

USO DE FIBRA NATURAL DE SISAL EM BLOCOS DE CONCRETO PARA ALVENARIA ESTRUTURAL

Indara Soto Izquierdo¹ & Marcio Antonio Ramalho²

Resumo

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 e bloco, e os ensaios de resistência à compressão axial das unidades, prismas e mini-paredes. Os resultados do ensaio à compressão mostraram que as mini-paredes reforçadas com fibras não apresentaram quase redução da resistência comparados com as de referência, 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 - deformação. O modo de ruptura dos elementos de referência foi caracterizado por uma fratura brusca e os reforçados mantiveram suas partes unidas pelas fibras, tornando a ruptura um processo progressivo.

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

USE OF NATURAL SISAL FIBER IN CONCRETE BLOCKS FOR STRUCTURAL MASONRY

Abstract

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 wallets. The laboratory tests were carried to characterize physical properties the fiber and blocks, and besides axial compression tests of the units, prisms, and wallets. The axial compression test results showed that wallets reinforced with fibers showed no reduction in strength compared with the reference, 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 elements reference was characterized by an abrupt and elements reinforced maintained their shares together by the fibers, becoming a progressive rupture.

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

1 INTRODUÇÃO

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

¹ Mestre em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, indara@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, ramalho@sc.usp.br

estudo de novos materiais com bom desempenho e baixo custo tem levado à utilização de fibras naturais em substituição às fibras sintéticas, normalmente empregadas como reforço em compósitos.

O Sisal, fibra estudada neste trabalho, é utilizada como reforço na matriz cimentícia dos blocos de concreto. 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.

Na alvenaria de blocos de concreto submetidos a carregamentos de compressão, a ruptura normalmente ocorre devido às tensões de tração explicadas pelo mecanismo de ruptura de prismas e paredes. 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.

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.

2 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.

3 DESENVOLVIMENTO

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.

3.1 Materiais

A fibra de sisal usada no trabalho experimental foi do Tipo 3, impregnada com emulsão à base de óleo mineral, fornecidas pela empresa Tecelagem de Sisal (Tecsal), localizada no estado de Bahia. Caracteriza-se por serem fibras secas, bem batidas ou escovadas, em bom estado de maturação, com

brilho e resistências normais, soltas, desembaraçadas e isentas de impurezas, como mostra a Figura 1. 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

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.



Figura 1 – Fibra de sisal Tipo 3 com tratamento à base de óleo mineral.

Os blocos de concreto foram fabricados com resistência característica de 4 MPa na empresa Tatu Pré-Moldados, localizada em Limeira, São Paulo. Os ensaios como: absorção de água, área líquida e massas específicas 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 1 apresenta a nomenclatura adotada para os blocos estruturais de cada série.

Tabela 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

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, sendo a mais adequada para o uso em alvenaria estrutural e o traço em volume foi 1:0,5:4,5 para argamassa de média resistência.

3.2 Ensaio de resistência à compressão

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 de prismas e mini-paredes.

3.2.1 Blocos

A NBR 12118 (2007) prescreve o método de determinação da resistência à compressão em blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural. 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. A caracterização dos blocos foi feita em termos de resistência média (f_{bm}) e de resistência característica (f_{bk}). Utilizou-se para o ensaio

a máquina computadorizada da marca ELE e Modelo Autotest 2000, com capacidade de 2000 kN e a velocidade de imposição de carregamento foi de 2,03 kN/s. O capeamento do bloco foi feito com placas utilizadas em forros de edificações, comumente conhecida como forro pacote da empresa Facimaq em São Carlos. As placas possuem espessuras de 16 mm e são constituídas de um material bastante deformável que permite distribuir uniformemente o carregamento ao longo da área da seção atuante.

3.2.2 Prismas e mini-paredes

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. 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.

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

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

Os prismas e mini-paredes foram feitos com blocos com ou sem adição de fibras de teor 0,5% ou 1% e comprimento 20 mm ou 40 mm.

