3.3 Teste de ANOVA com dois fatores

Nesse teste será analisado se o fator comprimento e o fator teor de fibras tiveram influência ou não na resistência à compressão dos prismas com adição de fibras. Na Tabela 12 são apresentados os resultados do teste ANOVA com dois fatores.

Tabela A.12: Teste ANOVA com dois fatores para a resistência à compressão dos prismas com adição de fibras.

Fatores	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor F	Valor P
Comprimento	1	1,896	1,896	7,546	0,009
Teor de fibra	1	6,293	6,293	25,045	0,000
Comp x teor fib	1	0,279	0,279	1,111	0,298

Comprimento: $P < 0,05$ é rejeitada a H_0 , portanto existe diferença nas médias dos prismas com adição de fibras de comprimento 20 e 40 mm. Pode-se concluir que o comprimento da fibra influenciou na resistência à compressão dos prismas com adição. Existe evidência estatística, estabelecendo-se um nível de significância de 0,05, que os prismas com adição de fibras de 20 mm apresentaram maior resistência que os prismas com adição de fibras de 40 mm, para um mesmo teor.

Teor de fibra: $P < 0,05$ é rejeitada a H_0 , portanto existe diferença nas médias dos prismas com adição de 0,5% e 1% de fibras. Pode-se concluir que o teor influenciou na resistência à compressão dos prismas com adição. Existe evidência estatística, estabelecendo-se um nível de significância de 0,05, que o aumento da

resistência à compressão dos prismas com 1% de adição de fibras foi significativo em relação com a resistência à compressão dos prismas com 0,5% de adição, para um mesmo comprimento.

Comprimento x teor de fibra: $P > 0,05$ é aceita a H_0 , portanto não existe diferença nas médias dos blocos com a combinação dos fatores comprimento e teor de fibra. Pode-se concluir que a interação desses parâmetros não influenciou na resistência à compressão dos prismas com adição de fibras.

A.4. Análise estatística dos resultados da resistência à compressão das mini-paredes com e sem adição de fibras.

A seguir serão realizados os diferentes testes estatísticos com os resultados obtidos na resistência à compressão dos diferentes tipos de mini-paredes.

A.4.1 Teste de ANOVA com um fator

Na Tabela A.13 são apresentados os resultados do teste ANOVA com um fator para a resistência à compressão das mini-paredes com e sem adição de fibras.

Tabela A.13: Teste ANOVA com um fator para a resistência à compressão das mini-paredes com e sem adição de fibras.

Tipo de Mini-paredes	Nº observ	Soma	Média	Variância
MN	3	9,226	3,075	0,486
MN20-0,5%	3	8,847	2,949	0,133
MN40-0,5%	3	8,873	2,957	0,037
MN20-1%	3	9,888	3,296	0,097
MN40-1%	3	9,196	3,065	0,046

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,235	4	0,059	0,366	0,827	3,478
Dentro dos grupos	1,605	10	0,160			
Total	1,840	14				

$F < F_{crit}$ e $P > 0,05$, não é rejeitada à H_0 , as médias das amostras não são diferentes. Portanto, para um nível de significância de 0,05, as resistências à compressão dos cinco tipos de mini-paredes são semelhantes.

A.4.2 Teste de ANOVA com dois fatores

Na Tabela A.14 são apresentados os resultados do teste ANOVA com dois fatores para a resistência à compressão das mini-paredes com adição de fibras. Este teste analisa se o fator comprimento e o fator teor de fibra tiveram influência ou não na resistência à compressão das mini-paredes com adição.

Tabela A.14 Teste ANOVA com dois fatores para a resistência à compressão das mini-paredes com adição de fibras.

Fatores	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor F	Valor P
Comprimento	1	0,036	0,036	0,460	0,517
Teor de fibra	1	0,154	0,154	1,953	0,200
Comp x teor fib	1	0,043	0,043	0,547	0,481

Comprimento: $P > 0,05$, não é rejeitada a H_0 , portanto não existe diferença nas médias das mini-partedes com adição de fibras de comprimento 20 e 40 mm. Pode-se concluir que o comprimento da fibra não influenciou na resistência à compressão das mini-paredes com adição. Existe evidência estatística, estabelecendo-se um nível de significância de 0,05 que o aumento da resistência à compressão das mini-paredes com adição de fibras de comprimento 20 mm não foi tão significativo comparado com a resistência à compressão das mini-paredes com fibras de 40 mm, para um mesmo teor.

Teor de fibra: $P > 0,05$, não é rejeitada a H_0 , portanto não existe diferença nas médias das mini-paredes com adição de 0,5% e 1% de fibras. Pode-se concluir que o teor não influenciou na resistência à compressão das mini-paredes reforçadas. Existe evidência estatística, estabelecendo-se um nível de significância de 0,05, que o aumento da resistência à compressão das mini-paredes com adição de 1% de fibras não foi tão significativo com relação a resistência à compressão das mini-paredes com adição de 0,5%, para um mesmo comprimento.

