

# COMPORTAMENTO EM COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS REFORÇADAS COM FIBRAS NATURAIS<sup>1</sup>

## I. RELAÇÃO TENSÃO-DEFORMAÇÃO EXPERIMENTAL E PROCESSO DE FRATURA

Romildo Dias Toledo Filho<sup>2</sup>, George Leslie England<sup>3</sup> e Khosrow Ghavami<sup>4</sup>

### RESUMO

Esta é a primeira parte de um artigo dividido em duas partes e visa avaliar, analítica e experimentalmente, o comportamento em compressão de argamassas reforçadas com fibras naturais. No presente artigo pretende-se mostrar, de forma experimental, como a adição de fibras de sisal e coco afeta, em várias frações volumétricas e comprimentos, o comportamento tensão-deformação, em compressão, de duas matrizes de argamassa. A influência dessas fibras no processo de fratura das argamassas é também avaliada. O efeito da substituição parcial do cimento Portland (OPC) por micro-sílica e escória de alto forno no comportamento dos compósitos é também discutido. Os resultados indicam que a adição de fibras naturais reduziu a resistência a compressão das matrizes em cerca de 18% a 32% e, de forma desprezível o seu módulo de elasticidade mas, não modificou, de forma significativa, o coeficiente de Poisson. Por outro lado, as fibras confinaram o material retardando a propagação da primeira fissura e aumentando a tenacidade pós-carga de pico do material. Com relação ao processo de fratura da argamassa, os resultados indicam que, até a tensão de ruptura, o efeito da adição de fibras de sisal e coco é similar às características produzidas pelo acréscimo da quantidade de areia na matriz de argamassa. A substituição parcial de OPC por escória e micro-sílica conduziu a misturas com uma resistência a compressão ligeiramente mais alta que a das preparadas apenas com OPC. A substituição do OPC resultou tanto na redução quanto no aumento do módulo de elasticidade, enquanto o coeficiente de Poisson não foi modificado significativamente.

**Palavras-chave:** materiais compósitos, resistência à compressão, argamassa, fibras de sisal, fibras de coco, curvas tensão-deformação

### COMPRESSIVE BEHAVIOUR OF NATURAL FIBRE REINFORCED MORTAR COMPOSITES

## I. EXPERIMENTAL STRESS-STRAIN RELATIONSHIP AND FRACTURE PROCESS

### ABSTRACT

This is the first part of a two-part paper providing an experimental and analytical evaluation of the influence of natural fibres on the axial compressive behaviour of cement mortar matrices. This paper shows how the addition of sisal and coconut fibres in various volume fractions and lengths

<sup>1</sup> Parte da tese de Doutorado defendida na PUC - Rio.

<sup>2</sup> Professor Doutor do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba. Av. Aprígio Veloso 882, Bodocongó, Campina Grande-PB, CEP: 58109-700. e-mail: romildo@deag.ufpb.br; Tel: (083)310-1312; FAX: (083)310-1184.

<sup>3</sup> Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil do Imperial College of Science Technology and Medicine, Imperial College Road, SW7 2BU, Londres - U.K. e-mail: england@ic.ac.uk.

<sup>4</sup> Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, Rua Marquês de São Vicente 225, Gávea, Rio de Janeiro-RJ, CEP 22453-900. e-mail: ghavami@dec.puc-rio.br.

affected the compressive stress-strain behaviour of two mortar matrices. The influence of these fibres on the fracture process of mortars in compression is also evaluated. The use of undensified silica fume and blastfurnace slag as partial replacement of ordinary Portland cement (OPC) is also investigated. The results indicate that the addition of natural fibres reduced the compressive strength of the matrix by about 18 to 32, slightly reduced its elastic modulus and did not change significantly the Poisson's ratio. On the other hand, the fibres confined the material thereby delaying the first crack propagation and increasing the post-peak ductility. The results also indicate that the effect of sisal and coconut fibres reinforcement on the fracture behaviour of mortar up to failure stress is similar to the characteristics imparted by the increase in sand content in the mortar matrix. The partial replacement of OPC by slag and silica fume led to mixtures with a compressive strength slightly higher than those made with OPC. The cement replacement resulted in both decrease and increase in the elastic modulus, whereas the Poisson's was not significantly changed.

**Key words:** composite materials, compressive strength, sisal fibres, coconut fibres, mortar, stress-strain curves

## INTRODUÇÃO

Nos últimos vinte e cinco anos um esforço considerável tem sido feito no sentido de se estabelecer as propriedades de compósitos produzidos com matrizes à base de cimento (concreto, argamassa e pasta) reforçados com fibras metálicas, poliméricas e minerais. No entanto, poucos estudos sistemáticos foram conduzidos usando-se fibras naturais de origem vegetal. Fibras naturais, como sisal, coco, juta, bambu e fibras de celulose, constituem excelente alternativa para uso como elemento de reforço de matrizes frágeis, devido à sua abundância, baixo custo e consumo de energia para sua produção. Considerando-se que a infra-estrutura rural brasileira, em especial da região Nordeste, é insuficiente e inadequada para atender às necessidades das suas populações, no que se refere a obras de apoio à produção agrícola, habitação, saneamento, educação e lazer, o uso de fibras naturais na produção de elementos de cobertura e revestimento, painéis divisórios, componentes habitacionais etc., pode contribuir para o estabelecimento dessa infra-estrutura. Compósitos de argamassa reforçados com fibras naturais surgem, então, como um desafio e, ao mesmo tempo, como solução, para se combinar materiais de construção não convencionais com as técnicas de construção tradicionais. Pesquisas com métodos científicos avançados podem ajudar na avaliação das propriedades de engenharia desses materiais locais, adaptando-os

para que se tornem materiais de construção econômicos e duráveis.

No presente artigo pretende-se mostrar o efeito da adição de fibras de sisal e coco no comportamento de duas argamassas submetidas a cargas de compressão. Os parâmetros investigados foram: frações volumétricas (2% e 3%) e comprimento de fibra (15mm e 25mm). O uso de micro-sílica não densificada e de escória de alto forno como substitutos parciais do cimento Portland foi também estudado. A resistência à primeira fissura, a tensão de iniciação da fissuração, a tensão crítica, a tensão e deformação de pico, a forma da curva tensão-deformação (particularmente seu ramo descendente) e a tenacidade do compósito foram avaliadas para cada mistura.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Materiais

Fibras de sisal e coco produzidas no Nordeste do Brasil foram usadas na presente investigação. A Tabela 1 apresenta valores mínimos, máximos, médios e coeficiente de variação (CV) das propriedades físicas e mecânicas dessas fibras (Tolêdo Filho, 1997). A Tabela 2 apresenta as propriedades da areia do vale do Rio Tâmis, usada nos estudos. Os seguintes materiais cimentantes foram usados: cimento Portland comum (OPC), escória de alto forno (GGBS) e micro-sílica não densificada,

Tabela 1. Sumário das propriedades físicas e mecânicas das fibras de sisal e coco

Propriedade	Fibra de Sisal		Fibra de Coco	
	Min. - Máx.	Média-CV(%)	Min. - Máx.	Média-CV(%)
Diâmetro (mm)	0,08 – 0,30	0,12 – 23,8	0,11 – 0,53	0,25 – 27,30
Densidade (kN/m <sup>3</sup> )	7,50 – 10,70	9,00 – 8,90	6,70 – 10,00	8,0 – 7,60
Teor de umidade natural (%)	10,97 – 14,44	13,30 – 8,80	11,44 – 15,85	13,5 – 10,00
Absorção de água após 5 minutos em água (%)	67,00 – 92,00	82,00 – 14,50	22,00-38,00	28,00 – 16,0
Absorção de água na saturação (%)	190,00 – 250,00	230,00 - 16,00	85,00 – 135,00	100,0 – 19,5
Resistência à tração (MPa)	227,80-1002,30	577,50 - 42,66	108,26-251,90	174,00-24,20
Módulo de elasticidade (GPa)	10,94 -26,70	19,00 - 29,50	2,50 – 4,50	3,50 – 27,00
Deformação na ruptura (%)	2,08 – 4,18	3,00 - 29,15	13,70 – 41,00	25,00 - 29,10

categoria 940. As propriedades químicas e físicas são apresentadas na Tabela 3. Água da torneira foi usada em todas as misturas.