3.3 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 da norma ACI 530-92 (1995). Segundo essa norma, o módulo é dado pela inclinação da reta secante no diagrama tensão - deformação, entre 5% e 33% da tensão de ruptura.

A instrumentação consistiu de dois transdutores de deslocamento para os prismas e quatro para as mini-paredes, 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, sendo as leituras e o armazenamento de dados realizados pelo sistema de aquisição SYSTEM 5000.

A Figura 2 a Figura 3 ilustra a posição da instrumentação, onde foram colocados os transdutores de deslocamento nos prismas e mini-paredes.

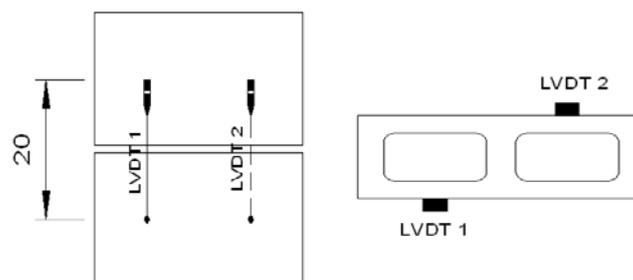


Figura 2 – Vista frontal e em planta da localização dos transdutores de deslocamento nos prismas.

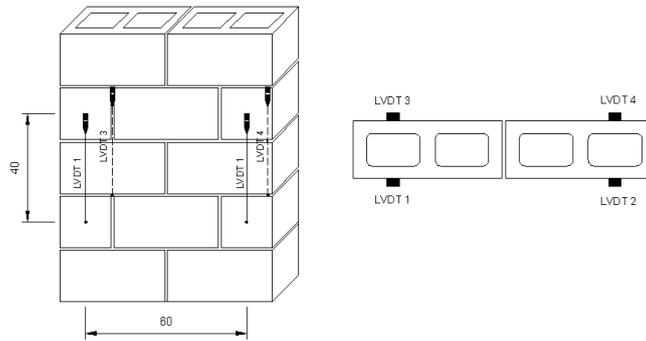


Figura 3 – Vista frontal e em planta da localização dos transdutores de deslocamento nas mini-paredes.

4 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados e análise dos fatos observados nos ensaios correspondentes ao programa experimental.

4.1 Caracterização física dos materiais

4.1.1 Fibra de sisal

Na Tabela 2 são mostrados os valores dos ensaios da caracterização física das fibras.

Tabela 2 – Massa específica real, massa específica 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

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/m³ e 500 kg/m³, 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 uma menor quantidade de poros.

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.

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.

A Figura 4 mostra a absorção de água das fibras medidas em tempos pré-estabelecidos.

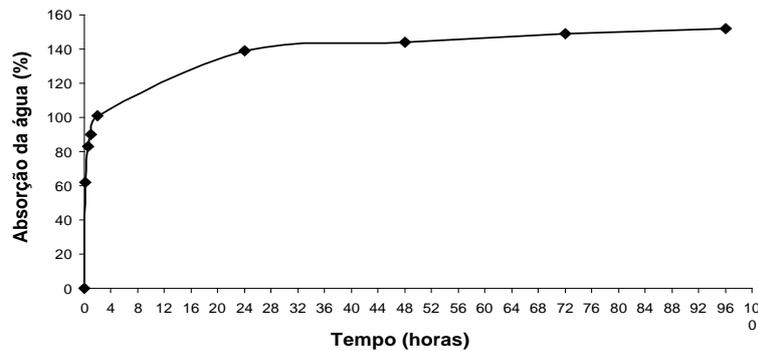


Figura 4 – Absorção de água das fibras de sisal no tempo.

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 Blocos de concreto com e sem adição de fibras

A Tabela 3 faz um resumo das propriedades físicas dos cinco tipos de blocos de concreto.