Comprimento x teor de fibra: $P > 0,05$, não é rejeitada a H_0 , portanto não existe diferença nas médias das mini-paredes com a combinação dos fatores comprimento

e teor, portanto, a interação desses parâmetros não influenciou na resistência à compressão das mini-paredes com adição de fibras.

Apêndice B: Resultados individuais dos ensaios de cada material e elemento.

Tabela B.1: Massa específica real e aparente das fibras

	Massa específica real e aparente das fibras					
	Psh (g)	Ps (g)	Vi (ml)	Vf (ml)	Massa esp apar (kg/m ³)	Massa esp real (kg/m ³)
Mostra 1	50	38	600	651	721,10	974,36
Mostra 2	25	19,2	600	625	753,06	1000,00
Mostra 3	50	45	600	653	746,80	937,50

Tabela B.2: Teor de umidade das fibras

	P _{úmido} (g)	P _{seco} (g)	Teor de umidade (%)
Mostra 1	50	45,3	10,38
Mostra 2	49,8	45,3	9,93
Mostra 3	50	45	11,11

Tabela B.3: Absorção de água dos blocos com e sem adição de fibras

Nº de blocos	Massa seca - M1 (g)		Massa saturada - M2 (g)		A(%)
	24h	26h	24h	26h	
BE					
1	12034	12031	12925	12935	7,51
2	11950	11946	12863	12878	7,80
3	12027	12021	12972	12986	8,03
BE20-0,5%					
1	11594	11593	12747	12757	10,04
2	11413	11412	12581	12580	10,23
3	11564	11562	12744	12747	10,25
BE40-0,5%					
1	11239	11236	12469	12470	10,98
2	11359	11357	12544	12551	10,51
3	11534	11533	12715	12724	10,33
BE20-1%					
1	11987	11985	13116	13120	9,47
2	11406	11405	12675	12681	11,19
3	12077	12074	13198	13201	9,33
BE40-1%					
1	11979	11976	13091	13105	9,43
2	11984	11982	12949	12960	8,16
3	11752	11749	12807	12822	9,13

Tabela B.4: Teor de umidade dos blocos com e sem adição de fibras

Nº de blocos	Massa seca ao ar - M3 (g)	Massa seca - M1 (g)		Massa saturada - M2 (g)		Umidade (%)
		24h	26h	24h	26h	
BE						
1	12308	12034	12031	12925	12935	30,64
2	12247	11950	11946	12863	12878	32,30
3	12337	12027	12021	12972	12986	32,75
BE20-0,5%						
1	11899	11594	11593	12747	12757	26,29
2	11715	11413	11412	12581	12580	25,94
3	11857	11564	11562	12744	12747	24,89
BE40-0,5%						
1	11433	11239	11236	12469	12470	15,96
2	11581	11359	11357	12544	12551	18,76
3	11747	11534	11533	12715	12724	17,97
BE20-1%						
1	12207	11987	11985	13116	13120	19,56
2	11616	11406	11405	12675	12681	16,54
3	12285	12077	12074	13198	13201	18,72
BE40-1%						
1	12228	11979	11976	13091	13105	22,32
2	12217	11984	11982	12949	12960	24,03
3	11990	11752	11749	12807	12822	22,46

Tabela B.5: Área líquida dos blocos com e sem adição de fibras

Nº de blocos	Massa saturada - M2 (g)	Massa aparente - M4 (g)	Altura (mm)	Área bruta (mm ²)	Área líquida (mm ²)
BE					
1	12935	7384,92	190,67	54820,1	29108,81
2	12878	7340,92	189,33	54669,3	29245,14
3	12986	7391,92	191,00	54830,3	29288,38
BE20-0,5%					
1	12757	7150,92	192,00	54971,9	29198,33
2	12580	7000,92	191,67	55050,1	29108,24
3	12747	7166,92	191,33	54901,2	29164,18
BE40-0,5%					
1	12470	6944,92	190,67	55026,78	28977,69
2	12551	7005,92	190,50	54803,62	29108,03
3	12724	7120,92	191,33	54729,69	29284,39
BE20-1%					
1	13120	7428,92	194,33	54856,83	29285,15
2	12681	7030,92	194,00	54828,41	29124,12
3	13201	7461,92	193,00	55139,94	29736,17
BE40-1%					
1	12935	7442,92	191,50	55538,46	28679,27
2	12878	7420,92	194,00	55201,50	28129,28
3	12986	7284,92	192,83	55024,02	29564,81