Tabela 2. Propriedades dos agregados

Módulo de finura	Massa específica	Teor de umidade total (%)
2,81	2,65	0,35

Tabela 3. Propriedades químicas e físicas dos materiais cimentantes

Propriedades	OPC	Micro-sílica 940	GGBS
a) Propriedades químicas	wt (%)	wt (%)	wt (%)
SiO <sub>2</sub>	20,70	91,70	34,40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,00	0,51	1,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,60	1,11	11,70
CaO	64,70	0,23	41,20
MgO	1,00	0,70	8,81
SO <sub>3</sub>	3,00	0,26	-
Na <sub>2</sub> O	0,13	0,25	0,29
K <sub>2</sub> O	0,65	1,11	0,31
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,07	-
TiO <sub>2</sub>	-	0,01	0,58
MnO	-	0,03	-
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0,30
Perda ao rubro	1,30	2,34	-
Resíduos solúveis	0,38	-	-
pH	-	6,90	-
b) Propriedades físicas			
Finura (m <sup>2</sup> /kg)	353,00	15000,00-20000,00	417,00
Tempo de pega (inicial - min.)	134,00	-	-
Resistência à compressão (MPa):			
2 dias	26,63	-	-
7 dias	47,20	-	-
14 dias	59,20	-	-
Densidade volumétrica (kN/m <sup>3</sup> )	-	3,24	-
Sólidos secos (em peso)	-	-	-

**Programa experimental e preparação dos corpos de prova**

O programa experimental é apresentado na Tabela 4. As seguintes abreviações são usadas para representar o tipo, comprimento e o volume da fibra, o traço da argamassa de OPC, e o traço da argamassa de cimento-escória e o traço de argamassa micro-sílica-cimento:

(a) M1 - argamassa de traço (em peso) 1:1:0,4 (cimento:areia:água); (b) M2 - argamassa de traço (em peso) 1:2:0,52 (cimento:areia:água); (c) S - fibra de sisal; (d) C - fibra de coco; (e) M1slag - substituição parcial do OPC por escória (40% em peso) na argamassa M1, (f) M2slag - substituição parcial do OPC por escória (40% em peso) na argamassa M2, (g) M1ms - substituição parcial do OPC por micro-sílica (10% em peso) na argamassa M1. A proporção de água/cimento foi aumentada de 0,4 para 0,46 para essa mistura; (h) M2ms - substituição parcial do OPC por micro-sílica (10% em peso) na argamassa M2; (i) número após o tipo de fibra - volume de fibra; (j) número após o símbolo do volume de fibra - representa o comprimento das fibras; (k) V<sub>f</sub> - volume de fibra; (l) l - comprimento das fibras; (m) d - diâmetro das fibras; (n) V<sub>f</sub>(l/d) - índice de reforço. A abreviação da mistura M1S325 significa: argamassa de traço 1:1:0.4 reforçada com 3% de fibra de sisal de 25 mm de comprimento.

Um misturador normalmente usado para concreto foi utilizado para preparar os compósitos. A seguinte sequência da mistura foi usada: (a) colocar toda a areia no misturador e ligá-lo; (b) adicionar 40% da quantidade total de água ao misturador; (c) adicionar as fibras de sisal ou coco ao misturador. As fibras devem ser adicionadas aos poucos, sem amontoá-las. Cerca de 30 a 35% da quantidade de água da mistura são progressivamente adicionadas durante esse estágio, para manter a mistura úmida; (d) adicionar o material cimentante ao misturador; (e) adicionar a água restante; (f) continuar misturando por cerca de 5 minutos, para intensificar a dispersão das fibras na mistura. As propriedades das misturas no estado fresco (abatimento e VêBê) estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Programa experimental e propriedades no estado fresco

Abreviação da mistura	Traço da argamassa (em peso)	Tipo de fibra	Volume de fibra (%)	Abatimento (mm)	VêBê (sec)
M1	1:1:0,40	-	-	Fluido	Fluido
M2	1:2:0,52	-	-	Fluido	Fluido
M1S325	1:1:0,40	Sisal	3	40,00	3,90
M1S315	1:1:0,40	Sisal	3	72,00	2,83
M1S225	1:1:0,40	Sisal	2	118,00	1,90
M1C325	1:1:0,40	Coco	3	114,00	2,14
M1C225	1:1:0,40	Coco	2	167,00	1,62
M2S225	1:2:0,52	Sisal	2	-	2,40
M1slagS225	(0.6OPC+0.4slag):1:0,40	Sisal	2	110,00	2,00
M1msS225	(0.9OPC+0.1MS):1:0,46	Sisal	2	90,00	-
M2slagS225	(0.6OPC+0.4slag):2:0,52	Sisal	2	68,00	-
M2msC225	(0.9OPC+0.1MS):2:0,52	Coco	2	62,00	-

Os corpos de prova (cilindros de 75mm de diâmetro x 150 mm de altura) foram concretados em moldes de aço que permitiam a moldagem de três amostras ao mesmo tempo. Três amostras foram moldadas para cada mistura, usando-se vibração externa. Os corpos de prova foram mantidos nos respectivos moldes, cobertos com um pano úmido e uma folha de plástico durante as primeiras 24h. Após esse período, foram curados em água, a uma temperatura de 18°C e ensaiados após 28 dias. Um dia antes do ensaio, os corpos de prova foram removidos do banho de cura para ter as superfícies superior e inferior polidas (para garantir o paralelismo entre as faces) e para ter os extensômetros elétricos colados.

**Método de ensaio**

Os ensaios de compressão uniaxial foram executados em uma máquina servo, controlada a uma taxa de deslocamento do travessão de 0,5 mm/min. Carga, deformações circunferenciais e deslocamentos verticais foram registrados, usando-se um sistema de aquisição de dados de 16 bits capaz de efetuar até 2400 leituras/min. Os deslocamentos longitudinais foram medidos com o uso de três transdutores elétricos (LVDT's) montados na zona central das amostras e as deformações circunferenciais foram obtidas usando-se dois extensômetros elétricos de 50mm de comprimento, conforme mostra a Figura 1.

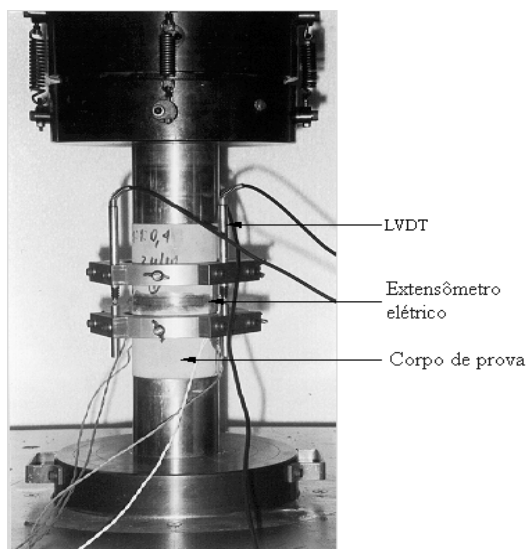


Figura 1. Detalhe da instrumentação usada no ensaio de compressão uniaxial.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Curva tensão-deformação

A Figura 2 apresenta curvas tensão-deformação típicas obtidas através dos ensaios de resistência a compressão, realizados nos compósitos. Observando-se tais curvas, pode-se notar que elas apresentam formas similares às curvas típicas normalmente obtidas de ensaios realizados em amostras de concreto simples ou argamassa. As curvas tensão versus deformação axial e volumétrica da Figura 2, são ampliadas nas Figuras 2a e 2b, para mostrar os pontos que representam os estágios mais importantes do processo de fratura dos compósitos em compressão (pontos A, B, C, D e E).