Tabela 3 – Propriedades físicas dos blocos com e sem adição de fibras

Tipo de Bloco	Absorção de água (%)	C.V (%)	Área líquida (mm ²)	C.V (%)	Massa específica seca ao ar (g/cm ³)	C.V (%)
BE	7,78	0,03	29214,11	0,32	2,18	1,63
BE20-0,5%	10,17	0,01	29156,92	0,16	2,12	0,65
BE40-0,5%	10,61	0,03	29123,37	0,53	2,08	0,67
BE20-1%	10,00	0,10	29381,81	1,08	2,11	0,03
BE40-1%	8,91	7,43	28791,12	2,52	2,18	1,15

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.

As fibras também provocaram que os valores de massa específica seca ao ar sejam menores para os blocos reforçados, comparados com os blocos de referência, pelos 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.

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

4.2 Resistência à compressão

4.2.1 Blocos

Os valores de resistência à compressão média e características de cada tipo de bloco são apresentados na Tabela 4. Esses resultados foram calculados em função da área bruta das unidades.

Tabela 4 – Resistência à compressão média e característica dos blocos com e sem adição de fibras

Tipo de Bloco	Média (f_{bm}) (MPa)	C.V (%)	Caract. (f_{bk}) (MPa)	Varição c/ a referência
BE	11,26	9,42	9,43	0
BE20-0,5%	7,11	6,79	6,25	-37%
BE40-0,5%	6,00	10,24	4,81	-47%
BE20-1%	7,16	13,03	6,10	-36%
BE40-1%	6,43	12,12	5,22	-43%

A resistência média 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.

Os blocos com fibras apresentaram uma diminuição da resistência média, aproximadamente, 41%, com relação aos blocos de referência, apesar de terem alcançado a resistência característica pretendida. 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. Nos blocos BE40-1% o índice de vazios não influenciou na resistência porque apresentaram igual massa específica com relação aos blocos de referência. Nesse caso foi comprovada de forma visual uma maior concentração de fibras formando bolas em diferentes lugares da unidade. Possivelmente isso provocou falhas no material diminuindo a resistência.

Os blocos com fibras de comprimento 20 mm apresentaram melhor eficiência, ou seja, 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 distribuem melhor nas relativamente pequenas dimensões dos blocos, o que não ocorreu com as fibras maiores deixando algumas falhas na estrutura do material. 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. Apesar disso, o teor de 1% apresentou uma resistência ligeiramente maior que o teor de 0,5%, portanto, uma fração volumétrica maior contribuiu para melhoria da capacidade resistente do compósito.

Foi observado durante o ensaio de compressão que nas unidades sem reforço ocorreu um colapso instantâneo, como mostra a Figura 5. O rompimento brusco é produto da maior resistência à compressão que apresentaram esses blocos, tornando-os mais frágeis. Já os blocos reforçados com fibras mostraram ausência de ruptura frágil, como se apresenta na Figura 6.



Figura 5 – Ruptura frágil dos blocos sem adição de fibras.



Figura 6 – Ruptura dúctil dos blocos com adição de fibras.

4.2.2 Prismas

Os resultados de resistência à compressão correspondente à área bruta dos prismas são apresentados na Tabela 5. São mostrados também os fatores de eficiência prisma/bloco.

Tabela 5 – Resistência à compressão dos prismas com e sem adição de fibras

Tipo de prisma	Média (f_p) (MPa)	C.V (%)	Eficiência (f_p/f_{bm})	Varição c/ a referência
PR	5,19	14,56	0,46	0
PR20-0,5%	3,49	11,67	0,49	-33%
PR40-0,5%	3,25	10,86	0,54	-37%
PR20-1%	4,37	9,34	0,61	-16%
PR40-1%	3,82	13,69	0,59	-26%

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.

Os prismas reforçados com fibras apresentaram uma diminuição média de 28% da resistência em relação aos prismas sem fibras.