Tabela B.6: Massa específica dos blocos com e sem adição de fibras

Nº de blocos	Massa seca ao ar - M3 (g)	Massa saturada - M2 (g)	Massa aparente - M4 (g)	Massa específica (g/cm ³)	
				Seca ao ar	Saturada
BE					
1	12228	12935	7384,92	2,20	2,33
2	12217	12878	7340,92	2,21	2,33
3	11990	12986	7391,92	2,14	2,32
BE20-0,5%					
1	11899	12757	7150,92	2,12	2,28
2	11715	12580	7000,92	2,10	2,25
3	11857	12747	7166,92	2,12	2,28
BE40-0,5%					
1	11433	12470	6944,92	2,07	2,26
2	11581	12551	7005,92	2,09	2,26
3	11747	12724	7120,92	2,10	2,27
BE20-1%					
1	12207	13120	7428,92	2,14	2,31
2	11616	12681	7030,92	2,06	2,24
3	12285	13201	7461,92	2,14	2,30
BE40-1%					
1	12228	13105	7442,92	2,16	2,31
2	12217	12960	7420,92	2,21	2,34
3	11990	12822	7284,92	2,17	2,32

Tabela B.7: Resistência à compressão média dos blocos com e sem adição de fibras

Número	BE	BE20-0,5%	BE40-05%	BE20-1%	BE40-1%
1	9,54	6,60	4,82	6,63	5,69
2	10,43	6,68	5,30	5,34	6,17
3	10,42	6,64	5,89	7,36	5,21
4	12,12	8,14	6,16	5,19	7,30
5	9,88	7,31	7,10	7,91	7,19
6	12,22	7,41	5,89	6,35	6,42
7	13,24	6,36	6,10	7,65	6,45
8	11,92	7,43	6,28	7,18	7,27
9	12,57	7,38	6,00	8,08	7,75
10	10,41	6,62	5,48	7,41	5,80
11	11,12	7,68	5,49	5,37	5,45
12	10,47	7,31	6,69	9,35	5,98
13	11,33	7,57	4,78	6,65	5,73
14	12,56	6,69	6,13	9,27	7,92
15	11,22	7,54	6,92	7,63	6,05
16	12,24	6,92	6,10	7,30	6,30
17	10,37	7,06	6,33	8,26	6,42
18	10,68	6,69	6,36	6,04	6,53

Tabela B.8: Dimensões dos blocos com e sem adição de fibras

Nº de blocos	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
BE			
1	139,86	391,50	190,33
2	139,61	391,35	189,08
3	139,69	391,58	190,16
4	139,85	391,08	190,16
5	139,93	391,50	191,17
6	139,92	391,08	188,76
BE20-0,5%			
1	140,2	391,33	191,87
2	140,28	391,33	191,50
3	139,89	391,17	191,25
4	140,18	391,41	191,17
5	139,85	391,75	191,17
6	139,86	391,42	191,25
BE40-0,5%			
1	140,06	391,83	190,18
2	139,89	390,83	190,75
3	140,03	390,92	191,16
4	140,18	391,25	191,17
5	140,05	391,25	190,83
6	139,92	390,75	189,08
BE20-1%			
1	139,99	391,42	195,00
2	140,12	390,91	193,25
3	140,35	391,67	193,83
4	139,99	391,10	192,50
5	140,32	391,00	193,15
6	139,89	391,66	193,67
BE40-1%			
1	140,77	391,25	192,33
2	140,46	391,58	192,83
3	140,16	391,58	192,67
4	140,98	392,17	191,75
5	140,15	391,67	189,42
6	139,87	391,58	191,75

Tabela B.9: Espessura mínima das paredes dos blocos com e sem adição de fibras

Nº de blocos	Parede longitudinal (mm)	Parede transversal (mm)
BE		
1	31,02	31,91
2	30,82	31,98
3	30,88	31,72
4	30,78	31,91
5	31,18	31,68
6	31,34	31,52
BE20-0,5%		
1	31,39	32,11
2	30,30	31,73
3	30,69	31,80
4	30,51	31,71
5	30,56	31,85
6	30,25	31,84
BE40-0,5%		
1	31,08	31,89
2	31,21	31,23
3	31,50	31,28
4	30,96	31,40
5	30,88	31,74
6	30,55	31,70
BE20-1%		
1	31,58	32,55
2	31,13	31,81
3	31,37	32,32
4	30,76	31,68
5	31,09	31,55
6	31,05	31,41
BE40-1%		
1	31,01	31,67
2	31,57	31,80
3	31,29	32,250
4	31,30	31,62
5	30,71	31,64
6	30,65	31,65

Tabela B.10: Menor dimensão dos furos dos blocos com e sem adição de fibras.