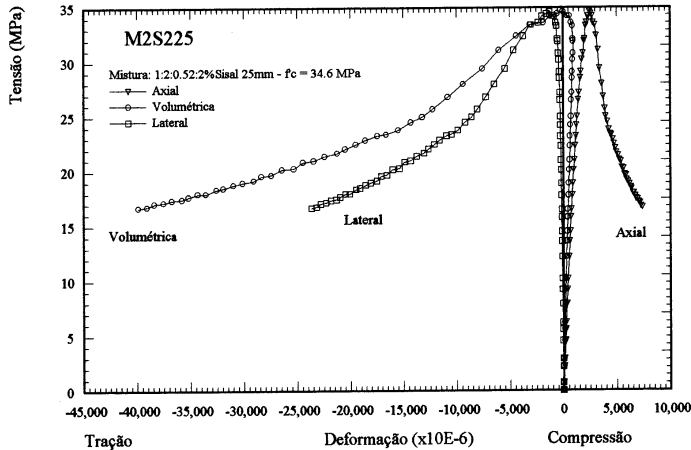


Figura 2. Curvas típicas tensão de compressão-deformação para a mistura M2S225.

As formas das curvas tensão-deformação estão intimamente associadas ao mecanismo interno de microfissuração. Inicialmente, as fissuras se formam como um sistema distribuído de microfissuras. Essas microfissuras são estáveis e se propagam apenas com o aumento da carga. A resistência à primeira fissura (FCS), ponto A na Figura 2 partes a) e b), o qual é denominado, de início, fissuração localizada, é o ponto onde a curva tensão-deformação se desvia da linearidade. As microfissuras internas começam a se abrir nesse nível de carga. As microfissuras da interface se propagam no ponto B o qual é chamado ponto de iniciação da fissuração (CIS); este corresponde ao ponto em que o

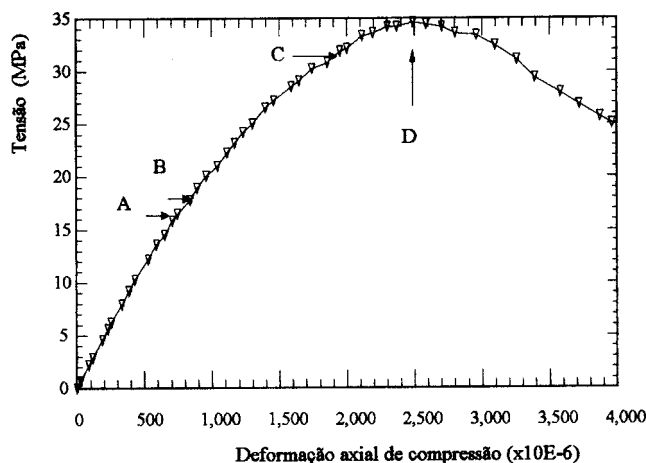


Figura 2a. Ampliação da curva tensão-deformação axial. Mistura M2S225.

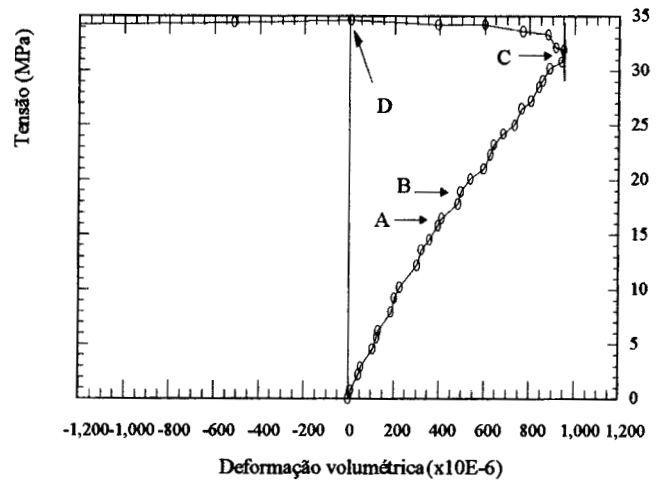


Figura 2b. Ampliação da curva tensão-deformação volumétrica. Mistura M2S225.

coeficiente de Poisson do material começa a aumentar e a curva da deformação volumétrica se desvia da linearidade (Shah e Chandra, 1968). As fissuras de aderência, que são isoladas e uniformemente distribuídas por todo o corpo de prova, se propagam em direções diferentes dentro da argamassa e coalescem como uma única fissura, ou várias fissuras maiores, no ponto C, referido como sendo o ponto de tensão crítica (CS). Essas fissuras maiores se propagam de forma estável, até que uma delas atinja o seu comprimento crítico no ponto D. Como resultado, o corpo de prova exibe a sua tensão compressiva de pico. Após a tensão de pico, as fissuras maiores se propagam automaticamente, apesar de a carga aplicada diminuir. A variação típica do coeficiente de Poisson com o acréscimo da tensão, obtida para a mistura M2S225, é apresentada na Figura 3.

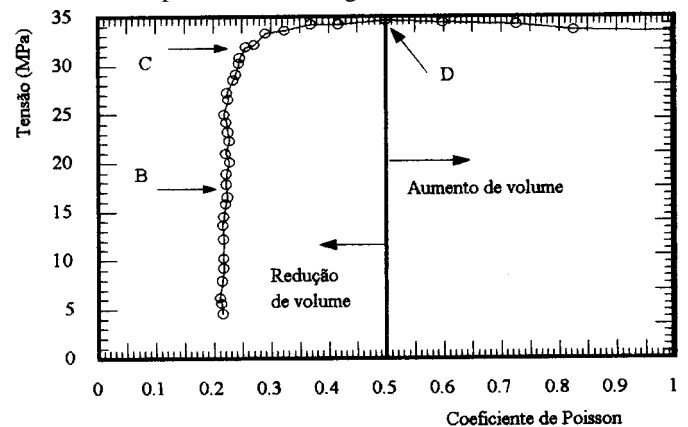


Figura 3. Variação do coeficiente de Poisson com a tensão de compressão. Mistura M2S225.

A Tabela 5 apresenta os valores médios e o coeficiente de variação (CV) dos ensaios de compressão, em termos de resistência a compressão ( $f'_c$ ), módulo de elasticidade ( $E_{comp}$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e deformação axial e lateral na tensão de pico ( $e_a$ ,  $e_l$ ). O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson foram calculados a partir do diagrama tensão-deformação, conforme recomendado pela ASTM C 469 (1987).

Resultados de estudos experimentais anteriores demonstraram tanto acréscimo quanto decréscimo da resistência a compressão com diferentes tipos de fibra. Para fibras de aço, por exemplo, resultados obtidos por Shah e Rangan (1971),

Tabela 5. Resultados experimentais dos ensaios de compressão

Mistura	E <sub>comp</sub> - CV (GPa)-(%)	f <sub>c</sub> - CV (MPa)-(%)	ν - CV(%)	Deformação na tensão de ruptura (µε) -CV (%)	
				Axial	Lateral
M1	29,8 - 1,7	70,1 - 3,5	0,23 - 3,9	3777,2 - 8,1	-1444,9 - 3,6
M2	26,5 - 1,2	46,9 - 2,2	0,21 - 2,1	2982,3 - 0,4	-1031,1 - 6,4
M1S325	26,1 - 5,6	47,8 - 4,5	0,21 - 3,7	2994,9 - 3,4	-1088,3 - 7,9
M1S315	24,8 - 2,2	47,3 - 2,9	0,23 - 1,7	2947,0 - 3,3	-1383,3 - 8,8
M1S225	28,0 - 0,1	51,3 - 3,9	0,23 - 0,0	2535,8 - 9,9	-1337,7 - 7,5
M1C325	28,2 - 1,9	49,8 - 8,1	0,23 - 0,0	2536,9 - 5,2	-1333,0 - 8,7
M1C225	29,4 - 3,1	57,2 - 0,7	0,23 - 4,1	2840,7 - 7,7	-1203,0 - 9,2
M2S225	22,5 - 2,0	34,0 - 1,8	0,23 - 2,5	2487,8 - 3,6	-1258,0 - 1,3
Mslag1S225	24,2 - 3,4	50,9 - 1,1	0,23 - 2,9	2886,8 - 2,5	-1349,1 - 7,4
Mms1S225	24,9 - 0,8	50,1 - 5,7	0,22 - 4,9	2745,3 - 7,5	-1205,0 - 9,6
Mslag2S225	23,7 - 1,0	37,7 - 4,2	0,20 - 2,2	2426,7 - 2,9	-932,7 - 9,8
Mms2C225	28,8 - 1,7	53,1 - 1,8	0,20 - 2,4	2526,5 - 0,5	-1008,0 - 7,1