Os corpos-de-prova com fibras de comprimento 20 mm mostraram melhor eficiência, ou seja, maior resistência que os prismas com fibras de 40 mm para os mesmos teores. Quanto à fração volumétrica das fibras, os componentes com 1% de adição de sisal, para um mesmo comprimento, apresentaram melhor comportamento, sendo esse fator mais significativo nos prismas que nos blocos e contribuindo melhor à capacidade resistente do compósito.

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 7 mostra como isso ocorreu de forma típica para cada tipo de prisma.

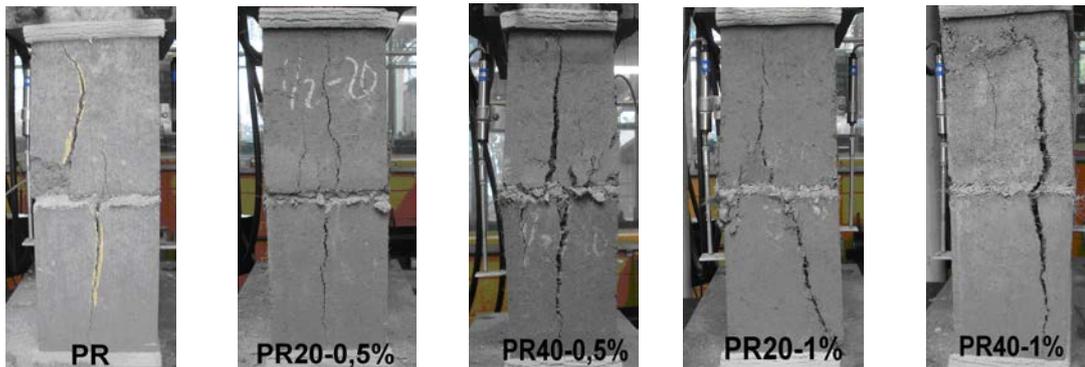


Figura 7 – Ruptura típica dos prismas sob compressão.

O prisma, ao ser comprimida axialmente, tende a se deformar lateralmente, e a argamassa, por ter, em geral, módulo de elasticidade menor que a do bloco, tende a se deformar mais. No entanto, devido à aderência entre os blocos e a argamassa, essa deformação é impedida, surgindo tensões laterais de tração no bloco e de compressão na argamassa.

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, além de fissuras verticais ao longo dos septos laterais, ocorreu um rompimento brusco para alguns prismas, característico de um comportamento frágil como se observa na Figura 8. A maior resistência à compressão dos blocos que formam os prismas de referência também pode contribuir para esse tipo de ruptura.



(a) Ruptura frágil dos prismas sem reforço

(b) Ruptura dúctil dos prismas com reforço

Figura 8 – Ruptura frágil e dúctil dos prismas sob compressão.

4.2.3 Mini-paredes

Os resultados de resistência à compressão correspondente à área bruta das mini-paredes ensaiadas são apresentados na Tabela 6. Também são expostos os fatores de eficiência mini-parede/bloco e mini-parede/prisma e diminuição da tensão com relação à mini-parede de referência. O f_{mp} representa a resistência média das mini-paredes.

Tabela 6 – Resistência à compressão das mini-paredes com e sem adição de fibras

Tipo de mini-parede	Média (f_{mp}) (MPa)	C.V (%)	f_{mp} / f_{bk}	f_{mp} / f_p	Varição c/ a referência
MN	3,08	22,68	0,33	0,59	0
MN20-0,5%	2,95	12,41	0,47	0,81	-5%
MN40-0,5%	2,96	6,57	0,62	0,91	-4%
MN20-1%	3,30	9,49	0,54	0,76	7%
MN40-1%	3,07	7,04	0,59	0,80	-1%

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.

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.

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.

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 9 mostra esse comportamento.