Nº de blocos	Menor dimensão dos furos (mm)
BE	
1	87,79
2	88,83
3	88,70
4	89,11
5	87,83
6	87,88
BE20-0,5%	
1	88,33
2	88,48
3	87,80
4	87,91
5	87,87
6	88,54
BE40-0,5%	
1	88,01
2	88,02
3	88,11
4	88,69
5	88,90
6	88,33
BE20-1%	
1	88,46
2	88,01
3	88,33
4	89,16
5	88,22
6	87,82
BE40-1%	
1	89,94
2	88,65
3	88,31
4	88,94
5	88,67
6	89,71

Tabela B.11: Resistência à compressão da argamassa

Resistência à compressão da argamassa					
Nº CP	BE	BE20-05%	BE40-0,5%	BE20-1%	BE40-1%
1	5,81	5,74	6,77	6,92	6,14
2	6,3	5,21	5,23	6,56	6,88
3	7,18	5,32	6,56	7,45	5,62
4	5,97	5,86	5,12	8,02	4,98
5	4,98	6,81	6,01	6,54	6,46
6	6,10	6,65	7,21	6,63	7,39

Tabela B.12: Resistência à compressão média dos prismas com e sem adição de fibras

Resistência à compressão dos prismas					
Nº de blocos	PR	PR20-0,5%	PR40-05%	PR20-1%	PR40-1%
1	6,16	3,61	3,76	3,87	3,33
2	5,11	3,50	3,32	3,75	2,35
3	7,48	3,51	3,47	4,41	4,49
4	4,02	3,69	3,22	4,50	3,34
5		3,86	2,56	4,66	5,02
6	5,76	3,75	2,95	4,47	3,54
7	5,02	3,60	3,41	4,63	4,68
8	4,57	3,72	3,43	3,76	3,26
9	4,36	2,53	3,36	4,69	3,98
10	5,21	2,92	2,70	4,25	4,45
11	5,37	3,80	3,58	4,36	3,48
12	4,05	3,53	3,23	5,10	3,93

Tabela B.13: Módulo de deformação dos prismas com e sem adição de fibras

Módulo de deformação dos prismas					
Nº de prismas	PR	PR20-0,5%	PR40-05%	PR20-1%	PR40-1%
1	5930,42	3448,14	3049,77	5742,91	4515,92
2	3160,89	3640,94	3137,72	2497,13	3378,03
3	6228,19	3878,85	3381,33	2709,64	4576,43
4	4919,85	4255,54	3528,87	4163,98	4243,91
5		3241,27	3083,45	4939,18	3422,32
6	4104,07	2257,52	2909,18	4406,10	4787,35
7	6622,11	3232,93	2799,57	6073,04	5075,32
8	5885,12	2672,20	3914,64	5283,46	4571,63
9	7381,75	3224,27	2868,86	4169,90	2830,23
10	3882,20	3796,92	2709,17	7814,47	2480,39
11	4399,14	4585,88	2829,53	3180,59	3863,99
12	5608,75	4101,97	2802,78	2833,47	3252,63

Tabela B.14: Resistência à compressão média das mini-paredes com e sem adição de fibras

Resistência à compressão das mini-paredes					
Nº de mini-paredes	MN	MN20-0,5%	MN40-05%	MN20-1%	MN40-1%
1	3,13	2,53	3,18	2,94	3,23
2	2,35	3,16	2,90	3,43	2,82
3	3,75	3,16	2,80	3,52	3,15

Tabela B.15: Módulo de deformação das mini-paredes com e sem adição de fibras

Módulo de deformação das mini-paredes					
Nº de mini-paredes	MN	MN20-0,5%	MN40-05%	MN20-1%	MN40-1%
1	5896,32	4712,34	4706,85	4108,95	3098,64
2	4833,45	5020,09	3086,64	5657,08	6699,37
3	5266,84	4427,92	5540,70	5963,13	3245,40

Tabela B.16: Carga da 1ra fissura com relação à carga última

Tipo de Parede	Carga 1^a fissura	Carga última	F 1^a fiss/F última (%)
MN-1	255,74	345,65	73,99
MN-2	208,72	260,42	80,15
MN-3	319,33	414,4	77,06
Média	261,26	340,16	77,06
MN20-0,5%-1	221,33	279,42	79,21
MN20-0,5%-2	297,46	349,54	85,10
MN20-0,5%-3	271,09	326,65	82,99
Média	263,29	318,54	82,43
MN40-0,5%-1	302,36	351,22	86,09
MN40-0,5%-2	249,6	320,24	77,94
MN40-0,5%-3	273,15	309,94	88,13
Média	275,04	327,13	84,05
MN20-1%-1	287,7	325,05	88,51
MN20-1%-2	330,32	379,25	87,10
MN20-1%-3	358,37	389,37	92,04
Média	325,46	364,56	89,22
MN40-1%-1	318,27	357,17	89,11
MN40-1%-2	290,91	312	93,24
MN40-1%-3	318,87	348,01	91,63
Média	309,35	339,06	91,33