Fanella e Naanan (1985) e Mangat e Azari (1984) indicam aumento na resistência, que varia de zero a cerca de 25%. Para fibras poliméricas, Balagaru e Shah (1992) afirmam que até uma fração volumétrica de 0,1% a adição de fibras não afeta quaisquer propriedades do concreto endurecido. A uma fração volumétrica de 0,5%, no entanto, uma redução de 5% a 10% na resistência a compressão pode ocorrer. Para argamassa reforçada com fibras de polipropileno retorcidas, resultados obtidos por Fanella e Naanan (1985) registram redução na resistência a compressão, de cerca de 30% a 35%, quando 2% a 3% das fibras foram adicionadas à mistura. Resultados anteriores mostram, também, que as mudanças no módulo de elasticidade podem ser consideradas desprezíveis em razão da adição de fibras à matriz. Por outro lado, a adição de fibras contribuiu consideravelmente para a tenacidade pós-fissuração da matriz. Essas observações sugerem que a modificação na curva tensão-deformação da matriz depende de um número de fatores nos quais se incluem a fração volumétrica e o tipo de fibra.

**Argamassas de OPC reforçadas com fibras de sisal e coco**

**a) Influência do tipo de fibra e da fração volumétrica**

Exemplos típicos de curvas tensão-deformação, mostrando o efeito da adição de 2% ou 3% de fibras de sisal ou coco no comportamento em compressão da mistura M1, são apresentados nas Figuras 4 e 5. Os resultados mostram que as misturas M1S225 e M1C225 apresentaram **resistência a compressão**, respectivamente, 26,8% e 18,4% menores que a observada para a mistura M1. Um aumento na quantidade de fibras para 3% reduziu a resistência à compressão da matriz, em cerca de 31,8% e 29% para as misturas reforçadas com fibras de sisal e coco, respectivamente. Esses resultados sugerem que, usando-se procedimentos convencionais de mistura, a adição de uma alta fração volumétrica de fibras à matriz introduz defeitos, em razão de uma compactação ineficiente da mistura fresca. Esses defeitos aumentam com o aumento da quantidade de fibras, uma vez que a mistura se torna mais rígida e menos trabalhável (ver propriedades no estado fresco – Tabela 4). A maior porosidade da zona interfacial da argamassa fibrosa, também relacionada a uma compactação ineficiente da mistura fresca, contribui para a

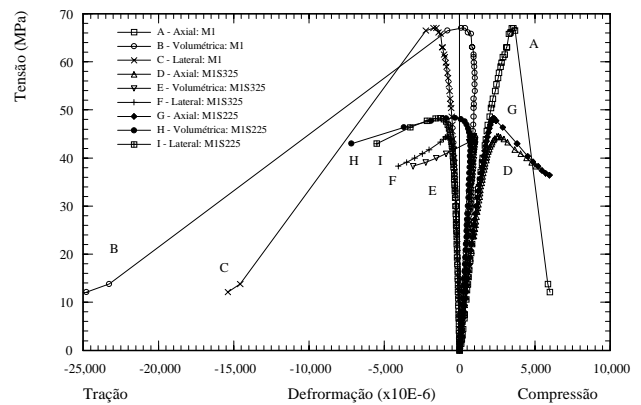


Figura 4. Relações tensão-deformação para as misturas M1, M1S225 e M1S325.

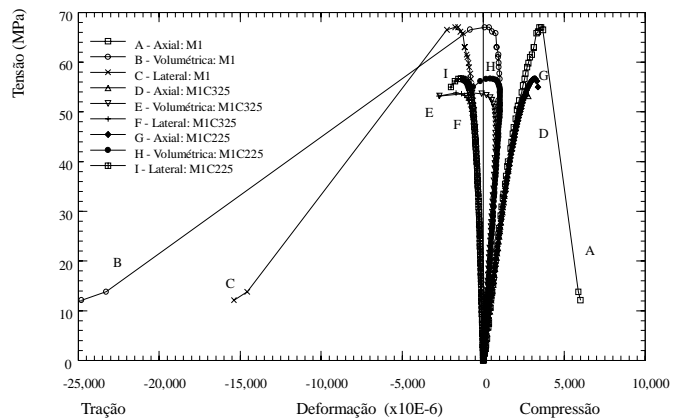


Figura 5. Relações tensão-deformação para as misturas M1, M1C225 e M1C325.

redução da resistência a compressão (Tolêdo Filho, 1997). Com relação ao **tipo de fibra**, pode-se observar que as misturas reforçadas com fibras de coco apresentaram comportamento ligeiramente superior sob carga de compressão. Esse comportamento pode ser atribuído à melhor trabalhabilidade dessas misturas no estado fresco (ver propriedades no estado fresco – Tabela 4). No que diz respeito ao **módulo de elasticidade**, os resultados mostram que a adição de fibras

de sisal às matrizes de argamassa reduziu os respectivos módulos de elasticidade, de 6,2% a 12,8%. Os compósitos reforçados com fibras de coco foram menos afetados e a redução no módulo de elasticidade variou de 1,3% a cerca de 5,2%. Com relação ao *coeficiente de Poisson*, pode-se observar, através da Tabela 5, que os valores médios não foram afetados de forma significativa em razão da presença das fibras de sisal ou coco na mistura.

A variação do coeficiente de Poisson com a relação tensão/resistência é apresentada na Figura 6a para as misturas M1, M2, M1S225, M1S325, M2S225, M1C225 e M1C325. Nessa Figura, observa-se que o coeficiente de Poisson permanece constante ( $\mu=0,23$ ) até aproximadamente  $0,9f'_c$  para todas as misturas. Além desse ponto, o coeficiente de Poisson começa a aumentar, alcançando um valor maior que 3 no pós-pico. Neste estágio está-se lidando, no entanto, com um coeficiente de Poisson aparente, uma vez que o corpo de prova não é mais um corpo contínuo.

A Figura 6b compara valores do coeficiente de Poisson das misturas M1, M1S225, M1S325, M1C225 e M1C325 em vários níveis de tensão. Os resultados mostram que a taxa de crescimento do coeficiente de Poisson até um nível de tensão/resistência de 0,9 é praticamente a mesma para todas as misturas. Essa taxa parece não ser afetada pela presença de fibras. Além do nível de tensão/resistência de 0,9, o qual corresponde ao ponto em que a deformação volumétrica pára de diminuir, o coeficiente de Poisson dos corpos de prova reforçados com fibras cresce numa taxa mais alta se comparado com o da matriz. Nesse estágio de tensões, uma propagação de fissuras rápida e instável está ocorrendo. O papel das fibras neste processo é mobilizar a aderência cisalhante friccional na interface fibra-matriz e, como resultado, maiores valores de deformações laterais e coeficiente de Poisson são observados nos corpos de prova reforçados; conseqüentemente, valores mais altos de energia de fratura pós-pico ocorrem para os compósitos de

argamassa reforçados com fibras, conforme evidenciado pela inclinação do ramo descendente das curvas tensão-deformação.