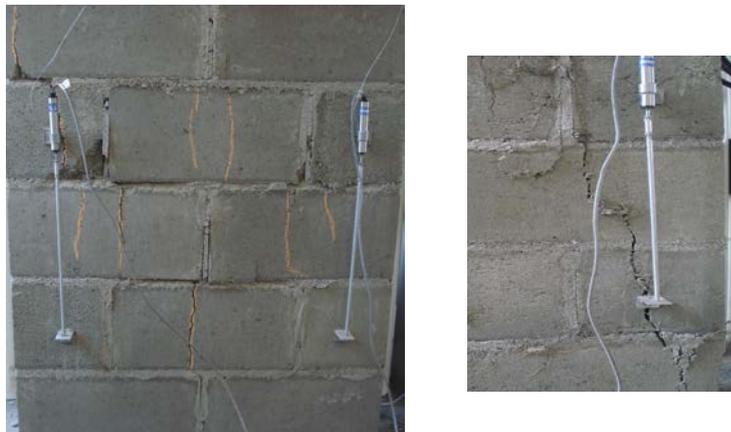


Figura 9 – Propagação de fissuras verticais de tração

De forma geral, surgiram também, fissuras verticais ao longo dos septos laterais, ocorrendo ruptura por tração transversal nos blocos, como se ilustra na Figura 10.



Figura 10 – Fissuras verticais ao longo dos septos laterais.

Na maioria das mini-paredes sem fibras e também em algumas com adição de fibras, ocorreu o esmagamento localizado entre a argamassa da junta vertical e horizontal, como mostra a Figura 11.



Figura 11 – Esmagamento da argamassa.

4.3 Módulo de deformação

4.3.1 Módulo de deformação dos prismas

Os resultados de módulo de deformação dos prismas são apresentados na Tabela 7. 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.

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.

Tabela 7 – 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

A Tabela 7 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.

4.3.2 Módulo de deformação das mini-paredes

A Tabela 8 mostra os resultados de módulo de deformação dos cinco tipos de mini-paredes estudados.

Tabela 8 – Módulo de deformação das mini-paredes

Tipo de umidade	f_{mn} (MPa)	Módulo (E_{pp}) (MPa)	Def. 33% (‰)	Def. Última (‰)	Relação E_{pp}/f_{pp}
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 8 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.

4.4 Diagrama tensão-deformação dos prismas e mini-paredes à compressão

O diagrama tensão-deformação das alvenarias à compressão é frequentemente usado em projetos estruturais, para estabelecer o comportamento da curva e calcular o valor do módulo de elasticidade. Nesta pesquisa, as curvas tensão-deformação foram traçadas nos prismas e mini-paredes, com o objetivo principal de analisar o ganho de capacidade de deformação destes elementos.

4.4.1 Diagrama tensão-deformação dos prismas

É mostrado, a continuação, os diagramas tensão-deformação para cada tipo de prisma estudado. Eles se encontram organizadas, por tipo de prisma, nos gráficos apresentados nas Figura 12.

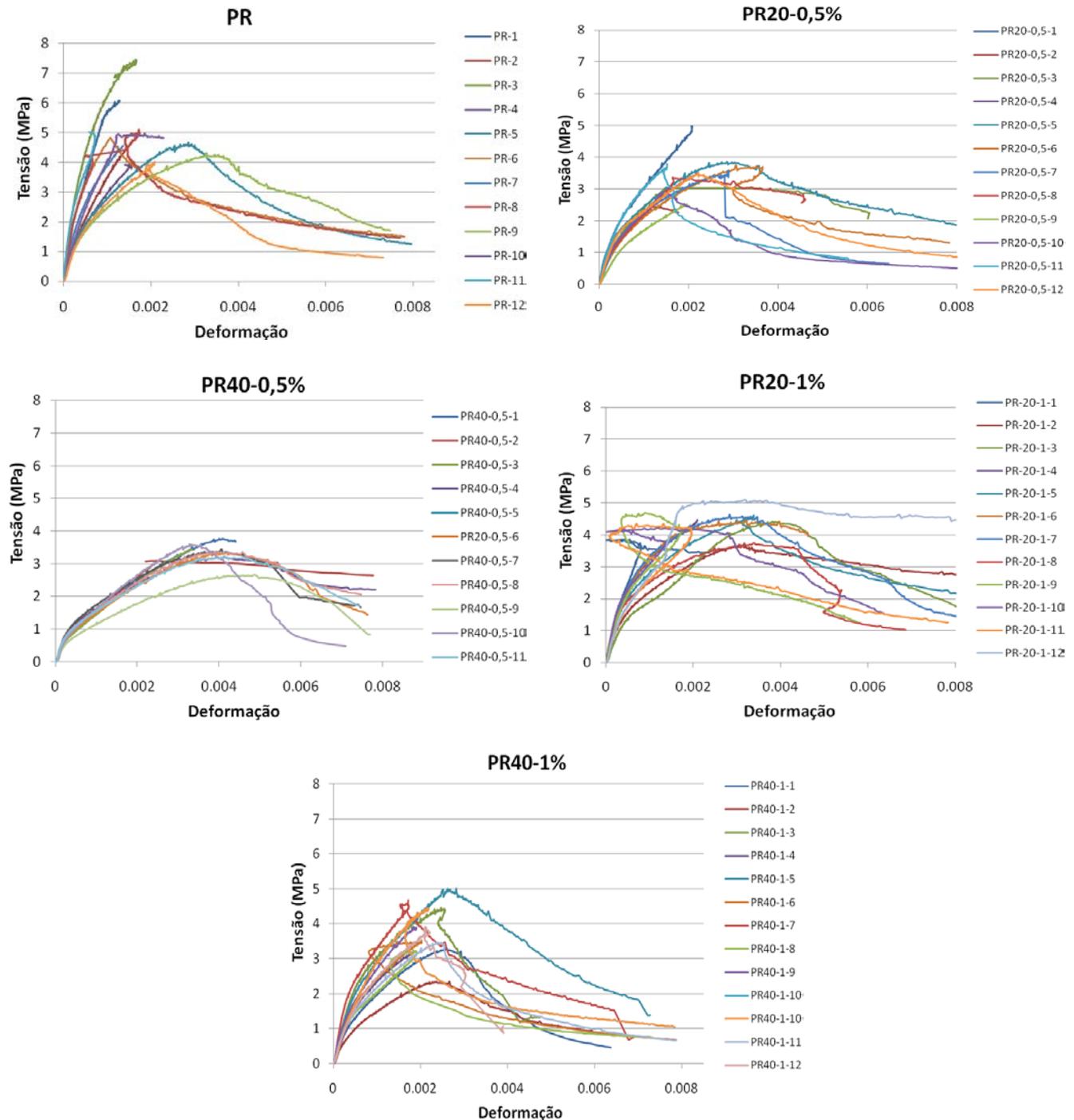


Figura 12 – Curvas tensão – deformação dos prismas com e sem adição de fibras.

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.

4.4.2 Diagrama tensão-deformação das mini-paredes

Foram traçadas as curvas de tensão - deformação para cada tipo de mini-paredes. Elas estão organizadas para cada tipo de corpo-de-prova e são apresentadas na Figura 13.