A influência das fibras de sisal e coco nos estágios do *processo de fratura* das matrizes de argamassa em compressão, foi estudada observando-se os valores da resistência à primeira fissura (FCS), tensão de iniciação da fissura (CIS), tensão crítica (CS), deformação na resistência à primeira fissura ( $\epsilon_{FCS}$ ), deformação na tensão de iniciação da fissura ( $\epsilon_{CIS}$ ), e deformação na tensão crítica ( $\epsilon_{CS}$ ) obtidos das curvas tensão-deformação. A Tabela 6 apresenta os valores médios e o coeficiente de variação desses parâmetros.

A Figura 7a mostra o efeito do tipo de fibra e fração volumétrica na *relação FCS/f'\_c* (pontos A e D na Figura 2). Os resultados mostram que essas relações foram maiores para as misturas reforçadas; por exemplo, os corpos de prova M1S325 e M1C325 apresentaram valores de FCS/f'\_c cerca de, respectivamente, 22,5% e 8,0% mais altos que aqueles observados para a matriz. A *relação  $\epsilon_{aFCS}/\epsilon_{apeak}$*  da mistura M1 também foi aumentada em razão da presença de fibras na mistura. Por exemplo, a matriz M1 teve a *relação  $\epsilon_{aFCS}/\epsilon_{apeak}$*  aumentada em, respectivamente, 23% e 15%, quando 3% de fibra de sisal e coco foram adicionadas à mistura. O aumento nos valores percentuais da resistência de primeira fissura pode ser explicado considerando-se que, em baixos níveis de tensão de compressão, como a resistência à primeira fissura, as tensões de tração e de cisalhamento impostas ao material durante o ensaio de compressão são baixas e a resistência de aderência desenvolvida entre a fibra e a matriz é adequada para deter o crescimento das fissuras de tração e de cisalhamento. Resultados similares foram obtidos por Mangat e Azari (1984) para o concreto reforçado com fibra de aço.

O efeito da adição de fibra na *relação tensão de iniciação de fissura/tensão de pico* (pontos B e D na Figura 2a) é apresentado na Figura 7b. Uma redução na *relação CIS/f'\_c* em

Tabela 6. Tensões e deformações na primeira fissura, iniciação da fissura e tensão crítica obtidas dos ensaios de compressão

Mistura	FCS - CV		CIS - CV		CS - CV		$\epsilon_{FCS}$ - CV		$(\epsilon_{CIS})$ - CV		$(\epsilon_{CS})$ - CV	
	(MPa)-(%)		(MPa)-(%)		(MPa)-(%)		$(x10^{-6})$ - (%)		$(x10^{-6})$ - (%)		$(x10^{-6})$ - (%)	
	Axial - Lateral		Axial - Lateral		Axial - Lateral		Axial - Lateral		Axial - Lateral		Axial - Lateral	
M1	27,9 - 2,1	39,9 - 2,2	65,1 - 9,4	992,1-5,2	232,9-4,9	1444,0-2,6	342,0-0,3	3000,0-0,8	870,0-12,5			
M2	19,7 - 3,0	26,0 - 7,5	43,0 - 0,9	763,6-3,9	158,3-4,7	1095,6-8,5	236,3-9,5	2268,3-2,4	1079,0-4,9			
M1S325	23,3 - 2,2	24,7 - 1,7	43,5 - 0,9	956,1-0,9	179,9-7,4	1013,0-2,8	206,0-3,2	2124,7-4,1	579,0-5,3			
M1S315	23,0 - 1,8	24,8 - 1,5	42,6 - 0,8	993,0- 0,8	202,4-5,5	1129,0- 3,3	284,0-2,7	2046,0- 3,3	593,0-5,2			
M1S225	25,1 - 1,4	26,4 - 1,5	44,6 - 6,9	925,3-3,4	215-2,8	975,0-3,3	227,0-2,6	1896,5-10,7	537,5-10			
M1C325	21,4 - 0,9	22,8 - 0,6	43,4 - 9,7	770,7-0,1	178,7-0,5	819,5-0,9	193,5-0,3	1806,0-11,3	537,5-13			
M1C225	22,9 - 4,9	26,9 - 1,1	49,3 - 0,5	727,7-8,9	189,9-3,5	936,0-9,9	229,5-1,5	1900,0-3,3	648,0-10,4			
M2S225	16,5 - 0,9	17,8 - 1,3	31,3 - 0,7	745,2-6,6	166,9-3,3	839,0-0,3	177,0-1,0	1947,0- 2,2	498,5-7			
Mslag1S225	25,1 - 1,5	26,6 - 0,4	44,8 - 4,3	1073,0-2,3	243,1-1,9	1151,7-2,1	260,0-0,0	2232,7-5,4	600,7-8,9			
Mms1S225	25,3 - 3,3	26,5 - 0,5	44,4 - 4,3	1060,4-5,1	232,2-2,0	1058,0-4,8	249,9-0,1	2185,0-5,2	590,0-8,7			
Mslag2S225	19,6 - 7,1	21,4 - 6,5	34,1 - 4,3	920,6-6,8	181,5-6,2	1083,0-7,4	207,2-5,9	1900,7-2,7	468,7-0,1			
Mms2C225	25,5 - 3,7	27,1 - 2,4	45,6 - 6,8	899,0-2,1	188,7-0,1	981,5-1,1	204,5-2,7	1910,0-6,8	458,0-9,3			

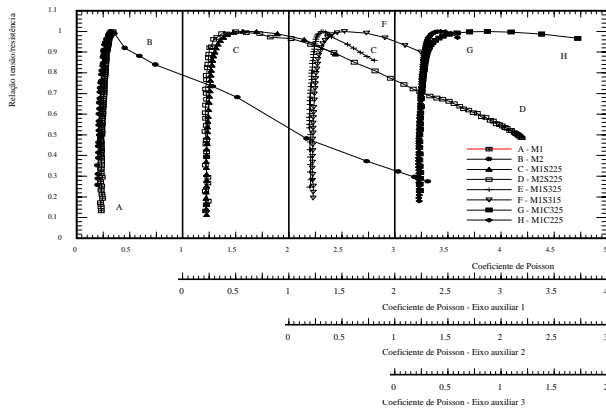


Figura 6a. Variação do coeficiente de Poisson com o acréscimo de tensão.

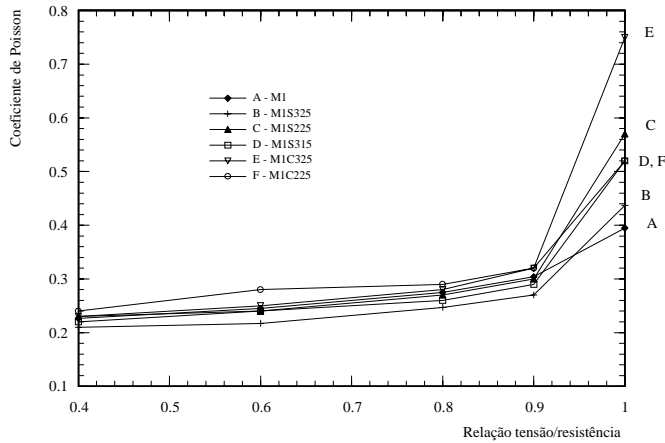


Figura 6b. Variação do coeficiente de Poisson com a relação tensão/resistência.

razão da adição de ambos os tipos de fibra pode ser observada; por exemplo, a relação  $CIS/f'_c$  da matriz é cerca de 10,0% e 20,0% mais alta que aquelas observadas para as misturas M1S325 e M1C325, respectivamente. Uma redução de cerca de, respectivamente, 10% e 16% na proporção  $\epsilon_{aCIS}/\epsilon_{apeak}$  também foi observada para as referidas misturas, em virtude da adição

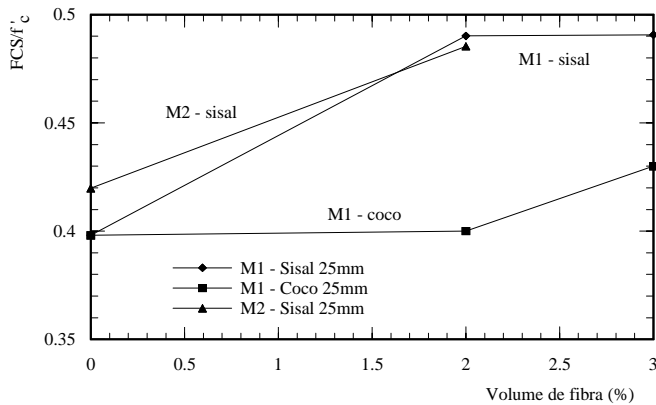


Figura 7a. Efeito do tipo de fibra e fração volumétrica nos valores percentuais da resistência à primeira fissura das misturas M1 e M2 em compressão uniaxial.