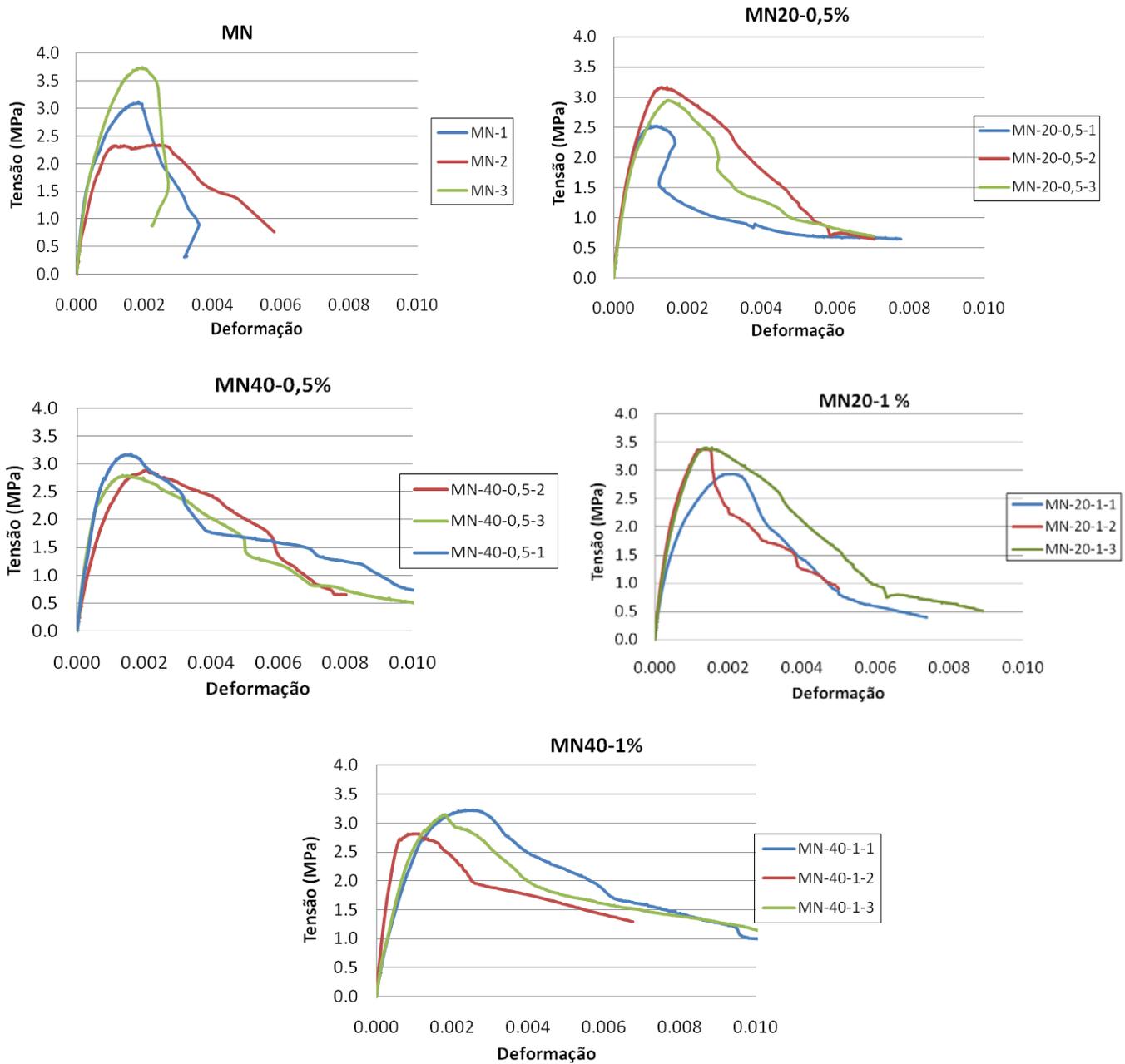


Figura 13 – Curvas tensão – deformação das mini-paredes com e sem adição de fibras.

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.

5 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 compacidade da massa. No caso dos blocos BE40-1% uma maior concentração das fibras provocou falhas na estrutura do material.

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 mantiveram 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.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem 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 e ao Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas pela realização do programa experimental desta pesquisa.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118**: blocos vazados de concreto simples para alvenaria- Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**: blocos vazados de concreto simples para alvenaria - requisitos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10837**: cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto. Projeto de Norma Técnica. Rio de Janeiro, 1989.

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

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

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.

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.

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. Proceedings. 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.

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 se São Paulo, São Paulo, 2000.

SAVASTANO, H. J. **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 se São Paulo, São Paulo, 1992.