<sup>5</sup> Nas Figuras 7a e 7b as linhas ligando os resultados obtidos não querem dizer que existe uma variação linear das relações  $FCS/f'_c$ ,  $CIS/f'_c$  e  $CS/f'_c$  com o aumento da fração volumétrica. Os pontos foram ligados apenas para indicar a tendência dos resultados.

de 3% de fibras de sisal e coco à matriz.

Reduções similares nos valores relativos da tensão e deformação de iniciação foram registradas por Shah e Chandra (1968) e Kaplan (1963) em razão de um aumento na quantidade de areia na argamassa ou na quantidade de agregados graúdos no concreto simples. Mangat e Azari (1984) também encontraram efeitos similares no concreto reforçado com fibra de aço. De acordo com Shah e Chandra, a tensão de iniciação aumenta com relação à resistência a compressão porque um aumento na quantidade de agregados aumenta a inelasticidade da argamassa e do concreto. Mangat e Azari (1984) sugerem que a influência do reforço com fibra de aço no comportamento de fratura do concreto é similar ao efeito de um aumento na quantidade de agregados graúdos no concreto.

Gráficos da relação *tensão crítica/tensão de pico* (pontos C e D na Figura 2a) são apresentados na Figura 7c. Os resultados mostram que a relação da tensão crítica/resistência última da matriz M1 é reduzida em 7% quando 3% de fibras de sisal ou coco são incorporadas à matriz. Também pode ser visto, através dos dados da Tabela 6, que a adição de fibra reduziu a relação deformação axial na tensão crítica/deformação axial na tensão de pico de zero a cerca de 18%.

Reduções similares na tensão crítica e na deformação na

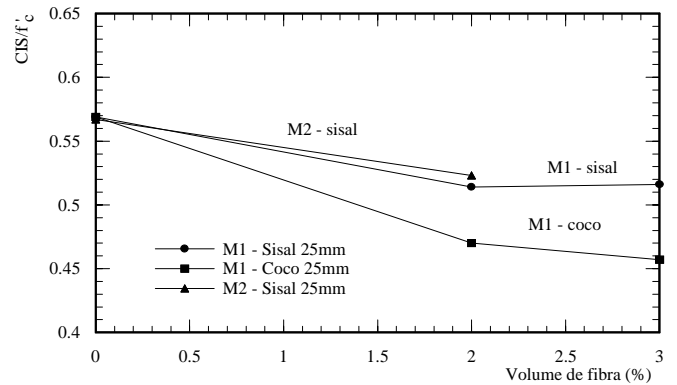


Figura 7b. Efeito da fração volumétrica e do tipo de fibra na relação tensão de iniciação de fissura/resistência para as misturas M1 e M2 em compressão uniaxial.

tensão crítica foram registradas por Shah e Chandra (1968) e Kaplan (1963) em razão de um aumento na quantidade de areia na argamassa (ou em razão de um aumento na quantidade de agregado graúdo no concreto simples). Mangat e Azari (1984), também observaram essas reduções para o concreto reforçado com fibra de aço. Eles sugerem que o volume inicialmente maior de micro-fissuras no concreto fibroso conduz a um emaranhado de fissuras relativamente maior em cada estágio do carregamento em compressão; conseqüentemente, os níveis de tensão nos quais a iniciação e a propagação das fissuras ocorrem, diminuem. Esta hipótese é reforçada pelos resultados apresentados na Tabela 6 e nas Figuras 7b e 7c, que mostram diminuição dos níveis da tensão de iniciação de fissura e da tensão crítica das argamassas com aumento na fração volumétrica das fibras naturais.

Com relação às *deformações na tensão de pico*, os resultados apresentados na Tabela 6 mostram redução na capacidade última de deformação axial da argamassa com a adição de fibras de sisal ou coco. Por exemplo, quando 2% de sisal foram adicionados às misturas M1 e M2, a deformação axial na tensão de ruptura das matrizes foi reduzida em 32,8% e

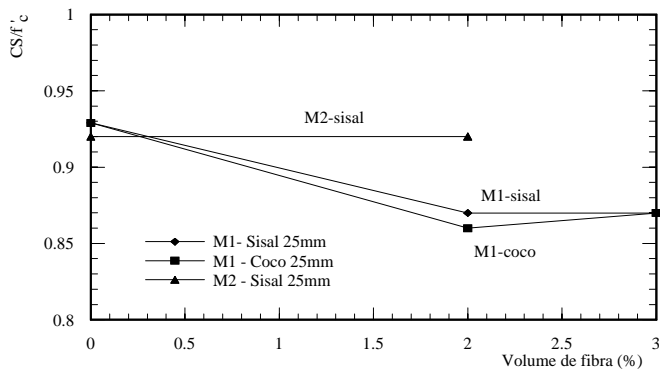


Figura 7c. Efeito do volume e tipo de fibra na relação tensão crítica/resistência a compressão das argamassas M1<sub>w</sub> e M2<sub>w</sub>.

16,6%, respectivamente. A deformação lateral na tensão de pico também foi afetada em razão da presença de fibras naturais na mistura. Para a mistura M1 a adição de fibras levou a uma redução que variou de 4,2% a 24,6%, enquanto a mistura M2 apresentou diminuição de cerca de 10%.

Um *ramo descendente* menos íngreme pode ser observado nas curvas tensão-deformação das misturas reforçadas com fibras de sisal e coco. Se for considerado que a inclinação das curvas tensão-deformação durante o amolecimento ("softening") é uma medida da *fragilidade* do material, conforme sugerido por Vonk (1993) a adição de fibras conduzirá a um material mais tenaz. O aumento da tenacidade se deve à maior resistência contra o crescimento da fissura. Observando-se as curvas tensão-deformação, pode-se ver que misturas com uma maior quantidade de fibras (3%) apresentaram um ramo descendente menos íngreme. Para evitar danos aos LVDT's, os ensaios foram concluídos para deformações verticais de cerca de 6000  $\mu\text{e}$ , apesar de nesse estágio os corpos de prova reforçados com fibras ainda apresentarem significativa resistência.

#### b) Influência do comprimento da fibra

A influência do comprimento da fibra na resistência a compressão da argamassa M1 foi estudada usando-se fibras de sisal com 15mm e 25mm de comprimento. Os resultados mostram que, à exceção do comportamento de pós-pico, as propriedades das misturas M1S325 e M1S325 foram praticamente as mesmas. A principal diferença ocorreu na zona pós-pico, uma vez que o ramo descendente da curva tensão-deformação para a mistura M1S325 apresentou inclinação menor que a da mistura M1S315, resultando em um material mais tenaz. Este fato indica que o comprimento de fibra de 25 mm foi mais efetivo na detenção do crescimento das fissuras de tração após a tensão de pico ter sido alcançada.

#### c) Influência do traço

Antes de se comparar como a adição de fibras de sisal modificou o comportamento tensão-deformação de ambas as matrizes, é conveniente que se proceda a uma comparação dos resultados obtidos para as argamassas M1 e M2.

Os resultados mostram que as matrizes apresentam diferença significativa em suas propriedades; por exemplo, a resistência a compressão, o módulo de elasticidade e as deformações axial e lateral na tensão de pico da mistura M1 foram reduzidos em, respectivamente, 49%, 12,5%, 27% e 40%,

quando a quantidade de areia na mistura foi aumentada. O coeficiente de Poisson, no entanto, não foi modificado de forma significativa. No que se refere aos estágios do processo de fratura, se a relação  $FCS/f'_c$  para a argamassa M2 for observada, pode-se notar que a mencionada relação será menor que para a mistura M1. Por outro lado, as relações  $CIS/f'_c$  e  $CS/f'_c$  são maiores para a mistura M1. Comparando-se essas tendências com as observadas quando as fibras foram adicionadas à matriz (ver subseção anterior) pode-se concluir que o aumento na quantidade de agregados e a adição de fibras à mistura têm efeito similar no comportamento de tensão-deformação do material até a tensão de pico. Conclusões semelhantes foram apresentadas por Mangat e Azari (1984) para o concreto reforçado com fibra de aço.

A influência da adição de fibras de sisal às matrizes M1 e M2 pode ser vista através da comparação dos resultados obtidos para as misturas M1S225 e M2S225. Os resultados mostram que as seguintes propriedades das matrizes foram afetadas de forma similar (embora nem sempre na mesma quantidade) pela adição de fibra: (i) redução da resistência a compressão de ambas as matrizes em cerca de 27%; (ii) redução do módulo de elasticidade das matrizes, em cerca de 7% para M1S225 e 14% para M2S225; (iii) nenhuma mudança significativa no coeficiente de Poisson das matrizes; (iv) mudanças similares nos estágios do processo de fratura (com exceção da relação CS/tensão de pico da mistura M2, que não foi afetada pela adição de fibras); (v) redução da deformação axial na tensão de pico, em cerca de 20% e 47% para as misturas M2S225 e M1S225, respectivamente; e (vi) decréscimo na inclinação do ramo descendente indicando aumento da tenacidade.

Uma propriedade que apresentou diferença significativa foi a deformação lateral na tensão de pico; enquanto a mistura M1S225 apresentou valor cerca de 7% menor que o observado para a matriz, a mistura M2S225 aumentou o valor observado para a matriz, em cerca de 22%.

#### Efeito da substituição parcial do cimento por micro-sílica e escória

A influência da substituição parcial do OPC por micro-sílica e escória no comportamento tensão-deformação das misturas M1S225 e M2S225 pode ser observada nos gráficos típicos apresentados nas Figuras 8 e 9. Os resultados mostram que a *resistência a compressão* das misturas com escória e micro-sílica é igual ou ligeiramente superior que a observada para as misturas com OPC; por exemplo, as misturas M1S225, M1msS225 e M1slagS225 apresentaram quase que a mesma resistência a compressão (diferença de cerca de 2%) enquanto a mistura M2slagS225 apresentou valor 10,9% mais alto que o observado, para a mistura M2S225. O melhor resultado, no entanto, foi obtido para a mistura M2msC225, que apresentou resistência a compressão 13,2% mais alta que a observada para a matriz. Este comportamento pode ser atribuído à habilidade da escória e da micro-sílica reagirem, em temperatura normal, com o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento Portland hidratada, formando silicato de cálcio hidratado e conduzindo a uma redução na porosidade da matriz e da zona interfacial dos compósitos.

A presença de escória e de micro-sílica nas misturas resultou tanto na redução quanto no aumento do *módulo de elasticidade*; por exemplo, a mistura M2msC225 apresentou

módulo de elasticidade 8,7% mais alto que o observado para a matriz, enquanto a mistura M2slagS225 aumentou o módulo da mistura M2S225 em 5,3%; no entanto, reduções de cerca de 15% no módulo de elasticidade da mistura M1S225 foram observadas em razão da substituição parcial do OPC. A substituição parcial do OPC por escória e micro-sílica modificou ligeiramente os valores do *coeficiente de Poisson* ( $\nu$  variou de 0,20 a 0,23 para essas misturas).

Com relação à influência da substituição parcial do OPC por escória e micro-sílica no valor da relação *resistência à primeira fissura/tensão de pico* da mistura M1, os resultados apresentados na Tabela 6 mostram que as misturas de argamassa mistas conduziram a relações  $FCS/f'_c$  mais altas que as observadas para as misturas com OPC; por exemplo, a presença de 2% de fibra de sisal aumentou a relação  $FCS/f'_c$  da matriz em 22,5%, em comparação com os aumentos de 23,0% e 26,5%, respectivamente, observados para as misturas reforçadas com 2% e preparadas com escória-cimento e micro-sílica-cimento. Os resultados também mostraram que a presença de escória e micro-sílica na mistura aumentou a relação  $\epsilon_{aFCS} / \epsilon_{a \text{ tensão de pico}}$  da matriz M1 em 38,5% e 50%, respectivamente. O aumento nessas

adição de 2% de sisal à matriz M1 reduziu o  $CIS/f'_c$  em cerca de 10,5% comparado com 9% e 7%, respectivamente, quando escória e micro-sílica também estavam presentes na mistura. Para a matriz M2 a adição de 2% de sisal reduziu esta relação em cerca de 9%, em comparação com uma desprezível diferença de 1,8% quando escória também estava na mistura. Os resultados indicam que a substituição parcial do OPC por escória e micro-sílica não modifica os valores da relação deformação axial na tensão de iniciação de fissura/deformação axial na tensão de pico para a mistura M1. Para a matriz M2 a adição de 2% de sisal reduziu essa proporção em cerca de 8,8%, enquanto a adição de 2% de sisal e escória aumentou esta proporção em 18,9%. Quando 2% de fibras de coco e micro-sílica estavam presentes na mistura, a relação diminuiu em cerca de 5,5%.

A *relação tensão crítica/tensão de pico* não foi significativamente afetada pela substituição do OPC. Os resultados da Tabela 6 mostram uma redução mínima nessa relação para as mistura M1S225 e M2S225 com a substituição do OPC; por exemplo, quando 2% de sisal e 40% de escória estão presentes na mistura, a proporção  $CS/\text{tensão de pico}$  é reduzida em cerca de 5,5%, enquanto a presença de 10% de micro-sílica conduziu a uma redução de 4%. Para a mistura M2, a presença de sisal e escória na mistura reduziu a relação tensão crítica/resistência última em cerca de 2,2%, enquanto a presença de fibra de coco e micro-sílica reduziu esta relação em 7,0%. Os resultados também mostraram que a adição de 2% de fibras de sisal reduziu a proporção  $\epsilon_{vCS} / \epsilon_{vpeak}$  da matriz M1 em cerca de 5%. A mesma tendência foi observada para a mistura com escória e 2% de sisal na mistura. Quando micro-sílica foi adicionada à mistura, esta relação não se modificou.

Com relação à *deformação na tensão de pico*, os resultados mostram que os corpos de prova M1msS225 e M1slagS225 apresentaram valores de deformação axial na tensão de pico ligeiramente superiores àqueles observados para a mistura M1S225, mas menores que os obtidos para a matriz. A deformação lateral da matriz também foi reduzida em razão da adição de fibra e micro-sílica e fibra e escória. A presença de escória e micro-sílica nas misturas não modificou o comportamento *pós-pico* observado para os compósitos preparados com OPC.

**Modo de ruptura**

Corpos de prova de argamassa e de argamassa reforçada com fibras de sisal e coco rompidos são apresentados nas Figuras 10a, 10b e 10c. Observando-se a Figura 10a, nota-se que a argamassa M1 apresentou fraturas em forma de cone e cisalhantes. Esse tipo de ruptura ocorreu subitamente, sem qualquer aviso prévio.

Uma fratura mista - cisalhante e vertical - pode ser observada na Figura 10b para a argamassa reforçada com fibra de sisal (M1S225). A Figura 10b apresenta cilindros rompidos da mistura M1C225. Eles indicam que o modo de propagação da fissura foi por tração vertical. Nota-se que o aumento na resistência cisalhante causado pela presença das fibras modificou o modo de ruptura da matriz. Os corpos de prova reforçados com fibras não romperam em vários pedaços depois que a carga máxima foi atingida.

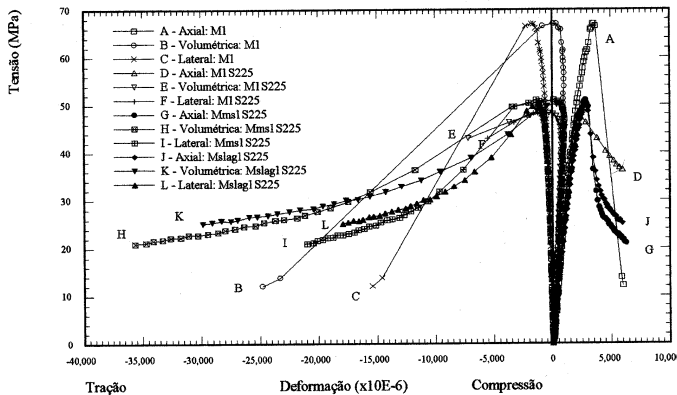


Figura 8. Influência da substituição de OPC por micro-sílica e escória no comportamento em compressão da matriz M1.

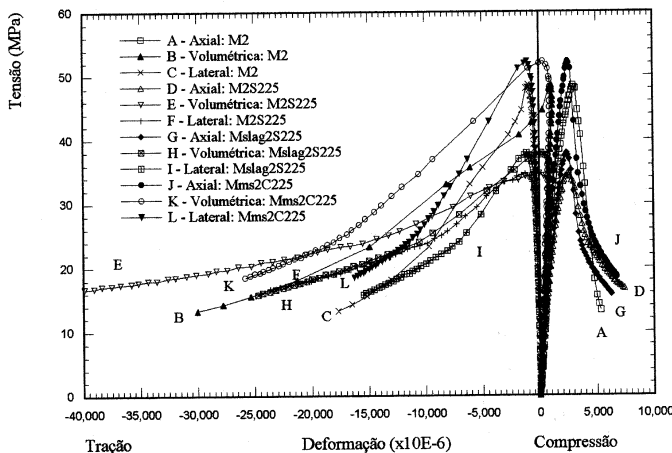


Figura 9. Influência da substituição parcial do OPC por micro-sílica e escória no comportamento em compressão da matriz M2.

relações pode estar relacionado com a maior finura dos cimentos mistos.

Com relação aos valores da relação *tensão de iniciação de fissura/tensão de pico*, os resultados mostram que misturas com escória e micro-sílica apresentaram menor redução na proporção  $CIS/f'_c$  que as misturas com OPC; por exemplo, a



Figura 10a. Corpos de prova típicos da matriz M1 após a ruptura.

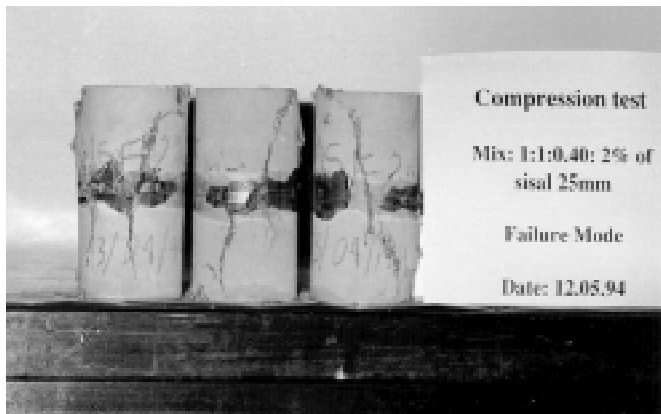


Figura 10b. Corpos de prova típicos da mistura M1S225 após a ruptura.



Figura 10c. Corpos de prova típicos da mistura M1C225 após a ruptura.

## CONCLUSÕES

Mostrou-se nesta investigação que:

1. A adição de fibras de sisal e coco às matrizes de argamassa de cimento reduz resistência à compressão da matriz de 18,4 a 32,0%.

2. O módulo de elasticidade da matriz é, em geral, ligeiramente reduzido com a adição de fibras naturais de sisal e coco à matriz. A redução do módulo de elasticidade nos compósitos reforçados com fibras de sisal variou de 6% a 15% enquanto nos com fibras de coco, a variação foi de 1,3% a 5%.

3. A capacidade de deformação longitudinal da argamassa na tensão de pico é reduzida de 15,2% a 32,9% quando fibras naturais são adicionadas à mistura.

4. A capacidade de deformação lateral da argamassa na

tensão máxima é reduzida em 4,2% a 24,9% em razão da adição de fibras de sisal e coco à mistura.

5. O coeficiente de Poisson da argamassa não é afetado de forma significativa pelas fibras de sisal e coco. Valores do coeficiente de Poisson variando de 0,20 a 0,23 foram observados para as matrizes e para os compósitos.

6. O reforço com fibras de sisal e coco conduz a um aumento na relação resistência à primeira fissura/resistência à compressão da argamassa. Por outro lado, a adição de fibras reduz as relações tensão de iniciação/resistência à compressão e tensão crítica/resistência à compressão. Esses resultados mostram alguma similaridade com o efeito da inclusão de agregados graúdos no concreto ou com o aumento na quantidade de areia na argamassa.

7. O ramo descendente da curva tensão-deformação da argamassa é modificado de forma significativa em razão da adição de fibras à mistura. Os compósitos apresentam um ramo descendente menos íngreme, o que resulta em uma maior ductilidade e tenacidade do material.

8. A adição de fibras de sisal e coco às matrizes de argamassa modifica o seu modo de ruptura. A matriz rompe subitamente em vários fragmentos sem qualquer advertência anterior, enquanto os compósitos de NFRM não se decompõem em vários pedaços após a ruptura.

9. A substituição parcial de OPC por escória e micro-sílica conduziu a misturas com uma resistência à compressão ligeiramente mais alta que a das preparadas com OPC. A presença de escória e micro-sílica nas misturas resultou tanto na redução quanto no aumento do módulo de elasticidade, enquanto o coeficiente de Poisson não foi modificado de forma significativa.

## AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos aos técnicos Ken Mitchell e Less Clark, do Laboratório de Estruturas de Concreto do Imperial College – Londres, pela assistência prestada durante a realização do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM: C 469 - 87a. **Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression**. Philadelphia: ASTM Annual Book, Vol, 04.02, 1987.
- BALAGURU, P. N. e SHAH, S. P. **Fiber-Reinforced Cement Composites**, New York.: McGraw-Hill, 1992, 530p.
- FANELLA, D. A. e NAAMAN, A. E. Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression", **ACI Journal**, USA, p. 475-483, Julho-Agosto, 1985.
- KAPLAN, M. F. Strains and Stresses of Concrete at Initiation of Cracking and near Failure. **Journal of ACI**, USA, v. 60, n. 44, p. 853-879, Junho, 1963.
- MANGAT, P. S. e AZARI, M. M. Influence of Steel Fibre Reinforcement on the Fracture Behaviour of Concrete in Compression. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 6, n. 4, p. 219-232, Novembro, 1984.
- SHAH, S. P. e CHANDRA, S. Critical Stress Volume Change and Micro-Cracking of Concrete, **Journal of the ACI**, v. 65, n. 57, p. 770-781, Setembro, 1968.
- SHAH, S. P. e RANGAN, B.V. Fiber Reinforced Concrete Properties", **ACI Journal**, v. 68, n. 2, p. 126-135, 1971.
- TOLEDO FILHO, R.D. **Materias Compósitos Reforçados com Fibras Naturais: Caracterização Experimental**. DEC-PUC-Rio/DEC-Imperial College-Londres, U.K. 1997, 472p. (Tese de Doutorado).
- VONK R,A, A Micromechanical Investigation of Softening of Concrete Loaded in Compression, **HERON**, v. 38, n. 3, 1993.